

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ**

№ 220

**Труды
Всероссийской астрометрической конференции
«ПУЛКОВО – 2012»**

Санкт-Петербург
2013

Редакционная коллегия:

Доктор физ.-мат. наук **А.В. Степанов** (ответственный редактор)

член-корреспондент РАН **В.К. Абалакин**
доктор физ.-мат. наук **А.Т. Байкова**
кандидат физ.-мат. наук **Т.П. Борисевич** (ответственный секретарь)
доктор физ.-мат. наук **Ю.Н. Гнедин**
кандидат физ.-мат. наук **А.В. Девяткин**
доктор физ.-мат. наук **Р.Н. Ихсанов**
доктор физ.-мат. наук **Ю.А. Наговицын**
доктор физ.-мат. наук **А.А. Соловьев**
доктор физ.-мат. наук **Е.В. Хруцкая**

Зав. редакцией **Е.Л. Терёхина**

Издание осуществлено с оригинала, подготовленного к печати
Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН

**ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ
№ 220
Труды Всероссийской астрометрической конференции
«Пулково – 2012»**

Утверждено к печати
Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН

Компьютерная верстка оригинал-макета Е.Л. Терёхиной

ISBN 978-5-9651-0699-8

© Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2013

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Секция 1

Наземная и космическая астрометрия

<i>Авраменко А.Е., Лосовский Б.Я.</i> Согласованность параметров вращения пульсаров на вековом масштабе	13
<i>Баканас Е.С., Барабанов С.И., Крючков С.В., Николенко И.В.</i> Результаты фотометрических наблюдений астероидов 141018 (2001 WC47) и 312473 (2008 SX245)	19
<i>Вараксина Н.Ю., Нефедьев Ю.А., Заббарова Р.Р., Кутленков М.В.</i> Анализ космических и наземных селенографических опорных сетей	23
<i>Горшанов Д.Л., Девяткин А.В., Верецагина И.А., Ромас Е.Н., Соков Е.Н., Слесаренко В.Ю., Зиновьев С.В., Иванов А.В., Куприянов В.В., Наумов К.Н., Карашевич С.В., Башакова Е.А., Петрова С.Н., Мартюшева А.А., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.</i> Наблюдения, открытия и исследования астероидов на автоматизированных телескопах ЗА-320М и МТМ-500М в ГАО РАН	29
<i>Гусева И.С., Ермаков Б.К., Лих Ю.С., Литвиненко Е.А., Гребецкая О.Н., Павловский С.Е.</i> Наблюдения искусственных спутников Земли в ГАО РАН	35
<i>Дементьева А.А.</i> Результаты астрометрических ПЗС-наблюдений Урана на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории за период 2006–2011 гг.	41
<i>Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Сергеев А.В., Чазов В.В.</i> Результаты фотометрических и позиционных наблюдений фрагментов космического мусора в обсерватории на пике Терскол	47
<i>Липовка Н.М., Липовка А.А.</i> Оптические отождествления радиоисточников с группой звезд в окрестности звезды HD87481	53
<i>Малкин З.М.</i> Об определении случайных ошибок каталогов координат радиоисточников	59
<i>Петрова С.Н., Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Верецагина И.А., Львов В.Н.</i> Астрометрические и фотометрические исследования астероидов (857) Glasenappia, (2323) Zverev, (3504) Kholshchevnikov	65
<i>Pushkarev A.B., Volvach A.E., Volvach L.N., Aller H.D., Aller M.F.</i> Synchrotron self-absorption and absolute astrometry of active galactic nuclei	71
<i>Рыльков В.П., Наружная Н.В.</i> Анализ собственных движений звезд в Плеядах по наблюдениям на нормальном астрографе	75

Рыльков В.П., Наружная Н.В. Каталог звезд 11–16 ^m по траектории Плутона 1930–1985 гг.	81
Рыхлова Л.В. Научные задачи в проблеме астероидно-кометной опасности	87
Чубей М.С., Курпьянов В.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Толчельникова С.А., Бахолдин А.В., Цуканова Г.И., Маркелов С.В. Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория: научное и прикладное значение проекта	93

Секция 2

Вращение Земли и геодинамика

Горшков В.Л., Смирнов С.С. Кинематика ГНСС-станций вокруг Финского залива	101
Горшков В.Л., Щербакова Н.В. Исследование случайных и систематических ошибок наблюдений сети GPS-станций на территории Пулковской обсерватории	105
Малкин З.М. Об оценивании точности прогноза параметров вращения Земли	111
Малкин З.М. О наблюдаемости свободной нутации внутреннего ядра Земли	115
Малкин З.М., Скурихина Е.А. Зависимость результатов оперативных определений UT1 на РСДБ-сети "Квазар" от используемой модели нутации	119
Миллер Н.О. Тонкая структура и параметры чандлеровского движения полюса	125
Миллер Н.О., Воротков М.В. Анализ остатков после выделения основных компонент движения полюса Земли	131
Пашкевич В.В. Построение долгосрочных численного и полуаналитического решений задачи о вращении Земли	137
Сидоренков Н.С. Природа амплитудной модуляции чандлеровского движения полюса	143
Тиссен В.М. Повышение точности описания неравномерностей вращения и движения северного полюса Земли и их прогноза за счет использования длительных рядов наблюдений и оптимизации математических моделей	149
Халявина Л.Я. Интерпретация смещений отвесной линии в меридиане Полтавы по данным астрометрических наблюдений	155

Секция 3

**Эфемеридная астрономия, кинематика и динамика
Солнечной системы и экзопланетных систем**

<i>Бережной А.А.</i> Уточнение параметров вращения HCRF относительно систем численных эфемерид по наблюдениям астероидов	163
<i>Бондаренко Ю.С.</i> HALLEY – электронные эфемериды	169
<i>Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Ясько П.П.</i> Уточнение положений Плутона по наблюдениям 2005–2011 гг.	173
<i>Вавилов Д.Е., Медведев Ю.Д.</i> Определение орбит небесных тел, сближающихся с Землей	179
<i>Василькова О.О., Львов В.Н., Смирнов С.С., Цекмейстер С.Д.</i> Объекты солнечной системы в резонансе 1:1	185
<i>Верещагина И.А., Соков Е.Н., Рощина Е.А., Горшанов Д.Л., Растегаев Д.А., Ба- лега Ю.Ю., Малоголовец Е.В., Дьяченко В.В., Максимов А.Ф.</i> Исследование системы двойного астероида 22 Kalliope	189
<i>Виноградова Т.А.</i> Вычисление собственных элементов и поиск семейств среди троянцев	195
<i>Галушина Т.Ю., Авдюшев В.А.</i> Исследование вероятностной орбитальной эволюции астероидов 2011 AG5 и 2007 VK184	201
<i>Глебова Н.И., Лукашова М.В., Нецветаева Г.А., Парийская Е.Ю., Свешни- ков М.Л., Скрипниченко В.И.</i> Эфемеридные программные системы для астрономических ежегодников	207
<i>Горшанов Д.Л., Архаров А.А., Ларионов В.М., Ефимова Н.В.</i> Наблюдения астероидов в инфракрасном диапазоне (JHK) на телескопе АЗТ-24 Пулковской обсерватории	213
<i>Гусева И.С., Лих Ю.С.</i> Статистический анализ орбит комет	219
<i>Емельяненко Н.Ю.</i> Классификация сближений малых тел с планетами по планетоцентрической ско- рости и глобальному минимуму	225
<i>Емельяненко Н.Ю.</i> Поиск области орбит малых тел с особенностями в сближениях с планетами	231
<i>Ершов В.Н.</i> Динамика системы трех тел с цветными полями	237
<i>Киселева Т.П., Чантурия С.М., Васильева Т.А., Калиниченко О.А.</i> Результаты астрометрических наблюдений спутников планет в Абастуманской астрофизической обсерватории в 1983–1994 гг.	243

Космодамианский Г.А., Порошина А.Л., Замарашкина М.Д. Эфемериды главных спутников планет в приложении к Астрономическому ежегоднику	249
Кочетова О.М., Кузнецов В.Б., Медведев Ю.Д., Шор В.А. Каталог элементов орбит нумерованных астероидов ИПА РАН	255
Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Движение астероидов с учетом эффекта Ярковского	259
Мельников А.В. О возможности существования странных аттракторов во вращательной динамике малых спутников планет	265
Мышев А.В. Фрактальная динамика малых тел и критерии связанности траекторий	269
Мышев А.В., Талалаев И.В. Теория фрактальных размерностей в информационных технологиях обработки и анализа больших потоков данных астрономических наблюдений	275
Павлов Д.А., Скрипниченко В.И., Фишков А.А. Система ЭРА: текущее состояние и перспективы развития	281
Петров Н.А., Васильев А.А. Нахождение и исследование свойств траекторий возможных столкновений астероида Апофис с Землей	287
Питьев Н.П., Питьева Е.В. Ограничивающие оценки для темной материи в Солнечной системе	293
Питьева Е.В. Высокоточные планетные эфемериды ИПА РАН «ЕРМ» (их модель, точность, параметры) — основа для астронавигации и научных исследований	299
Порошина А.Л., Космодамианский Г.А. Построение численных теорий движения основных спутников планет в системе ЭРА	305
Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. ПЗС-наблюдения спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове	311
Рыльков В.П. Плутон – все положения, полученные в Пулково за 1930–1996 г.	317
Смирнов С.С. Новые семейства астероидов (522) Helga и (1390) Abastumani	323
Соков Е.Н., Верецагина И.А., Девяткин А.В., Гнедин Ю. Н., Мартюшева А.А., Петрова С.Н. Наблюдения, поиск и исследование внесолнечных планеты	329
Тимошкова Е.И. Особенности движения некоторых потенциально опасных астероидов	335

Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М.

Массы ряда двойных астероидов, полученные динамическим методом 341

Шор В.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А.

Орбита астероида (99942) Апофис с учетом наблюдений, выполненных в 2012 г., и прогноз его тесных сближений с Землей после 2036 года 347

Секция 4

Звездная астрономия, кинематика и динамика Галактики

Дёмин С.А., Панищев О.Ю., Нефедьев Ю.А.

Релаксационные особенности рентгеновской активности микроквazarов 355

Дремова Г.Н.

Прогнозирование приливной эволюции ТДС 361

Захожай В.А., Бабенко М.А.

Новая версия каталога ближайших звезд и субзвезд 367

Иванов Г.А.

Каталог звезд с большими собственными движениями (версия 3.0) 373

Измайлов И.С., Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю.

Тригонометрические параллаксы 88 звезд с большими собственными движениями 377

Киселев А.А., Кияева О.В., Романенко Л.Г., Калиниченко О.А., Васильева Т.А., Василькова О.О.

Пулковские наблюдения «забытых» двойных и кратных звезд на 26-дюймовом рефракторе 383

Кияева О.В., Жучков Р.Я., Малооголовец Е.В., Орлов В.В.

Четверная система ADS 9626 389

Куликова А.М., Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бережной А.А.

Новые собственные движения быстрых звезд 395

Малкин З.М.

Некоторые результаты статистического анализа определений галактоцентрического расстояния Солнца 401

Малков О.Ю.

Орбитальные двойные: эффекты селекции и распределения по параметрам 407

Мартынов М.В., Майгурова Н.В., Пинигин Г.И.

Поиск $\Delta\mu$ -бинагу систем в площадках Аксиального меридианного круга Николаевской обсерватории 413

Мельников А.В., Орлов В.В., Шевченко И.И.

Динамика тройных звездных систем в окрестности резонанса 2:1 417

Муминов М.М., Каххаров Б.Б.

Массовый поиск переменных звезд в избранных рассеянных скоплениях 423

Никифоров И.И., Агладзе Е.В.

Исследование осевой зоны избегания в системе шаровых скоплений Галактики 429

Панищев О.Ю., Дёмин С.А., Тимашев С.Ф., Нефедьев Ю.А. Корреляционные взаимосвязи радиоизлучения квазаров	435
Романенко Л.Г., Киселев А.А. Орбиты четырех визуально-двойных звезд Пулковской программы, полученные по короткой дуге	441
Рыльков В.П. О влиянии вращения Галактики на получение положений внегалактических объектов	447
Шахт Н.А., Афанасьева А.А., Киселев А.А., Василькова О.О., Горшанов Д.Л. Исследование движения и оценки масс близких звезд – кандидатов для космических наблюдений	453

Секция 5

Новые методы и техника астрометрии и геодинамики

Гусева И.С. Особенности обработки наблюдений при большом поле зрения инструмента	461
Захожай В.А. Геометрический метод определения расстояния до космических объектов, использующий галактоцентрическую протяженность солнечного движения	467
Малков О.Ю. Виртуальная обсерватория для звездной астрономии	473
Нефедьев Ю.А., Шерстюков О.Н., Кащеев Р.А., Гусев А.В., Сасюк В.В., Загреддинов Р.В. Создание центра космических исследований и технологий на базе Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта	479
Тимашев С.Ф., Поляков Ю.С. Флуктуационная метрология в решении астрометрических задач	485

Секция 6

Обработка, хранение и распространение астрономических данных

Ермаков Б.К., Гусева И.С. О фотометрических данных каталога UCAC	495
Иванов Г., Пакуляк Л., Шатохина С., Ижакевич Е., Казанцева Л., Андрук В. Цифровой архив УкрВО: первые результаты обработки пластинок с телами Солнечной системы	501
Малкин З.М. Каталог оптических характеристик астрометрических радиоисточников OCARS	507
Малкин З.М. О вычислении ошибки среднего взвешенного	511
Муминов М.М., Каххаров Б.Б., Йулдошев К.Х., Андрук В.Н., Головня В.В. Астрометрия тестовых пластинок, оцифрованных сканером Epson Expression 10000XL в Астрономическом институте АН РУз	517

Нароенков С.А., Шеляков М.А., Галушина Т.Ю.

Система сбора и оперативной обработки координатной информации для малых тел Солнечной системы 523

Passarge M.

Forms and ways to promote astronomical knowledge and their didactic orientation 529

Полякова Г.Д.

Цвета родительских галактик ранних типов сверхновых с гравитационным коллапсом 535

Рыльков В.П., Нарижная Н.В., Дементьева А.А., Пинигин Г.И., Майгурова Н.В.

Каталог 231043 звезд для позиционных наблюдений внегалактических радиосточников 541

Хруцкая Е.В., Бережной А.А., Калинин С.И.

Архив фотографических пластинок Пулковской обсерватории, их оцифровка, новая астрометрическая редукция, анализ ошибок 547

**Секция 7
История астрономии**

Абалакин В.К., Пинигин Г.И., Эраль С.Ф.

Многолетнее плодотворное сотрудничество астрономических династий Струве и Кнорре 555

Глебова Н.И., Питьева Е.В., Свешников М.Л.

Планетные эфемериды ИТА и ИПА и их использование в астрономическом ежегоднике и его дополнениях 563

Железнов Н.Б.

История открытия Цереры 569

Левитская Т.И.

Эволюция биосферы в ноосферу в трудах В.И. Вернадского 575

Малкин З.М., Прудникова Е.Я., Соболева Т.В., Миллер Н.О.

Пулковские широтницы Л.Д. Костина и Н.Р. Персиянинова 581

Московченко Н.Я.

К истории портретов И. Кеплера и Н. Коперника из собрания Пулковской обсерватории 589

Пинигин Г.И., Пожалова Ж.А.

Николаевская обсерватория в первой половине XX века 595

Прудникова Е.Я., Соболева Т.В., Малкин З.М.

Памяти Ивана Федотовича Корбута 601

Толбин С.В., Попов А.А.

История службы времени Пулковской обсерватории по материалам отчетов её директоров 607

Хруцкая Е.В.	
К 110-летию со дня рождения Митрофана Степановича Зверева	613
Список авторов	619

Секция 1

**НАЗЕМНАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ
АСТРОМЕТРИЯ**

СОГЛАСОВАННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ НА ВЕКОВОМ МАСШТАБЕ

Авраменко А.Е., Лосовский Б.Я.

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН, г. Пушчино Московской обл., Россия

В работе исследованы устойчивые закономерности вращения пульсаров по наблюдательным данным хронометрирования секундных пульсаров. Методом моделирования интервалов периодического излучения определены соотношения параметров вращения, инвариантные в координатных системах, и численные величины периода вращения и производных, тождественные на вековом масштабе. Показано, что излучение пульсаров обладает свойством временной и пространственной когерентности, а замедление вращения вследствие потерь энергии на излучение согласуется с численными величинами периода вращения и производных по критерию торможения пульсара как излучающего магнитного диполя.

1. Введение

Пульсары, отождествляемые с нейтронными звездами, обладают огромным магнитным полем, индукция которого на поверхности составляет около 10^8 Тл для секундных и около 10^4 Тл для миллисекундных пульсаров, могут рассматриваться как магнитные диполи, вращающиеся с угловой частотой $\Omega = 2\pi/P$. При массе, сопоставимой с массой Солнца, радиус нейтронной звезды составляет всего около 10 км, и миллисекундные пульсары вращаются с угловыми скоростями, близкими к своему физическому пределу. Устойчивая периодичность излучаемых радиоимпульсов может быть связана только с вращением нейтронных звезд [1].

Временные ряды наблюдаемых событий излучения нейтронных звезд обычно сравнивают с высокоточными атомными эталонами времени, используя статистические оценки (дисперсия Аллана, Z-статистика) остаточных уклонений – разности наблюдаемых и расчетных моментов прихода импульсов (МПИ) в барицентр Солнечной системы. Однако наблюдаемые вариации остаточных уклонений, которые у миллисекундных пульсаров на 2-3 порядка, а у секундных пульсаров на 5-6 порядков больше случайных вариаций атомных эталонов, принципиально ограничивают возможность точного определения закономерности вращения нейтронных звезд и сопоставления рядов наблюдаемых событий излучения с атомными эталонами. В частности, как показано в [2], остаточные уклонения нельзя интерпретировать как разницу между пульсарным и высокоточным атомным временем, поскольку численные значения параметров вращения, взятые для расчета остаточных уклонений по данным ретроспективных наблюдений, известны лишь приблизительно. Остаточные уклонения в статистической модели не связаны напрямую с параметрами вращения пульсара, которые, и только они, определяют стабильность периодического излучения нейтронной звезды.

По этим причинам в основу модели временных рядов наблюдаемых событий была положена аналитическая модель интервалов наблюдаемых событий, которые определяются наблюдаемыми параметрами вращения пульсара. Численные значения наблюдаемых параметров находятся в виде решения уравнений, которое удовлетворяет условию наилучшего приближения исходных величин наблюдаемых интервалов, и рассчитываются по найденным значениям наблюдаемых параметров вращения.

В этой статье на основе аналитической модели интервалов событий излучения пульсара [3] определены численные соотношения параметров вращения – периода и его производных, тождественных в координатных системах в пределах всей протяженности наблюдений. Показана согласованность численных величин периода и его произ-

водных, обнаруживающая свойство временной и пространственной когерентности периодического излучения пульсаров. Наблюдаемые события привязаны к фазе когерентного излучения с относительной погрешностью в пределах 10^{-18} - 10^{-19} на 40-летнем масштабе. Показатель торможения согласуется с соотношениями классической электродинамики для излучающего магнитного диполя с учетом потерь энергии на излучение. Вековое замедление вращения пульсара не нарушает когерентности излучения.

2. Модель интервалов излучения пульсара

Модель базируется на сопоставлении результатов хронометрирования пульсаров в метрике общей теории относительности (ОТО) и специальной теории относительности (СТО). Моменты наблюдаемых событий излучения пульсара исчисляются в метрике ОТО с помощью эфемерид, полученных численным интегрированием релятивистских уравнений движения небесных тел в релятивистских шкалах барицентрического времени. Для обработки были взяты данные наблюдений пульсаров B0329+54, B0809+74, B0834+06, J1509+5531, B1919+21, B2217+47, которые проводились в 2006-2009 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. На рис. 1 в качестве примера приведены данные наблюдений секундного пульсара B1919+21 (период около 1,34 с), представленные в виде разности моментов наблюдаемых событий МПИТ и МПИВ в топоцентрической и барицентрической системах, отсчитываемых от начала текущих суток на дату наблюдения MJD (на рисунке *слева*), и интервалов ТТ и ТВ тех же событий, отсчитываемых от события на начальную эпоху наблюдений (на рисунке *справа*).

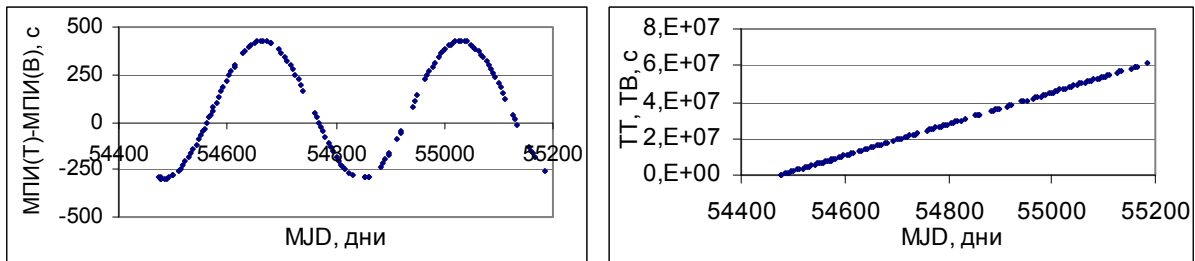


Рис. 1. Разность моментов (*слева*) и интервалы событий (*справа*) PSR B1919+21 в координатных системах

Поскольку в метрике ОТО интервалы ТТ, ТВ выражены в виде численных величин по моментам наблюдаемых событий МПИТ, МПИВ, в которых не отражена в явном виде периодичность событий излучения, то, следовательно, параметры вращения, которые определяют стабильность процесса излучения пульсара, не могут быть учтены.

Для того чтобы интервалы, исходно полученные в метрике ОТО, связать с наблюдаемыми параметрами вращения пульсара, определим эти интервалы в метрике СТО, представив их в координатных системах в виде уравнений, которые содержат параметры вращения в явном виде:

$$TT_i = (1 + \alpha_i)(P^* N_T + 0,5P^* \dot{P} N_T^2)_i, \quad (1)$$

$$TV_i = (1 + \alpha_i)(P^* N_B + 0,5P^* \dot{P} N_B^2)_i, \quad (2)$$

где P^* , \dot{P} – значение периода вращения пульсара и его производной на эпоху начального наблюдаемого события; $(1 + \alpha_i)$ – множитель, учитывающий относительную величину вариаций наблюдаемого периода вращения пульсара в промежутке от начального до текущего наблюдаемого события; $i = 0, 1, 2, \dots$ – порядковый номер сеанса на-

блюдения выбранного события; N_T, N_B – полное число событий излучения в промежутке наблюдений, рассчитанное по среднему периоду в этом промежутке.

Уравнения (1) и (2), описывающие физический процесс периодического излучения пульсара в виде временного ряда интервалов событий, определяемых параметрами вращения, отвечают условиям инвариантности интервалов 4-мерного пространства-времени относительно координатных преобразований. Отсюда следует одновременность (единое время) физических событий, наблюдаемых по световому или радио сигналу при одинаковых условиях, для всех точек трехмерного пространства в данной системе отсчета [4].

Как было показано в [5], метрические свойства СТО применительно к наблюдаемому процессу периодического излучения пульсара выражаются, во-первых, в тождественности численных величин наблюдаемого периода вращения в любой выбранной системе отсчета на совпадающие эпохи наблюдений; во-вторых, в тождественности интервалов, ограниченных одними и теми же наблюдаемыми событиями; и, наконец, в-третьих, в тождественности единичного интервала физического эталона времени для всех систем отсчета. Тогда, подставив в левые части уравнений (1) и (2) значения интервалов наблюдаемых событий T_T и T_B , выраженные в метрике ОТО и решая уравнения (1) и (2) методом линейных приближений по критерию МНК, находим численные значения наблюдаемого периода вращения $P^* = 1,33730279821909$ с на эпоху 54477.39095 и производной $\dot{P} = 1,34809 \cdot 10^{-15}$ с \cdot с $^{-1}$ в пределах промежутка, ограниченного выбранной начальной эпохой и текущей эпохой наблюдаемого события.

Важно отметить, что найденные численные величины периода и производной не только тождественны в координатных системах на совпадающие эпохи, но они же являются и единственным решением, которые, и только они, удовлетворяют условиям инвариантности уравнений (1) и (2) относительно координатных преобразований.

В результате решения уравнений (1) и (2), кроме параметров вращения пульсара, определяется также численная величина α_i , представляющая собой отклонение наблюдаемого периода и соответственно интервалов, обусловленное внешними факторами, не связанными с вращением пульсара. К таким факторам относятся, в частности, расхождения шкал времени, погрешности вычисления эфемерид.

3. Сопоставление наблюдаемых параметров вращения пульсаров

Моделированием интервалов событий излучения в соответствии с уравнениями (1) и (2) были определены параметры вращения секундных пульсаров В0329+54, В0809+74, В0834+06, J1509+5531, В1919+21, В2217+47 по наблюдениям на радиотелескопе БСА ФИАН. Наблюдаемые параметры вращения сопоставлялись с ретроспективными данными для этих пульсаров, содержащимися в наиболее распространенных каталогах [6] и [7]. Для этого численная величина периода вращения, которая указана в каталоге вместе с производной на некоторую фиксированную эпоху прошлого, пересчитывалась с учетом производной к начальной эпохе наблюдений, по которым были определены параметры вращения. Полученные значения сравнивались. Выбирая достаточно большие промежутки между эпохами, можно определить стабильность параметров вращения пульсаров на вековых масштабах, вплоть до всей исторической протяженности наблюдений после их открытия.

Приведенные к начальному наблюдаемому событию значения периода P будем определять из соотношения:

$$P = P_K + \dot{P}(MJD_0 - MJD_K) \cdot 86400, \text{ с} \quad (3)$$

где MJD_0 – эпоха начального наблюдаемого события, выраженная в долях текущих суток (дробная часть) на дату наблюдения (целая часть), MJD_K – эпоха, на которую определен период P_K по каталогу.

Результаты пересчета периода пульсара B1919+21 в соответствии с формулой (3), принимая во внимание $P_K = 1,337301192269$, $\dot{P} = 1,34809 \cdot 10^{-15} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$ на эпоху 40689.45 [6]: $P = 1,337301192269 + 1,34809 \cdot 10^{-15} (54477,39095 - 40689,45) \cdot 86400 = 1,33730279821909 \text{ с}$. Отсюда следует, что пересчитанные значения периода вращения пульсара B1919+21 из эпохи почти 40-летней давности (13.04.1970 г.) на эпоху наблюдений 54477.39095 эквивалентны, с учетом эпохи, параметрам вращения, полученным из уравнений (1) и (2) по наблюдениям на БСА ФИАН в 2006-2008гг.

Таким образом, сопоставлением параметров вращения текущих и ретроспективных наблюдений обнаруживается свойство когерентности импульсного излучения пульсаров, фаза которого на выбранную эпоху в любой координатной системе полностью определена стабильными параметрами вращения пульсара. Интервалы когерентного излучения выражаются:

$$PT_{\text{ког}i} = (P^* N + 0,5P^* \dot{P}N^2)_i \quad (4)$$

Отклонение интервалов вследствие вариаций наблюдаемого периода, которые определяются линейным приближением интервалов по критерию МНК из уравнений (1), (2):

$$\Delta PT_i = PT_i - PT_{\text{ког}i} = \alpha_i (P^* N + 0,5P^* \dot{P}N^2)_i \quad (5)$$

На рис.2 показаны относительные вариации наблюдаемого периода α_i и вычисленные по ним в соответствии с выражением (5) отклонения интервалов. Как следует из приведенных графиков, вариации наблюдаемого периода находятся в диапазоне $\pm 1 \cdot 10^{-15}$, а среднеквадратическая величина отклонений интервалов в абсолютном выражении составляет около 14 нс в пределах двухлетнего промежутка наблюдений.

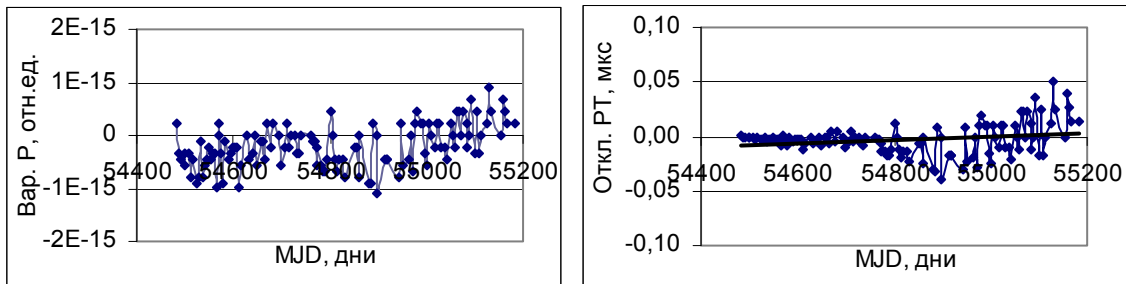


Рис. 2. Вариации наблюдаемого периода (слева) и отклонение интервалов (справа) PSR B1919+21.

Благодаря свойству когерентности излучения пульсара точность определения периода вращения по уравнениям (1), (2) повышается на 2-3 порядка по сравнению с приводимыми в каталогах данными, а интервалы периодического излучения пульсара, вычисляемые по наблюдаемым параметрам вращения, определяются с субнаносекундным разрешением. Относительная погрешность интервалов находится в пределах 10^{-18} - 10^{-19} на 40-летнем промежутке наблюдений. Для сравнения, это на 2-3 порядка превосходит достижимую стабильность современных квантовых эталонов времени.

Наблюдаемый период и производная на вековом масштабе согласованы точно так же и в барицентрической системе, с той лишь разницей, что, в отличие от топоцентрической системы, эпоха начального наблюдаемого события в расчете соотношении (3) для PSR B1919+21 смещена, с учетом разницы координатного времени, на величину

– 295,358528 с, как это следует из графика на рис.1 (слева). В результате согласованное значение периода в барицентрической системе составляет $P_{TB}^* = 1,33730279821869$ с на эпоху $MJD_0(TB) = 54477.3875$ при том же значении производной $\dot{P} = 1,34809 \cdot 10^{-15} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$.

По наблюдениям пульсара B0834+06 в промежутке $MJD 54103-54830$ (03.01.2007-30.12.2008гг.) были определены период вращения $P^* = 1,27377145381349$ с и производная $\dot{P} = 6,79918 \cdot 10^{-15} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$ на эпоху $MJD 54103.96609$. Наблюдаемый период отвечает условию согласованности по критерию когерентности с его величиной $P_k = 1,27376417152$ с и производной, приведенными в каталоге [6] на эпоху $MJD 41707.5$. На рис.3 (слева) показаны отклонения интервалов, вычисленные по соотношению (5). Отклонения, в отличие от PSR B1919+21 на рис.2 (справа), имеют выраженный тренд, величина которого составляет около 1,2 мкс на двухлетнем промежутке.

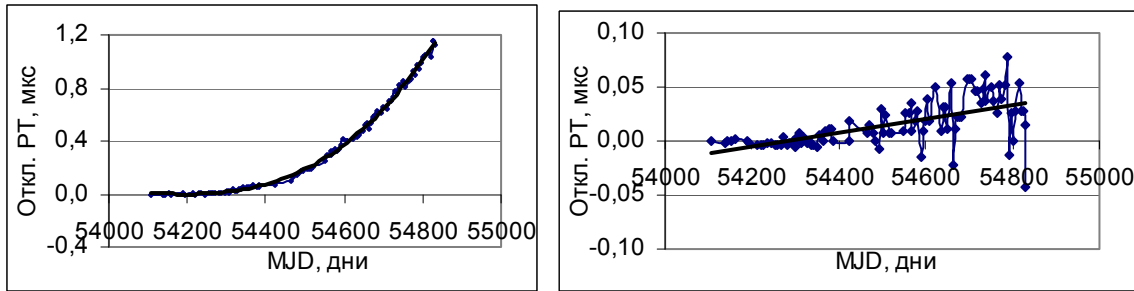


Рис. 3. Отклонения интервалов PSR B0834+06, обнаруживающие вторую производную периода (слева), и они же с учетом второй производной (справа).

Характер тренда, который аппроксимируется полиномом 3-го порядка, свидетельствует об обнаружении второй производной периода вращения \ddot{P} , которая не учтена в модели интервалов (1), (2), имеет постоянную величину и связана с \dot{P} соотношением:

$$\dot{P} = \dot{P}_0 + \ddot{P} \cdot PT, \quad (6)$$

где \dot{P}_0 – значение первой производной на эпоху начального наблюдаемого события, PT – промежуток между начальным и текущим наблюдаемыми событиями.

После подстановки выражения (6) в модель (1), (2) получаем выражение интервалов в форме общего вида (4), (5), с учетом второй производной:

$$PT_i = (1 + \alpha_i) (P^* N + 0,5 P^* \dot{P}_0 N^2 + 0,5 P^* \ddot{P} \cdot PT \cdot N^2); \quad (7)$$

Линейным приближением интервалов к параметрическому виду (7) при известных величинах P^* , \dot{P} определяем значение второй производной периода $\ddot{P} = 1,1615 \cdot 10^{-29} \text{ с}^{-1}$ для PSR B0834+06, соответствующее наблюдаемому тренду в отклонениях интервалов. На графике рис.3 (справа) показаны отклонения интервалов с учетом второй производной. Среднеквадратическое значение отклонений составляет 21,7 нс – оно того же порядка, что и у PSR B1919+21 на рис. 2 (справа). Численная величина второй производной постоянна на всей протяженности наблюдений и, как следует из соотношения (7) с учетом (6), все три наблюдаемых параметра вращения PSR B0834+06 согласованы по критерию когерентности.

Постепенное замедление вращения пульсаров, обусловленное потерями энергии на излучение, оценивается величиной показателя торможения n , который, согласно модели пульсара как излучающего магнитного диполя, определяется:

$$n = 2 - P\ddot{P} / \dot{P}^2. \quad (8)$$

Величина показателя торможения, согласно [8], находится в пределах $1 < n < 3$. В приведенных здесь примерах, в соответствии с соотношением (8), $n=1,68$ для пульсара B0834+06, а для PSR B1919+21, который на двухлетнем промежутке наблюдений не обнаруживает значимой второй производной, $n = 2$.

Результаты наблюдений подтверждают, что параметры вращения, согласованные по критерию когерентности, согласованы также и по критерию торможения у всех наблюдаемых секундных пульсаров. Следует только отметить, что у пульсара B0809+74, так же как и у B1919+21, значимой второй производной не обнаружено, а у PSR J1509+55, B2217+47 и B0329+54, как и у B1919+21, обнаружены и определены значения второй производной.

4. Заключение

Моделированием интервалов событий излучения пульсаров показана устойчивая закономерность вращения пульсаров, не обнаруживаемая статистическими методами анализа остаточных уклонений. Предложенные аналитические модели интервалов, обладающие свойством инвариантности в координатных системах, обнаруживают свойство когерентности периодического излучения, согласующееся с постепенным замедлением вращения пульсаров вследствие потерь энергии на излучение. Относительная погрешность интервалов, связываемых с наблюдаемыми параметрами вращения пульсара, не превышает 10^{-18} - 10^{-19} на 40-летнем промежутке наблюдений, что на 2-3 порядка превосходит стабильность современных квантовых эталонов времени.

Таким образом, пульсары действительно обладают непревзойденными по точности и долговременной стабильности метрическими характеристиками природных эталонов времени на практически неограниченной протяженности наблюдений в любой точке галактического пространства.

Литература

1. *P. Манчестер, Дж. Тейлор.* Пульсары. М., Мир, 1980.
2. G. Petit, P. Tavella. Pulsars and Time Scales. *Astron. Astrophys.*, **308**. 1996. 290-298.
3. *A.E. Avramenko.* The Observed Rotation Period as an Identifier of the Pulsar Time Properties. In "Pulsars: Theory, Categories and Applications", New York, Nova Publishers, 2010, 61-72.
4. *A.A. Логунов.* Анри Пуанкаре и теория относительности. М., Наука, 2004, 22-67.
5. *A.E. Авраменко.* Форминвариантность метрики координатного пульсарного времени. *Измерительная техника*. 2009, № 5, 40-45.
6. *J.H. Taylor, R.N. Manchester and A.G. Lyne.* Catalog of 558 Pulsars. *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* **88**. 1993. 529-568.
7. *G.B. Hobbs and R.N. Manchester.* The ATNF Pulsar Catalogue V1.43. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>
8. *A.G. Lyne & F. Graham-Smith.* Pulsar Astronomy. Cambridge Astrophys. Ser., Cambridge University Press, 2006, 59-62.

A LONG TIME SCALE CONSISTENCY OF THE OBSERVED ROTATION PARAMETERS OF PULSARS

Avramenko A.E., Losovsky B.Ya.

Pushchino Radio Astronomy Observatory of Lebedev Physical Institute of RAS, Russia

In the work, the stable patterns of pulsar rotation on the observational timing data of second pulsars are developed. By simulation of periodic radiation intervals, the relations of the rotation parameters, which are invariant in the coordinate systems, and numerical values of rotation period and derivatives, which are identical on the secular scale, are determined. It is shown that the radiation of pulsars has the property of time and spatial coherence, and spin-down value due to energy loss by radiation is matched with numerical values of rotation period and derivatives in accordance with criteria of braking index of a pulsar as emitting magnetic dipole.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ 141018 (2001 WC47) И 312473 (2008 SX245)

Баканас Е.С.¹, Барабанов С.И.¹, Крючков С.В.¹, Николенко И.В.²

¹ИНАСАН

²КраО

В ИНАСАН, который занимается изучением семейств астероидов с 2010 г. поставлена и последовательно выполняется задача разработки методических основ определения физических характеристик малых тел и выполнения высокоточных фотометрических, поляриметрических и спектрометрических измерений отраженного астероидом света и определения из этих наблюдений наиболее полного набора свойств астероида или кометоида, таких как, абсолютная звездная величина, размер, альbedo в разных участках спектра, спектральный (таксономический) тип, периоды собственного вращения. В данной статье описаны фотометрические наблюдения, проведенных нами в апреле 2012 г. на 1-м телескопе НИИ КраО на г. Кошка астероидов 141018 (2001 WC47) и 312473 (2008 SX245), сближающихся с орбитой Земли и получение их физических характеристик.

1. Наблюдения

С 28 апреля по 9 мая 2012 г. на 1-м телескопе НИИ КраО на г. Кошка на штатном фотометре, оснащенный широкополосными фильтрами системы Джонсона-Коузенса, были выполнены фотометрические наблюдения двух астероидов, сближающихся с орбитой Земли 141018 (2001 C47) и 312473 (2008 SX245). Орбитальные характеристики этих астероидов приведены в табл. 1. Позиционные данные и первичная обработка для фотометрических исследований всех полученных кадров были сделаны при помощи программного комплекса АПЕКС II [1] (позиционные данные отправлены в Центр Малых планет, [2]).

Таблица 1. Элементы орбиты астероидов 141018 и 312473 [3].
Эпоха 2456200.5 (2012 09 30.0).

Элементы орбиты	141018 (2001 WC47)	312473 (2008 SX245)
Большая полуось, a , а.е.	$1.39947156 \pm 9.4e-09$	$1.99308030729 \pm 5.8e-08$
Эксцентриситет, e	$0.241709514 \pm 3.9e-09$	$0.4580046 \pm 5.7e-08$
Наклонение к эклиптике, i , градусы	$2.8683201 \pm 1.3e-06$	$11.82278386 \pm 1.1e-05$
Восходящий узел, Ω , градусы	$91.679602 \pm 3.3e-05$	$209.0666087 \pm 1.9e-05$
Долгота перигелия, ω , градусы	$101.305899 \pm 2.9e-05$	$292.871072599 \pm 2.9e-05$
Средняя аномалия, M , градусы	$105.0983733 \pm 2.4e-06$	$83.8106965233 \pm 8.7e-06$
Период, лет	$1.66 \pm 6.941e-09$	$2.81 \pm 1.2e-07$
Дата прохождения перигелия, t_p	2012 04 06.46206705	2012 02 03.73313 2.9e-05

Была проведена дифференциальная фотометрия в квазиодновременном режиме в четырех фильтрах B, V, R, I . После привязки полей к фотометрическим стандартам каталога Ландольта [4] с учетом атмосферных поглощений выполнялся переход к абсолютной фотометрии, с учетом известных для данного наблюдательного оборудования коэффициентов перехода к стандартной фотометрической системе Джонсона-Коузенса [5]. На рис. 1 показаны фотометрические кривые, полученные для данных астероидов, после перехода к абсолютным звездным величинам и определения периода при помощи частотного анализа (ведено приведение к одной фазе). Абсолютная звездная величина определялась с учетом гелио и геоцентрических расстояний объектов и угла фазы,

которые вычислялись при помощи программного комплекса ЭПОС [6] (показаны в таблице 2).

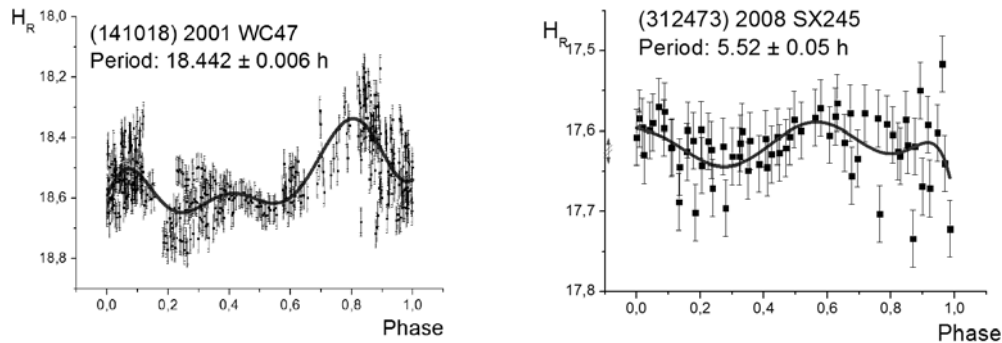


Рис. 1. Кривые блеска астероидов в фильтре R. Слева – для астероида 141018 (2001 WC47), справа – астероида 312473 (2008 SX245).

Таблица 2. Условия наблюдений астероидов.

Астероид, дата наблюдений	Геоцентрическое расстояние, а.е.	Гелиоцентрическое расстояние, а.е.	Фазовый угол, градусы
141018, 1 мая 2012	0,10556	1.081158	43,9
3 мая 2012	0.10725	1.084387	42.8
4 мая 2012	0.10822	1.086103	42.2
9 мая 2012	0.11410	1.095214	39.5
312473, 28 апреля 2012	0.40281	1.40561	7.06
29 апреля 2012	0.40918	1.411167	7.80
30 апреля 2012	0.41658	1.417501	8.6

После аппроксимирования кривой блеска и получения и периода (Рис. 1) можно вычислить средние значения блеска по периоду в разных фильтрах. Результаты этих вычислений приведены в табл. 3-4. Для астероида 141018 нами было выявлено значение периода, немного отличающееся от полученного в работе [7] ($P=16,747\pm 0.006$), возможно сказывается влияние разности фазового угла.

Таблица 3. Абсолютные звездные величины в различных фильтрах.

Астероид	H_B , mag	H_V , mag	H_R , mag	H_I , mag
141018 (2001WC47)	19.97 ± 0.2	18.68 ± 0.15	18.45 ± 0.08	18.54 ± 0.15
312473 (2008 SX245)	18.11 ± 0.2	$17,61 \pm 0.12$	17.62 ± 0.06	16.98 ± 0.15

Таблица 4. Показатели цвета для астероидов.

Астероид	B-V, mag	V-R, mag	R-I, mag
141018 (2001WC47)	1.29 ± 0.15	0.23 ± 0.08	18.45 ± 0.08
312473 (2008 SX245)	0.5 ± 0.15	$17,61 \pm 0.12$	17.62 ± 0.06

Используя полученные значения абсолютных звездных величин в фильтрах, можно оценить интегральные по полосе пропускания фильтра спектральные характеристики астероида, путем сравнения с модельными спектрами астероидов различных классов, полученными Толленом и др. [8]. Анализируя соответствие полученных отсчетов модельным спектра (см. рис. 4), мы делаем вывод, что астероид 141018 (2001 C47) вероятно имеет таксономический класс В или F (подклассы класса С – гидратированные

силикаты, углистые хондриты), а астероид 312473 (2008 SX245) – S или Q (S – пироксен, оливин, металл; Q – обыкновенные хондриты).

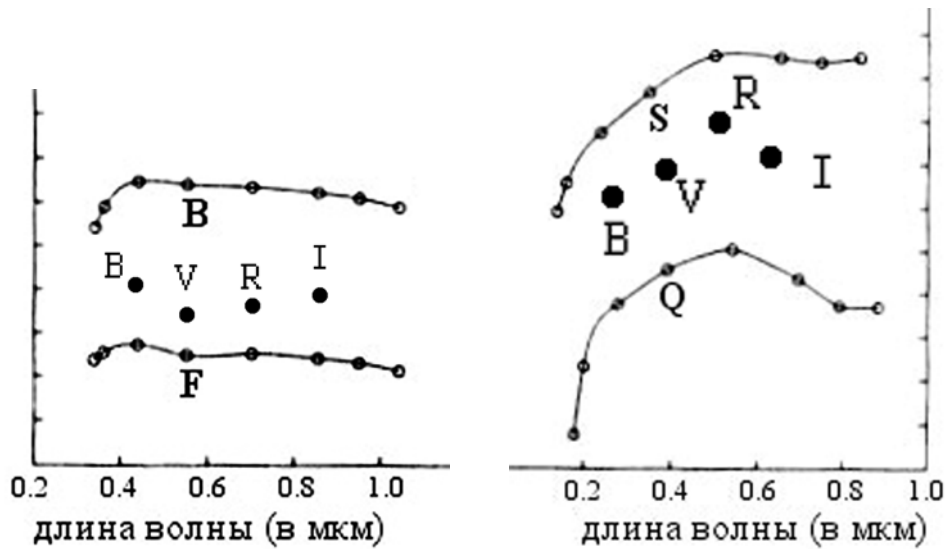


Рис. 2. Соответствие полученных отсчетов для астероидов усредненным отражательным спектрам астероидов 141018 (слева) и 312473 (справа) (для классов B, F, S и Q).

В работе [9] Бусарев В.В. указывал, что имея средние значения блеска в фильтрах B, V, R можно построить и решить систему уравнений, связывающую диаметр, альbedo и абсолютные звездные величины, используя в качестве уравнения связи то обстоятельство, что спектр, охватывающий диапазон длин волн, соответствующих данным фильтрам ведет себя примерно линейным образом от длины волны, а значит цветовые альbedo в фильтрах B, V, R будут связаны линейной зависимостью. Данная система имеет решение, если в нестрогое равенство внести некую поправку, характеризующего отклонение от нелинейности: $p_v = 0.5 \cdot (p_r + p_b) + \Delta$, где p_v , p_r , p_b – альbedo в фильтрах V, R, B. Значение поправки Δ может быть задано априорно путем анализа известных из литературы данных об астероидах. Для получения значения поправки данные об астероидах должны содержать значения блеска или цветовые индексы для полос B, V, R. Так как в настоящее время альbedo и показатели цвета B-V и V-R (одновременно) известны лишь для небольшого числа астероидов и эти астероиды, в основном, принадлежат к таксономическому классу S. Не исключено, что эта поправка будет зависеть от определения таксономического класса. Из анализа имеющихся данных для AC3 [10], мы предполагаем эту поправку равной 0.05. Тогда, в нашем случае, получаем значения альbedo в фильтре V для астероида 141018 (2001 WC47) $p_v = 0.06 \pm 0.02$ и вычисляем соответствующее значение диаметра $D = 1.1 \pm 0.1$ км. Этот астероид включен в список возможных кандидатов для посещения космическими аппаратами [3] и полученный нами его размер и период вращения вокруг оси свидетельствует о том, что это хороший выбор. Для астероида 312473 (2008 SX245) было вычислено значение альbedo $p_v = 0.11 \pm 0.02$ и $D = 1.2 \pm 0.1$ км. Стоит отметить, что полученные значения альbedo соответствуют определенным нами таксономическим классам для этих астероидов.

Заключение

В 2012 г. нами были проведены фотометрические и спектральные наблюдения 10 астероидов и одной кометы, сближающихся с Землей. Предложенные в данной статье подходы к анализу наблюдательных данных будут в дальнейшем использованы для получения оценок физических параметров всех пронаблюденных объектов. Учитывая, что

количество астероидов, которые имеют такие оценки, мизерное по отношению к общему количеству уже известных астероидов и кометоидов, сближающихся с орбитой Земли, мы можем смело утверждать, что планомерные наблюдения, выполняемые в ИНАСАН совместно с НИИ КраО и другими российскими и ближнем зарубежными партнерами, дают значительный вклад в копилку знаний о природе объектов, сближающихся с орбитой Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы" и гранта РФФИ № 2-02-90444-Укр_а.

Литература

1. *Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верецагина И.А.* "Программные пакеты "Апекс I" и "Апекс II" для обработки астрономических ПЗС-наблюдений" // Астрон. вестник 2009, т.43, №6, с.1-14.
2. MPS 425944
3. <http://ssd.jpl.nasa.gov>
4. *Moffett, T.J.; Barnes, T.G.*, III Equatorial UBVRI photoelectric sequences // *Astronomical Journal*, vol. 84, May 1979, p. 627-632.
5. *Баканас Е.С., Барабанов С.И.* "Результаты фотометрических наблюдений астероида 68348" // Вестник «СибГАУ», Выпуск 6 (39). Ред. О.А. Ковалёв И.В. и О.А. Плехова. Красноярск. 2011. РИО СибГАУ, 2011. С. 186-190.
6. *L'vov, V.N.; Tsekmeister, S.D.* "The use of the EPOS software package for research of the solar system objects" // *Solar System Research*, Volume 46, Issue 2, pp.177-179
7. *Warner D.* "Asteroid Lightcurve Analysis at the Palmer Divide Observatoty: 2011 December – 2012 March" // *The Minor Planet Bulletin* v.39, № 3, A.D. 2012 Julu-September
8. *Tholen D.J. and Barucci M.A.* 1989 "Asteroid Taxonomy" // *Asteroids II* / Eds. R.P. Binzel, T. Gerels, M.S. Matthews. Univ. of Ariz, 1989. P.298-315.
9. *Бусарев В. В.* (2011) Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, Германия, 250 с.
10. http://earn.dlr.de/nea/table1_new.html

THE RESULTS OF PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF THE ASTEROIDS 141018 (2001 WC47) AND 312473 (2008 SX245)

Bakanas E.S.¹, Barabanov S.I.¹, Kryuchkov S.V.¹, Nikolenko I.V.²
¹INASAN
²KrAO

In INASAN task of developing methodical base of physical characteristics definition and carrying out high-accuracy photometric, polarimetric and spectroscopic measurements was undertaken and is been desided from 2010. Moreover definiton task of full set properties asteroids and cometoids (colour albedo, absolute magnitude, size, taxonomic type, rotation periods) is decided. In this report the methods of obtaining physical properties in the base carried out by us photometric observations of two NEA (141018 (2001 WC47) и 312473 (2008 SX245)) in 1-m telescope of KrAO on mt. Koshka are described.

АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ СЕЛЕНОГРАФИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ СЕТЕЙ

Вараксина Н.Ю., Нефедьев Ю.А., Заббарова Р.Р., Кутленков М.В.

*Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, Казанский федеральный университет,
г. Казань, Россия*

*В работе выполнен анализ систем координат селенографических каталогов и космических миссий. На основе использования программного пакета *ASNI USTU* построены модели макрорельефа Луны с использованием метода разложения по сферическим функциям. Такие модели достаточно точно описывают глобальные особенности лунной фигуры. Для построения этих моделей использовались следующие источники топографической информации: "*Clementine*" и "*Kaguya*" (*Selena, Japan mission*) миссии, "*KSC-1162*" (*Kazan selenocentric catalogue*), "*Kiev*" (*selenodesic catalogue*), "*SAI*" (*Chuikova (1975)*), "*Bills, Ferrari*", "*ULCN*" (*The Unified Lunar Control Network 2005*). Выполнено прямое сравнение гипсометрической информации каталога "*KSC-1162*" и миссии "*Clementine*". Эти исследования подтвердили неплохое согласие гипсометрической информации сравниваемых систем.*

1. Введение

В настоящее время все данные по лунной топографии можно разделить на два типа. С одной стороны, одни данные полученные на основе лазерного сканирования лунной поверхности с бортов спутников хорошо описывают лунный рельеф, но не дают значения координат опорных объектов на Луне. Другой тип данных дает точные координаты опорных объектов на основе наблюдений прямой привязки их к звездам, но не описывают с достаточной точностью лунный рельеф. Причем все эти системы имеют разные системы отсчета и ориентацию осей координат. Известно, что данные полученные во всех космических миссиях относятся к квазидинамической системе координат, в которой центром отсчета координат является центр масс Луны, но оси координат не совпадают с осями инерции Луны. Большинство современных селенодезических каталогов имеет также квазидинамическую систему координат. У них или центр отсчета координат не совпадает с центром масс Луны, или оси координат не совпадают с осями инерции Луны. Также важно отметить, что в настоящее время не существует опорной динамической селеноцентрической системы координат покрывающей достаточную площадь на лунной поверхности, основанную на основе космических наблюдений. Кроме того, несмотря на точность определения физического рельефа Луны космическими миссиями поверхность отсчета точек этого рельефа представляет собой абсолютно неопределенную фигуру. Поэтому во многих статьях, где описываются спутниковые топографические данные, большое внимание уделяется высокой точности полученного физического рельефа и умалчивается вопрос о его поверхности отсчета. Пока не существует фотограмметрического метода построения лунной спутниковой топографической карты на основе сведения тысячи разрозненных спутниковых снимков лунной поверхности в единую систему на абсолютной основе. Таким образом, нельзя говорить, что спутниковые топографические карты являются полноценными моделями, имеющими определенную поверхность отсчета топографических данных. Что касается каталога "*KSC-1162*" можно сказать, что метод построения данного каталога позволяет утверждать, что он построен в динамической системе координат, потому что объекты на лунной поверхности привязывались абсолютным методом к звездам.

С целью исследования достоверности топографических моделей, полученных на основе спутниковых и наземных наблюдений, возможно выполнить прямое сравнение

поверхностей лунного макрорельефа задаваемого спутниковой топографической картой и макрорельефов полученных из других источников.

При проведении данных исследований мы предполагаем, что для всех источников гипсометрической информации данные включенные в обработку равноточны. Это следует из того факта, что если в случае каталогов имеется высокая точность представленных координат объекта на поверхности Луны, но невысокая точность подробного описания окружающего рельефа, то при лазерном сканировании с бортов спутников мы имеем высокую точность отображения рельефа, но низкую точность привязки этого рельефа к какой либо селенографической системе координат (точнее неопределенную систему отсчета топографических данных).

2. Модель разложения функции лунного рельефа

В качестве модели, описывающей поведение рельефа на лунной сфере, используется разложение функции высоты в ряд по сферическим гармоникам [3] в виде модели регрессии [1]:

$$h(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (\overline{C}_{nm} \cos m\lambda + \overline{S}_{nm} \sin m\lambda) \cdot \overline{P}_{nm}(\cos \varphi) + \varepsilon \quad (1)$$

где φ, λ - (широта, долгота) известные координаты лунных объектов; $\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm}$ - нормированные амплитуды гармоник; \overline{P}_{nm} - нормированные присоединённые функции Лежандра; ε - случайная ошибка регрессии.

К сожалению, ряд (1) является медленно сходящимся. Например, для описания деталей рельефа Луны, необходим примерно порядок разложения $n=180$, что приводит к необходимости оценивания $(180+1)2$ коэффициентов (амплитуд) разложения.

3. Методы оценивания амплитуд гармоник

Решение переопределенной системы (1) для разных источников гипсометрической информации осуществлялось в рамках подхода регрессионного моделирования [1]. Это предусматривает кроме обычных этапов использование ряда статистик качества, в том числе, внешних мер:

- диагностику соблюдения основных условий метода наименьших квадратов (МНК),

- адаптацию при их нарушении. В качестве вычислительных схем МНК используются схемы Гаусса-Жордана и Хаусхолдера.

Основными нарушениями условий применения МНК к обработке (1) является наличие [1]:

- избыточных (шумовых) гармоник, приводящих к понижению точности прогнозирования как отдельных высот, так и изогипсов;

- коррелирующих друг с другом амплитуд гармоник при применении (1) к описанию рельефа на сегменте сферы или при сильной неоднородности распределения объектов. В этом случае цифровую модель (набор МНК-оценок амплитуд) следует считать некорректной.

С помощью пошаговой регрессии можно адаптироваться к двум указанным нарушениям с использованием известной процедуры регрессионного анализа [1]. Она будет достаточно эффективной для оценивания параметров модели (1), если будут выполняться следующие условия:

- а) объекты распределены по всей сфере, пусть и неоднородно;
- б) порядок разложения, определяемый количеством точек, должен быть относительно небольшим (n меньше 15); иначе время расчетов будет резко возрастать. При

однородном распределении объектов по всей сфере достаточно устранить статистически незначимые гармоники и выполнить расчеты повторно.

В ранних работах для описания рельефа на видимой стороне Луны использовалось «зеркальное» отображение её объектов на обратную сторону, что, естественно, неприемлемо для описания рельефа отдельных сегментов, меньших по площади полушария.

В работе [2] предложен способ оценивания амплитуд модели (1) путем предварительного расширения сегмента до полной сферы, что позволяет полностью устранить эффект мультиколлинеарности. После чего шумовые гармоники удаляются пошаговой регрессией.

4. Информационные технологии обработки данных

Для получения разложений (1) по сферическим гармоникам с целью формирования цифровой модели и определения в последующем искомым оценкам ЦФ относительно ЦМ использовалась АСНИ «СФЕРА» - автоматизированная система научных исследований [1, 2].

АСНИ «СФЕРА» предназначена для описания распределения различных характеристик (рельефа, гравитационного, магнитного и другого типа потенциальных полей) на сфере и ее участках по их значениям, измеряемым в точках с известными координатами.

С помощью программного комплекса можно формировать модели вида (1), осуществлять прогнозирование в виде сечений, изолиний, тоновом и трехмерном представлении распределения значений характеристик.

Формирование моделей (1) сопровождается оценкой их качества и диагностикой соблюдения условий МНК. При их нарушении применяются соответствующие методы адаптации.

Пакет АСНИ «СФЕРА» в режиме «расщепления» может быть применен для моделей больших порядков при параллельной обработке данных.

При описании потенциальных полей (аномалий силы тяжести, магнитного поля, характеристик почвы и т.д.) на участках сферы аналогом пакета АСНИ является известный пакет SURFER.

Благодаря использованию разложений по сферическим функциям с расширением до полной сферы в АСНИ «Сфера» и другим описанным выше свойствам при использовании данного комплекса для анализа участков лунной поверхности позволяет обеспечить повышение точности описания и прогнозирования от 40% и выше по сравнению с SURFER.

5. Прямое сравнение гипсометрических данных каталога "KSC-1162" с данными координатной системы миссии "Clementine"

С целью анализа поверхностей отчета селенографических данных нами было выполнено прямое сравнение гипсометрической информации, задаваемой независимой селеноцентрической системой координат «КСК-1162» и системой координат формируемой совокупностью высот, полученным в рамках миссии "Клементина".

Идея и математическое обеспечение для сравнения этих источников гипсометрических данных заключались в следующем.

Гипсометрические сечения рельефа Луны можно построить, используя разложения функции (1) высоты h в ряд по сферическим функциям. Их анализ позволяет сделать прямое заключение о степени близости гипсометрической информации, задаваемой каталогом КСК-1162, и моделью рельефа миссии «Clementine». С этой целью была

построена модель 40-го порядка разложения, достаточно точно описывающая глобальные особенности лунной фигуры.

Оценки параметров разложения находились из решения переопределенной системы 72548 линейных уравнений по вычислительной схеме МНК - схемы Гаусса-Жордана. Соответствующие внутренние критерии определялись одновременно с гармоническими коэффициентами, характеризующими точность оценивания и статистическую значимость отдельных коэффициентов и всей модели в целом. Процедура пошаговой регрессии (метод включения с исключением) при уровне значимости $\alpha=0.05$ использовалась для формирования оптимальной структуры модели по t-критерию

Было установлено, что значения коэффициентов разложения по сферическим функциям рельефа видимой стороны Луны сорокового порядка ($N=40$) практически совпадают для соответствующих гармоник при $N=70$. Это подтверждает корректность основных расчетов.

Проверка соблюдения предположений регрессионного анализа - метода наименьших квадратов (РА-МНК) привела к следующим заключениям: модель содержит около 30% статистически незначимых слагаемых; парные коэффициенты корреляции $r_{ij}<0.3$; это свидетельствует о практической ортогональности разложения; анализ остатков разложения позволяет сделать вывод что существует некоторое нарушение условий нормальности; критерий Дарбина-Уотсона равен 0.58, что означает наличие автокорреляции первого порядка.

На основе математических моделей при пятом порядке разложения и соответствующего графического модуля были получены сечения по меридианам лунной сферы по обе стороны от экватора с шагом 1^0 по широте.

Анализ сечений «Клементины», «КСК - 1162» и «Киев» дал следующие результаты:

1. Сравнение пяти гипсометрических кривых сечений моделей поверхности, определяемых данными «Клементина» и каталога «Казань - 1162», показывает их неплохое согласие.

2. Рельеф модели макрофигуры каталога «Казань - 1162» не дает ни заметных понижений, ни заметных повышений относительно данных космической миссии «Клементина».

3. Сравнение гипсометрических кривых данных «Клементины» и каталога "Киев" с «Казань - 1162» также подтверждает ранее сделанные выводы о понижении среднего уровня рельефа в северном полушарии Луны.

6. Заключение

Результаты прямого сравнения гипсометрических данных миссии «Clementine» с данными каталога «КСК-1162» показали неплохое согласие. Это касается как глобального понижения рельефа в северном полушарии, так и поведения рельефа в целом. Такое согласие подтверждает достоверность поверхности отсчета гипсометрических данных у сравниваемых систем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-97000 р_поволжье_a.

Литература

1. *Валеев С.Г.* Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. - М.: Наука. Гл. Редакция физ.-мат. лит., 1991, 272 с. (2-ое доп. издание: Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке данных. Казань: ФЭН. - 2001. - 296 с.).
2. *Валеев С.Г., Самохвалов К.М.* Международная конференция «Околоземная астрономия – 2005», 19-24 сентября 2005. Казань, 2006, С. 373-375.
3. *Сагитов М.У.* Лунная гравиметрия. - М.: Наука, Гл. Редакция физ.-мат. лит., 1979, 432 с.

ANALYSIS OF SPACE AND GROUND SELRNOGRAPHIC REFERENCE NET

Varaksina N.Y., Nefedyev Y.A., Zabbarova R.R., Kutlenkov M.V.

Engelhardt Astronomical Observatory, Kazan, Russia

The analysis of coordinate systems of selenographic catalogs and data cosmic mission was carried out. Using a software package ASNI USTU the models macrorelief Moon using the expansion in spherical harmonics were made. Such models fairly accurately describe global features of the lunar figure. To construct these models, the following sources of topographic information were used: "Clementine" and "Kaguya" (Selena, Japan mission) mission, "KSC-1162" (Kazan selenocentric catalogue), "Kiev" (selenodesic catalogue), "SAI" (Chuikova (1975)), "Bills, Ferrari", "ULCN" (The Unified Lunar Control Network 2005). The direct comparison of hypsometric information of the catalogue "KSC-1162" and the data mission of "Clementine" was carried out. This comparison showed the good agreement of the hypsometric information.

НАБЛЮДЕНИЯ, ОТКРЫТИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДОВ НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕЛЕСКОПАХ ЗА-320М И МТМ-500М В ГАО РАН

**Горшанов Д.Л., Девяткин А.В., Верещагина И.А., Ромас Е.Н., Соков Е.Н.,
Слесаренко В.Ю., Зиновьев С.В., Иванов А.В., Куприянов В.В., Наумов К.Н.,
Карашевич С.В., Башакова Е.А., Петрова С.Н., Мартюшева А.А.,
Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.**

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской Академии наук

Представлены результаты исследований некоторых астероидов на основе наблюдений на двух телескопах Пулковской обсерватории. Были открыты 4 астероида и 4 ранее «потерянных» астероида были переоткрыты. По наблюдениям потенциально опасного астероида 2005 YU55 был уточнён период его осевого вращения, определены показатели цвета и сделана оценка спектрального класса, а также проведено моделирование эволюции его орбиты во время тесных сближений с планетами. Для астероида 2012 BS67 получены астрометрические положения, позволившие подтвердить его открытие. Для астероида 2012 GQ42 определены показатели цвета, по которым сделана оценка спектрального класса, и получены астрометрические положения, по которым улучшена орбита.

Введение

Лаборатория наблюдательной астрометрии и Сектор эфемеридной астрономии ГАО РАН, в числе прочих задач, занимаются изучением астероидов с 1997 г. Основой для изучения являются астрометрические и фотометрические наблюдения на двух оптических телескопах, а также небесно-механические расчёты, включающие вычисление эфемерид, анализ точности результатов наблюдений, определение и улучшение орбит астероидов на основе позиционных измерений. Кроме того, ведутся базы данных по астероидам и кометам. На основе фотометрии производится определение и уточнение физических свойств астероидов.

Телескоп ЗА-320М (рефлектор системы Кассегрена, $D = 320$ мм, $F = 3200$ мм) установлен в Пулковской обсерватории [1]. Телескоп МТМ-500М (рефлектор системы Максутова с дополнительным линзовым корректором, $D = 500$ мм, $F = 4100$ мм) расположен на Северном Кавказе близ Кисловодска на Горной астрономической станции ГАО на высоте 2100 метров над уровнем моря [2]. Оба телескопа автоматизированы и оснащены ПЗС-камерами с одинаковыми ПЗС-матрицами (1024×1024 пикселей размером 24×24 мкм) и набором широкополосных фильтров *BVRI*. Поле зрения ЗА-320М с данным приёмником излучения — $\approx 28' \times 28'$, МТМ-500М — $\approx 21' \times 21'$.

Для обработки ПЗС-наблюдений используется программный пакет АПЕКС-II, разработанный в Пулковской обсерватории. Он позволяет производить полную и всестороннюю обработку ПЗС-кадров от калибровки до вывода позиционных и фотометрических результатов в заданном формате [3].

Для расчётов движения тел Солнечной системы применяется пакет программ (ПП) ЭПОС, также созданный в Пулковской обсерватории. Он позволяет решать ряд задач, в том числе — статистические исследования малых тел Солнечной системы, вычисление эфемерид, контроль точности наблюдений, определение и улучшение орбит, визуализация видимого движения объектов на небесной сфере и движения в пространстве и пр. [4].

Для объектов, сближающихся с Землёй (ОСЗ), поддерживается интернет-ресурс «Пулковская страница ОСЗ». Она содержит разнообразные сведения об ОСЗ, в том

числе эфемериды и рекомендации по наблюдениям (см. <http://www.gao.spb.ru/personal/neo/RUS/main-rus.htm>).

Результаты наблюдений

В течение 1997–2012 гг. на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М было выполнено более пятидесяти тысяч позиционных наблюдений малых тел Солнечной системы с точностью $0''.04 - 0''.40$. Результаты посылаются в международный Центр малых планет (Minor Planet Center — MPC). Среди заметных результатов, полученных по наблюдениям на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М, стоит упомянуть следующие.

На телескопе МТМ-500М Е.Н.Ромасом были открыты четыре астероида: 2010 UP67 (20.7^m), 2010 XA15 (20.5^m), 2010 XL46 (20.3^m), 2010 XM46 (20.2^m), а также переоткрыты четыре «потерянных» астероида: 2010 SY11 = 2004 TR356, 2010 VX29 = 2008 EG30, C20N117 = 2008 FM60, NA12044 = 2005 XP17.

Наблюдения известного астероида 2008 TC3 (обнаруженного незадолго до его падения на Землю) на телескопе ЗА-320М составили около трети всех его наблюдений, собранных в базе данных MPC, и позволили улучшить его орбиту, оценить абсолютную звёздную величину, показатель цвета, размеры, массу и отношение главных осей фигуры [5].

Наблюдения потенциально опасного астероида 2009 WZ104 на обоих телескопах составили около трёх четвертей всех мировых наблюдений [6]. По этим наблюдениям была улучшена орбита астероида и определены показатели цвета. А частотный анализ наблюденной кривой блеска позволил выявить в ней два периода.

Известный опасный астероид Апофис наблюдался вскоре после его открытия в 2004 г. В настоящее время идёт подготовка к наблюдениям при его очередном сближении с Землёй в самом начале 2013 года.

Астероид 2005 YU55

Потенциально опасный астероид 2005 YU55 наблюдался во время его тесного сближения с Землёй в ноябре 2011 года в рамках тренировочной части программы наземной наблюдательной поддержки европейского космического проекта GAIA. Наблюдения велись в период с 9 по 20 ноября 2011 г. на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М.

По кривым блеска, наблюденным без фильтров, был уточнён период его вращения. Прежнее значение этого периода, полученное из радарных наблюдений, — 18 часов (см. <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=308635>). Частотный анализ наших наблюдений методом Скаргла [7] и методом CLEAN [8] дал несколько меньшее значение — 16.3 часа. На рис. 1 показана кривая блеска по нашим наблюдениям в течение нескольких ночей, собранная с этим периодом.

При анализе кривой блеска в наблюдениях на обоих телескопах в течение разных ночей был выделен ещё один период длительностью, варьирующейся от 0.9 до 1.2 часа от ночи к ночи. На рис. 2 показана одна из кривых блеска с таким периодом. При этом в каждую ночь наблюдения длились достаточно долго, чтобы покрыть предполагаемый период несколько раз (в данном случае 10 часов).

По наблюдениям астероида в фильтрах были определены показатели цвета. Их средневзвешенные значения следующие:

$$B-V = 0.67^m \pm 0.07^m, \quad V-R = 0.34^m \pm 0.09^m, \quad R-I = 0.30^m \pm 0.07^m.$$

Из работ Хикса и соавторов [9, 10] следует эффективный показатель цвета астероида 2005 YU55, определённый по спектральным наблюдениям: $V-R = 0.37^m$. Это значение согласуется с определённым в настоящей работе.

Используя полученные показатели цвета, была сделана попытка определить спектральный класс этого астероида. Хикс с соавторами в работе [9] по спектру подобрали наиболее близкие к нему астероиды. Ими оказались астероиды классов C_{gh} , C , C_h по Bus&Binzel [11] и G по Толену (Tholen) [12] — астероиды, имеющие плоскую форму спектра в видимом диапазоне длин волн.

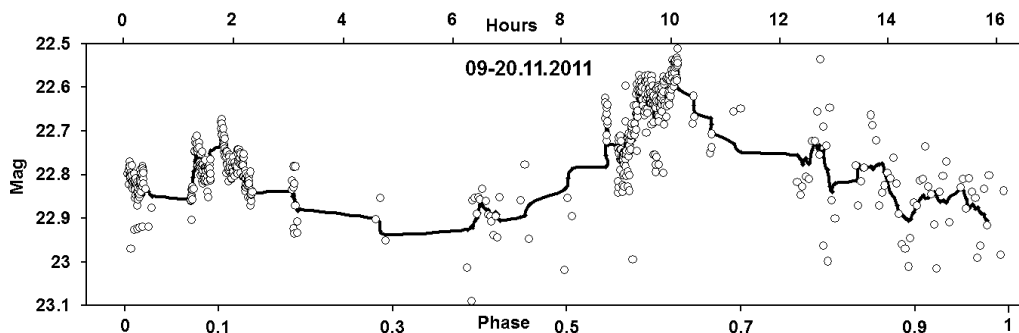


Рис. 1. Кривая блеска астероида 2005 YU55 с периодом 16.3 часа.

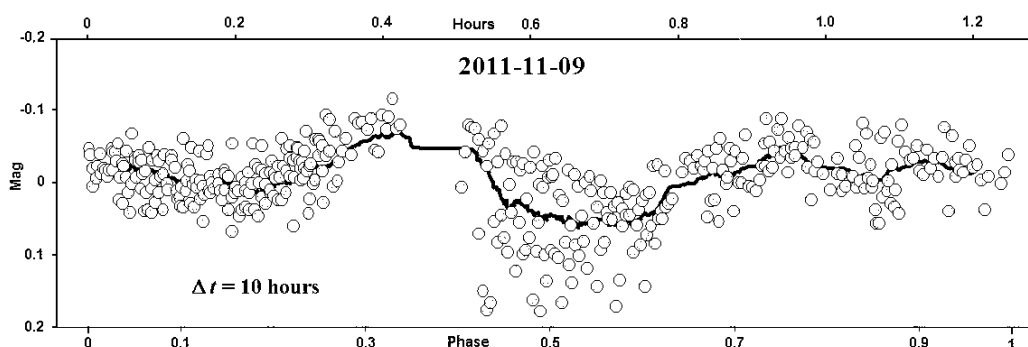


Рис. 2. Кривая блеска астероида 2005 YU55 по наблюдениям 9 ноября 2011 г. с периодом 1.2 ч.

Существует работа Дэнди и соавторов [13], в которой авторы проводят классификацию астероидов по Толену на основе широкополосной фотометрии — полос B , V , R , I и дополнительной полосы Z (0.91 мкм). Телескопы ЗА-320М и МТМ-500М оборудованы только фильтрами $BVRI$. В таком, более узком (0.44 - 0.83 мкм), диапазоне форма спектра 2005 YU55 оказалась близка к спектрам классов B , F , C , G по классификации Толена — тоже плоским в видимом диапазоне. (Класс B наиболее близкий.)

Хикс с соавторами в работе [10] по своим наблюдениям в фильтре R построили фазовую зависимость этого астероида и определили его абсолютную величину и параметр наклона. Рис. 3 представляет собой график из работы [10] с нанесёнными на него результатами наблюдений в фильтре R , полученными в настоящей работе. Они легли на ту же кривую, хотя и с большим разбросом. Эти данные, полученные при меньших фазовых углах, чем в работе [10], подтверждают правильность определения абсолютной величины и параметра наклона.

Наблюдения астероида 2005 YU55 на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М были также обработаны с целью получения его астрометрических положений. Всего было получено 926 положений со средней точностью около $0''.3$. Результаты отосланы в MPC.

Орбита астероида 2005 YU55 пересекает орбиты Венеры, Земли и Марса. Следовательно, он может испытывать тесные сближения с этими планетами, во время которых параметры его орбиты изменяются резко. С помощью ПП ЭПОС было проведено моделирование изменений орбиты астероида при таких сближениях: прошедшего сближения с Землёй 8–9 ноября 2012 г. и предстоящего сближения с Венерой 19–20 ян-

варя 2029 г. На рис. 4 показана эволюция трёх орбитальных элементов в 2012–2029 гг. Видны резкие скачки значений элементов во время указанных сближений. На рис. 5 в более крупном масштабе показано изменение шести орбитальных элементов астероида во время сближения с Землёй 8–9 ноября 2012 г. Изменения двух элементов (M и e), не только не линейны, но и не монотонны.

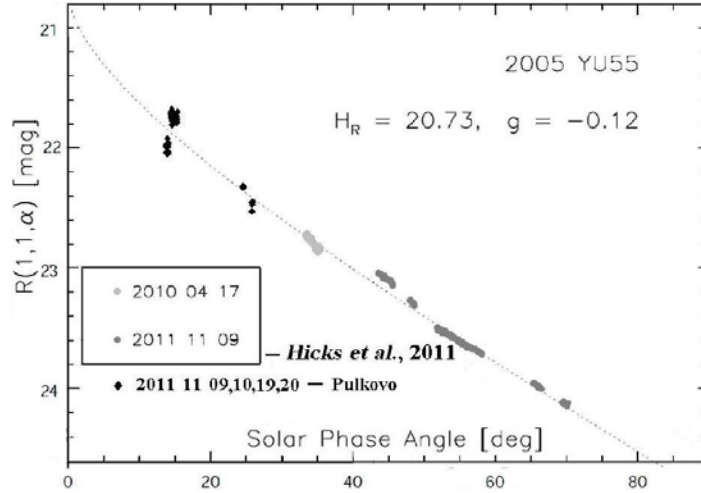


Рис. 3. Фазовая кривая в полосе R астероида 2005 YU55 из работы [9] с добавленными на график результатами наблюдений из настоящей работы — чёрные точки.

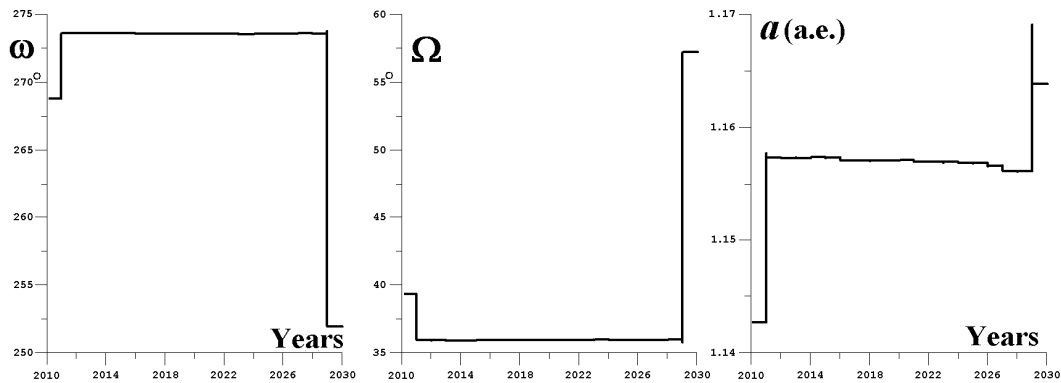


Рис. 4. Эволюция трёх орбитальных элементов астероида 2005 YU55 в 2012–2029 гг.

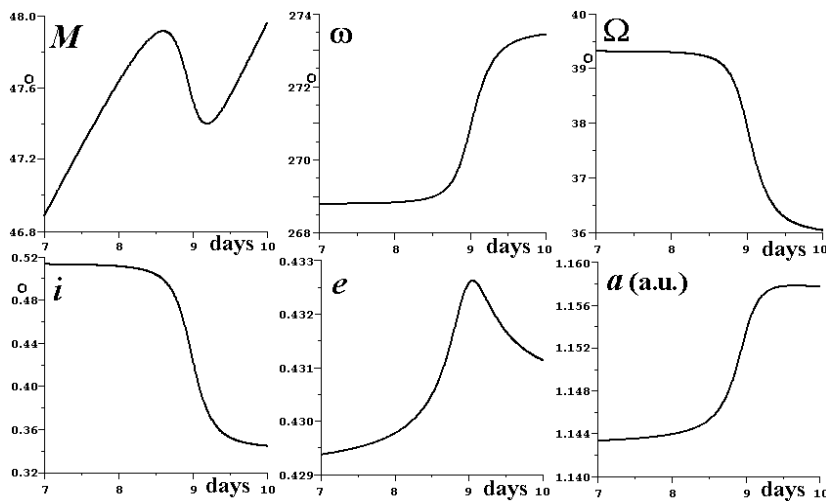


Рис. 5. Эволюция орбитальных элементов (обозначения стандартные) астероида 2005 YU55 в период тесного сближения с Землёй 8–9 ноября 2011 гг.

Астероид 2012 BS67

Астероид 2012 BS67 = TP3522 также наблюдался в рамках программы наземной поддержки проекта GAIA. Он был открыт 17 января 2012 г. в Королевской обсерватории Бельгии. После получения сообщения-«алерта» об открытии астероида наблюдения этого астероида были выполнены на телескопе МТМ-500М 20 января 2012 г. Астероид в период наблюдений имел довольно слабый блеск — 19^m – 20^m в полосе R . Всего было получено 24 положения — примерно треть от всех наблюдений этого астероида, имеющих в базе данных MPC. Средняя астрометрическая точность наблюдений составила около $0''.2$. Эти наблюдения (наряду с наблюдениями других обсерваторий) позволили подтвердить открытие астероида и улучшить его орбиту.

Астероид 2012 GQ42

Ещё один сближающийся с Землёй астероид — 2012 GQ42 наблюдался 6–9 сентября 2012 г. на телескопе ЗА-320М.

По наблюдениям, выполненным в фильтрах, были определены его показатели цвета: $B-V = 0.76^m \pm 0.16^m$, $V-R = 0.50^m \pm 0.07^m$, $R-I = 0.22^m \pm 0.07^m$.

На их основе тем же методом, что и для астероида 2005 YU55 (см. выше), была сделана оценка спектрального класса. К форме спектра, определённой по этим показателям цвета, близкими оказались классы V, Q, R (V — самый близкий).

Таблица 1. Элементы начальной и улучшенной орбит астероида 2012 GQ42. Обозначения элементов стандартные: rms — среднеквадратичная ошибка представления наблюдений, N_{obs} — количество наблюдений, использованных для улучшения орбиты.

Элементы	Начальная орбита (JPL)	Улучшенная орбита (наблюдения Пулково)		Улучшенная орбита (набл. Пулково + MPC)	
			Поправки		Поправки
Эпоха	2456189.5	2456189.5		2456189.5	
M	298.015083	298.014947	–0.000136	298.015010	–0.000073
ω	116.085767	116.085904	0.000137	116.085829	0.000062
Ω	344.949685	344.949697	0.000012	344.949688	0.000003
i	6.816120	6.816311	0.000191	6.816144	0.000024
e	0.37462048	0.37462078	0.00000030	0.37462048	0.00000000
a	1.025951851	1.025951904	0.000000053	1.025951835	–0.000000015
rms		0.428		0.389	
N_{obs}		219		1091	

По наблюдениям на телескопе ЗА-320М было получено 250 астрометрических положений астероида 2012 GQ42. По ним, а также с привлечением наблюдений из базы данных MPC, была построена улучшенная орбита. В качестве начальных элементов орбиты использовались элементы с сайта Лаборатории реактивного движения США (JPL). В табл. 1 приведены результаты двух вариантов улучшения орбиты астероида 2012 GQ42 — только по пулковским наблюдениям и по всем доступным наблюдениям, включая пулковские.

Литература

1. Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320.П. // Изв. ГАО, 2004, № 217, с. 505–530.
2. Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б., Ибрагимов Ф.М., Куприянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В. Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М // Изв. ГАО, 2009, № 219, вып. 1, с.192–218.

3. *Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А.* Программные пакеты «Апекс-1» и «Апекс-2» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // *Астрономический вестник*, 2010, том 44, № 1, с. 74-87.
4. *Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // *Астрономический Вестник*, 2012, 46, 2, с. 190-192.
5. *Алешкина Е.Ю., Куприянов В.В., Девяткин А.В., Верещагина И.А., Слесаренко В.Ю., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Астрометрические и фотометрические исследования астероида 2008 TC3 // *Астрономический вестник*, 2011, том 45, № 1, с. 36-44.
6. *Карашевич С.В., Девяткин А.В., Верещагина И.А., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Астрометрические и фотометрические исследования сближающегося с Землёй астероида 2009 WZ104 // *Астрономический вестник*, 2012, том 46, № 1, с. 34-40.
7. *Scargle J.D.* Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data // *Ap.J.*, 263, 1982, p. 835-853.
8. *Витязев В.В.* Анализ неравномерных временных рядов // Изд-во СПбГУ, 2001, 67 с.
9. *M. Hicks, K.Lawrence, L.Benner.* Palomar Spectroscopy of 2001 FM129, 2004 FG11, and 2005 YU55, *The Astronomer's Telegram*, 2010, # 2571.
10. *M. Hicks et al.* Broadband photometry of 2005 YU55: Solar phase behavior and absolute magnitude, *The Astronomer's Telegram*, 2011, # 3763.
11. *Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy // *Icarus*. 2002. V. 158. P. 146-177.
12. *Tholen D.J.* Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry // Ph.D. thesis, 1984, University of Arizona, Tucson.
13. *Dandy C.L., Fitzsimmons A., and Collander-Brown S.J.* Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit // *Icarus*. 2003. V. 163. P. 363-373.

OBSERVATIONS, DISCOVERIES AND RESEARCHES OF ASTEROIDS WITH AUTOMATED ZA-320M AND MTM-500M TELESCOPES IN PULKOVO OBSERVATORY

Gorshanov D.L., Devyatkin A.V., Vereshchagina I.A., Romas E.N., Sokov E.N., Zinov'ev S.V., Slesarenko V.Yu., Ivanov A.V., Kouprianov V.V., Naumov K.N., Karashevich S.V., Bashakova E.A., Petrova S.N., Martyusheva A.A., L'vov V.N., Tsekmeister S.D.
Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of Russian Academy of Science

The results of observations of some asteroids with two telescopes of Pulkovo observatory are presented. 4 asteroids were discovered and 4 asteroids were rediscovered. Using the observations, the period of axial rotation of 2005 YU55 asteroid was refined, color indices of the asteroid were determined, its taxonomy class was estimated, and its orbit evolution at close approaches to planets was simulated. The astrometric positions of 2012 BS67 asteroid were observed that allows confirmation of the asteroid discovering. For 2012 GQ42 asteroid, color indices are determined, taxonomy class are estimated using the color indices, astrometric positions are observed, and orbit of the asteroid is improved using the positions.

НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ В ГАО РАН

Гусева И.С., Ермаков Б.К., Лих Ю.С., Литвиненко Е.А.,
Гребецкая О.Н., Павловский С.Е.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
Санкт-Петербург

Наблюдения искусственных спутников Земли начались в ГАО РАН с момента запуска первого ИСЗ в октябре 1957 года. Первый профессиональный фотографический снимок был получен в Пулкове на двойном короткофокусном астрографе (АКД). Пулковские астрономы принимали активное участие в разработке средств и методов наблюдений ИСЗ, создании наземной сети оптических средств (НСОС) под эгидой Астросовета СССР. После длительного периода застоя и почти полного прекращения наблюдений ИСЗ в России, на том же инструменте АКД были начаты первые в России ПЗС-наблюдения ИСЗ, положившие начало созданию сети ПулКОН (ныне ISON). Приведены основные этапы работ коллектива авторов данной статьи.

Подготовка к наблюдениям искусственных спутников Земли началась незадолго до первого старта, в начале 1957 года. Организацией работ занимался Астросовет АН СССР [1]. Благодаря блестящим организаторским способностям А.Г. Масевич [2] в сентябре 1957 г. было готово к работе 66 станций оптических наблюдений ИСЗ, оснащенных простейшими телескопами и хронографами для визуальных наблюдений, подготовлены наблюдатели. Первый профессиональный фотографический снимок искусственного космического объекта был получен 10 октября 1957 года в Пулковской обсерватории Тамарой Петровной Киселевой на АКД, результаты координатных и фотометрических измерений были точнейшими в то время.



Рис. 1. Двойной короткофокусный астрограф (АКД).

Далее была славная история развертывания глобальной сети наблюдательных пунктов (НСОС), руководимой Астросоветом АН СССР. Были созданы специальные

инструменты для наблюдений ИСЗ (ВАУ, АФУ-75 и др.). Были получены не только наблюдения ИСЗ, но и важные научные результаты, создано направление космической геодезии. Значительное участие в этой работе принимали пулковские астрономы [3]: Б.А. Фираго, Г.В. Панова, Л.А. Панайотов, В.Б. Новопашенный, Д.Е. Щеголев, О.А. Калиниченко и многие другие. Методики обработки наблюдений разрабатывали А.Н. Дейч, А.А. Киселев, О.П. Быков.

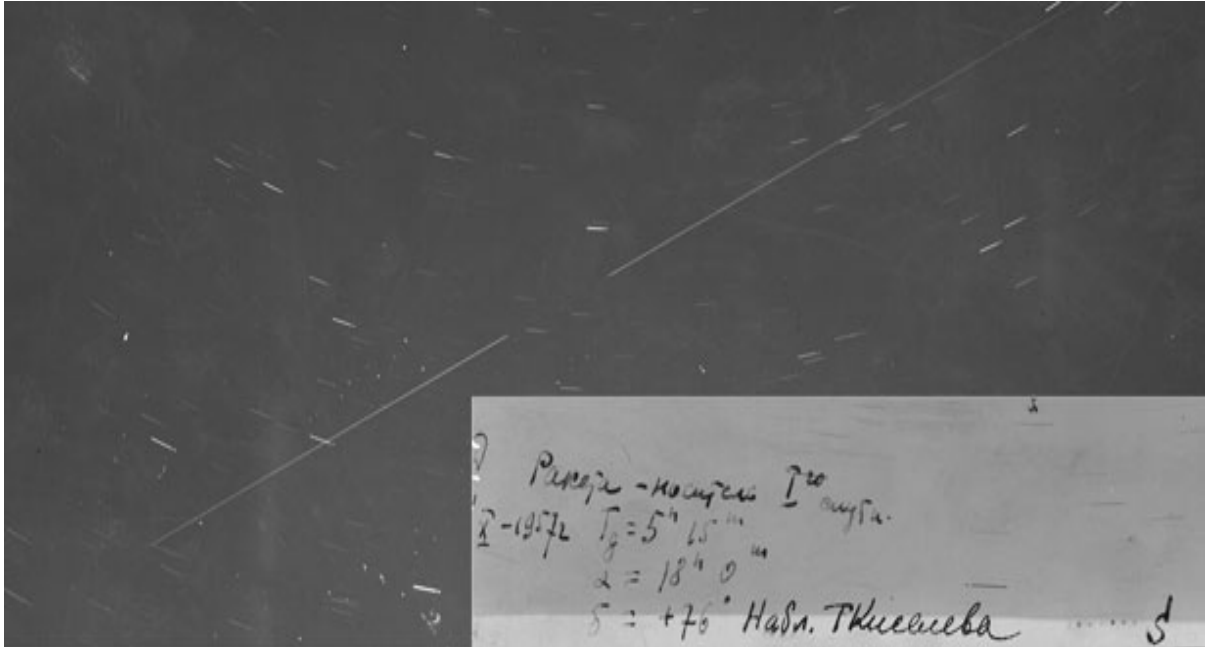


Рис. 2. Первый фотографический снимок искусственного космического объекта (ракеты-носителя ИСЗ-1), полученный 10 октября 1957 года в Пулкове Т.П. Киселевой

Распад СССР, «перестройка» и последующие события привели к практически полному прекращению наблюдений ИСЗ. Героическими усилиями энтузиастов продолжалась разработка задуманного еще в 70-е годы оптико-электронного комплекса «Окно» - мощной системы контроля космического пространства на основе применения телевизионных фотоприемников. Но только в 2002 году на «Окне» начались экспериментальные наблюдения [4].

В 70-е годы появились и к 90-м годам нашли широкое применение в астрономии фотоприемники нового типа – приборы с зарядовой связью (ПЗС), которые имели значительные преимущества перед иными средствами регистрации наблюдений. В 1990 году во время натурных экспериментов с ПЗС-камерой, созданной в Институте космических исследований РАН для проекта космической астрометрии Регата-Астро [5,6], на Кисловодской станции Пулковской обсерватории были получены первые ПЗС-снимки спутников на фоне звезд. Тогда же возникла идея о возможности применения короткофокусных ПЗС-телескопов для наблюдений ИСЗ. В 90-е годы были сделаны многократные попытки привлечь внимание специалистов к возможностях ПЗС для наблюдений спутников и других объектов [7]. В результате удалось заинтересовать крупных специалистов по динамике ИСЗ А.С. Сочилину и Р.И. Киладзе.

ПЗС-наблюдения ИСЗ в Пулкове на АКД начались в мае 2001 г. [8], когда планировался российско-украинский эксперимент по РСДБ-локации космического мусора. Небольшой телескоп АКД (диаметр объектива 100 мм, фокус 712 мм) трудно сравнивать с огромными инструментами комплекса ОКНО или с ВАУ.

Тем не менее, применение ПЗС позволило получить результаты сравнимые и даже в чем-то превосходящие то, что в то время получалось с большими инструментами. Проницающая способность АКД увеличилась на 5 звездных величин по сравнению с фотопластинками (до 15-16 звездной величины при минутной экспозиции) благодаря ПЗС-камере ST-8 (матрица KODAK KAF-1600, 1020x1530 пикселей размером 9x9 мкм). Поле зрения АКД с этой камерой составило 45 x 67 угловых минут при масштабе изображений 2.61 секунд дуги на пиксель.

На начальном этапе главной проблемой стало создание программ для обработки снимков. К тому времени был создан комплекс программ ASTRO для автоматической обработки наблюдений звезд, но обработка наблюдений спутников существенно сложнее. И звезды, и спутники на снимках изображаются в виде треков, длина которых зависит от оптики телескопа и экспозиции. В течение первых трех лет было создано программное обеспечение для обработки наблюдений ИСЗ – программа GEOS. Надо отметить, что по точности измерений наш 10-сантиметровый телескоп превосходил «Окно» и на лишь одну звездную величину уступал по проницающей способности (это в условиях Пулкова, где геостационары не наблюдаются выше 22 градусов над горизонтом, причем наш рекорд наблюдений с измерением координат – 3 градуса над горизонтом, сквозь деревья).

Полученные результаты использовались как основание для подачи заявок на гранты ИНАС и другие, так начинался проект ПулКОН [9], в настоящее время – ISON [10], инициаторами и организаторами которого были А.С. Социлина и И.Е. Молотов. В 2003 году на монтажке АКД был установлен «третьим глазом» специальный короткофокусный телескоп RST-220 - Трекер. С этим телескопом (D=220 мм, F=506 мм) резко увеличился и поле зрения, и проницающая способность телескопа, и точность результатов. Позже появилась более современная ПЗС-камера.



Рис. 3. Телескоп RST-220 с камерой ST-8 на монтажке АКД (Пулково).

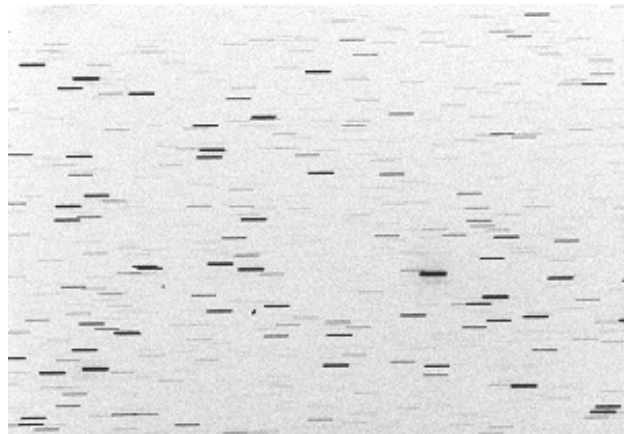


Рис. 4. Пример снимка спутников с RST-220 (спутники – точечные объекты, звезды – треки).

Следующим этапом нашей работы было начало наблюдений в Уссурийской астрофизической обсерватории (УАФО ДВО РАН) в 2004 году и обучение сотрудников обсерватории в течение полутора месяцев. Дело в том, что даже самый превосходный инструмент в месте с идеальным астроклиматом не решает задачу наблюдений всей геостационарной орбиты, зона работы «Окна» – 120 градусов по долготе. Начало наблюдений на востоке, в Уссурийске, обеспечило вместе с Пулково зону наблюдений геостационарной орбиты от -47 до + 195 градусов. Первые годы наблюдения велись на 40-см астрографе Цейсса с маленькой ПЗС-камерой ST-6. В настоящее время в УАФО установлено несколько инструментов для наблюдений ИСЗ и других объектов.



Рис. 5. Башня Цейсс-400 (УАФО).



Рис. 6. Двойной астрограф Цейсс-400 (УАФО).

В 2005 были начаты экспериментальные наблюдения в Боливии, в Тарихе на территории бывшей экспедиции ГАО РАН с той же целью – расширение наблюдаемой области геостационарных орбит на западное полушарие. На экспедиционном астрографе была установлена ПЗС-камера, начаты наблюдения и обучение персонала обсерватории. В 2006 состоялась еще одна 1.5-месячная поездка с передачей ПЗС-камеры. С 2007 обсерватория в Тарихе и наша сотрудница О.Н. Гребецкая работают самостоятельно. В конце 2009 года в Тарихе был установлен ORI-25, что позволило резко увеличить количество и качество наблюдений.



Рис. 7. Обсерватория в Боливии (Тариха).
Справа – павильон экспедиционного астрографа.



Рис. 8. Экспедиц. астрограф.
Слева – Родольфо Сальес.

Оставалась «незакрытой» небольшая область геостационарных орбит над Тихим океаном, и мы предложили установить телескоп на Камчатке, на 26° восточнее УАФО. По договоренности с Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН), в 2007 году мы отвезли туда телескоп с ПЗС-камерой, оплатили строительство площадки на крыше здания института, установили телескоп и выполнили пробные наблюдения, тем самым замкнув всю область геостационарных орбит. К сожалению, сотрудники ИКИР не стали наблюдать, поэтому инструмент был перенесен в Мильково, сейчас там работает специальный короткофокусный телескоп.



Рис. 9. Первые наблюдения на Камчатке выполнены на крыше здания ИКИР ДВО РАН



Рис. 10. Павильон с инструментами в Китабе (Узбекистан)

В 2007 году по инициативе Е.А.Литвиненко были начаты наблюдения в Китабе (Узбекистан), на бывшей широтной станции ГАО РАН. Ею создана группа, которая на двух телескопах, ORI-22 и ORI-40, при хорошем астроклимате, выполняет сейчас наибольшее количество наблюдений ИСЗ из всех станций сети ПулКОН/ISON.

Таблица 1. Результаты наблюдений в Китабе и Тарихе.

Год	Китаб (Е.А.Литвиненко и др.)		Тариха (О.Н.Гребецкая и др.)	
	Кол-во ночей и измерений	Примечания (инструменты)	Кол-во ночей и измерений	Примечания (инструменты)
2005			10 / 3 168	Эксп. астрограф
2006			18 / 4 045	Эксп. астрограф
2007	203 / 38 646	40 см Цейсс	54 / 10 419	Эксп. астрограф
2008	215 / 89 623	ORI-22	68 / 12 506	Эксп. астрограф
2009	255 / 101 891	ORI-22	55 / 11 873	Эксп. астрограф
2010	267 / 645 153	ORI-22	61 / 73 611	ORI-25
2011	484 / 650 182	ORI-22, ORI-40	112 / 184 624	ORI-25

Ситуация в Пулкове иная. На широте Пулкова геостационары над горизонтом не выше 22 градусов («Окно» не наблюдает ниже 20°, находясь на юге и в горах). Не в плюс, а в минус к этому – в Пулкове плохой астроклимат и белые ночи. Но в 2001 г. наблюдений в России не было вообще, поэтому пришлось начать в Пулкове, главным образом, разрабатывая методику и программы обработки наблюдений.

Таблица 2. Результаты наблюдений в Пулкове.

Год	Кол-во ночей/измерений	Примечания
2001	10 / 157	АКД + ST-8, X,Y – вручную
2002	44 / 890	АКД + ST-8, обработка «полуавтоматом»
2003	~50 / >1 500	RST + ST-8
2004	~50 / >2 000	RST + ST-8
2005	41 / 3 087	RST-220 + IMG 1001
2006	56 / 5 394	RST-220 + IMG 1001
2007	33 / 9 485	RST-220 + IMG 1001
2008	34 / 22 397	RST-220 + PL 0900, автоматизация
2009	22 / 21 280	Ремонты и перенос инструмента
2010	32 / >35 000	RST-220 + PL 0900, монтаж EQ-6

С самого начала было показано, что применение ПЗС даже с маленьким телескопом, даже в условиях Пулковки дает хорошие результаты. Работа по созданию проекта ПулКОН частично финансировалась ОАО МАК «Вымпел» с 2006 года, но в связи с прекращением финансирования в 2010 г. рутинные наблюдения в Пулковке были остановлены. В настоящее время выполняются экспериментальные наблюдения объектов ближнего космоса и разрабатываются методы повышения точности и эффективности обработки наблюдений.

Литература

1. *Рыхлова Л.В., Касименко Т.В.* Первые наблюдения спутников: как это было -Околоземная астрономия -2007, Нальчик, 2008, с.15-19.
2. *Масевич А.Г.* Звезды и спутники в моей жизни. – М., Русская книга, 2007.
3. *Бронникова Н.М.* Работы Пулковской обсерватории в области фотографической астрометрии и звездной астрономии. – 150 лет Пулковской обсерватории, Л., 1989, с. 87-120.
4. *М. Севастьянов, А. Долинин.* ОКНО над крышей мира. Красная звезда (Москва), 23.4.2003.
5. *А.А. Андронова, И.С.Гусева, О.В. Кияева, В.А. Красиков, Я.Л. Зиман.* Астрометрическая обработка наблюдений звезд, выполненных с короткофокусной ПЗС-камерой. Тр. 3 Орловской конф., 1994, с.300-302.
6. *G.A. Alexeeva, A.A. Andronova, I.S. Guseva, et al.* CCD-photometry in REGATTA-ASTRO space project and its ground-based support.- IAU Coll. 136, Dublin, 1993, p.166-168.
7. *И.С. Гусева, А.Ю. Коган.* Телевизионный компьютеризованный астрограф ТЕКАС-РА и его возможности в проблеме астероидно-кометной опасности. – Тр. совещ. «Астероидная опасность», СПб, 1992 г., с.144-146.
8. *Каткова Е.В., Гусева И.С.* Наблюдения ГСО с короткофокусным ПЗС-астрографом. – Известия ГАО, 216, 2002 г.,с. 170-173.
9. *I. Molotov, A. Konvalenko, G. Tuccari et al.* Pulkovo Cooperation for radar and optical observations of space objects. Proc. of 6th US/Russian Space Surveillance Workshop, VVM. Co. Ltd., 2005, pp. 228-235.
10. *Molotov I., Agapov V.* International collaboration as a primary way for the ISON network development. 63rd International Astronautical Congress, IAC2012 Proceedings, Naples, Italy, DVD ISSN 1995-6258, Paper-Nr: IAC-2012,A6,1,10,x15550, 5 pages

OBSERVATIONS OF THE EARTH SATELLITES AT PULKOVO OBSERVATORY

**Guseva I.S., Ermakov B.K., Likh Yu.S., Litvinenko E.A.,
Grebetskaya O.N., Pavlovskiy S.E.**

*Central Astronomical Observatory of the RAS (at Pulkovo)
St Petersburg, Russia*

Observations of the Earth satellites started at Pulkovo observatory since the launch of the first satellite on October, 4, 1957. The first professional photography was obtained at Pulkovo with the Double Short-Focus Astrograph (ASD). Astronomers of Pulkovo observatory participated actively in the development of instrumentations and methods for the satellites observations, in the creation of the ground-based network for the space surveillance, headed by the Astrosoviet of the USSR. After “perestrojka” and a long period of degradation, the re-establishment of the satellites observations started at Pulkovo in 2001 with the same instrument ASD equipped with CCD. The very first CCD-observations in Russia followed in the creation of the PulCON/ISON network of the satellites tracking. The main steps of the authors work on the CCD-observations of satellites are shown briefly in the paper.

РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ УРАНА НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ЗА ПЕРИОД 2006–2011 гг.

Дементьева А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Приводятся экваториальные координаты Урана, полученные по астрометрическим ПЗС-наблюдениям, выполненным на Нормальном астрографе ($D/F = 0.33\text{м}/3.5\text{м}$, CCD S2C, FOV $18' \times 16'$) Пулковской обсерватории за период 2006–2011 гг. Редукция ПЗС-кадров выполнена с привязкой к системе каталога UCAC3. Величины (O-C) вычислялись с помощью сервиса “Natural satellites service”. Проведен учет уравнения блеска.

Введение

Одним из важнейших аспектов изучения динамики далеких планет Солнечной системы является уточнение теорий их движения. Для эффективного решения этой задачи необходимы длительные высокоточные ряды астрометрических наблюдений, результатами которых являются экваториальные координаты планет и их спутников, отнесенные к современной опорной системе. В настоящее время такие наблюдения ведутся во многих обсерваториях мира (например, [1] и [2]). На протяжении нескольких десятилетий такие наблюдения ведутся и в Пулковской обсерватории (например, [3]). В данной работе представлены результаты астрометрических ПЗС-наблюдений Урана, выполненных на Нормальном астрографе в период с 2006 по 2011 гг.

1. Наблюдения и обработка данных

Результаты данной работы основаны на полученных на Нормальном астрографе ПЗС-кадрах с изображениями Урана, в период с 2006 по 2011 гг. На телескопе установлена ПЗС-камера S2C (рабочее поле: $18' \times 16'$, масштаб: 900 мсд/пиксель). Наблюдения проводились, как правило, с августа по декабрь. В ночь снималось от одной до трех серий ПЗС-кадров с различными экспозициями. Серии варьировались от 5 до 11 кадров. В данной работе использованы серии, снятые с экспозициями 10, 30, 60 и 120 секунд. Всего было получено 415 отдельных положений Урана в системе каталога UCAC3 [4]. Среднеквадратические ошибки по сходимости внутри серий ПЗС-кадров лежат в пределах 10–60 мсд, хотя в отдельные даты имеются отклонения, превышающие 100 мсд, что, скорее всего, обусловлено ухудшением условий наблюдений. При съемке с указанными выше экспозициями, кроме изображений планеты и ее спутников в ПЗС-кадрах в среднем получились изображения 10–30 опорных звезд из каталога UCAC3. Это дало возможность выполнить стандартную астрометрическую редукцию методом шести постоянных и получить экваториальные координаты Урана в системе данного каталога с помощью программы IZMCCD [5]. На данном этапе были отброшены кадры, в которых ошибки редукции по звездам выходили за пределы $0.65''$. Затем все полученные из наблюдений положения Урана сравнивались с двумя современными теориями его движения. Для вычисления величин (O-C) использовался web-ресурс “Natural satellites service” [6]. Экваториальные координаты Урана рассчитывались с помощью теорий движения INPOP10 и DE414/LE414 [7–8]. Все наблюдаемые ПЗС-кадры, для которых разности (O-C) превысили $0.8''$, были отброшены, и после этого для каждой серии кадров положения Урана были приведены на средний момент наблюдений. Полученные усредненные экваториальные координаты Урана приводятся в табл. 1.

В табл. 2 приводятся средние по годам ошибки редукции по звездам для обеих координат, число опорных звезд каталога UCAC3, по которым проводилась редукция, диапазон их звездных величин и оценочная звездная величина Урана.

Таблица 1. Экваториальные координаты Урана, полученные по данным наблюдений.

Дата	α	Δ	Дата	α	Δ
ГГ ММ DD	h m s	° ' "	ГГ ММ DD	h m s	° ' "
2006 09 03.907	22 57 29.977	-07 32 25.09	2009 09 17.916	23 40 58.529	-02 55 45.41
2006 09 18.856	22 55 17.647	-07 45 54.67	2009 09 20.918	23 40 31.972	-02 58 36.31
2006 09 21.753	22 54 52.860	-07 48 24.90	2009 09 23.970	23 40 05.083	-03 01 29.02
2006 12 07.729	22 50 27.902	-08 12 46.09	2009 09 25.903	23 39 48.184	-03 03 17.31
2006 12 28.616	22 52 16.319	-08 00 53.81	2009 10 02.887	23 38 48.210	-03 09 39.41
2007 09 07.971	23 12 12.160	-06 00 39.04	2009 10 06.809	23 38 15.675	-03 13 06.02
2007 09 30.811	23 08 54.415	-06 21 10.36	2009 10 09.896	23 37 50.774	-03 15 43.00
2007 09 30.818	23 08 54.406	-06 21 10.72	2010 08 20.004	00 00 01.086	-00 51 02.41
2008 09 13.914	23 26 23.991	-06 21 10.70	2010 08 20.008	00 00 01.091	-00 51 02.49
2009 08 15.949	23 45 29.304	-02 26 11.82	2010 08 30.954	23 58 39.191	-01 00 06.70
2009 08 16.947	23 45 22.282	-02 26 58.80	2010 08 30.958	23 58 39.175	-01 00 06.88
2009 08 16.953	23 45 22.224	-02 26 59.22	2010 08 31.996	23 58 30.865	-01 01 01.75
2009 08 16.959	23 45 22.191	-02 26 59.41	2010 10 07.871	23 53 12.683	-01 35 26.95
2009 08 24.925	23 44 22.661	-02 33 34.25	2011 08 27.014	00 14 12.218	+00 42 06.25
2009 08 31.879	23 43 26.353	-02 39 44.48	2011 08 28.006	00 14 04.993	+00 41 18.13
2009 09 02.951	23 43 08.962	-02 41 38.37	2011 09 04.983	00 13 03.484	+00 34 31.85
2009 09 02.956	23 43 08.925	-02 41 38.59	2011 09 05.970	00 12 55.498	+00 33 39.05
2009 09 07.946	23 42 26.168	-02 46 17.63	2011 09 18.886	00 11 05.910	+00 21 42.46
2009 09 07.956	23 42 26.113	-02 46 18.26	2011 10 18.874	00 06 47.484	-00 05 58.62
2009 09 09.885	23 42 09.312	-02 48 07.03	2011 10 18.880	00 06 47.434	-00 05 58.74
2009 09 10.977	23 41 59.748	-02 49 09.22	2011 11 08.812	00 04 24.861	-00 20 49.99
2009 09 11.909	23 41 51.567	-02 50 02.47	2011 11 15.796	00 03 50.188	-00 24 20.03
2009 09 12.947	23 41 42.417	-02 51 01.04	2011 11 15.805	00 03 50.153	-00 24 20.21
2009 09 12.968	23 41 42.254	-02 51 02.59			

Таблица 2. Ошибки редукции экваториальных координат Урана, полученных по данным наблюдений.

Год	S_x''	S_y''	Nrs	mag rs	mag Ur
2006	0.0127-0.2980	0.0127 -0.3230	5-8	7.8-15.9	6.6
2007	0.0263-0.2720	0.0216 -0.2495	5-6	10.3-15.4	5.6
2008	0.0115-0.1165	0.0167 -0.0950	5	9.5-15.1	6.3
2009	0.0124-0.1710	0.0061 -0.1767	5-7	8.3-16.0	6.0
2010	0.0110-0.1414	0.0117 -0.0980	5-10	9.6-15.3	5.3
2011	0.0030-0.1692	0.0070 -0.1889	5-6	7.1-16.7	6.0

Поскольку сам Уран был ярче опорных звезд, в среднем на 6^m , то имело смысл попробовать убрать влияние уравнения блеска. Поправка за уравнение блеска была взята из работы [9].

2. Анализ величин (О-С)

Для анализа внешней точности экваториальные координаты Урана, полученные из наблюдений, сравнивались с двумя современными теориями его движения. Для вычисления величин (О-С) использовался web-ресурс “Natural satellites service”. Экваториальные координаты Урана рассчитывались с помощью теорий движения INPOP10 и

DE414/LE414. Результаты вычислений, средние по годам, приведены в табл. 3, во втором и третьем столбцах (а); в четвертом и пятом столбцах приводятся разности (О-С) после введения поправки за уравнение блеска (б).

Таблица 3. Значения (О-С) для экваториальных координат Урана по данным наблюдений, выполненных на Нормальном астрографе. Все величины приводятся в секундах дуги.

Дата	INPOP10(а)		DE414/LE414(а)		INPOP10(б)		DE414/LE414(б)	
	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ	(О-С) α	(О-С) δ
2006	0.1304	-0.0623	0.1769	0.0544	0.0454	-0.1713	0.0919	-0.0546
2007	0.1226	-0.0624	0.1785	0.0665	0.0376	-0.1714	0.0935	-0.0425
2008	0.6394	-0.1431	0.7045	-0.0044	0.5544	-0.2521	0.6195	-0.1134
2009	0.0946	-0.1556	0.1693	-0.0081	0.0096	-0.2646	0.0843	-0.1171
2010	0.1032	0.0807	0.1886	0.0753	0.0182	-0.1897	0.1036	-0.0337
2011	-0.0072	-0.1882	0.0873	-0.0250	-0.0922	-0.2972	-0.0023	-0.1340

На рисунке 1, в верхней его части (а), представлены разности (О-С) α , полученные при сравнении с теорией INPOP10 для всех 47 усредненных положений Урана. В нижней части (б) – то же самое после введения поправки за уравнение блеска. Можно видеть, что поправка несколько улучшает ситуацию в среднем.

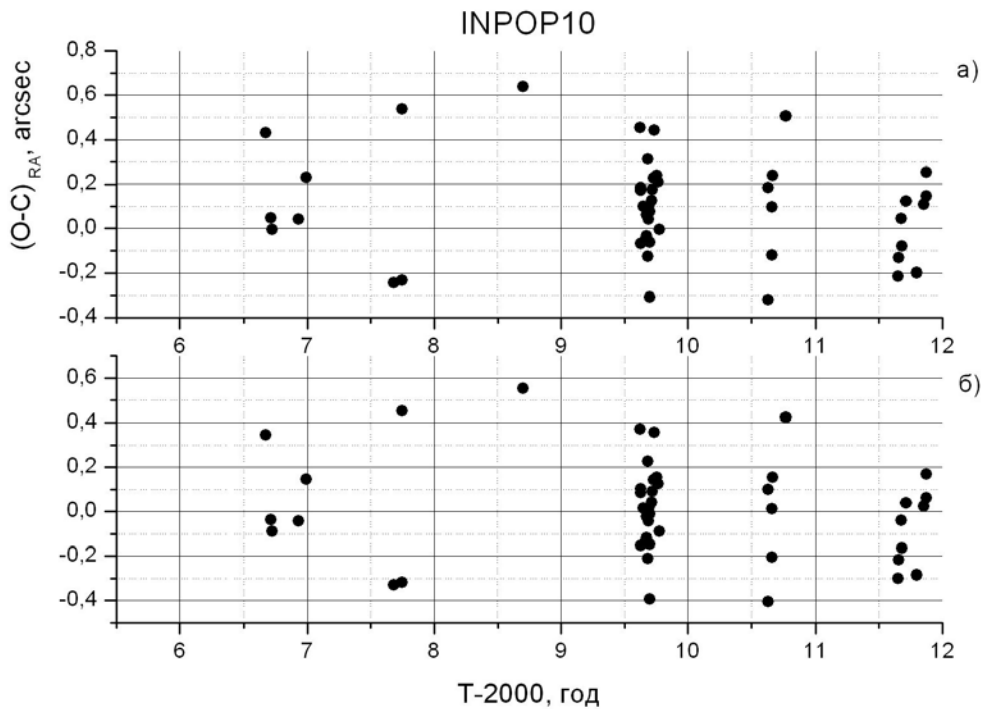


Рис. 1. Значения (О-С) α относительно теории INPOP10 для положений Урана, полученных по результатам наблюдений, выполненных на Нормальном астрографе в период 2006-2011 гг. и усредненных по сериям (а); они же после учета уравнения блеска (б).

На рисунке 2 приводятся разности (О-С) δ , полученные при сравнении с теорией INPOP10 для всех 47 положений Урана. Здесь мы видим, что введение поправки за уравнение блеска улучшает ситуацию в целом.

Если посмотреть на рисунки 3 и 4, на которых приведены результаты сравнения полученных на Нормальном астрографе положений Урана с теорией DE414/LE414, то можно увидеть, что в этом случае не только прямое сравнение с теорией дает лучшее согласие наблюдений, но и учет уравнения блеска еще больше улучшает ситуацию.

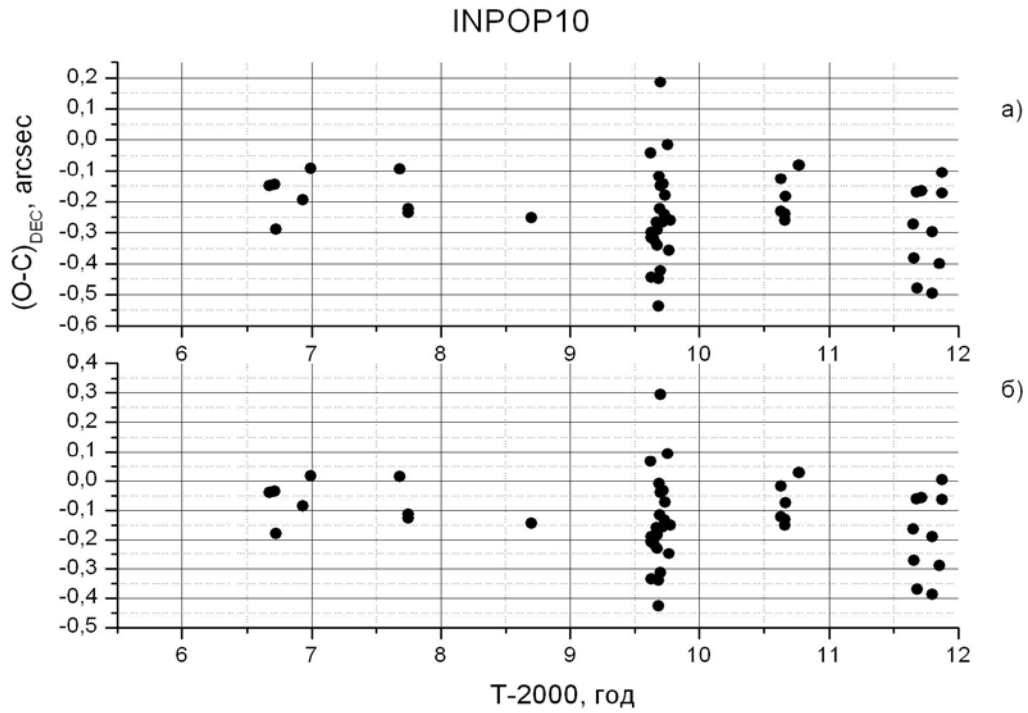


Рис. 2. $(O-C)_\delta$ относительно теории **INPOP10** для положений Урана, полученных по результатам наблюдений, выполненных на Нормальном астрографе в период 2006-2011 гг. и усредненных по сериям (а); они же после учета уравнения блеска (б).

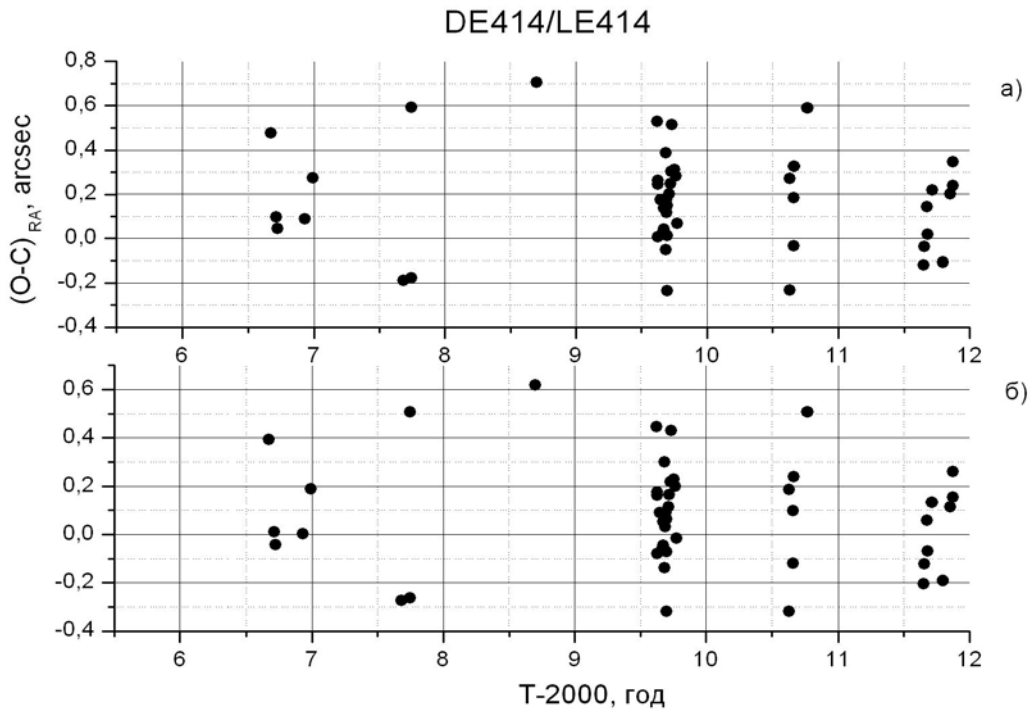


Рис. 3. Значения $(O-C)_\alpha$ относительно теории **DE414/LE414** для положений Урана, полученных по результатам наблюдений, выполненных на Нормальном астрографе в период 2006-2011 гг. и усредненных по сериям (а); они же после учета уравнения блеска (б).

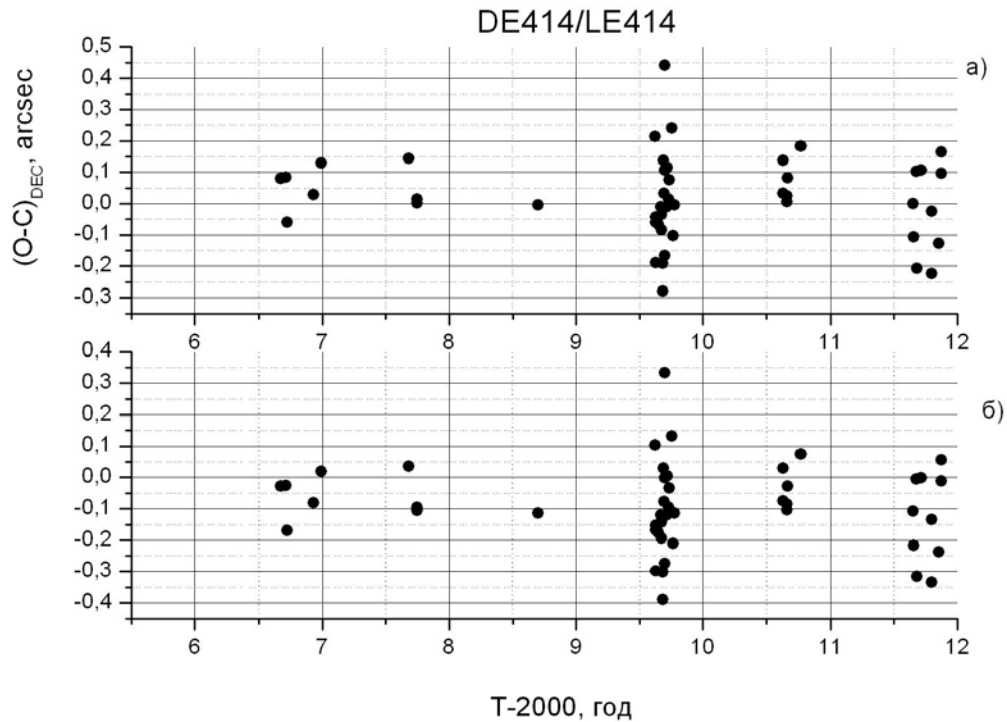


Рис. 4. Значения $(O-C)_{DEC}$ относительно теории **DE414/LE414** для положений Урана, полученных по результатам наблюдений, выполненных на Нормальном астрографе в период 2006-2011 гг. и усредненных по сериям (а); они же после учета уравнения блеска (б).

Сопоставление $(O-C)$ для экваториальных координат Урана, вычисленных с использованием двух теорий его движения (INPOP10 и DE414/LE414), показывает, что для полученного набора данных положения Урана, рассчитанные на основе обеих теорий, находятся примерно в одинаковом согласии с наблюдениями по прямому восхождению. Однако для склонения теория DE414/LE414 гораздо лучше согласуется с нашими наблюдениями. Следует отметить, что в отдельные даты, а для 2008 года для всех наблюдений значения $(O-C)$ по прямому восхождению получились больше $1''$. Это, скорее всего, обусловлено тем, что часовой механизм Нормального астрографа работал в это время во внештатном режиме, поэтому все положения, для которых разности $(O-C)$ превысили $0.8''$, были отброшены.

3. Выводы

В рамках данной работы представлены высокоточные экваториальные координаты Урана (в системе каталога UCAC3). Всего 47 отдельных положений. Если из ряда наблюдений исключить положения, для которых $(O-C)$ по прямому восхождению превышают $0,8''$, то такие наблюдения хорошо согласуются с наблюдениями, полученными на других обсерваториях [1, 2, 10], а также с положениями Урана, приведенными в каталоге Тусхо для тел Солнечной системы [11]. Эти положения можно использовать как для улучшения теории движения самого Урана, так и в целях уточнения связи между системами космических координат: динамической и звездной.

Автор выражает благодарность всем наблюдателям Нормального астрографа.

Работа выполнена в рамках проекта «Позиционные наблюдения спутников планет и исследование их динамики с целью уточнения теорий движения» Программы 22 Президиума РАН.

Литература

1. *Ronald C. Stone*. Positions for the outer planets and many of their satellites. V. FASTT observations taken in 2000-2001//The Astronomical Journal, 122:2723–2733, 2001 November.
2. *Carlos H. Veiga, Roberto Vieira Martins, and Alexandre H. Andrei*. Positions of Uranus and its main satellites//The Astronomical Journal, 125:2714–2720, 2003 May.
3. *Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Калинин С.И. и др.* Астрометрические базы данных Пулковской обсерватории: астрометрические каталоги, результаты наблюдений тел Солнечной системы, двойные звезды//Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы. Николаев; Атолл, 2007, с.197-204.
4. *Zacharias N. et al.* The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3)// The Astronomical Journal, 139, 2184, 2010.
5. *Izmailov, I.S.; Khovricheva, M.L.; Khovrichev, M. Yu. et al.* Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory//Astronomy Letters, Volume 36, Issue 5, pp.349-354.
6. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT //A&A, 487, 759. 2008.
7. *Fienga A. et al.* INPOP08, a 4-D planetary ephemeris: from asteroid and time-scale computations to ESA Mars Express and Venus Express contributions, A&A, 507, 1675-1686. 2009.
8. *Standish E.M. et al.* 1998. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405, JPL IOM 312. F-98-048.
9. *Khrutskaya E.V.; Berezhnoi A.A.; Khovrichev M.Yu.* Investigation of the motions of fast stars based on observations with the Pulkovo normal astrograph // Astronomy Letters. 2011. V. 37. Issue 6. P.420-430 (AstL Homepage).
10. *M.Yu. Khovritchev.* Astrometric observations of the Uranian satellites with the Faulkes Telescope North in 2007 September//Mon. Not. R. Astron. Soc. 393, 1353–1358 (2009).
11. *D. Hestroffer, B. Morando, E. Høg, J. Kovalevsky, L. Lindegren and F. Mignard.* The Hipparcos solar system objects catalogues//A&A, 334, 325-336. 1998.

ASTROMETRIC POSITIONS OF URANUS OBTAINED FROM CCD-OBSERVATIONS WITH PULKOVO NORMAL ASTROGRAPH DURING 2006-2011

Dement'eva A.A.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of the RuAS

Equatorial coordinates of Uranus are presented. These coordinates have been obtained from astrometric CCD-observations made with Pulkovo Normal astrograph (D/F = 0.33m/3.5m, CCD S2C, FOV 18'x16') during 2006–2011. Astrometric positions of Uranus have been calculated relative to UCAC3 catalogue. (O-C) residuals have been obtained with “Natural satellites service”. Observational coordinates were compared with ones calculated from two theories: INPOP10 and DE414/LE414. The magnitude equation has been taken into account.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ОБСЕРВАТОРИИ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

Левкина П.А.¹, Бахтигараев Н.С.¹, Сергеев А.В.², Чазов В.В.³

¹*Институт Астрономии РАН (ИНАСАН)*

²*Терскольский филиал ИНАСАН*

³*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга*

В работе приведены результаты наблюдений фрагментов космического мусора вблизи геостационарной орбиты в 2012 году. Наблюдения проводились на комплексе двухметрового телескопа Zeiss-2000 Терскольской обсерватории. Представлены результаты обработки наблюдательных данных: экваториальные координаты объектов, изменения их блеска и отношения площади к массе. Приводятся улучшенные элементы орбит объектов и их эволюция. Кроме того, были исследованы фрагменты космического мусора на орбитах работающих спутников (класс опасных объектов).

Введение

Информация о состоянии околоземной космической среды необходима не только для её безопасного освоения и эксплуатации, но и для оценки её текущей экологической ситуации. Основное отличие неработающих спутников и фрагментов космического мусора (КМ) от действующих аппаратов – это неконтролируемое движение по орбите, которое необходимо отслеживать также в целях безопасности человеческой деятельности в космосе. Системам контроля космического пространства удаётся отслеживать далеко не весь даже крупноразмерный космический мусор [1]. Многие фрагменты КМ в силу особенностей их орбит теряются и выпадают из каталогов. Их необходимо искать заново, что удаётся зачастую лишь с помощью специальных наблюдательных средств.

На Терскольском филиале ИНАСАН в период с 19 мая по 2 июня и с 1 по 14 сентября 2012 года были проведены оптические наблюдения фрагментов КМ.

Основными объектами наблюдений в период с 19 мая по 2 июня были высокоорбитальные малоразмерные фрагменты космического мусора. В период с 1 по 14 сентября были осуществлены плановые наблюдения объектов на высоких орбитах, в том числе опасных объектов на орбитах работающих аппаратов.

За 12 наблюдательных ночей:

- произведены наблюдения 62 объектов;
- получено около 3000 положений;
- определены параметры орбиты для 28 объектов;
- вычислены эмпирические коэффициенты отношения средней площади объекта к его массе (C_T) для 24 объектов.

Наблюдения осуществлялись на комплексе телескопа Zeiss-2000, с помощью программного модуля CameraControl [2]. Обработка полученных изображений проводилась с помощью программного комплекса Apex II [3]. CameraControl и Apex II разработаны в Пулковской обсерватории РАН. Исследования физических и орбитальных характеристик фрагментов космического мусора проведены с помощью программного комплекса, созданного на основе численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли и адаптированного для исследований космического мусора [4, 5].

Исследование физических и орбитальных характеристик объектов

Анализ звёздной величины исследуемого объекта позволяет нам делать выводы о свойствах его вращения, о форме и размерах фрагмента.

На рис. 1-3 на примере объекта № 90195 приведены кривые блеска по полученным наблюдательным данным в сентябре 2012 года. Объект наблюдался в течение трёх ночей, снимался долгими сериями с экспозицией 1 секунда через 7 секунд. На рис. 1-3 представлены различные отрезки наблюдательного времени из данных по трём ночам. Хорошо видно изменение блеска на $\sim 2^m$ в течение ночи, обусловленное осевым вращением объекта и особенностями его формы. Эксцентриситет объекта мал, порядка 0.006, таким образом, изменение блеска не связано с орбитальным движением фрагмента. Оценки звёздной величины на графиках (рис. 1-3) представлены с точностью 0.1^m .

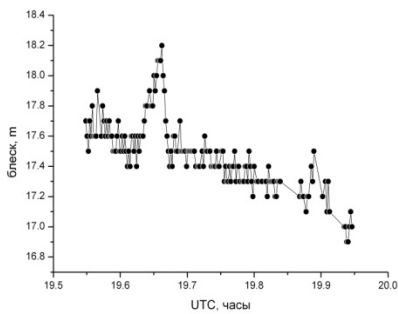


Рис. 1.

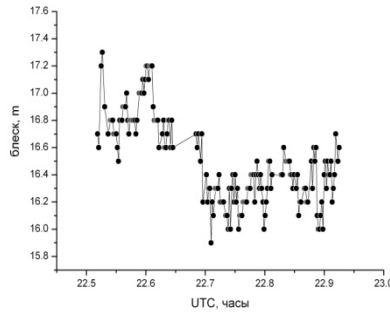


Рис. 2.

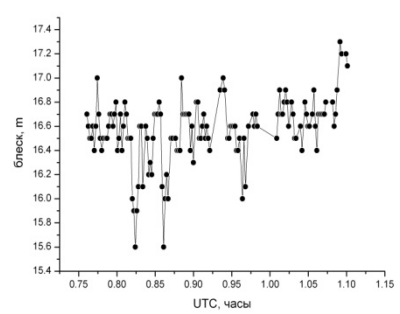


Рис. 3.

По наблюдательным данным была уточнена орбита объекта, и вычислена эволюция элементов орбиты, определённых из наблюдений, до 2016 года (рис. 4).

На рис. 4 по оси абсцисс показано время прогноза до 1 января 2016, по оси ординат: a – большая полуось, e – эксцентриситет орбиты, ω – аргумент перигея, λ – географическая долгота, i – угол наклона, Ω – долгота восходящего узла.

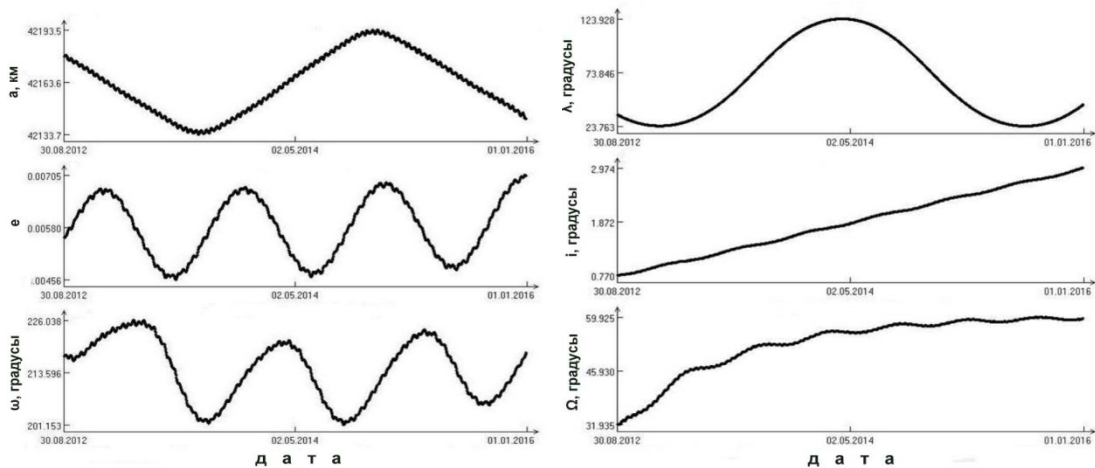


Рис. 4.

Наблюдения на орбитах с большими эксцентриситетами, проходящих через геостационарную область, предпринимаемые мировым сообществом, привели к открытию объектов с большим отношением площади к массе (ОПМ) [6, 7]. К таким объектам относятся, в частности, куски термической обшивки космических аппаратов.

Влияние давления солнечной радиации на такие объекты на высоких орбитах приводит к плохо прогнозируемым изменениям их элементов орбит. Необходимо посто-

янный контроль за подобными искусственными объектами, что также является предметом наших исследований.

В табл. 1 приведены объекты с большими значениями оценок C_r , которые наблюдались на ТФ ИНАСАН в 2012 году. Большими оценками ОПМ будем считать оценки, превышающие $0.50 \text{ м}^2/\text{кг}$. В табл.2 приведены параметры орбит объектов со значениями коэффициентов C_r менее $0.50 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В представленных таблицах:

№ - номер объекта в каталоге ИПМ им. М.В. Келдыша, a – большая полуось, e – эксцентриситет орбиты, i – угол наклона, Ω – долгота восходящего узла, N – число положений, σ – средняя квадратическая погрешность (СКП) в секундах дуги, C_r – оценка отношения средней площади к массе.

Таблица 1.

№	a (км)	e	i (°)	Ω (°)	N	σ (")	C_r ($\text{м}^2/\text{кг}$)
43213	42186.890	0.040534	7.4648	324.3375	49	0.34	1.76
90023	40131.768	0.051023	11.7130	336.6470	92	0.76	2.49
95480	43464.900	0.167151	1.6273	105.5963	41	0.38	7.35
95539	42713.688	0.086430	6.8084	330.5871	63	0.41	3.68
95698	42787.188	0.033237	15.0265	339.0291	47	0.37	1.67
95706	42233.463	0.023662	14.5074	337.9205	29	0.20	5.71

Таблица 2.

№	a (км)	e	i (°)	Ω (°)	N	σ (")	C_r ($\text{м}^2/\text{кг}$)
43183	42538.624	0.009730	15.4442	351.9025	85	0.62	0.055
90009	42277.885	0.003268	14.4899	342.2471	153	0.20	0.017
90022	42169.658	0.005246	14.3277	341.7777	77	0.68	0.159
90073	42158.158	0.006659	2.5374	74.7910	97	1.45	0.042
90114	42178.143	0.002180	14.4477	5.7956	43	0.35	0.031
90126	42181.866	0.004735	14.3781	341.8366	63	0.51	0.207
90139	43371.225	0.029385	16.9638	355.3374	55	0.28	0.067
90158	42147.814	0.001324	14.6567	350.6526	47	0.31	0.017
90195	42180.703	0.005585	0.7745	31.9563	137	0.90	0.091
95406	42174.261	0.001492	14/5346	350.8275	37	0.43	0.139
95567	42143.210	0.008143	15.5557	351.0215	58	0.35	0.029

Оценка СКП координат объектов определена из разностей между всеми точками наблюдений и вычисленными значениями. Для минимизации этой величины необходим большой объём наблюдений и хорошее представление этих наблюдений с помощью параметров орбиты.

Внутренняя точность наблюдений

На рис. 5 приведены невязки по прямому восхождению (слева) и склонению (справа), вычисленные для объекта № 90195. Невязки получены после обработки коротких наблюдательных серий (около десяти минут) как разность между наблюдёнными и вычисленными значениями координат (О-С). Средняя квадратическая погрешность по прямому восхождению составила $0.14''$, по склонению – $0.12''$. Средняя точность наших наблюдений составляет $\sim 0.15''$. Это соответствует точности звёздного каталога USNO-B1.0 (порядка 0.20), который мы используем при обработке изображений.

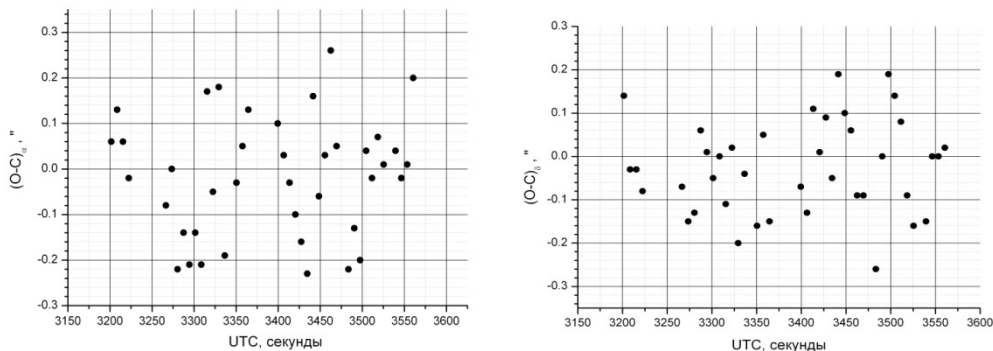


Рис. 5.

На рис. 6 показана точность наблюдений объекта в сентябре 2012 года. На графике нанесены невязки (O-C) в секундах дуги по прямому восхождению (сверху) и склонению (снизу) для 23 объектов в 1344 положениях.

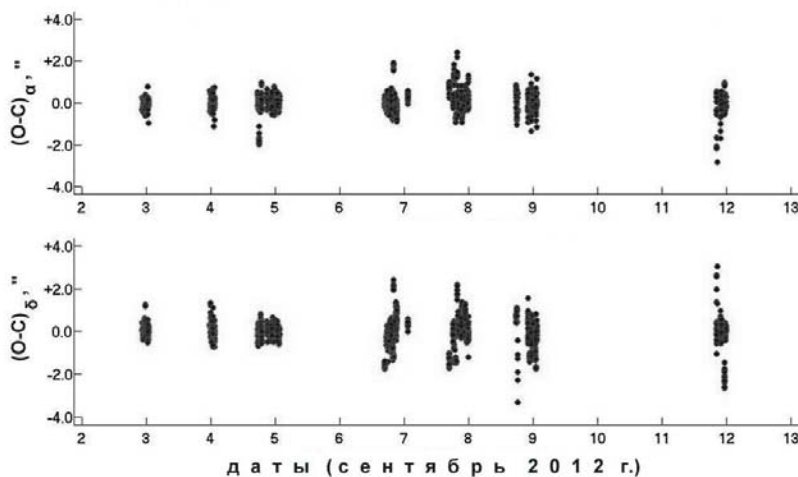


Рис. 6.

Исследование опасных объектов

В 2012 году проводились плановые наблюдения объекта № 90073, орбита которого проходит на высоте работающих искусственных спутников Земли (непосредственно вблизи геостационарной орбиты - 42160 км), и движение которого может служить угрозой их работоспособности.

На рис. 7-8 приведены фазовые кривые объекта, построенные по данным наблюдений в 2012 году. Видна хорошая зависимость звездной величины от величины фазы – блеск слабеет с увеличением фазового угла. Это позволяет сделать вывод о том, что форма объекта близка к сферической.

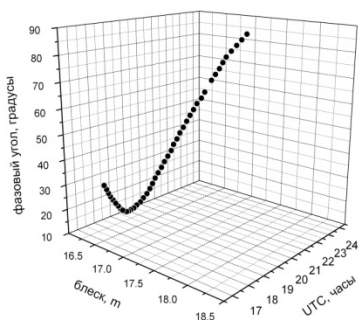


Рис. 7.

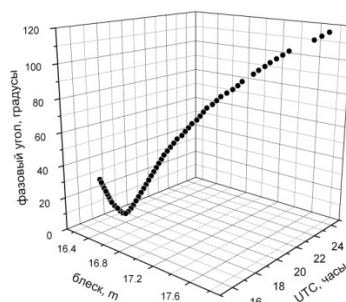


Рис. 8.

Объект № 90073 стабильно наблюдается со времени обнаружения, и впервые за всё время наблюдений значительно ослаб к маю 2012 года. Нами было получено достаточное количество наблюдательных данных этого объекта, чтобы можно было сделать вывод о значительном изменении в эволюции его орбиты в этом году. После обработки изображений было выявлено ослабление блеска на ~ 2.5 звёздной величины.

На основе предыдущих наблюдений был сделан прогноз на 2012 год для элементов орбиты объекта № 90073 (рис. 9). Майские наблюдения уже значительно отличались от этих предвычисленных величин. После наблюдений в сентябре был сделан обратный прогноз (рис. 10), который существенно отличался от ранее выполненных измерений положения объекта № 90073. При сравнении орбит было выявлено существенное колебание значения эксцентриситета.

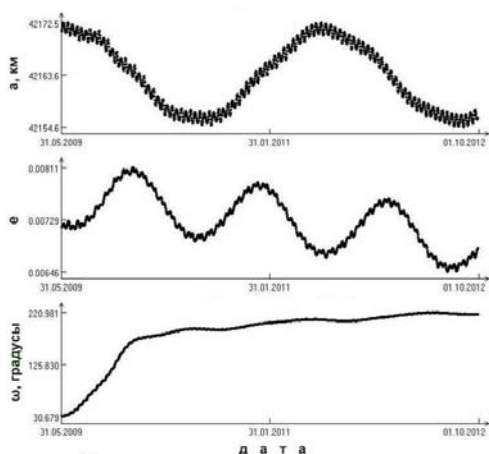


Рис. 9.

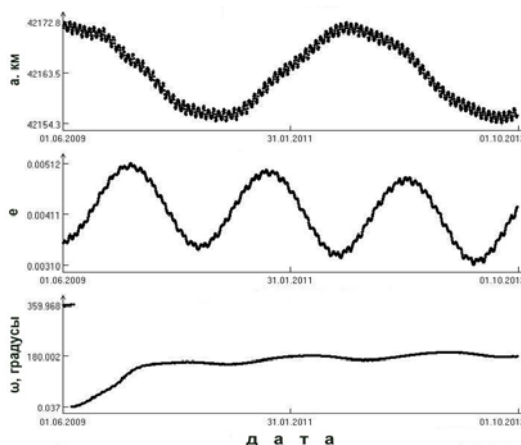


Рис. 10.

Были посчитаны остаточные уклонения для объекта 90073 по данным наблюдений в мае-июне (рис. 11) и в сентябре 2012 г. (рис. 12). Если в мае-июне отклонение орбиты от ранее предвычисленных значений ещё находится в грубом допуске, то в сентябре наблюдения значительно отличаются от эфемерид.

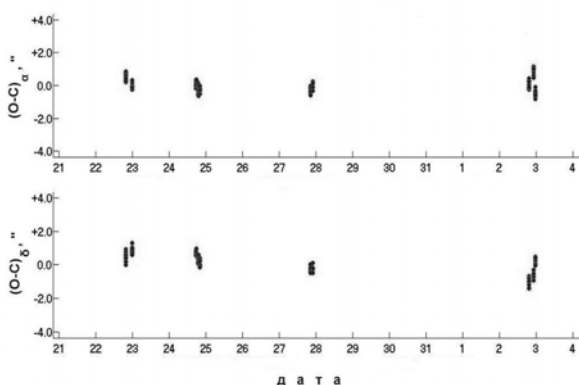


Рис. 11.

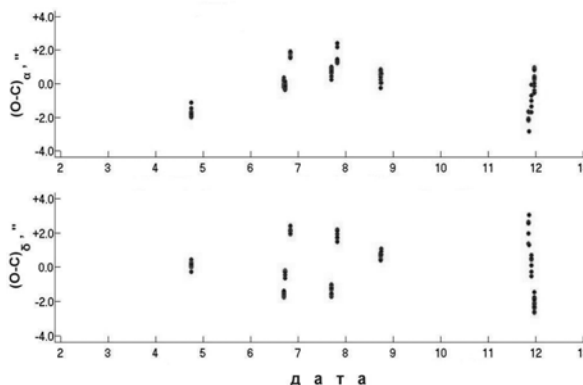


Рис. 12.

В ночь с 11 на 12 сентября при хорошем небе невязки значительно превышают допустимые значения. Выявлено значительное отклонение величины эксцентриситета, полученной по наблюдениям ранее, от новой величины e . Вследствие чего можно допустить, что объект испытал столкновение с другим телом, что повлекло за собой изменение его орбитальных характеристик. Есть основания полагать, что столкновение произошло так же с фрагментом космического мусора.

Во избежание потери объекта требуются новые наблюдения для постоянного уточнения его характеристик.

Заключение

За 12 наблюдательных ночей на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН в 2012 году во время сеансов наблюдений космического мусора было получено более 3000 положений для 62 объектов. Для 28 объектов были определены параметры орбиты, для 24 объектов вычислены эмпирические коэффициенты отношения площади к массе.

Проведены наблюдения фрагментов космического мусора, орбиты которых находятся в зоне работающих спутников Земли, и относятся к категории опасных объектов.

Представленные результаты наблюдений неизвестных фрагментов используются для поддержания и обновления каталога космического мусора. Полученные наблюдения также вносят свой вклад в моделирование состояния околоземного космического пространства и являются основанием для подробного исследования движения отдельных объектов на околоземной орбите.

Литература

1. *Ting Wang*. Analysis of Debris from the Collision of the Cosmos 2251 and the Iridium 33 Satellites. *Science and Global Security*. 2010. Vol. 18. No.2. P. 87-118.
2. *Русаков О.П., Куприянов В.В.* Устройство для синхронизации наблюдений со службой точного времени GPS на базе модуля «Trimble Resolution T». // Сб. докл. Международной конференции «Наблюдение околоземных космических объектов», Звенигород, 2007.
3. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., et al.* Apex I and Apex II Software Packages for the Reduction of Astronomical CCD Observations // *Solar System Research*. 2010. Vol. 44. No. 1. P. 68–80.
4. *Чазов В.В.* Создание численно-аналитической теории движения небесных тел. // В сб.: "Околоземная астрономия - 2003". СПб, ВВМ, 2003. С. 171 - 175.
5. *Бахтигараев Н.С., Чазов В.В.* Информационное обеспечение космических экспериментов на основе численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли. // *Космические исследования*. Т. 43, №5. 2005. С. 386-389.
6. *Schildknecht T. et al.* The ESA Survey for Space Debris in GEO and Highly Elliptical Orbits, 22nd IADC WG1 presentation, 2004.
7. *Liou J.-C., Weaver J.K.* Orbital Evolution of GEO Debris with Very High Area-to-Mass Ratios, *Orbital Debris Quarterly News*, Vol.8, Issue 3, 2004.

RESULTS OF PHOTOMETRIC AND POSITIONAL OBSERVATIONS OF SPACE DEBRIS AT THE TERSKOL OBSERVATORY

Levkina P.A.¹, Bakhtigaraev N.S.¹, Sergeev A.V.², Chazov V.V.³

¹*Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences (INASAN)*

²*Terskol branch of INASAN*

³*Sternberg Astronomical Institute Moscow State University*

This paper is devoted to results of space debris' observations on the geostationary region in 2012. Optical surveys were performed by the two-meter telescope Zeiss-2000 of Terskol observatory. Orbital elements of objects, their brightness and area-to-mass ratios are determined. The improved orbital elements of fragments and their evolution are presented. In addition we investigated of space debris fragments on the operational satellites orbits (dangerous objects class).

ОПТИЧЕСКИЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ С ГРУППОЙ ЗВЕЗД В ОКРЕСТНОСТИ ЗВЕЗДЫ HD87481

Липовка Н.М., Липовка А.А.

Центр физических исследований, Университет Соноры, Эрмосийо, Мексика

Выполнены отождествления оптических и радиоисточников в окрестности звезды HD87481. Обнаружено, что координаты радионеба, исследуемой площадки, сдвинуты относительно его оптического изображения. На площадке размером 0.7 кв градуса отождествилось семь радиоисточников со звездами ярче 11^m , что составило 63% от общего количества радиоисточников, расположенных на исследуемой площадке. Центральный яркий радиоисточник отождествился со звездой HD87481. Радиорефракция в межзвездной среде в окрестности исследуемых объектов оценивается в 3.5^s по прямому восхождению и менее 10^s по склонению.

1. Введение

Для изучения радио и оптических свойств объектов в широком диапазоне длин волн, основополагающим является получение оптических отождествлений радиоисточников. Однако используемый в настоящее время метод привязки радионеба к оптическому по немногочисленному списку опорных радиоисточников [1, 2] привел к тому, что большая часть радиоисточников не отождествляется с их оптическими аналогами и попадает в пустое поле на карте в оптическом изображении неба (проблема Empty Field). Таким образом, задача привязки радионеба к оптическому небу до сих пор не решена.

Первые попытки выполнить оптические отождествления радиоисточников по стандартной астрометрической методике, были предприняты нами в 1985–1990 годах при помощи блинк-компаратора в INAOE (Мексика). Привязка производилась к звездам каталога FK5 с точностью $\pm 1.5''$. Мы обнаружили, что большая часть радиоисточников не имеет оптического аналога [3, 4]. В процессе дальнейших исследований было обнаружено, что причина несовпадения небесных радиообъектов с объектами, видимыми в оптическом диапазоне длин волн, заключалась в несовершенстве метода привязки источников радиоизлучения к оптическим небесным объектам. Для исправления ситуации нами был предложен и успешно используется в настоящее время метод ЛКЛ привязки [5] небесных радиоисточников непосредственно к оптическим объектам, в результате применения которого количество радиоисточников, отождествленных с оптическими объектами, увеличилось в десятки раз [6–10].

Причины неточной привязки радионеба к оптическому небу подробно рассмотрены в работе [8]. По разработанной методике нами были обследованы несколько тысяч площадок обзора неба на частоте 1400 МГц [1] размером один квадратный градус. Наши исследования по оптическим отождествлениям [6–9, 14] показали, что большая часть радионеба некорректно привязана к оптическому небу, что звезды тоже радиоизлучают, вопреки существующим представлениям о том, что радиоизлучение преимущественно исходит от далеких, активных галактик и квазаров [1]. Оказалось, что большинство радиоисточников отождествляются со звездами.

Вплоть до настоящего времени считалось, что разреженная плазма, заполняющая космическое пространство, не влияет на распространение электромагнитного излучения в радио диапазоне. Как следствие, излучение в радио считается не испытывающим рефракции, и искажения траектории радио волн отсутствуют при прохождении через космическое пространство. Однако сделанные нами оптические отождествления косвенно показали, что в космическом пространстве существует радиорефракция, ко-

торая зависит от градиента плотности межзвездной среды, температуры, степени ионизации и от удаленности небесного объекта [11–13].

2. Радиоизлучение звезд

При привязке радионеба к оптическому небу по общепринятой методике [1, 2] на исследуемом участке неба (рис 1) [18] размером $RA \times DEC = 5^m \times 34'$ ни один радиоисточник не отождествился с оптическим объектом. При использовании нашего метода отождествления [5] оказалось, что семь наиболее ярких звезд на исследуемой площадке отождествляются с радиоисточниками в пределах точности измерений радиокоординат и искажений, вносимых радиорефракцией в космическом пространстве. Однако координаты радиоисточников значительно смещены относительно объектов, с которыми они отождествляются в оптическом диапазоне длин волн.

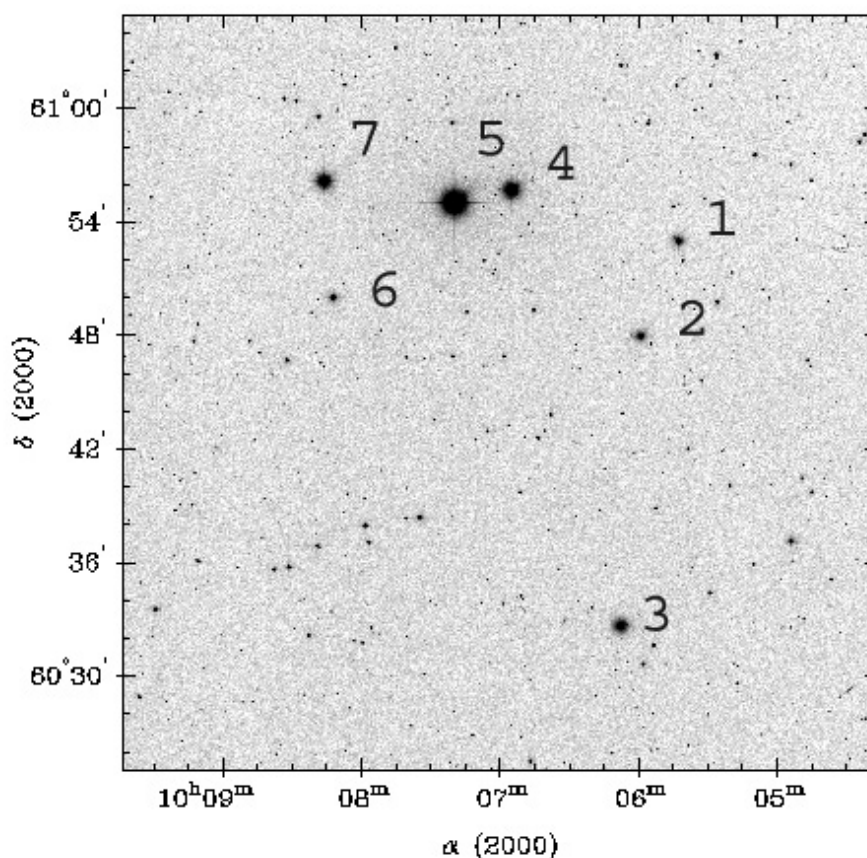


Рис 1. Изображение исследуемого участка неба по Паломарским картам.

Оптические отождествления проводились по высокоинформационному обзору обсерватории NRAO [1], выполненному на частоте 1400 МГц и помещенному в сети Интернет для общего пользования, а так же по обзору Паломарской обсерватории [18] с использованием оцифровки Паломарских карт методом Майкла Ирвина (M. Irvin) [17].

Координаты радиоисточников на эпоху J2000 и плотность потоков представлены в табл. 1 (столбцы 2, 3, 4) по данным полученным в радиодиапазоне [1, 15]. Координаты радиоисточников, исправленные за привязку к оптическому небу, представлены в столбцах 5, 6.

Столбцы: 1 – порядковый номер, 2 – прямое восхождение радиоисточника, 3 – склонение радиоисточника, 4 – плотность потока в Ян, 5 – исправленное прямое вос-

хождение радиоисточников за привязку к оптическому небу, 6 – исправленное склонение радиоисточников, 7 – спектральные индексы для радиообъектов.

Таблица 1.

№	RA(J)	DEC(J)	Поток	RA(J)	DEC(J)	α
1	2	3	4	5	6	7
	h m s	° ' "	Ян	h m s	° ' "	
1	10 04 54.599	+60 59 30.34	0.0126	10 05 37.5	+60 52 30.3	0.2
2	10 05 16.03	+60 54 28.16	0.0052	10 05 59.0	+60 47 28.1	
3	10 05 38.752	+60 40 22.51	0.0084	10 06 16.7	+60 33 22.0	0.6
4	10 06 07.313	+61 03 13.77	0.0038	10 06 47.3	+60 56 13.6	
5	10 06 38.946	+61 02 28.26	0.0091	10 07 16.9	+60 55 28.2	1.0
6	10 07 32.0	+60 57 30.0	<0.0025	10 08 10.0	+60 50 30.0	
7	10 07 27.665	+61 03 14.5	0.0025	10 08 10.6	+60 56 11.5	

В табл. 2 приведены характеристики ярких звезд на эпоху J2000 по данным [17], которые обозначены номерами №1–7, как и на рис. 1.

Таблица 2.

№	RA(J)	DEC(J)	R[mag]	Ellipse parms
1	2	3	4	5
	h m s	° ' "	m	
1	10 05 37.96	+60 52 22.0	9.45	54.4 0.17
2	10 05 57.50	+60 47 29.2	9.39	55.4 0.11
3	10 06 15.06	+60 32 17.1	10.02	50.6 0.25
4	10 06 48.71	+60 55 37.9	9.47	53.5 0.12
5	10 07 16.39	+60 55 31.1	11.05	80.2 0.68
6	10 08 09.72	+60 50 37.0	10.26	42.3 0.07
7	10 08 10.53	+60 56 48.4	9.67	58.9 0.35

Столбцы: 1 – порядковый номер звезды в соответствии с рис 1, 2 – прямое восхождение звезды, 3 – склонение звезды, 4 – звездная величина, 5 – параметры эллипса.

Исследуемые звезды (рис. 1) делятся на две группы по величине поправки к радиокоординатам за счет привязки радионеба к оптическому небу. Поправка по привязке радиоисточников № 1, 2, 4, 7 (табл. 1, столбцы 2, 3) к звездам № 1, 2, 4, 7 (табл. 2, столбцы 2, 3) составила по прямому восхождению $\Delta RA = 41.5^s$ и по склонению $\Delta DEC = -7'10''$ (с учетом знака поправки).

Поправка по привязке радиоисточников № 3, 5, 6 (табл. 1, столбцы 2, 3) к звездам № 3, 5, 6 (табл. 2, столбцы 2, 3) составила по прямому восхождению $\Delta RA = 38^s$ и по склонению $\Delta DEC = -7'$ (с учетом знака поправки). Центральный яркий радиоисточник №5 (табл. 1, столбцы 5, 6) отождествился со звездой HD87481 [16], (№5, табл. 2, столбцы 2, 3). Таким образом на исследуемой площадке (рис. 1) с радиоисточниками отождествились 7 звезд ярче 11^m (100% звезд) и 7 радиоисточников, что составило 63% от общего количества радиоисточников, расположенных на исследуемой площадке.

Следует отметить, что правильность предлагаемого оптического отождествления подтверждают многочисленные отождествления слабых радиоисточников, (которые не числятся в радиокаталоге [15]) со слабыми звездами, однако эти отождествления в данной работе не рассматриваются.

Погрешность привязки координат радиоисточников к оптическим объектам на исследуемом участке неба составила $\pm 1.5^{\circ}$ по прямому восхождению и $\pm 10''$ по склонению.

Разные поправки для двух групп звезд № 1, 2, 4, 7 и № 3, 5, 6 мы интерпретируем как факт различной удаленности исследуемых групп звезд от наблюдателя и наличия радиорефракции возникающей на неоднородностях, существующих в межзвездной среде между этими группами звезд.

В заключение отметим, что на исследуемом участке неба радиорефракция составила $3,5^{\circ}$ по прямому восхождению и $10''$ по склонению.

3. Спектры радиоисточников

Спектральные индексы в радиодиапазоне ($P \sim \nu^{-\alpha}$) для отождествленных звезд были вычислены по опубликованным радионаблюдениям на частотах 325 и 327 мГц [19, 20] и по данным, полученным на частоте 1400 мГц [1].

Известно, что в метровом диапазоне длин волн большие искажения в координатные измерения вносит ионосфера Земли [21], поэтому для привязки координат радионаблюдений на частотах 325 и 327 мГц [19, 20] использовался метод привязки по спутникам GPS [19].

Если привязка измерений 325 и 327 мГц к измерениям на частоте 1400 мГц [1] выполнена правильно [19], то тогда можно определить спектральные индексы для ряда радиоисточников в указанном выше интервале частот. Вычисленные спектральные индексы для трех радиоисточников представлены в табл. 1, столбец 7. Еще три радиоисточника имеют нетепловой спектр в указанном выше интервале частот, однако мы затрудняемся указать соответствующий им компонент в оптике из-за обилия слабых далеких оптических объектов на площадке. Кроме того эти три объекта могут представлять собой лепестки от сильных радиоисточников расположенных на соседних площадках в окрестности исследуемой площадки.

4. Заключение

Наши исследования показали, что оптические отождествления радиоисточников необходимо выполнять непосредственно привязкой к оптической Астрометрической системе координат в пределах первого лепестка диаграммы направленности радиоинтерферометра с соблюдением яркостного и морфологического соответствия в радио и оптическом диапазоне длин волн. Следует подчеркнуть, что для осуществления правильной привязки радиоизлучающей области к оптическому небу необходимо иметь не менее трех опорных объектов в оптическом диапазоне длин волн в пределах первого лепестка диаграммы направленности радиоинтерферометра. Такую плотность объектов могут обеспечить только фундаментальные астрометрические каталоги звезд $5^m - 14^m$.

Вопрос о правильной привязке радионеба к оптическому небу в настоящее время является наиболее актуальным для всех отраслей астрономии: астрометрии, звездной астрономии, радиоастрономии, небесной механики, астрофизики и геодезии.

Правильное оптическое отождествление радиоисточников открывает широкие возможности для исследования характеристик межзвездной среды, определения удаленности небесных объектов, исследования физических характеристик звезд и диффузных объектов (галактик) в широком диапазоне длин волн. Все это важно для познания характеристик и эволюции Вселенной.

Благодарности

Авторы благодарят обсерваторию NRAO и ее штат, всех тех, кто выполнил обзор неба на волне 21 см и поместил его в Интернет для общего пользования. Так же благо-

дарят Паломарскую обсерваторию и ее штат за Паломарский обзор неба и Майка Ирвина (M. Irvin) за оцифровку оптических карт неба.

Авторы обращаются со словами глубокой благодарности за постоянную поддержку, способствовавшую выполнению данной работы, к Караевой В.Г., Полякову Е.В., Канаеву И.И., Быковской Н.Б., Чубею М.С., Толчельниковой С.А. и Кияевой О.В.

Литература

1. *Condon J.J., Cotton W.D., Greisen E.W. et al.* The NRAO VLA Sky Survey. *Astron. J.* 1998. V. 115, 1693–1716, (<http://www.cv.nrao.edu/NVSS/>)
2. International Celestial Reference Frame — «Международная небесная опорная система» <http://rorf.usno.navy.mil/ICRF2/>
3. *Чавира-Наваррете Э., Кияева О. В., Липовка Н. М., Липовка А. А.* Методика проведения оптических отождествлений на приборах типа блинк-компаратора. Препринт № 81 Специальной астрофизической обсерватории РАН СПб, 1992.
4. *Чавира-Наваррете Э., Липовка Н.М., Липовка А.А.* Оптические положения 748 слабых диффузных объектов и галактик в окрестности радиоисточников RC-каталога. Препринт № 88 Специальной астрофизической обсерватории РАН СПб, 1993
5. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Способ привязки координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат. ЛКЛ (англ LKL). Патент на изобретение №2010107938/28(011185) 2011.
6. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Привязка радиоизлучения неба к оптическим объектам в окрестности скопления галактик A2956. Труды конгресса-2010 «Фундаментальные проблемы естествознания и техники» 2010, Часть 1, 400.
7. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* К вопросу о привязке радионеба к оптическому небу. *Астрономический календарь*, 2010, 145, Санкт Петербург.
8. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Метод привязки координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат. *Геодезия и картография*, 2010, № 12, 6–11.
9. *Липовка Н.М., Липовка А.А.* Радиоизлучение звезд проецирующихся на скопление галактик A3487. *Астрофизика*, 2011, т. 54, выпуск 3, 415–421.
10. *Липовка Н.М., Липовка А.А.* Значение оптических отождествлений для изучения природы небесных объектов и механики звездных систем. Международная конференция «Седьмые Окуневские чтения», 20–24 июня 2011, Санкт-Петербург, Россия.
11. *Lipovka A.A., Lipovka N.M.* The end of the «Empty Field» epoch in optical identifications. *Molecules in Space and Laboratory, the meeting held in Paris, France, May 14–18, 2007.* Editors: J.L. Lemaire, F. Combes. Publisher: S. Diana., p. 26.
12. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Радиорефракция в Галактике. Конец кризиса в оптических отождествлениях. Труды Всероссийской астрономической конференции (ВАК-2007), с. 339, Казань: Изд-во. Казанского государственного университета. – 536 с.
13. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Радиорефракция в межзвездной среде. *Фундаментальные проблемы естествознания и техники.* 2008, с.33, С.-Петербург.
14. *Липовка А. А., Липовка Н. М.* Оптические отождествления радиоисточников в окрестности объекта ICRF J002914.2+345632. *Геодезия и картография* 2012, №2, 11–15.
15. *Verkhodanov O. V. et al.* The CATS database to operate with astrophysical catalogs. In «Astronomical Data Analysis Software and Systems VI». Editors: Gareth Hunt and H. E. Payne ASP Conference Series, 1997, 125, 322–325.
16. UCAC, <http://ad.usno.navy.mil/ucac/>
17. *Irvin M.*, 1998 <http://www.ast.cam.ac.uk/~mike/apmcat/>
18. DSS, <http://cadwww.dao.nrc.ca/cadcbin/>
19. *Erickson W.C., Perley R.A., Flatters C., and Kassim N.E.* Ionospheric corrections for VLA observations using Local GPS data *A&A* 2001, 366, 1071-1080.
20. *Rengelink R.B., Tang Y., de Bruyn A.G., Miley G.K., Bremer M.N., Roettgering H.J.A., & Bremer M.A.R.* The Westerbork Northern Sky Survey (WENSS). *A&AS*, 1997, 124, 259 -280.
21. *Komesaroff M.M.* 1960, *Aust. J. Phys.* 13, 153

**OPTICAL IDENTIFICATIONS OF RADIO SOURCES WITH A GROUP
OF STARS IN VICINITY OF THE HD87481 STAR**

Lipovka N.M., Lipovka A.A.

CIFUS, Universidad de Sonora, Hermosillo, Mexico

Identifications of optical and radio sources in a vicinity of HD87481 star are suggested. It is discovered that coordinates of the radio sky in the field under investigation, are shifted in respect to its optical image. At the plate of the size of 0.7 square degrees, seven radio sources were identified with stars brighter 11^m , that consist of 63% of the radio sources from the plate. The central bright radio source was identified with HD87481 star. The radio refraction due to the interstellar medium in vicinities of studied objects is estimated as 3.5^s on a right ascension, and less than $10''$ on declination.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК КАТАЛОГОВ КООРДИНАТ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В. Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Оценка случайных ошибок каталогов важна для многих задач, таких как оценка качества каталогов и вычисление весов при составлении сводных каталогов. Внутренние ошибки координат, приводимые авторами каталогов, нередко бывают существенно заниженными по сравнению с их реальной точностью. Кроме того, эти ошибки вычисляются разными авторами разными методами, что затрудняет сопоставление точности каталогов, которое необходимо, например, для их статистически обоснованного взвешивания. Поэтому астрометристы стремятся к разработке более объективных методов оценки случайных ошибок каталогов. Один из распространенных методов решения этой задачи основывается на анализе попарных разностей каталогов с помощью соотношения $\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\sigma_i\sigma_j r_{ij}$, где σ_i и σ_j – искомые среднеквадратические ошибки координат источников в двух каталогах, σ_{ij} – среднеквадратическая ошибка разностей координат источников в этих каталогах, r_{ij} – коэффициент корреляции между ошибками каталогов. Имея три каталога и, соответственно три приведенных разностных уравнения, мы можем их решить относительно ошибок сравниваемых каталогов. Этот метод обеспечивает теоретически правильный результат для трех сравниваемых каталогов с некоррелированными ошибками ($r_{ij}=0$), чего, обычно, не бывает на практике. Поэтому необходимо уметь оценивать корреляции между ошибками каталогов. Важно также обобщить метод для произвольного числа каталогов, больше трех. В настоящей работе мы рассмотрели один из возможных методов решения этой задачи.

Введение

При сравнении каталогов координат звезд или радиоисточников и построении из сводных каталогов большое значение имеет корректная оценка случайных ошибок каждого каталога. Проблема заключается в том, что мы в этом случае можем вычислить только статистику *разностей* координат в разных каталогах, и полученные оценки дисперсии и другие статистические оценки будут зависеть от ошибок обоих каталогов. Такие задачи приходится решать не только в астрометрии. Наверное, наиболее распространенным примером может служить определение нестабильности стандартов частоты на основе изучения разностных сигналов между ними. Для последнего случая и был впервые предложен так называемый "Three-cornered hat" (ЗСН) метод [1]. Он получил впоследствии широкое распространение при исследовании шумовых характеристик различных сигналов в различных областях науки и техники, в том числе и в астрометрии для исследования, например, рядов параметров вращения Земли и каталогов координат радиоисточников.

Однако, несмотря на широкое распространение метода ЗСН, далеко не все вопросы его практического применения решены удовлетворительным образом. Главной проблемой остается оценка корреляций между исследуемыми рядами или каталогами, без чего в большинстве случаев невозможно получить надежные (а иногда и просто разумные) оценки ошибок сравниваемых каталогов (рядов). Надо заметить, что при использовании этого метода нередко авторы пренебрегают этими корреляциями, что существенно ослабляет доверие к полученным результатам. Но в последнее время этому вопросу уделяется должное внимание, хотя задача еще очень далека от окончательного решения. В настоящей работе мы предлагаем новый подход к определению корреляций между каталогами, который может дополнить существующие методы.

ЗСН метод

В исходной формулировке ЗСН метод применяется к трем сериям (рядам) измерений (в общем случае это могут быть и каталоги положений звезд или радиоисточников), сделанным в одни и те же моменты времени. Сначала для этих серий вычисляются серии попарных разностей для каждого момента (для каталогов – разности положений одних и тех же объектов). Эти измерения могут быть сделаны и не одновременно, а в близкие моменты, если изучаемые сигналы достаточно стабильны, т.е. их изменения за время, соответствующее разности эпох измерений, малы по сравнению с дисперсией сравниваемых данных. Затем для каждой серии разностей измерений вычисляется дисперсия. Если серии не коррелированы, справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\sigma_{12}^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2, \\ \sigma_{13}^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_3^2, \\ \sigma_{23}^2 &= \sigma_2^2 + \sigma_3^2,\end{aligned}\tag{1}$$

где левые части представляют собой вычисленные дисперсии разностей серий измерений, а в правых частях стоят дисперсии исходных рядов, которые легко находятся из решения системы (1):

$$\begin{aligned}\sigma_1^2 &= (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2) / 2, \\ \sigma_2^2 &= (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{13}^2) / 2, \\ \sigma_3^2 &= (\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{12}^2) / 2.\end{aligned}\tag{2}$$

Для произвольного числа серий измерений $M > 3$ система (1) состоит из $M(M-1)/2$ уравнений вида

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2,\tag{3}$$

и имеет следующее решение [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_i^2 &= \frac{1}{M-2} \left(\sum_{j=1}^M \sigma_{ij}^2 - B \right), \\ B &= \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M \sigma_{kj}^2, \\ \sigma_{ii}^2 &= 0, \quad \sigma_{ij}^2 = \sigma_{ji}^2.\end{aligned}\tag{4}$$

Однако эти простые формулы решают задачу только для случая некоррелированных сигналов, который представляется чисто теоретическим. На практике мы, как правило, имеем дело с коррелированными данными. Причины этого многообразны. В случае стандартов частоты корреляции чаще всего объясняются изменениями окружающей среды в помещении, где они находятся (обычно метод ЗСН применяется для часов одной службы времени). В случае каталогов координат радиоисточников, которые являются предметом настоящего исследования, корреляция результатов обусловлена, в первую очередь тем, что все центры анализа используют один и тот же набор наблюдений, а нередко также одно и то же программное обеспечение.

Пренебрежение корреляциями между сравниваемыми данными делает решения (2) или (4) статистически необоснованными. Более того на практике нередки случаи, когда дисперсии получаются отрицательными.

Для реальных (коррелированных) данных исходная система будет состоять из уравнений вида

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j.\tag{5}$$

В данном случае система является недоопределенной, т.е. содержит больше неизвестных, чем уравнений, и не имеет однозначного решения. В работе [3] предложен способ решения системы (5) в применении к определению нестабильности стандартов частоты для случая малых корреляций. Этот метод имеет и другие ограничения. Так он требует выделения одного стандарта как опорного, с которым сравниваются остальные. Кроме того, решение получается неоднозначным, а только позволяет выделить некоторый интервал возможных значений ковариационной матрицы, а значит и искомым дисперсий входных данных. Степень неопределенности уменьшается при увеличении числа сравниваемых стандартов. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах [4,5], но с теми же ограничениями.

Прямым и более привлекательным методом решения задачи была бы оценка корреляций ρ_{ij} между сравниваемыми данными каким-либо независимым способом, что, собственно и является ключевой проблемой корректного применения метода ЗСН. Один из возможных подходов к вычислению такой оценки приводится ниже.

Применение к каталогам координат радиисточников

Применение метода ЗСН к определению случайных ошибок каталогов радиисточников рассмотрено в ряде работ сотрудников ГАО НАНУ [6,7]. Авторы рассматривают несколько модификаций метода, но все они основаны на анализе разностей изучаемых каталогов с комбинированным (сводным) каталогом. Во всех случаях рассматривается сравнение трех каталогов. Кроме этого ограничения, результат вычислений очевидным образом зависит от метода построения сводного каталога, включая метод взвешивания исходных каталогов. От последнего зависит, насколько близок будет сводный каталог к тому или иному исходному, и, следовательно, этот фактор будет существенно влиять на вычисляемые корреляции.

Мы здесь рассматриваем дальнейшее развитие метода и предлагаем его модификацию, не требующую выделения какого-либо каталога как опорного и пригодную для произвольного числа каталогов, большего трех. Собственно говоря, точность вычисления повышается с увеличением числа используемых каталогов.

Вычисления по предлагаемому здесь методу производятся следующим образом. Сначала из всех каталогов выбираются общие источники. Дальнейшие вычисления производятся с этими редуцированными каталогами. Для определения корреляции между двумя каталогами i и j сначала вычисляются их разности для всех источников с каким-либо третьим каталогом сравнения k . Таким образом получают наборы разностей Δ_{ik} и Δ_{jk} . Потом вычисляется корреляция между этими наборами $Corr(\Delta_{ik}, \Delta_{jk})$. Такая операция повторяется со всеми остальными каталогами, т.е. для $k = 1, \dots, n, k \neq i, j$, где n – число каталогов. Все разности по прямому восхождению умножаются на $\cos \delta$. Среднее значение $Corr(\Delta_{ik}, \Delta_{jk})$ по всем k является искомой оценкой ρ_{ij} .

В этой работе мы использовали семь каталогов координат радиисточников, доступных в центре данных Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии IVS (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/vlbi/ivsproducts/crf/>): aus008a, bkg001a, gsf008a, iaa008c, ma008a, ora008b, usn010b. Описания каталогов находятся там же.

Результаты вычислений приведены в табл. 1. Имена каталогов, соответствующих индексам i и j , приведены в первой колонке. Каталоги, соответствующие индексу k – в заголовке колонок со второй по предпоследнюю; в ячейках данных этих колонок приведены значения $Corr(\Delta_{ik}, \Delta_{jk})$. В последней колонке приведено их среднее значение (оценка ρ_{ij}). Во всех ячейках с результатами вычислений верхняя строка относится к прямому восхождению, нижняя к склонению.

Таблица 1. Корреляции между каталогами.

Catalogs	AUS	BKG	GSF	IAA	MAO	OPA	USN	Mean
AUS BKG	—	—	0.0259 -0.0807	0.1870 0.1533	0.1199 0.0604	0.0057 -0.1081	0.0159 0.1137	0.0709 0.0277
AUS GSF	—	-0.1868 -0.2932	—	0.2932 0.3056	0.1493 0.1381	-0.0173 -0.1742	0.0302 0.1392	0.0537 0.0231
AUS IAA	—	-0.1723 -0.1807	-0.0909 0.0087	—	0.1013 0.0346	0.0414 -0.0723	0.0533 0.1498	-0.0134 -0.0120
AUS MAO	—	-0.1934 -0.2939	-0.1408 -0.1606	-0.3258 -0.3361	—	0.0470 0.0500	0.0709 0.2325	-0.1084 -0.1016
AUS OPA	—	-0.2004 -0.3461	-0.1317 -0.3034	-0.3114 -0.3820	-0.1720 -0.2157	—	0.0565 0.2801	-0.1518 -0.1934
AUS USN	—	-0.2059 -0.2208	-0.1595 -0.0670	-0.3318 -0.2261	-0.1929 -0.1303	-0.0722 0.0389	—	-0.1925 -0.1211
BKG GSF	0.8861 0.9473	—	—	0.6182 0.6901	0.7319 0.7355	0.2891 0.4078	0.5264 0.6137	0.6103 0.6789
BKG IAA	0.6918 0.8501	—	-0.2146 -0.2247	—	0.5439 0.5640	0.2419 0.3013	0.3826 0.6202	0.3291 0.4222
BKG MAO	0.9338 0.9182	—	-0.0243 -0.0233	-0.4356 -0.3848	—	0.0391 0.1063	0.3737 0.5263	0.1773 0.2285
BKG OPA	0.9553 0.9503	—	-0.0305 0.0832	-0.5838 -0.6311	-0.7074 -0.6825	—	0.5047 0.6572	0.0277 0.0754
BKG USN	0.9546 0.9278	—	-0.2769 0.0039	-0.5805 -0.4490	-0.7059 -0.5252	-0.3158 -0.0821	—	-0.1849 -0.0249
GSF IAA	0.8597 0.9131	0.5391 0.5375	—	—	0.5383 0.5779	0.1396 0.2329	0.4398 0.5475	0.5033 0.5618
GSF MAO	0.8623 0.9239	0.6230 0.6336	—	-0.7176 -0.6057	—	0.0242 0.1718	0.6252 0.5734	0.2834 0.3394
GSF OPA	0.8373 0.9452	0.9463 0.9414	—	-0.9694 -0.9484	-0.9470 -0.9336	—	0.9209 0.7672	0.1576 0.1544
GSF USN	0.8316 0.9255	0.6626 0.6911	—	-0.8019 -0.6795	-0.8209 -0.7137	-0.2426 -0.1620	—	-0.0742 0.0123
IAA MAO	0.6505 0.8170	0.4284 0.5258	0.1595 0.2652	—	—	0.1563 0.2925	0.4145 0.6425	0.3618 0.5086
IAA OPA	0.5894 0.7985	0.5490 0.5379	0.1041 0.0826	—	-0.5286 -0.5622	—	0.4546 0.6848	0.2337 0.3083
IAA USN	0.5863 0.7879	0.4369 0.4039	0.1708 0.0351	—	-0.5239 -0.4554	-0.1777 -0.0732	—	0.0985 0.1396
MAO OPA	0.9584 0.9535	0.6547 0.6377	0.2196 0.1491	0.7408 0.6094	—	—	0.6601 0.7115	0.6467 0.6122
MAO USN	0.9499 0.9236	0.3558 0.4239	-0.0876 -0.0393	0.5303 0.3668	—	0.1123 0.0297	—	0.3721 0.3409
OPA USN	0.9904 0.9679	0.6570 0.6950	0.1234 0.2910	0.7943 0.6641	0.8014 0.7044	—	—	0.6733 0.6645

Результаты, приведенные в таблице, содержат много данных для дальнейшего анализа. Приведем здесь только некоторые предварительные выводы:

- корреляции между каталогами для прямого восхождения и склонения близки между собой; это соответствует результатам других авторов [6, 7];
- различия между величинами $Corr(\Delta_{ik}, \Delta_{jk})$, вычисленными для разных k , в целом соответствуют среднеквадратической разности каталогов сравнения;
- в полученных результатах не просматривается явной зависимости корреляций от используемого программного обеспечения, чего можно было ожидать.

Что касается последнего пункта, каталоги BKG, GSF, OPA и USN получены с пакетом Calc/Solve, а три остальные каталога с разными другими пакетами.

Заключение

Метод ЗСН, первоначально предложенный для исследования нестабильности стандартов частоты, позволяет, в принципе, при наличии нескольких стандартов определить дисперсию вариаций частоты каждого из них по дисперсиям разностей отсчетов между стандартами. Этот метод также применяется для определения случайных ошибок астрономических рядов измерений и каталогов положений звезд или радиоисточников. Однако реальные оценки шумовой составляющей отдельного стандарта (ряда, каталога), как правило, могут быть получены только при учете корреляций между исходными данными. Без этого получаемые оценки дисперсий нередко получаются нерелистичными, а нередко даже отрицательными.

В настоящей работе предложен новый метод оценивания корреляции между каталогами радиоисточников, применимый при большом числе сравниваемых каталогов. Корреляция между каждыми двумя каталогами радиоисточников находится как среднее значение между корреляциями разностей этих двух каталогов с каждым из остальных.

Зависимость результатов от числа каталогов не исследовалась, но из общих соображений корреляции между каталогами должны определяться тем точнее, чем больше каталогов используется. Этот вопрос еще нуждается в дополнительном исследовании. Другой важный вопрос, подлежащий исследованию, как влияют на результаты систематические разности между каталогами. Эти, как и прочие затронутые выше вопросы, предполагается изучить более детально на следующих этапах работы, в том числе с использованием разных наборов исходных каталогов, вычисляемых в различных центрах обработки РСДБ-наблюдений.

Литература

1. Gray J.E., Allan D.W. A method for estimating the frequency stability of an individual oscillator. In: Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control, May 1974, 243–246.
2. Riley W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1065, July 2008.
3. Tavella P., Premoli A. Estimating the instabilities of N clocks by measuring differences of their readings. Metrologia, 1994, V. 30, 479–486.
4. Torcaso F., Ekstrom C.R., Burt and E.A., Matsakis D.N., Estimating Frequency Stability and Cross-Correlations, In: Proc. 30th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, 1998, 69–82.
5. Galindo F.J., Palacio J. Estimating the instabilities of N correlated clocks, 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, USNO, Washington DC, 2000, 285–296.
6. Molotaj O.A., Tel'Nyuk-Adamchuk V.V., Yatskiv Ya.S. Celestial reference frame RSC (GAOUA) 98 C 01. Кинемат. физ. неб. тел., 1998, v. 14, 393–399.
7. Болотин С.Л., Литвин С.О. Сравнение сводных каталогов RSC (GAOUA) 05 C 03 и RSC (PUL) 06 C 02 с реализацией международной небесной системы отсчета ICRF. Кинемат. физ. неб. тел., 2010, v. 26, 31–42.

ON ASSESSMENT OF THE STOCHASTIC ERRORS OF SOURCE POSITION CATALOGS

Malkin Z. M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Correct estimate of the random errors of the catalogs is important for many tasks, such as catalog comparison, computation of the weights of the catalogs during combination, etc. Formal uncertainties of the source positions provided in the catalog are generally substantially smaller than the real position accuracy. Moreover, these uncertainties are computed using different methods, which makes it difficult to make a correct comparison of the catalogs. For this reason, astrometrists strive to develop and use more objective methods for the assessment of the catalog position errors. One of the widely used method for this task is the method called "N-cornered hat". It is based on the pair catalog comparison, for which we can write $\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\sigma_i\sigma_j r_{ij}$, where σ_i и σ_j are the position errors in two catalogs, σ_{ij} is the error of the differences between source positions in two catalogs, r_{ij} – correlation coefficient between the position errors in two catalogs. Having three catalogs and three pairs of differences, one can solve the system of three equations to solve for σ_i . This method provides a theoretically correct result only in the case of uncorrelated errors ($r_{ij}=0$), which is usually not the case in practice. Hence, we should have a possibility to estimate the correlations between catalogs. It is also important to generalize the method for arbitrary number of catalogs greater than 3. In this paper, one of possible approach to solve this task is considered.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТЕРОИДОВ (857) GLASENAPPIA, (2323) ZVEREV, (3504) KHOLSHEVNIKOV

Петрова С.Н., Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Верещагина И.А., Львов В.Н.
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

На двух телескопах ГАО РАН (ЗА-320М и МТМ-500М) проведены наблюдения астероидов Главного пояса: (857) Glasenappia, (2323) Zverev и (3504) Kholshchevnikov. Обработка наблюдений выполнена с помощью программных пакетов АПЕКС-II и ЭПОС. На основе полученных данных и данных с сайта MPC уточнены элементы орбит астероидов. Построены кривые блеска астероидов. Уточнены периоды осевого вращения астероидов (857) Glasenappia и (2323) Zverev. Период осевого вращения астероида (3504) Kholshchevnikov впервые определен с помощью частотного анализа ряда наблюдений.

С целью исследования астероидов главного пояса (857) Glasenappia, (2323) Zverev и (3504) Kholshchevnikov в период с 26.01.2012 по 30.03.2012 были проведены фотометрические и астрометрические наблюдения на двух автоматизированных телескопах ГАО РАН.

Астероид (857) Glasenappia (A916S33 = A906 FF = A913 MF = 1953 YC = 1958 НК) был открыт 6 апреля 1916 года С.И.Белявским в обсерватории Симеиз (Украина). Назван в честь Сергея Павловича Глазенапа (25 сентября 1848 г. — 12 апреля 1937 г.) — российского (советского) астронома, члена-корреспондента АН СССР. С.П.Глазенап был инициатором создания и руководителем строительства обсерватории Петербургского университета, а также одним из организаторов Русского астрономического общества и его председатель в 1893-1906 гг. и в 1925-1929 гг.

Астероид (2323) Zverev (1951 GP = 1960 WK = 1965 SW = 1965 UF1 = 1976 SF2) был открыт 24 сентября 1976 года Н.С.Черных в Крымской астрофизической обсерватории (Украина). Астероид был назван в честь Митрофана Степановича Зверева (16 апреля 1903 г. — 17 ноября 1991 г.) — советского астронома, астрометриста, члена-корреспондента АН СССР (1953 г.). М.С.Зверев с 1951 г. по 1971 г. работал заместителем директора Пулковской обсерватории; одновременно читал лекции по астрономии в Ленинградском университете. С 1970 г. был заведующим кафедрой астрономии. Организовал и был участником астрометрической экспедиции в Чили (1962–1973 гг.), составил ряд звездных каталогов, в том числе Предварительный фундаментальный каталог слабых звезд.

Астероид (3504) Kholshchevnikov (1981 RV3 = 1959 TN = 1975 RH2 = 1980 KT1 = 1980 LD1) был открыт 3 сентября 1981 года Н.С.Черных в Крымской астрофизической обсерватории (Украина). Астероид назван в честь профессора Константина Владиславовича Холшевникова (род. 19 января 1939 г.) — заведующего кафедрой небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, заслуженного деятеля науки, академика РАН.

Обработка наблюдений

Наблюдения выполнялись на телескопах ЗА-320М ($D = 320$ мм, $F = 3200$ мм, расположен в Пулковской обсерватории) и МТМ-500М ($D = 500$ мм, $F = 4100$ мм, расположен на Горной астрономической станции ГАО РАН на высоте 2100 м над уровнем моря). Телескопы оборудованы ПЗС-камерами и фильтрами *BVRI*.

Обработка наблюдений, производилась при помощи двух созданных в Пулковской обсерватории программных пакетов: для обработки астрометрических и фотометрических наблюдений был использован полностью автоматический программный пакет АПЕКС-II [1], а для оценки точности этих наблюдений по *O–C* использовалась про-

грамма ЭПОС [2]. В Таблице 1 $(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ — среднее значение $O-C$ по прямому восхождению, приведённое к экватору, $\sigma_{\alpha} \cos \delta$ — ошибка одного наблюдения по прямому восхождению, $(O-C)_{\delta}$ — среднее значение $O-C$ по склонению, σ_{δ} — ошибка одного наблюдения по склонению.

Таблица 1. Оценка точности астрометрических наблюдений астероидов.

Астероид (телескоп)	Кол-во набл.	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha} \cos \delta$	$(O-C)_{\delta}$	σ_{δ}
857 (ЗА-320М)	235	+0".11	$\pm 0".17$	+0".01	$\pm 0".14$
2323 (ЗА-320М)	161	-0".10	$\pm 0".11$	-0".08	$\pm 0".11$
3504 (ЗА-320М)	212	-0".05	$\pm 0".16$	+0".09	$\pm 0".16$
3504 (МТМ-500М)	81	+0".06	$\pm 0".16$	+0".08	$\pm 0".14$

Улучшение орбит

Попытки уточнения орбит на основе полученных астрометрических наблюдений производилось с помощью программы ORBIMPR [3], разработанной в Пулковской обсерватории. Для улучшения орбит астероидов были привлечены данные с сайта MPC, содержащие 1343 наблюдений из разных обсерваторий мира для астероида (857) Glasenappia [4], 1066 наблюдений — для астероида (2323) Zverev [5] и 1266 наблюдений — для астероида (3504) Kholshchikov [6]. К этим данным были добавлены наши наблюдения, их количество для каждого астероида приведено в табл. 1. В табл. 2, 3, 4 приведены полученные уточнённые величины орбитальных элементов.

Таблица 2. Уточнение элементов орбиты астероида (857) Glasenappia на эпоху J2455100.5.

Элементы	Начальные	Улучшенные	Поправка	Ср. кв. ошибка опр. поправки
M , (°)	192.780396	192.780489	0.000093	0.0000329
ω , (°)	238.922257	238.922124	-0.000133	0.0000629
Ω , (°)	83.000147	83.000203	0.000056	0.0000552
i , (°)	5.299131	5.299147	0.000016	0.0000053
e	0.08814481	0.08814471	-0.00000010	0.000000062
a , (а.е.)	2.190695240	2.190695237	-0.000000003	0.0000000037
q	1.997596824	1.997597031		

Ошибка единицы веса до улучшения орбиты составляла 0".534, а после улучшения стала 0".530, то есть имеется незначительное улучшение.

Таблица 3. Уточнение элементов орбиты астероида (2323) Zverev на эпоху J2455600.5.

Элементы	Начальные	Улучшенные	Поправка	Ср. кв. ошибка опр. поправки
M , (°)	349.13290	349.13283	-0.00004	0.00002
ω , (°)	98.06949	98.06957	0.00008	0.00006
Ω , (°)	5.44990	5.44982	-0.00008	0.00006
i , (°)	4.644220	4.644199	-0.000021	0.000006
e	0.14990060	0.14990035	-0.00000025	0.00000005
a , (а.е.)	3.137183500	3.137183550	0.00000005	0.000000016
q	2.666917811	2.666918641		

Ошибка единицы веса до улучшения орбиты составляла $0''.762$, а после улучшения стала $0''.760$, то есть имеется незначительное улучшение.

Таблица 4. Уточнение элементов орбиты астероида (3504) Kholshchevnikov на эпоху J2455100.5.

Элементы	Начальные	Улучшенные	Поправка	Ср. кв. ошибка опр. поправки
M , (°)	110.803670	110.803672	0.000002	0.0000216
ω , (°)	165.486238	165.486156	-0.000082	0.0001861
Ω , (°)	118.859517	118.859555	0.000038	0.0001849
i , (°)	2.047295	2.047291	-0.000004	0.0000056
e	0.18077272	0.18077315	0.00000043	0.000000071
a , (а.е.)	3.099084150	3.099084270	0.000000120	0.0000000200
q	2.538854279	2.538853048		

Ошибка единицы веса до исправления орбиты составляла $0''.686$, а после исправления стала $0''.703$, то есть улучшений не имеется.

Кривые блеска астероидов

В данной работе период осевого вращения определялся методами частотного (спектрального) анализа, а именно методом CLEAN [7] и методом Скаргла [8].

Для астероида (857) Glasenappia кривая блеска, приведённая на рис. 1, построена по данным, полученным в течение 5 наблюдательных ночей в период с 26 января по 5 февраля 2012 года. По данным сайта JPL (на декабрь 2011 года) период осевого вращения астероида равен 8.23 часа [9]. По результатам наших наблюдений получен период 8.230 ± 0.003 часа. То есть, никаких изменений касательно периода в ходе работы выявить не удалось. Амплитуда колебаний блеска составляет $0.16^m \pm 0.05^m$.

Для астероида (2323) Zverev кривая блеска, представленная на рис. 2, была построена по данным наблюдений, полученных в течение 3 наблюдательных ночей, в период с 28 января по 15 февраля 2012 года. По информации с сайта JPL (на декабрь 2011 года), период должен быть равен 3.921 часа [10]. По результатам наших наблюдений был получен период, равный 3.882 ± 0.002 часа. Амплитуда колебаний блеска равна $0.21^m \pm 0.05^m$.

Для астероида (3504) Kholshchevnikov кривая блеска, которая приведена на рис. 3, была построена по данным, полученным не только на телескопе ЗА-320М, но и на МТМ-500М, в ходе 6 наблюдательных ночей в период с 12 марта по 30 марта 2012 года. На сайтах JPL, MPC и в других источниках не содержится никакой информации о периоде осевого вращения этого астероида, поэтому его предстояло определить. Частотный анализ наблюдательных данных позволил установить, что период равен 4.720 ± 0.002 часа. Амплитуда колебаний блеска составляет $0.20^m \pm 0.07^m$.

Интерпретация фотометрии астероидов

В рамках данной работы также были проведены наблюдения в фильтрах BVRI. Из-за недостаточно благоприятных погодных условий, на телескопе ЗА-320М не удалось выполнить наблюдения в фильтре В. Для астероида (3504) Kholshchevnikov наблюдения в фильтрах удалось выполнить только на телескопе МТМ-500М.

В результате сравнения спектральной кривой астероида (3504) Kholshchevnikov, полученной по наблюдениям в полосах BVRI (см. табл. 5), со спектральными кривыми классификации по Толлену, приведёнными в статье [11], удалось установить, что

наиболее близко спектральная кривая этого астероида соответствует классу F, для которого характерны значения альбедо 0.04–0.09.

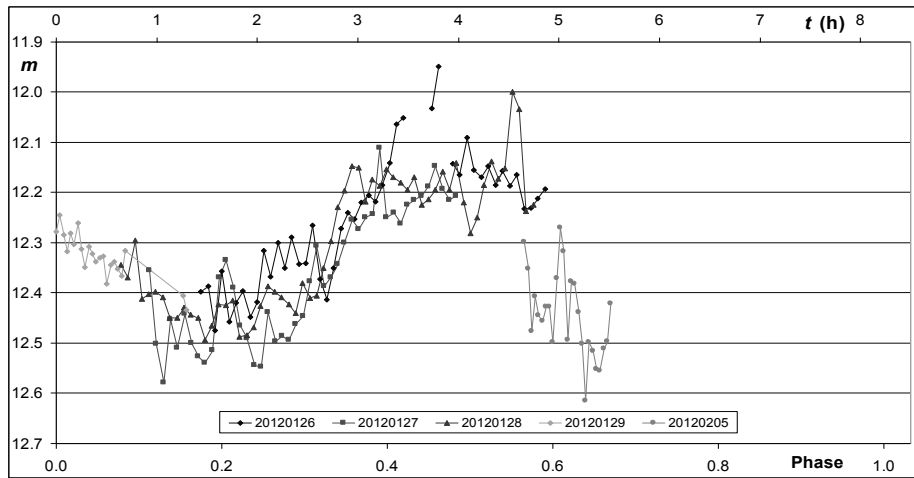


Рис. 1. Кривая блеска астероида (857) Glasenappia с периодом 8.230 ч.

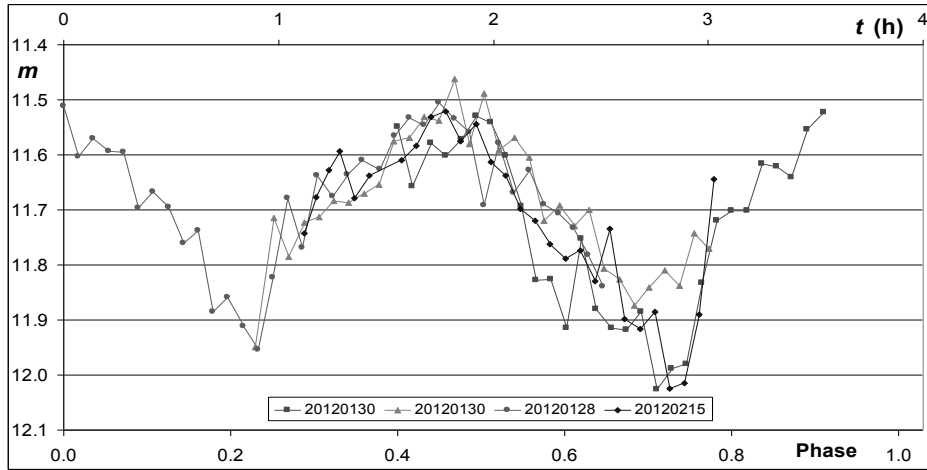


Рис. 2. Кривая блеска (2323) Zverev с периодом 3.882 ч.

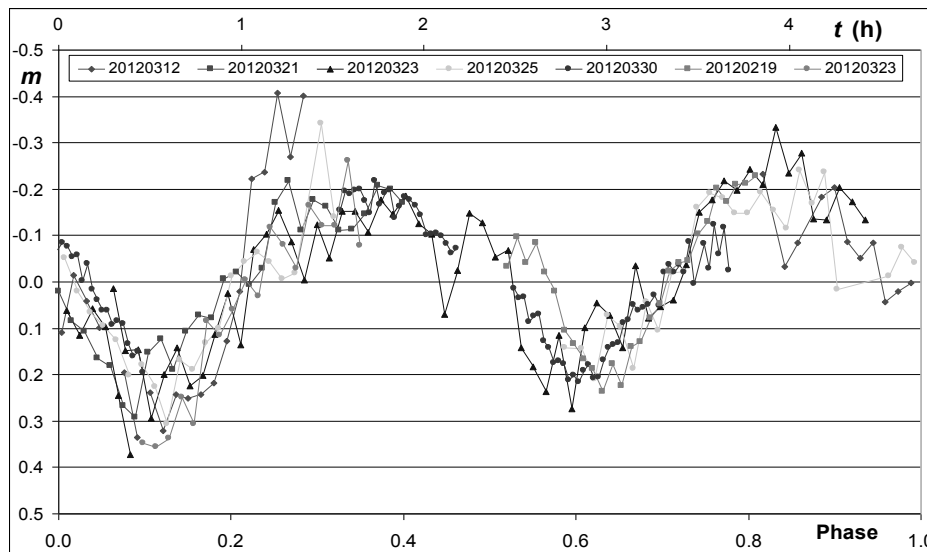


Рис. 3. Центрированная кривая блеска астероида (3504) Kholshchikov с периодом 4.720 ч.

Таблица 5. Показатели цвета избранных астероидов.

Астероид	$B-V$ (JPL)	$B-V$	$V-R$	$R-I$
857	0.63 ± 0.20	—	0.53 ± 0.09	0.28 ± 0.02
2323	—	—	0.33 ± 0.10	0.46 ± 0.07
3504 (MTM-500M)	—	0.32 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.10 ± 0.03

Для оценки эквивалентного диаметра астероида (т.е. диаметра в предположении, что объект является сферическим) из наблюдений существует соотношение

$$\lg(D) = 3.122 - 0.5\lg(p) - 0.2H, \quad (1)$$

где D — эквивалентный диаметр объекта, p — альbedo, H — абсолютная звездная величина [12].

Таким образом, для астероида (3504) Kholshchevnikov удалось вычислить возможные величины его диаметра: он может составлять от 20.2 км до 30.3 км. Данные величины получены при крайних значениях альbedo для астероидов класса F. Из частотного анализа ряда наблюдений была получена амплитуда изменения блеска Δm , связанного с осевым вращением астероида. Зная амплитуду, можно сделать грубую оценку отношения размеров астероида. Предположим, что форма астероида — трехосный эллипсоид с полуосями a , b , c , где c — наименьшая полуось, соответствующая наименьшей оси инерции, вокруг которой происходит вращение объекта. При осевом вращении объекта его блеск меняется за счет того, что $a \neq b$ и астероид поворачивается к наблюдателю то одной, то другой своей стороной. При наблюдениях с Земли трехосный эллипсоид в проекции на плоскость, нормальную к лучу зрения, будет эллипсом. Если $a > b$, то максимальный блеск астероида будет соответствовать площади такого эллипса, равной $2\pi ac$, а минимальный — площади $2\pi bc$. Используя соотношение между звездной величиной и световым потоком, имеем

$$\Delta m = -2.5\lg(2\pi bc/2\pi ac). \quad (2)$$

Из соотношения (2) получаем отношение размеров b/a , которое для астероида (3504) Kholshchevnikov составляет 0.69 ± 0.07 .

Основные результаты

1. Проведены астрометрические и фотометрические наблюдения астероидов (857) Glasenappia, (2323) Zverev и (3504) Kholshchevnikov на автоматических телескопах ГАО РАН ЗА-320М и MTM-500М.
2. Предпринята попытка уточнить орбиты астероидов (857) Glasenappia, (2323) Zverev и (3504) Kholshchevnikov на основе проведённых астрометрических наблюдений.
3. Получены кривые блеска для астероидов (857) Glasenappia, (2323) Zverev и (3504) Kholshchevnikov на основе проведённых фотометрических наблюдений.
4. Проведён анализ кривых блеска, вследствие чего уточнены периоды осевого вращения и амплитуды колебаний блеска для астероидов (857) Glasenappia и (2323) Zverev. Для астероида (3504) Kholshchevnikov впервые был определён период осевого вращения (4.72 часа), таксономический класс (F) и оценены размеры астероида.

Литература

1. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Курриянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-1» и «Апекс-2» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрономический вестник, 2010, том 44, № 1, с. 74-87.

2. L'vov V.N. et al. The use of the Epos software package for research of the Solar System objects // Solar System Research, vol. 46, issue 2, pp. 177-179.
3. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. ЭПОС — эффективный инструмент для исследования и эфемеридной поддержки наблюдений объектов Солнечной системы // Изв. ГАО, 2009, № 219, с. 179-184.
4. http://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=857&page=2
5. http://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=2323&page=2
6. http://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=3504&page=2
7. Витязев В.В. Анализ неравномерных временных рядов // Издательство Санкт-Петербургского университета, 2001, 67 с.
8. Scargle J.D. Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data // Ap.J., 263, 1982, p. 835-853.
9. Lagerkvist C.-I., Bel'skaya I., Erikson A., Schevchenko V. et al. Physical studies of asteroids. XXXIII. The spin rate of M-type asteroids // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 131, 1998, pp. 55-62.
10. Behrend R. // Observatoire de Geneve web site, 2006, http://obswww.unige.ch/~behrend/page_cou.html.
11. C.L.Dandy et al. Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit // Icarus, 163, 2003, pp. 363–373.
12. Виноградова Т.А., Железнов Н.Б., Кузнецов И.К. и др., Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Труды ИПА РАН, вып. 9, 2003, с. 43.
13. Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II // ИЗВ. ГАО, № 217, 2004, с. 505–530.
14. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещagina И.А., Бехтева А.С., Ибрагимов Ф.М. Астрометрические и фотометрические наблюдения тел Солнечной системы на автоматизированном зеркальном астрографе ЗА-320М Пулковской обсерватории // Астрономический вестник, т. 43, № 3, 2009а, с. 1-11.
15. Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б. и др. Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М // Изв. ГАО, № 219, 2009, с. 192-218.
16. Brian D. Warner Initial results from dedicated H-G project // Minor Planet Bulletin 34, 2007.
17. Девяткин А.В., Львов В.Н., Горшанов Д.Л., Верещagina И.А., Куприянов В.В. Астрометрия и фотометрия тел Солнечной системы // В сб. «Астрономические исследования в Пулковке сегодня», под ред. А.В. Степанова, СПб, ВВМ, 2009, с. 278-294.

**ASTROMETRIC AND PHOTOMETRIC INVESTIGATION OF ASTEROIDS
(857) GLASENAPPIA, (2323) ZVEREV, (3504) KHOLSHEVNIKOV**

Petrova S.N., Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Vereshchagina I.A., L'vov V.N.
Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of Russian Academy of Science

Observations of three Main belt asteroids (857) Glasenappia, (2323) Zverev and (3504) Kholshchevnikov were made using two Pulkovo Observatory telescopes ZA-320M and MTM-500M. The APEX-II and EPOS software systems were used to process the observations. Accuracy of the orbital elements of the asteroids was estimated on the basis of obtained observations and MPC data. Light curves of the asteroids were obtained. Axial rotation periods of (857) Glasenappia and (2323) Zverev were specified. Axial rotation period of (3504) Kholshchevnikov was obtained for the first time by means of frequency analysis.

SYNCHROTRON SELF-ABSORPTION AND ABSOLUTE ASTROMETRY OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI

Pushkarev A.B.^{1,2}, Volvach A.E.², Volvach L.N.², Aller H.D.³, Aller M.F.³

¹*Pulkovo observatory, St. Petersburg, Russia*

²*Crimean astrophysical observatory, Nauchny, Ukraine*

³*Department of astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, USA*

We present results of joint analysis of the observational data of active galactic nuclei (AGN) obtained within long-term monitoring programs carried out by means of (i) very long baseline interferometry (VLBI) technique within the Research and Development – VLBA (RDV) project conducted at 8.6 GHz and (ii) the single-dish AGN monitoring campaigns performed at the 22 m (Simeiz) and 26 m (Michigan) radio telescopes covering a frequency range of 4.8-36.8 GHz. We measured the apparent speed of the parsec-scale outflow using the VLBI data, while the time delays of the emission at different frequencies were derived from the monitoring data sets. This allowed us to determine the absolute angular shift caused by synchrotron self-absorption, and to investigate its frequency dependence for the quasar 1334-127 characterized by a high compactness on milliarcsecond scale.

1. Introduction

Opacity effects in nuclear regions of active galactic nuclei can be caused by synchrotron self-absorption in the jet and pressure/density gradients or external absorption from the surrounding medium [1]. Thus, owing to the absorption, the shortest projected distance at which the radio emission at a given frequency is detected, determines the VLBI core size r_{core} , which is frequency dependent and follows the relation $r_{\text{core}} \propto \nu^{-1/k}$ [2], where the power index $k \approx 1$ as derived in [3,4,5]. This indicates that the dominating absorption mechanism acting in AGN parsec-scale outflows is synchrotron self-absorption.

The apparent frequency-dependent shifts of the VLBI core (“core shift” effect) can be measured by a variety of ways: (i) from phase-referencing VLBI observations, (ii) self-referencing by using optically thin compact jet component whose position is achromatic, (iii) applying two-dimensional cross-correlation technique, and (iv) utilizing the total flux density light curves and measuring the time delays between the emission at different frequencies. In this work, we apply the approach (iv) together with measuring the proper motion in the jet by analyzing VLBI observations to derive the absolute angular shifts for the quasar 1334-127.

2. Apparent jet speed from global VLBI observations

To measure the apparent motion in the quasar 1334-127, we used the 8.6 GHz data obtained within a framework of the long-term VLBI project RDV (Research and Development – VLBA). The project started in 1997 under the coordination of NASA and NRAO. The simultaneous observations at 2.3 GHz and 8.6 GHz are carried out bi-monthly, making up five to six sessions per year with the participation of all ten 25 m VLBA antennas and up to ten geodetic stations. The RDV project is still ongoing exceeding by now 90 observational sessions in total.

Initial amplitude and phase calibration was performed in Astronomical Imaging Processing System (AIPS) using techniques adopted for the subarrayed data sets. CLEANing, phase and amplitude self-calibration, hybrid imaging, and structure model fitting using circular/elliptic Gaussian components were performed in the Caltech DIFMAP. Detailed description of these steps of analysis is discussed in [6].

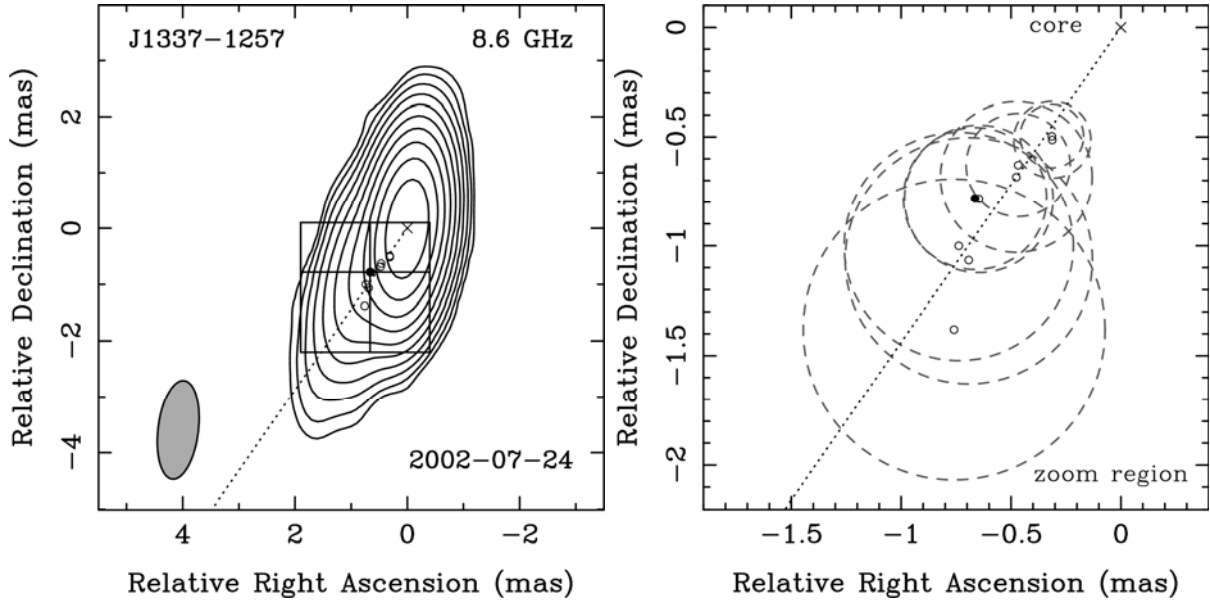


Fig. 1. *Left:* Naturally weighted 8.6 GHz total intensity CLEAN image of 1342-127 at the middle epoch. The contours are plotted at increasing powers of 2, starting from $4.63 \text{ mJy beam}^{-1}$. The peak flux density reaches $4.66 \text{ Jy beam}^{-1}$. The FWHM of the restoring beam is shown as a shaded ellipse in the lower left corner. The box delimits the zoomed region displayed in the right-hand panel. The component's position at the middle epoch is indicated by the cross-hairs. The dotted line originated from the core feature is drawn with the median position angle of the component, whose position at the middle epoch is shown by the filled circle while other epochs are plotted with unfilled circles. *Right:* Zoomed region of the map. Grey dashed circles represent the FWHM sizes of the individual fitted Gaussian components.

In Fig. 1, we plot the 8.6 GHz total intensity map of the quasar 1334-127 at the middle of reduced epochs along with jet component positions with respect to the VLBI core, which is often the brightest and most compact feature in VLBI images of AGN. Being the apparent end of the jet, the VLBI core thus represents the jet region where its optical depth reaches $\tau_\nu \approx 1$ at a given frequency. Fitting the core separation of the jet component depicted in Fig. 2, we measured its proper motion $\mu_{\text{app}} = 0.31 \pm 0.03 \text{ mas yr}^{-1}$ and emergence epoch $t_0 = 1999.14 \pm 0.27$.

3. Time delays from single-dish campaigns

A number of AGN is being observed within a framework of monitoring programs carried out at the 22 m Simeiz and 26 m Michigan University radio telescopes at 22.2, 36.8 GHz and 4.8, 8.0, 14.5 GHz, respectively. To derive time lags between the emission in total intensity registered at different frequencies, we performed cross-correlation analysis using all the available data and interpolating them on the time axis. The nearest to zero maximum of the calculated cross-correlation function determines the time delay of the signal at one frequency with respect to the other. The light curves for 1334-127 at five different radio bands ranging from 4.8 to 36.8 GHz are shown in Fig. 3, and the derived time lags are listed in Table 1. The brightest flare registered at all the frequencies was detected in the beginning of 1999.

Time delays of the radio emission at different frequencies are mainly caused by synchrotron self-absorption mechanism acting in nuclear regions of ultracompact AGN jets as shown in [3, 4], though pressure and/or density gradients or external absorption from the surrounding medium may also contribute to the opacity [1].

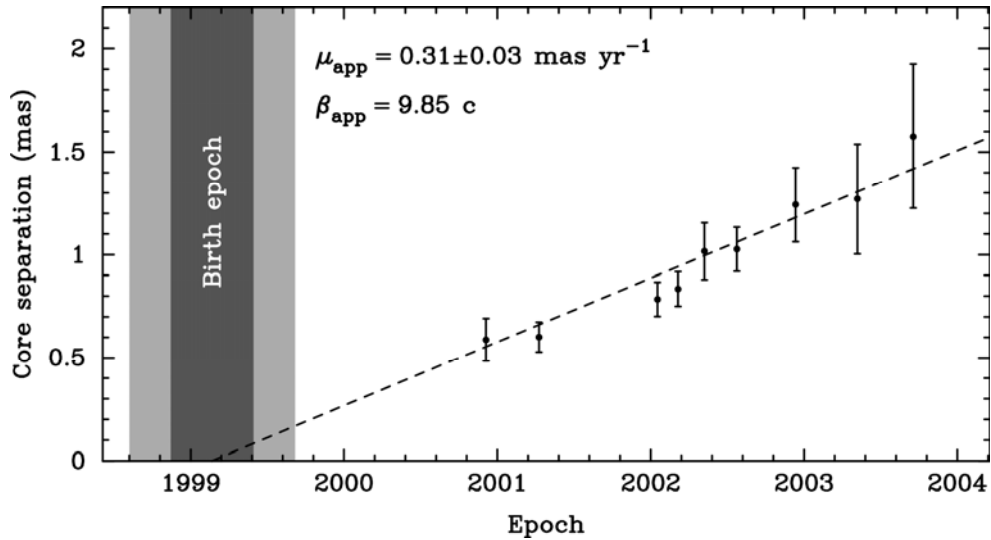


Fig. 2. Angular distance between the core and the fitted Gaussian jet component versus time. The dashed line indicates vector motion fit to the data points assuming no acceleration. Birth epoch is shown with 1σ (dark gray) and 2σ (light gray) regions.

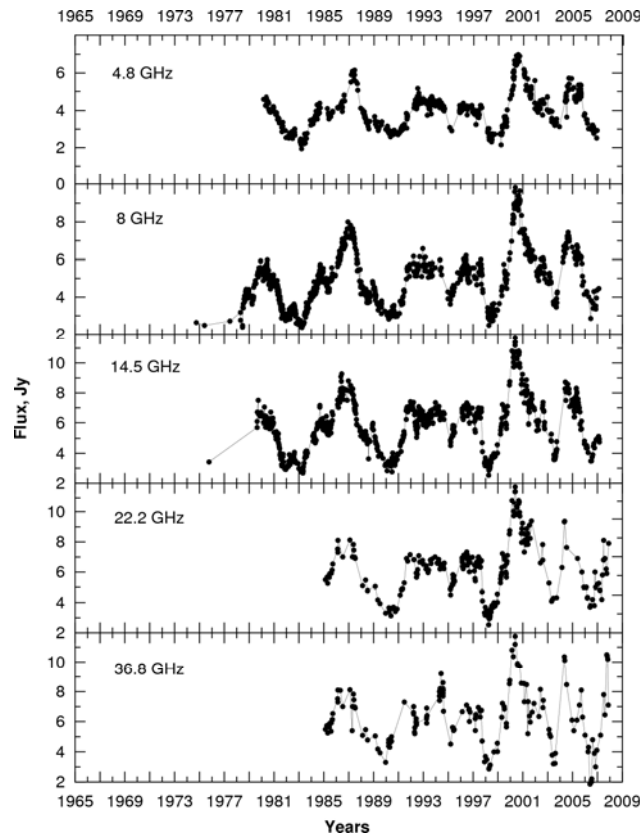


Fig. 3. Total intensity light curves of 1334-127 at 4.8, 8.0, 14.5, 22.2, and 36.8 GHz.

4. Frequency-dependent position shift

The product of the derived time lags and proper motion yields a frequency-dependent position shift of the VLBI core, $\Delta r_{\text{core}, \nu_1 \nu_2} = \Delta t_{\nu_1 \nu_2} \mu_{\text{app}}$. The core shifts for 1334-127 are given in Table 1. The delays for another source, the powerful radio galaxy 3C120, along with the light curves are presented in [8].

Table 1. Core shifts in 1334-127.

Frequency range (GHz)	Time lag (yr)	Core position shift (microarcsec)
4.8 – 8.0	0.133	41.2±3.5
8.0 – 14.5	0.089	26.7±2.3
14.5 – 22.2	0.005	1.5±0.1
22.2 – 36.8	0.049	15.2±1.3

It should be stressed out that the method we used here is especially effective for sources with a high VLBI compactness, i.e. those with lack of optically thin jet emission that makes the proper alignment of VLBI images reconstructed at different frequencies to be problematic either by a 2-D cross correlation technique [7] or by self-referencing achromatic jet components from model fits [3,9].

We also note that for further improvement of the astrometric measurements the whole strategy should be changed from selecting the most compact sources to taking into account source structure. Moreover, the frequency-dependent core shift effect cannot be properly measured for the most compact objects owing to the lack of optically thin, i.e. achromatic, jet emission used as a reference.

Acknowledgements

This work is based on the analysis of global VLBI observations including the VLBA, the raw data for which were provided to us by the NRAO archive. The National Radio Astronomy Observatory is a facility of the National Science Foundation operated under cooperative agreement by Associated Universities, Inc.

References

1. *Lobanov A.P.* Ultracompact jet in active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, V. 330, 79-89.
2. *Blandford R.D., Königl A.* Relativistic jets in compact radio sources. *Astrophysical Journal*, 1979, V. 232, 34-48.
3. *Sokolovsky K.V., Kovalev Y.Y., Pushkarev A.B., Lobanov A.P.* A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. Evidence of dominating synchrotron opacity. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, V. 532, 38-48.
4. *O'Sullivan S.P., Gabuzda D.C.* Magnetic field strength and spectral distribution of six parsec-scale active galactic nuclei jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, V. 400, 26-42.
5. *Hada K., Doi A., Kino M., Nagai H., Hagiwara Y., Kwaguchi N.* An origin of the radio jet in M87 at the location of the central black hole. *Nature*, 2011, V 477, 185-187.
6. *Pushkarev A.B., Kovalev Y.Y.* Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 GHz and 8 GHz. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, V. 544, 34-48.
7. *Pushkarev A.B., Hovatta T., Kovalev Y.Y., Lister M.L., Lobanov A.P., Savolainen T., Zensus J.A.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, V. 545, 113-122.
8. *Volvach A.E., Pushkarev A.B., Volvach L.N., Aller H.D., Aller M.F.* Evolution of flux density and parsec-scale structure of compact extragalactic radio sources from monitoring results at 4.8-36.8 GHz and imaging on the basis of geodetic VLBI observations. *Space Science and Technology*, 2009, V. 15, No. 4, 46-70.
9. *Kovalev Y.Y., Lobanov A.P., Pushkarev A.B., Zensus J.A.* Opacity in compact extragalactic sources and its effect on astrophysical and astrometric studies. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, V. 458, 759-768.

АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗД В ПЛЕЯДАХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ

Рыльков В.П., Нарижная Н.В.

Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН

Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, корп.1

E-Mail: vrylk1145@yandex.ru

На нормальном астрографе ГАО, используя перекрывающиеся сканы ПЗС-наблюдений получены координаты 257 звезд в Плеядах. Размер сборки из 7 сканов примерно 28×57 arcmin с центром в $RA = 3h 47m 30s$, $DE = 24^\circ 34' 45''$. Сделано сравнение положений 73 звезд в Плеядах 1910 г., отождествленных со звездами каталога Tucho-2, которое выявило значительные расхождения в положениях, сильно увеличивающиеся при увеличении звездной величины. Сделано сравнение вычисленных по опорному каталогу UCAC3 257 координат звезд с их положениями в каталогах UCAC2-UCAC4, которые показали значительное увеличение разностей (O-C) при увеличении звездной величины. Для этой области Плеяд звезды в диапазоне от 14 до 16m показывают разности до 400 mas и более при сравнении со всеми тремя каталогами. Сравнение выборки 3332 звезд поля нормального астрографа $2,5 \times 2,5^\circ$ в Плеядах без использования собственных движений показало увеличение разностей координат между UCAC2 и UCAC3 до 50-80 mas в диапазоне 14-16m. Такие же разности между 4861 звездами UCAC3 и UCAC4 дали их уменьшение почти вдвое.

Одной из основных задач астрометрии остается получение положений и собственных движений звезд с наиболее высокой точностью. До космических наблюдений основную роль в решении этой задачи играли непосредственные определения координат звезд из меридианных астрометрических наблюдений и массовые вычисления из фотографических наблюдений, которые обеспечивали высокую точность получения координат и собственных движений звезд при достаточной для этого разности эпох.

После выхода космических каталогов Hipparcos и Tucho стало очевидным, что на текущий момент никакие наземные наблюдения при равноценных технических условиях не могут дать такой позиционной точности, как наблюдения космические. Это верно хотя бы потому, что земная атмосфера не позволяет при наблюдениях разделить на компоненты близкие двойные звезды, а их, как показали космические наблюдения, оказалось практически большая часть. Влияние атмосферной дисперсии, особенно при выборе опорных звезд для редукции координат, тоже значительно; - и в этом случае даже не важно, что сам опорный каталог имеет очень высокую точность: - изображения небесных объектов получены с Земли и все положения звезд на ней искажены атмосферными влияниями. Кроме того, интервал эпох для получения значимых собственных движений звезд слабее 9^m при наблюдениях с Земли должен быть достаточно большим, тогда как за меньший промежуток времени и со значительно большей достижимой точностью для большего числа звезд астрометрические параметры можно получить из позиционных космических наблюдений.

В работе рассматривается вопрос о точности получения астрометрических параметров звезд из наземных наблюдений на малых земных телескопах на примере фотографических и ПЗС-наблюдений скопления Плеяды, выполненных на Пулковском Нормальном астрографе (НА, 33/346). Фотографические наблюдения этого самого известного и наблюдаемого скопления звезд проводилось на НА в течение почти 100 лет, с 1895 по 1993 г., ПЗС-наблюдения в последнее десятилетие. Пластинки до 1970 г. были взяты для обработки из архива Пулковской фототеки. Пластинки после 1980 г. в большинстве получены автором для определения точностных характеристик получае-

мых результатов. Еще в начале 90-х были измерены по 2,3,5 и более пластинок 1895(2), 1910(3), 1911(4), 1930(3), 1956(3), 1979(4), 1986(5), 1988(5), 1989(10), 1992(2), 1993(3)гг.

В поле звезд на пластинках НА (около 2°) в радиусе до 1° было измерено до 120 звезд до 12^m . В табл.1 для сравнения приведены средние ошибки единицы веса при вычислении положений этих звезд, характеризующих точность редукции координат.

ПЗС-наблюдения проведены на Нормальном астрографе с помощью CCD-детектора произведенного НПО «Электрон» типа S2C-017AP. Размер матрицы составляет 1040×1160 пикселей размером 16×16 мкм, определяющий поле наблюдения 18×16 arcmin. В 2011 году получены положения 192 звезд в 3 областях Плеяд смещенных по отношению к центральной звезде Альционе по склонению, по 5 сканов экспозицией 120 секунд на кадр.



Рис. 1. Вид одного CCD-скана НА.

В 2012 году получены положения 134 звезд по 4 взаимно пересекающимся областям Плеяд (RA-DE, RA-DE1, RA1-DE, RA1-DE1) - сдвиг по RA и DE на $10'$. По 5 кадров на область, по 120s на скан. На рис. 1 приведено изображение одного из обработанных сканов НА, полученного в 2012 г в поле Плеяд. Изображения круглые, четкие и для звезд от 10^m до $13-15^m$ хорошо измеряются и обрабатываются. Границы наблюдавшегося поля Плеяд соответственно по

$$\begin{aligned} \text{RA: } & 03^h 46^m 34^s - 03^h 48^m 28^s \\ & (28.5 \text{ arcmin}) \\ \text{DE: } & +23^\circ 36' 00'' - +24^\circ 33' 32'' \\ & (57.5 \text{ arcmin}) \end{aligned}$$

Для получения сканов и обработки использовался программный комплекс IZMCCD, разработанный в ГАО РАН И.С. Измайловым [1]. Вычисление координат в IZMCCD проводится методом наименьших квадратов по стандартной процедуре редукции, с использованием линейного уравнения (метод 6 постоянных), что для CCD-поля Нормального астрографа $18 \times 16^\circ$ вполне обоснованно. Методика и обработка наблюдений описана в работе [2]. Все сканы наблюдения обрабатывались отдельно. Для каждого скана в качестве опорной системы использовалось от 7 до 10 звезд каталога UCAC3 (ICRF, равноденствие J2000). Диапазон ошибок редукции (ошибки единицы веса) S_x, S_y для обеих эпох составляет 0,032-0,043 arcsec. В итоге получен каталог 257 звезд (C257), из них 69 звезд общие по двум сезонам (они приведены на среднюю эпоху).

Все пластинки нормального астрографа с Плеядами измерены в 90-е годы на полуавтоматической машине "АСКОРЕКОРД" Дементьевой А.А., Нарижной Н.В. и Рыльковым В.П. Список исследуемых звезд выбран из существующего в то время каталога PPM для поля нормального астрографа и включает более 100 звезд. Однако часть пластинок последних лет были нестандартного размера (12×16 см), поэтому общее число звезд для всех пластинок от 1895 г. составило 64. Для исключения систематических ошибок для всех 50 экспозиций от 1895 до 1993 года выбраны одни и те же 24 опорные звезды спектрального класса A0-A5, соответствующего центру приемного тракта системы "атмосфера-оптика-фотопластинка" [3]. Вычисления координат проведены с использованием опорных каталогов PPM, Tycho-1, Tycho-2 и UCAC3. Звезд каталога Hipparcos 26 на пластинке, звезд Tycho-88.

По пластинкам НА вычислены координаты и собственные движения для 64 общих звезд по всем пластинкам 1895-1993 гг. Обработка велась в системе ICRF, J2000 с использованием опорных каталогов Tycho-1, Tycho-2 и UCAC3. Число опорных звезд выбиралось от 12 до 22, ошибки редукции S_x, S_y (ошибки единицы веса) варьируются от 0.15" до 0.30". Причем лучшую точность редукции показали результаты по всем типам астрономических пластинок до 1941 года. Получены координаты и собственные движения от 64 до 99 звезд в Плеядах для каждой пластинки. Практически все вычисления по каталогу PPM от 1895 до 1993 гг. дали удовлетворительные средние ошибки единицы веса $\sim 0.15 \div 0.36$ ", хотя все вычисления сделаны по одним и тем же опорным звездам. Причем большие ошибки до 0.40" получены в 90-е годы наблюдений, когда Плеяды снимали на устаревшие пластинки.

Таким образом нами получены координаты и собственные движения для 80 звезд от 7 до 11^m звездной величины на средние эпохи:

- по средним годовым данным для всех лет наблюдений,
- по разным каталогам (использованы каталоги Tycho-2 и UCAC3).

Сделано сравнение с координатами и собственными движениями каталогов основных на космических наблюдениях, каталогов серии Tycho и UCAC2-4. Результаты представлены в виде графиков разностей (O-C) относительно звездных величин, поскольку исследуемая область мала и нет смысла изучать изменения по координатам.

Совершенно неудовлетворительно на удаленные эпохи прошли вычисления по каталогу Tycho-1, - значения для 1895 г. и 3-х пластинок 1910 г. приведены в табл. 1 в графе "Tycho-1". Причина, естественно в плохих собственных движениях, что практически сразу было выяснено. После его переработки в Tycho-2, были проделаны вычисления при использовании его координат и собственных движений. Средние значения ошибок единицы веса при редукции координат на эпохи отстоящие от эпохи каталога почти на 100 лет уменьшились и не превысили 0.22 по обеим координатам (табл. 1). Для сравнения были выполнены вычисления положений 1895-96 (2 пластинки) и 1910 (3 пластинки) используя опорные звезды каталога Tycho-1 с собственными движениями из каталога PPM (в табл. 1 величины Tycho1-PPM). Ошибки редукции относительно варианта с Tycho-1 уменьшились вдвое, однако остались большими. Можно отметить тот факт, что значения ошибок единицы веса S_x, S_y при редукции координат по каталогам Tycho-1 и Tycho-2 практически одинаковы для пластинок от 1993 до 1979 и значительно расходятся для более далеких эпох вычисления координат.

Таблица.1. Ошибки единицы веса в arcsec при вычислении координат по опорным каталогам PPM, Tycho-1 и Tycho-2 с двумя вариантами собственных движений.

Эпоха год	PPM		Tycho1		Tycho1-PPM		Tycho-2	
	S_x "	S_y "	S_x "	S_y "	S_x "	S_y "	S_x "	S_y "
1895.93	0.268	0.204	0.636	0.856	0.428	0.267	0.212	0.224
1910.97	0.228	0.220	0.787	0.752	0.381	0.253	0.194	0.207
1930.93	0.220	0.235	0.604	0.563	-	-	0.179	0.196
1956.94	0.316	0.258	0.478	0.520	-	-	0.201	0.217
1979.97	0.350	0.278	0.203	0.244	-	-	0.190	0.205
1988.90	0.362	0.297	0.186	0.205	-	-	0.190	0.207
1993.46	0.350	0.304	0.190	0.159	-	-	0.190	0.158

Вычислены разности положений полученные по опорному каталогу PPM относительно положений 73 звезд из Tycho-2, переведенных на эпохи пластинок. Получили огромные более 0,4" разности для половины совпадающих звезд рис. 2. Однако для звезд слабее 8^m в RA, звезды вычисленные по Tycho-2 лежат западнее, чем полученные

по PPM и показывают отрицательные значения (O-C) практически для всех отождествленных звезд. В DE в этом же диапазоне звездных величин значения координат в Tycho-2, переведенные на 90 лет каталожными собственными движениями, показывают положения ниже, чем вычисленные по PPM для всех звезд в каждой пластинке. Значения (O-C) практически все положительные. Причина возможно в отличии астрометрических систем. Это наглядно видно из графика на рис.3.

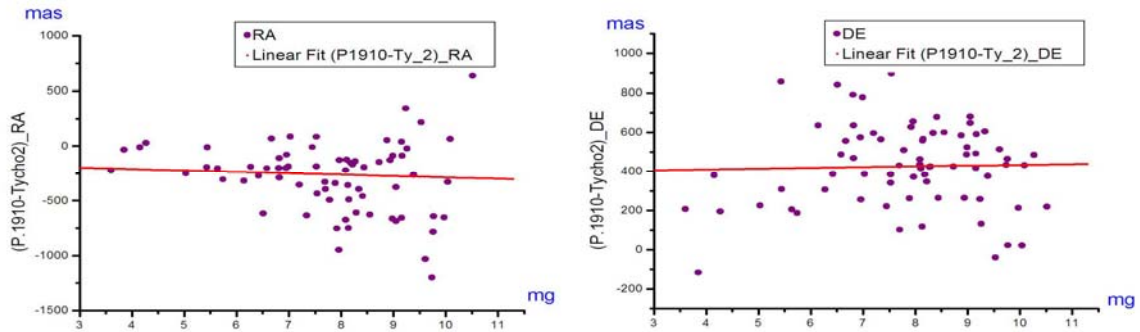


Рис. 2. Графики разностей координат в RA и в DE для 73 звезд, отождествленных со звездами Tycho-2 на пластинках Нормального Астрографа 1910 года.

Совпадающих звезд в поле НА из наших прошлых измерений было довольно мало, поэтому выводы делать по этим результатам трудно. Для более глубокого исследования необходимо переизмерить пластинки НА с Плеядами, содержащими значительно большее число измеряемых изображений звезд. Однако результаты, полученные по наблюдениям с CCD-матрицей, показывают для слабых звезд ту же картину (рис. 3-5).

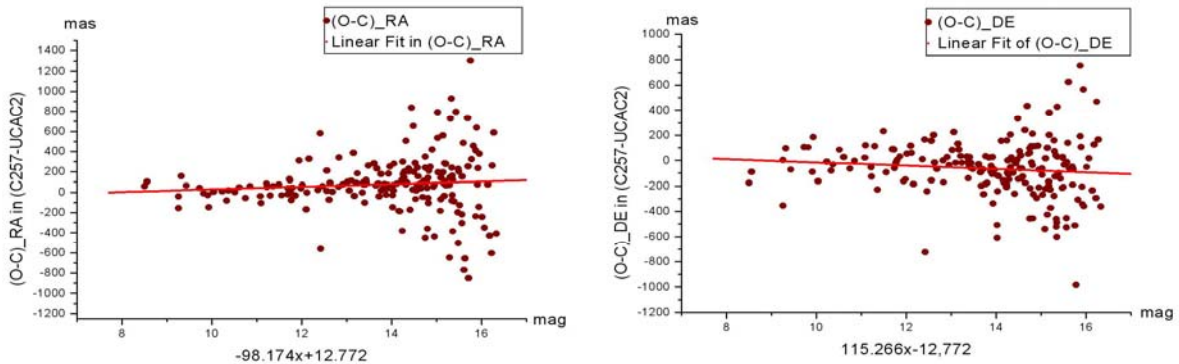


Рис. 3. Разности координат в RA и DE - C257 относительно UCAC2 (236 звезд).

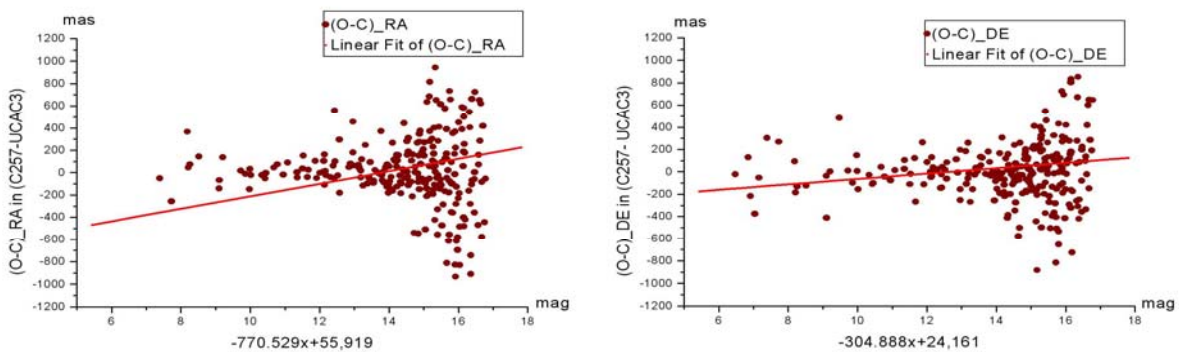


Рис. 4. Разности координат в RA и DE - C257 относительно UCAC3 (236 звезд).

Нами сделано сравнение 257 координат звезд, полученных в 2011-2012 гг. с их положениями в основных используемых сейчас астрометрических каталогах. Число

совпадающих звезд 236 от минимума в UCAC2, вычисления проделаны по всем каталогам для одних и тех же отождествленных звезд.

Получили довольно разные картины рассогласований (C257-UCACx) относительно переведенных координат звезд фундаментальных каталогов, особенно от UCAC4. Даже от положений в UCAC3, который является опорным для нашего C257, расхождения возрастают до 600-800 mas для звезд 14-16^m, хотя по UCAC2 как видно из графиков они в основном в диапазоне до 400-600 mas и даже меньше для (O-C) в DE.

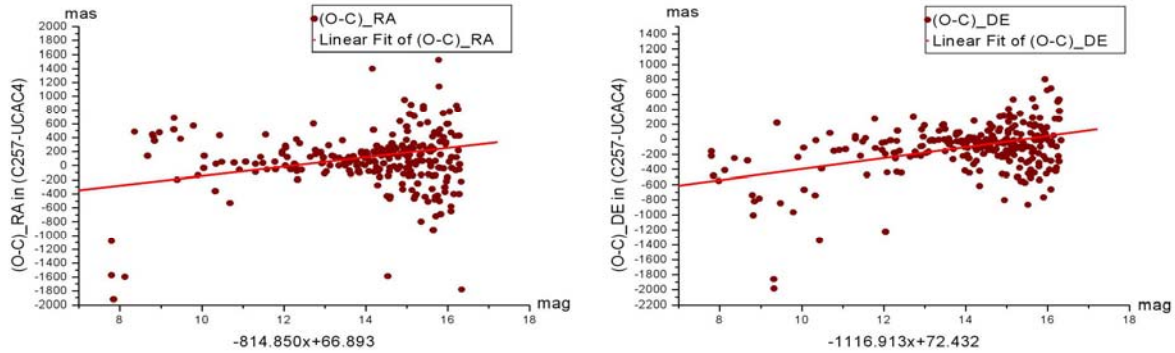


Рис. 5. Разности координат в RA и DE - C257 относительно UCAC4 (236 звезд).

Наконец, мы взяли координаты из самих каталогов и получили картину разностей положений в них без переводов на разные эпохи, поскольку они все три приводятся на J2000. Всего в двухградусной зоне Плеяд по выборке совпадений из UCAC2, поскольку в нем меньше звезд, нашлось 3364 звезды. 32 звезды были отсеяны из-за странных огромных ошибок (более 1000 mas), хотя большинство этих звезд в каталоге повторялись. Графики разностей координат в UCAC2 и UCAC3 приведены на рис.6.

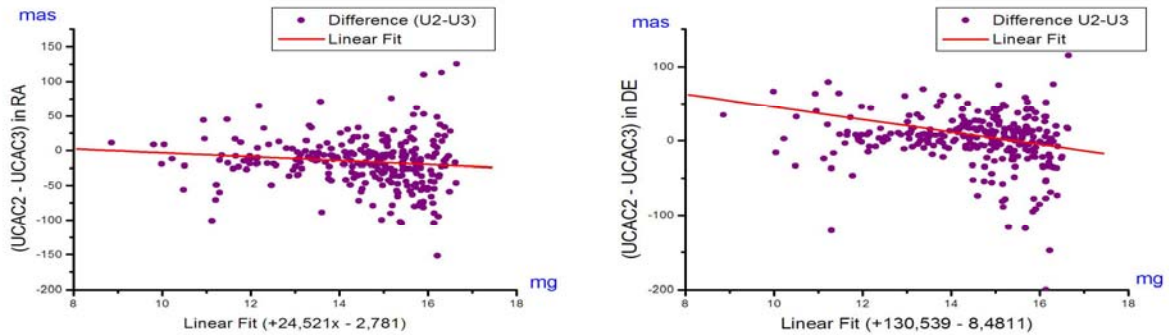


Рис. 6. Разности (UCAC2-UCAC3) в положениях 3332 совпадающих звезд в радиусе 2,5° зоны в области Плеяд. $3^h42^m23^s.0 - 3^h52^m35^s.7$ и $23^o11'13.4 - 25^o30'38.8$.

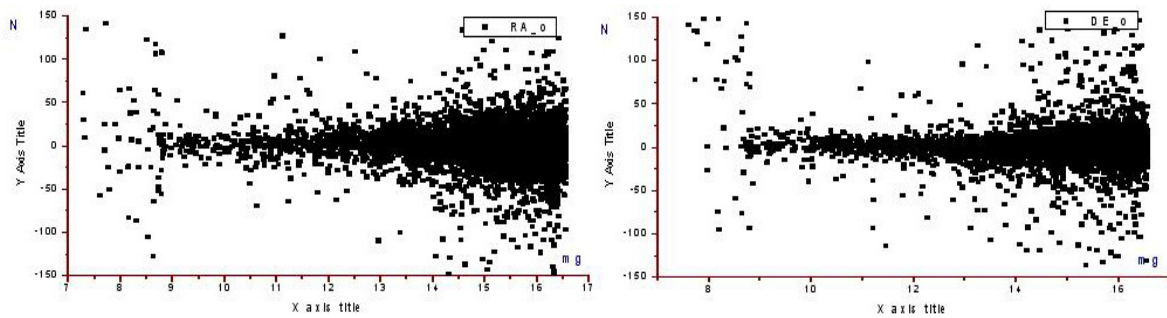


Рис. 7. Разности координат в RA и DE каталогов UCAC3 и UCAC4 для 4861 совпадающих звезд в области 2,5×2,5 созвездия Плеяд в зависимости от звездной величины.

Сравнение 3332 координат каталогов UCAC2 и UCAC3 показало увеличивающиеся расхождения в положениях для звезд слабее 14^m до 50-80 mas в RA и в DE (рис. 6).

Летом 2012 г появилась версия каталога – UCAC4 [4]. Нами выполнено сравнение координат каталогов UCAC3 и UCAC4, для той же области в Плеядах отождествлено 4861 звезд. Из рис.7 видно, что принципиально картина увеличения отклонений (O-C) не изменилась, однако можно констатировать, что произошло выравнивание координат и разности уменьшились до основного разброса в 50 mas, для склонения даже меньше.

Выводы, которые можно сделать из результатов данного исследования. Если для одного из самых исследованных созвездий северного неба мы видим такое сильное рассогласование положений в каталогах для звезд слабее 14^m, то трудно представить, что для остального неба картина в этом плане лучше. И недаром главный создатель всех версий каталогов UCAC Захарияс отмечает в описании каталогов, что собственные движения для звезд слабее 14^m - сомнительны. Даже сами положения слабых звезд достаточно сильно различаются в самих начальных эпохах. Астрометрические данные по накопленным наблюдениям в настоящее время обеспечивают хорошую точность результатов только по опорным системам звезд до 12-14^m, и используя их в этом качестве, нужно постепенно улучшать положения звезд и объектов слабее 14^m.

Космические проекты, нацеленные на получение до миллиарда звезд, должны иметь в системе стандартов высокоточные определения положений для объектов 16-18^m и эта задача, вероятно, сейчас должна быть самой актуальной для всей наземной астрометрии.

Литература

1. *Измайлов И.С.* Технология астрометрической обработки ПЗС-изображений на примере программного пакета IZMCCD, 2007, сб. п/ред. д.ф.м.н. Пинигина Г.И., Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы, Николаев, Атолл, с.277-282.
2. *Рыльков В.П., Наризhnaya Н.В.* Позиционные ПЗС-наблюдения областей звезд на Пулковском нормальном астрографе. «Изв. ГАО в Пулкове», 2009, N219, в.4, с.315-318.
3. *Рыльков В.П.* О влиянии атмосферной дисперсии на положения звезд, получаемые фотографическим методом, Астрофотография в исследовании Вселенной, изд. ГАО АН СССР, п/р В.К. Абалакина, СПб, 1992, с.165-183.
4. *Zacharias N., Finch C.T., Girard T.M., et al.* The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog UCAC4, 2012, Astron. J., CDAS I/322 catalog.

ANALYSIS OF STARS PROPER MOTIONS IN PLEIADES BY OBSERVATIONS IN THE PULKOVO NORMAL ASTROGRAPH

Ryl'kov V.P., Narizhnaya N.V.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The positions of 257 Pleiades stars was obtained with the Pulkovo Normal Astrograph by means of covering scans from the CCD-observations. The size of the assembly from the 7 scans compiled the area 28×57 arcmin within center to RA = 3h 47m 30s, DE = 24° 34' 45". Coordinates of 73 stars, obtained from plates Pulkovo Normal Astrograph for 1910 year, were identified with positions stars in Tycho-2 catalogue. Its comparison was revealed the considerable divergence in the positions, which strongly grow at the increasing star magnitude. The coordinates 257 stars, calculated with reference stars UCAC3 catalogue, were compared with their positions from UCAC2-UCAC4. the results were showed considerable enlarged residuals (O-C) at the increasing star magnitude. For stars 14-16^m this region of Pleiades the deflexions (O-C) arrive at the 400 mas and more, when the positions were compared with three catalogues UCAC + 2UCAC4. The comparison of the 3332 stars for the Normal Astrograph 2,5×2,5° field in Pleiades was showed the increasing differences coordinates between UCAC2 and UCAC3 up to 100 mas within the range 14 -16^m.

КАТАЛОГ ЗВЕЗД 11-16^m ПО ТРАЕКТОРИИ ПЛУТОНА 1930-1985 г.

Рыльков В.П., Нарижная Н.В.

Главная (Пулковская) Астрономическая обсерватория РАН,

Пулковское ш., 65/1, Санкт-Петербург, 196140, Россия

E-Mail: vrylk1145@yandex.ru

По измерениям большого числа звезд в окрестностях Плутона из более 200 фотопластинок, полученных в Пулковской обсерватории за период 1930-1996 гг. получен каталог положений для 1872 звезды до 16^m в областях траектории планеты за наблюдаемый период. В качестве опорного каталога использован UCAC3 системы ICRF J2000.0. Даны центры областей звезд; приведено число пластинок, по измерениям которых делались вычисления положений; приведено число опорных звезд; диапазоны точности вычислений и число полученных координат звезд за каждый год. Сделано сравнение с положениями этих звезд, вычисленными по каталогам PPM, Tycho-2 и UCAC4.

В течение всего периода наблюдений Плутона с 1930 по 1995 гг. с использованием Пулковского Нормального Астрографа (НА, 330/3600) было сфотографировано более 240 фотопластинок, в основном по 3-4 пластинки каждую весну [1]. После 1995 г наблюдения были прекращены из-за ухода планеты в южное полушарие. В рамках гранта РФФИ в 1993-94 гг. все имеющиеся фотопластинки были переизмерены с использованием полуавтоматической измерительной машины АСКОРЕКОРД. Поскольку Плутон имел звездную величину порядка 16-17^m, а опорные каталоги на то время были в основном для звезд только до 11-12^m, в окрестности его изображения на пластинке дополнительно измеряли положения от 30 до 54 слабых звезд 12-15^m, которые предполагалось в будущем использовать как опорные при появлении астрометрических позиционных каталогов звезд до 15-16^m. Сейчас такие астрометрические каталоги уже созданы [4] – это UCAC3 (сейчас уже UCAC4). Исследования показали, что он достаточно точен, и можно выполнить вычисления положений Плутона по опорным звездам, по яркости близким к яркости Плутона, что в принципе должно минимизировать ошибку уравнения яркости. Как байт-продукт при этом было интересно получить координаты и собственные движения звезд в окрестности Плутона по нашим ранее проведенным измерениям звезд. Такая работа может быть полезной для пополнения банка данных собственных движений звезд 12-16^m для улучшения данных астрометрических позиционных каталогов звезд.

Все вычисления выполнены в единой системе опорного каталога UCAC3 (J2000.0, ICRF). Как обычно было принято для вычисления координат звезд для всего поля НА (2x2°) редукция астрометрических координат выполнялась с использованием метода наименьших квадратов для восьми постоянных, реализующих нелинейную связь измеренных (x,y) и тангенциальных координат (X,Y) звезд на фотопластинке:

$$X - x = a_1 x + b_1 y + c_1 + p_{xx} + q_{xy}$$

$$Y - y = a_2 x + b_2 y + c_2 + p_{xy} + q_{yy}$$

В основном использовалось от 12 до 22 опорных звезд 9-13 звездной величины. Ошибки единицы веса S_x , S_y для фотографических наблюдений от 0,1'' до 0,3''. Вычислялось до 54 определяемых звезд, в число которых мы включали и вычисление координат самих опорных звезд, поскольку для них были выполнены двойные измерения.

Полученные по измерениям с пластинок НА положения всех вычисленных координат звезд сравнивались с их координатами в двух каталогах PPM и Tycho-2, которые своими собственными движениями из стандартной эпохи самого каталога переводились на эпоху наблюдений максимально до 70 лет и вычислялись разности положений

(O-C). Всего получено 1872 положений звезд в основном от 8^m до 15^m. Область их расположения по RA, DE приведена на рис. 1. Значения по прямому восхождению RA приводятся в градусах – они занимают диапазон от 109,37° до 217,21°, что соответствует значениям в часовой мере от 7^h19^m до 14^h 27^m. По склонению значения координат лежат в области от 3° до 25°. С координатами из каталога PPM отождествлено 741 звезда, с каталогом Tycho-2 совпало 966 звезд.

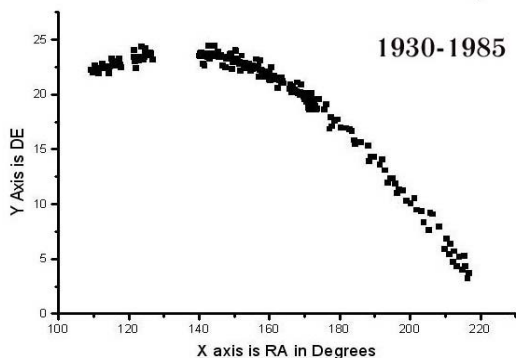


Рис. 1. Область неба, заполняемая звездами поля в окрестности Плутона с 1930 г.

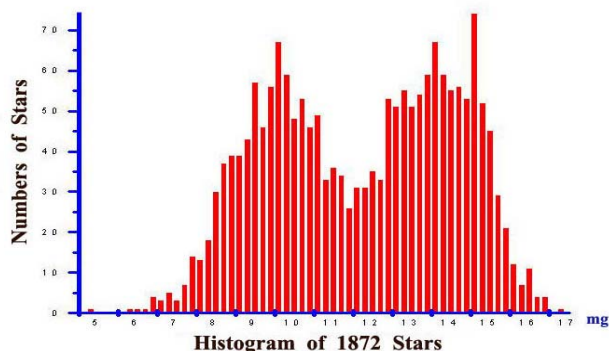


Рис. 2. Распределение 1872 звезд по звездным величинам.

Распределение по звездным величинам на рис. 2 характеризуется двумя пиками – первый соответствует опорным звездам первого уровня 9-12^m, второй более слабых 12-16^m. Каждый год по нескольким пластинкам получали средние значения координат звезд – их количество приведено в последней колонке таблицы. В этой же таблице даны характеристики вычисления координат – ошибки единицы веса при редукции по указанному числу опорных звезд, а также число пластинок при усреднении и центры полей получаемых звезд.

Анализ отклонений (O-C) относительно координат звезд из каталогов PPM, Tycho-2 и UCAC4 приведен на рис. 3-7. С каталогом PPM совпадает 741 звезда (ZPPM741). По существу это анализ отклонений по ярким звездам 7-11^m, что видно из графиков на рис. 3-4. Оба они показывают практически хаотический разброс отклонений (O-C) в диапазоне от -400 до +400 mas с небольшим увеличением в 80-е годы.

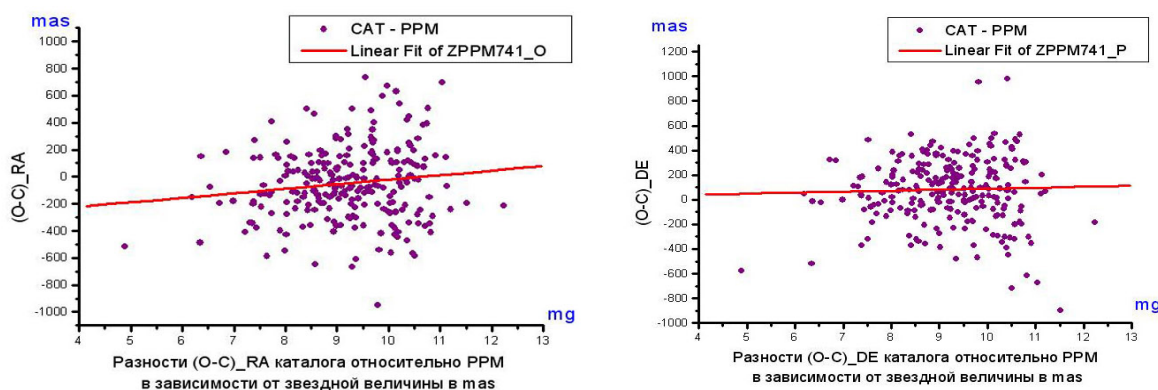


Рис. 3. Разности (ZPPM741-PPM) в RA и DE от звездной величины для 741 звезды.

Таблица. Характеристики получения координат звезд по траектории Pluto.

Year	N	Centre of plasts		opor.	Ошибки редукции		Pol. star
	pl.	RA	DE	Star	Sx	Sy	
		h m s	o ' "	Nos	" "	" "	
1930	8	07 19 47.0	+22 00 29	18-20	0.143 - 0.277	0.172 - 0.235	35-39
1931	2	07 25 22.3	+22 12 08	17-18	0.199 - 0.252	0.232 - 0.332	42-44
1932	5	07 31 19.2	+22 22 56	15	0.125 - 0.269	0.168 - 0.249	31-36
1933	2	07 37 37.4	+22 32 12	15	0.143 - 0.200	0.178 - 0.314	42-50
1934	3	07 42 29.1	+22 46 04	20	0.267 - 0.380	0.300 - 0.404	51-53
1935	4	07 48 35.4	+22 55 17	20-22	0.179 - 0.287	0.288 - 0.433	49-50
1938	3	08 07 08.8	+23 19 49	14-18	0.101 - 0.349	0.178 - 0.374	40-46
1939	3	08 15 39.0	+23 18 58	17-20	0.168 - 0.434	0.183 - 0.211	43-46
1940	3	08 19 04.7	+23 35 07	16	0.203 - 0.289	0.316 - 0.368	41-44
1941	2	08 25 00.8	+23 41 44	12-17	0.288 - 0.400	0.492 - 0.568	43-45
1949	3	09 22 17.4	+23 39 12	16-22	0.172 - 0.281	0.179 - 0.229	41-48
1950	3	09 29 02.2	+23 36 46	18-20	0.207 - 0.281	0.375 - 0.422	45
1951	4	09 35 21.0	+23 34 23	18-20	0.224 - 0.280	0.167 - 0.222	48-49
1952	4	09 42 06.2	+23 29 07	24-26	0.184 - 0.222	0.204 - 0.346	49-52
1953	3	09 50 57.2	+23 16 49	15-18	0.247 - 0.339	0.322 - 0.385	43-44
1954js	3	09 57 14.6	+23 10 20	15-21	0.121 - 0.242	0.135 - 0.196	31-37
1955js	3	10 04 49.4	+22 58 33	16-19	0.146 - 0.220	0.140 - 0.199	37-40
1956js	3	10 12 57.5	+22 43 39	15-20	0.170 - 0.427	0.183 - 0.283	39-43
1957js	4	10 21 28.1	+22 28 40	14-16	0.156 - 0.228	0.160 - 0.303	36-38
1958js	3	10 29 30.7	+22 11 36	21-23	0.130 - 0.259	0.162 - 0.286	41-42
1959js	4	10 38 40.0	+21 48 22	18-23	0.096 - 0.264	0.164 - 0.298	40-43
1960js	3	10 46 06.5	+21 32 12	20-21	0.122 - 0.311	0.112 - 0.307	40-41
1961js	3	10 54 00.4	+21 11 22	20-21	0.188 - 0.276	0.163 - 0.215	41
1962js	3	11 06 08.6	+20 24 09	18-21	0.348 - 0.473	0.361 - 0.383	38-41
1963js	3	11 14 00.4	+20 03 42	17-19	0.112 - 0.303	0.167 - 0.334	42-43
1964js	5	11 22 17.4	+19 29 54	14-22	0.129 - 0.353	0.140 - 0.328	37-43
1965js	4	11 31 28.6	+19 01 32	15-18	0.142 - 0.307	0.138 - 0.330	35-42
1966	3	11 36 14.2	+18 53 40	12-15	0.155 - 0.308	0.093 - 0.245	12-16
1968j	3	11 54 58.3	+17 49 39	12-15	0.194 - 0.355	0.157 - 0.386	12-15
1969	4	12 03 37.0	+17 02 40	14-15	0.223 - 0.392	0.256 - 0.333	14-15
1970js	4	12 13 57.9	+16 13 31	12-14	0.326 - 0.460	0.209 - 0.415	12-15
1971js	6	12 20 10.2	+15 49 08	14-17	0.215 - 0.451	0.221 - 0.428	14-17
1972js	4	12 33 42.6	+14 31 51	14-17	0.199 - 0.404	0.177 - 0.379	14-17
1973js	4	12 38 39.7	+14 19 13	14-16	0.192 - 0.268	0.262 - 0.385	14-17
1974	3	12 49 46.4	+13 20 09	16	0.242 - 0.300	0.185 - 0.272	17
1975	4	12 57 39.8	+12 39 08	14-16	0.148 - 0.231	0.165 - 0.185	14-16
1976	5	13 05 14.2	+11 59 18	14-18	0.235 - 0.376	0.158 - 0.350	14-23
1977	3	13 15 26.0	+11 02 04	13-15	0.103 - 0.256	0.143 - 0.264	13-16
1978	3	13 24 56.0	+10 08 19	15-16	0.149 - 0.229	0.250 - 0.333	17-18
1979	3	13 33 37.4	+ 9 16 34	6-17	0.046 - 0.259	0.073 - 0.216	6-18
1980	4	13 43 36.2	+ 8 16 28	7-12	0.196 - 0.398	0.108 - 0.251	10-20
1981pl	4	13 54 13.8	+ 7 07 38	6	0.101 - 0.346	0.098 - 0.632	6
1982pl	4	14 04 09.4	+ 6 04 55	5-13	0.242 - 0.280	0.234 - 0.391	7-18
1983pl	3	14 12 21.6	+ 5 09 02	6-16	0.052 - 0.521	0.116 - 0.365	6-18
1984	9	14 20 57.9	+ 4 17 52	8-13	0.208 - 0.396	0.182 - 0.314	13-20
1985	3	14 27 16.6	+ 3 40 37	11-14	0.157 - 0.268	0.203 - 0.287	14-17

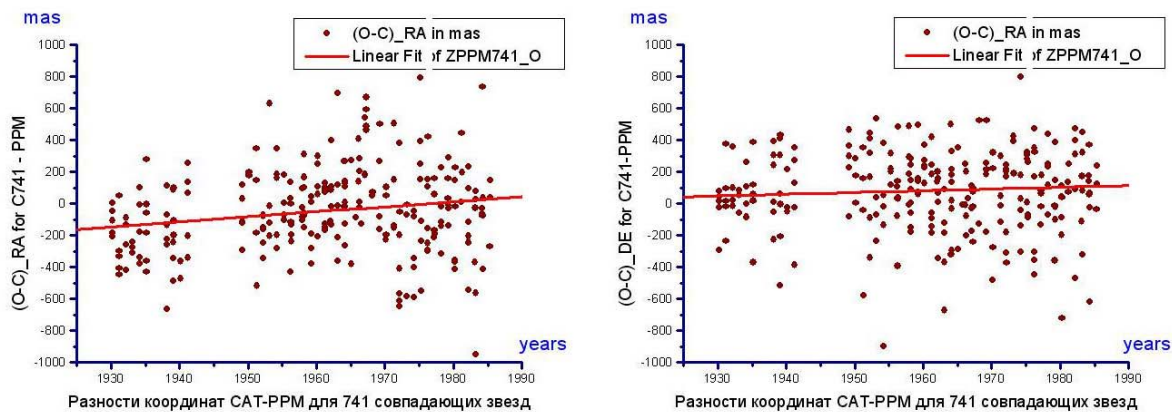


Рис. 4. Разности (ZPPM741-PPM) в RA и DE C741 относительно каталога PPM по годам.

Сравнение 741 звезд, полученных нами, с каталогом PPM выявило следующие значения средних отклонений (O-C) в смысле “ZPPM741(ucac3) – PPM” и средние ошибки единицы веса при редукации координат:

$$\begin{aligned} \text{в RA} &= -46,34 \pm 10,08, & \text{среднее } S_x &= 75,87 \pm 2,60 \\ \text{в DE} &= 83,34 \pm 9,44, & \text{среднее } S_x &= 65,35 \pm 2,03 \end{aligned}$$

При сравнении с 966 координатами каталога Tycho-2 картина разброса отклонений улучшилась практически вдвое - диапазон разностей (O-C) стал от -200 до +200 mas (рис. 5-6). Это, скорее всего, отражает факт применения опорного каталога UCAC3, который выполнен в системе HCRS, с использованием каталогов Hipparcos и Tycho. Можно отметить факт отсутствия трендов в значениях разностей при изменении по годам.

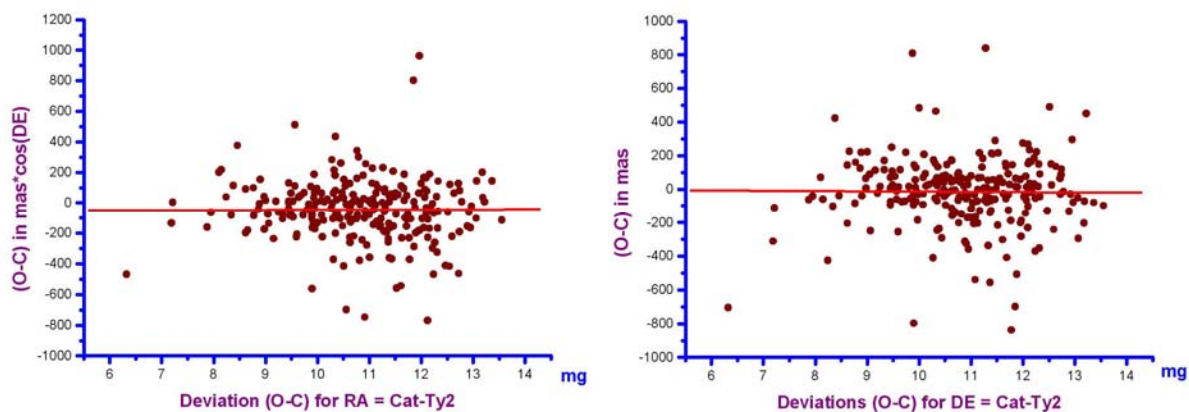


Рис. 5. Разности (ZCAT966-Tycho-2) в RA и DE от звездной величины для 966 звезд.

Для 966 звезд, полученных нами и совпадающих с каталогом Tycho-2 получены следующие значения отклонений (O-C) в смысле “ZCAT966(ucac3) – Tycho2” и средние ошибки единицы веса:

$$\begin{aligned} \text{в RA} &= -45,86 \pm 6,08, & \text{среднее } S_x &= 72,29 \pm 2,26, \\ \text{в DE} &= -15,83 \pm 6,03, & \text{среднее } S_x &= 62,66 \pm 1,76. \end{aligned}$$

Видно, что ошибки редукации немного уменьшились. Среднее значение разности в прямом восхождении практически не изменилось, величина значимая – вероятно это систематическая ошибка, которую надо изучить. Значительно изменилось и уменьшилось среднее отклонение в склонении – стало почти в пять раз меньше и поменяло знак. Да и разброс разностей уменьшился значительно: от -200 до +200 mas.

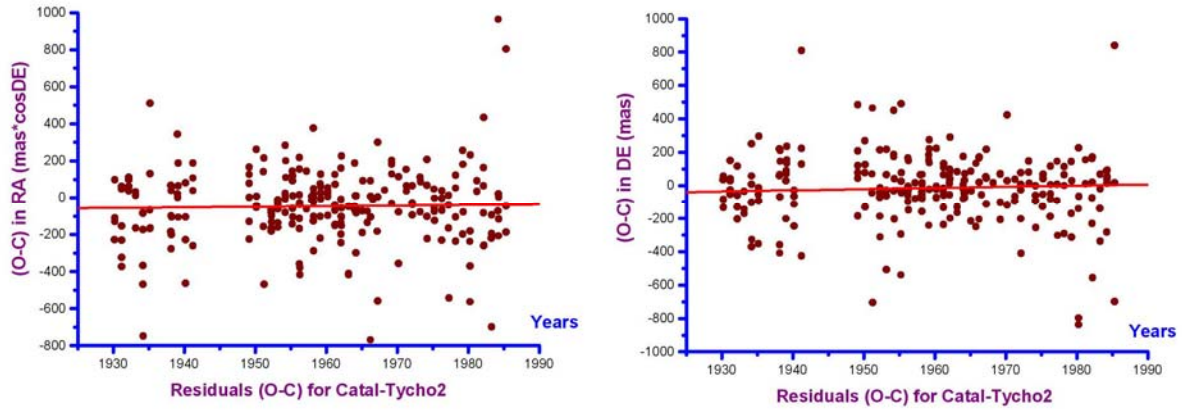


Рис. 6. Разности (ZCAT966-Тучо-2) в RA и DE относительно 966 звезд Тучо-2 по годам.

Подготовленный каталог имеет больше половины звезд, которые наблюдались два и более (до 9) раз. Нами также получены значения собственных движений для всех 1872 звезд каталога SP1930-85. Принципиально пока не решен вопрос об эпохе для собственных движений каждой звезды каталога. Вычисления с полученными нами собственными движениями звезд дали довольно большие расхождения при сравнении с вычислениями по другим каталогам.

Формат данных каталога SP1930-85, подготовленный как описание формата для передачи каталога в центр астрономических данных выглядит следующим образом:

num	item	fmt	unit	explanation	remark
1	Nom	I4		Number in catalogue	
2	mgu	F7.3	mag	UCAC fit model magnitude	(1)
3	RA	I*11	hhmmsddd	Right Ascension at epoch of observation (ICRS)	(2)
4	DE	I*10	+ggmmsddd	Declination at epoch of observation (ICRS)	(2)
5	RA	F13.7	grad,dddd	Right Ascension at epoch of observation (ICRS)	(3)
6	DE	F12.7	+grad,dddd	Declination at epoch of observation (ICRS)	(3)
7	niz	I*3		Number of obtained images of this star	
8	sigRA	F6.1	mas	s.errors at central epoch in RA (*cos Dec)	
9	sigDE	F6.1	mas	s.errors at central epoch in Dec	
10	epoh	F10.3	yr	epoch of observation for mean RA, DE	
11	pmra	F7.1	mas/yr	proper motion in RA*cos(Dec)	
12	sigpmr	F7.1	mas/yr	s.errors of pmRA*cos Dec	
13	pmde	F8.1	mas/yr	proper motion in Declination (mas)	
14	sigpmd	F7.1	mas/yr	s.errors of pmDeclination (mas)	

- 1) – Звездная величина, взята из отождествления с UCAC3
- 2) – Прямое восхождение (RA), вычисленное на эпоху пластинки в час и градусной форме (RA-hhmmsddd, DE-ggmmsddd)
- 3) – Прямое восхождение (RA), вычисленное на эпоху пластинки в градусах с долями до 8 знака (RA и DE – gg.dddddd)

Было выполнено сравнение координат звезд нашего каталога с каталогом USNO UCAC4, которое показало уменьшение разностей (O-C) в RA по годам от 400 до 200 mas при переходе от 30-х годов к восьмидесятым (рис. 7). Однако в целом картина хуже, чем при сравнении со звездами каталога Тучо-2.

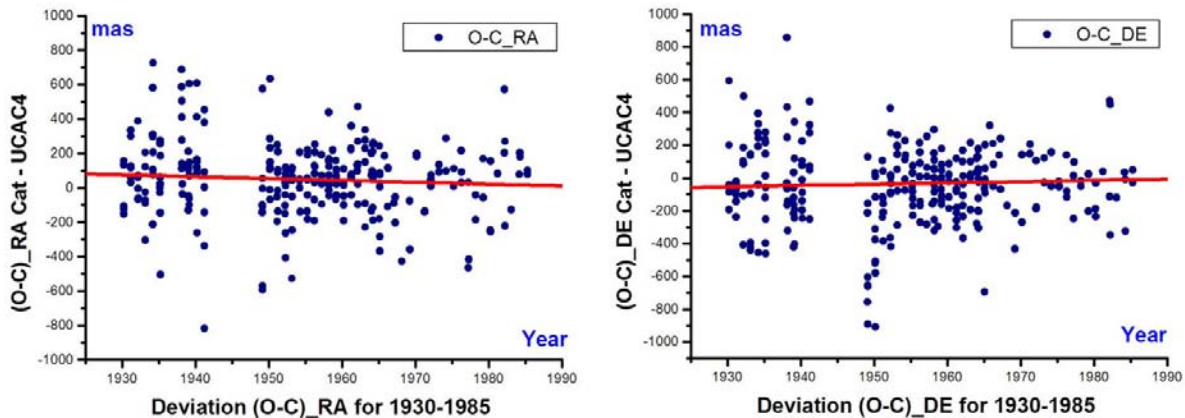


Рис. 7. Разности (C1872-UCAC4) в RA и DE относительно всех 1872 звезд UCAC4 по годам.

Таким образом, получен каталог положений 1872 звезд с эпохами наблюдений от 1930 до 1985 гг. Звезд до 12^m почти точно половина, они, по-видимому, совпадают с положениями 8-12^m звезд каталога Tycho-2. Больше половины каталога звезды 11-16^m. Анализ разностей положений совпадающих с Tycho-2 звезд практически не показал зависимости значений (O-C) по годам, картина отклонений ровная со значениями разброса до 200 mas. Аналогичная картина и в зависимости (O-C) от звездной величины, разности для данного диапазона 8-13^m не показывают их увеличения при увеличении звездной величины. Это свидетельствует о достаточно хороших собственных движениях звезд для данного диапазона звездных величин. Значительно хуже выглядит сравнение с UCAC4, вероятно, здесь сыграли свою роль собственные движения слабых звезд, неудовлетворительное знание которых для звезд 12-16^m известно всем астрономам.

Литература

1. V.P. Ryl'kov, V.V. Vityazev, A.A. Dement'eva, Pluto: Analysis of Photographic Position Obtained with Pulkovo Normal Astrograph in 1930-1992, *Astron. And Astrophys. Trans.*, 1995, vol.6, p.265.
2. S. Roeser, U. Bastian, *Catalogue of Positions and Proper Motions*, 1988, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 74, 449.
3. N. Zaharias, C. Finch, T. Girard, *at al*, Third U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalogue (UCAC3), 2010, *Astron.J.*, 139, 2184.
4. Hoeg, E., Fabricius, C., Makarov, V.V., *at al*, The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 million brightest stars, 2000, *Astron. & Astroph.* 355L, 27 (short paper).

CATALOGUE OF 11-16^m STARS ALONG THE PLUTON TRAJECTORY OVER 1930-1985 years

Ryl'kov V.P., Narizhnaya N.V.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

E-Mail: nnat@gao.spb.ru

By measuring of the larger quantity of stars in the Pluton vicinity, there are near 240 photo-plates obtained in Pulkovo observatory from 1930 to 1996 years, was obtained catalogue of the positions 1872 stars up to 16^m in the regions of planet trajectory for the observation period. UCAC3 in system ICRS at epoch J2000.0 was used as reference catalogue. In the paper were presented the centers of the star regions; number of the plates at by measuring, which were calculated position of catalogue stars; number reference stars; ranges of precision at calculation of star positions in form of statistical errors S_x , S_y and the numbers obtained star coordinates for the which years. Comparison of positions these stars was made with by PPM, Tycho-2 and UCAC4 catalogues.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОБЛЕМЕ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

Рыхлова Л.В.

ИНАСАН, Москва, Россия

Научное осознание и обоснование проблемы астероидно-кометной опасности стали возможны в результате информационного взрыва на рубеже 21 века. Рассмотрены основные научные задачи, составляющие суть проблемы АКО. Основой решения практически всех научных задач являются поисковые обзорные наблюдения с целью обнаружения и прогнозирования траекторий движения опасных для Земли астероидов и комет, оценки времени их предсказуемой траектории, определения времени и места возможного столкновения.

Очень важны исследования основных источников пополнения популяции астероидов и комет во внутренних областях Солнечной системы, путей их миграции, процессов длительной эволюции под воздействием различных гравитационных возмущений.

Осознание и обоснование астероидно-кометной опасности как научной задачи стало возможным в результате информационного взрыва, случившегося на рубеже XX-XXI веков, когда начали накапливаться факты для создания научной теории астероидно-кометной опасности.

Этому способствовало несколько факторов:

- появление современных наземных оптических телескопов диаметром более двух метров, целенаправленно исследующих объекты Солнечной системы;
- появление принципиально новых сверхчувствительных приемников излучения, обладающих высокой квантовой эффективностью;
- появление новых технологий обзора небесной сферы;
- появление быстродействующих компьютеров и возможность быстрого сравнения наблюдений с более ранними изображениями исследуемой области неба с целью выделения перемещающихся на фоне звезд объектов;
- накопленные банки данных в компьютерных информационных центрах, возможность быстрого сравнения данных для отождествления нового объекта;
- и, наконец, научная информация, полученная с помощью космических аппаратов, обследовавших планеты, некоторые астероиды и кометы Солнечной системы.

Накопление и осмысление новых наблюдательных данных, обнаружение все большего числа следов космических катастроф на земной поверхности, новые факты о катастрофических столкновениях в Солнечной системе в настоящее время – все это позволило конкретизировать подходы к изучению происхождения малых тел Солнечной системы, распределения их орбит в околосолнечном пространстве, выделить особый класс астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), а среди них - потенциально-опасных или даже угрожающих возможным столкновением с Землей, просчитать частоту столкновения с Землей тел различных размеров и энергии (в прошлом). Произошел существенный сдвиг в восприятии той реальной опасности, которую представляют собой столкновения крупных космических тел с Землей. Возросло понимание того, что падения крупных космических тел на Землю играли очень важную роль в развитии жизни на Земле в прошлом и могут оказать решающее влияние на нее в будущем.

Наблюдения современных специализированных служб Spacewatch, Catalina, Linear (США) и других уже привели к открытию нескольких сот тысяч астероидов и комет. Ежегодно обнаруживаются сотни новых, не наблюдавшихся ранее объектов. При этом,

один и тот же объект может за ночь наблюдаться несколько раз, что было невозможно в эпоху фотографических наблюдений всего лишь 20–30 лет назад.

Считается, что к настоящему времени обнаружены почти все объекты крупнее 5 км среди светлых астероидов (альbedo около 0.5) и крупнее 10 км среди темных объектов (альbedo от 0.02).

Однако основную угрозу для Земли представляют астероиды размером от 140 метров до 1 км. Количество неоткрытых астероидов такого размера оценивается в несколько десятков тысяч. Популяция объектов еще меньших размеров (от 50 до 100 метров) оценивается более чем в несколько сотен тысяч. Открытия таких тел идут непрерывно, но известны орбиты лишь нескольких процентов таких тел.

Инфракрасный телескоп WISE (широкоугольный исследователь в инфракрасных лучах), запущенный НАСА на околоземную орбиту и проработавший на орбите с декабря 2009 по февраль 2011 года, обнаружил более 33,5 тысяч новых астероидов и комет (рис. 1). Оказалось, что потенциально опасных астероидов примерно в два раза больше, чем считалось на основании наземных наблюдений (т.е. порядка 20000 объектов). Было обнаружено много объектов с орбитами, близкими к плоскости земной орбиты.

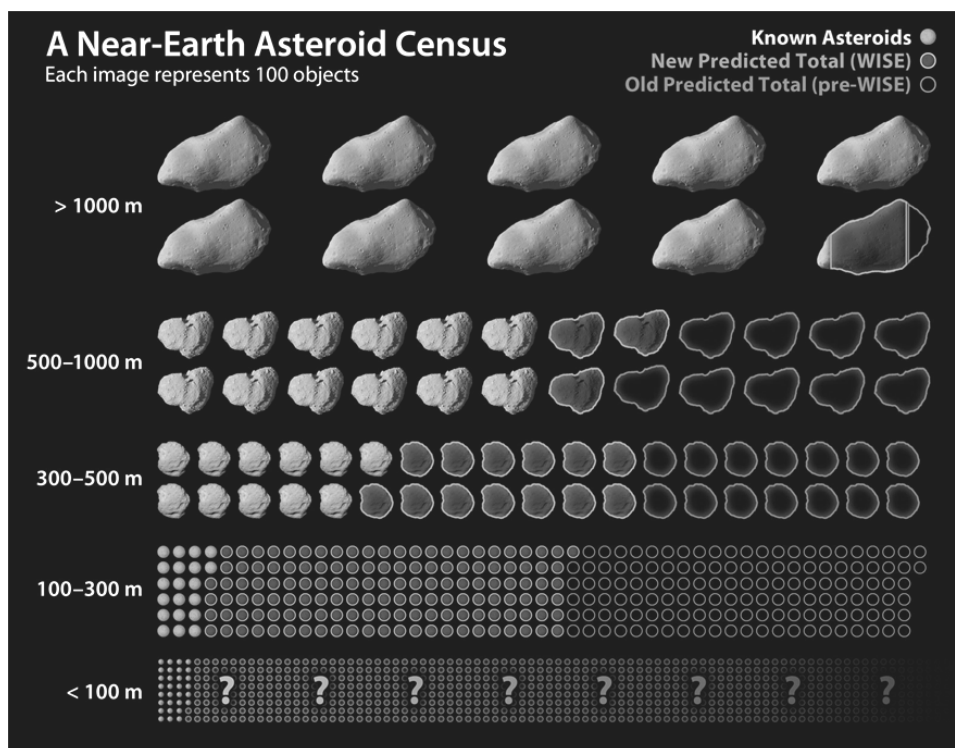


Рисунок 1.

На рис. 1 представлено количество известных астероидов (размер указан слева) и количество неизвестных астероидов по прогнозам до и после работы КА WISE. Каждое изображение представляет 100 объектов.

Следовательно, ключевой момент любых программ исследований по проблеме астероидно-кометной опасности состоит в поисковых наблюдениях и каталогизации малых небесных тел.

Не менее важная задача заключается в изучении физико-химических, минералогических, структурных и динамических свойств астероидов, что необходимо как для понимания закономерностей эволюции ранней Солнечной системы, так и для решения проблем астероидно-кометной опасности. Мизерное количество имеющейся в настоя-

шее время информации о строении и свойствах малых тел Солнечной системы лишает смысла обсуждение технологических способов противодействия опасным телам. Задача состоит в опережающем изучении астероидов, как объектов, требующих целесообразно выбранного способа противодействия.

Задача массового обнаружения опасных небесных тел формулируется сегодня как необходимость обнаружения опасных небесных тел размером более 100 метров. Изучение опасных тел направлено на уточнение степени риска и выработку способа предотвращения или уменьшения ущерба в случае падения опасного тела на Землю.

Решение первой задачи возможно только с помощью крупных специализированных телескопов. Для решения второй задачи необходимо детальное изучение (мониторинг) опасных тел, в результате которого, кроме физико-химических характеристик, должны непрерывно уточняться параметры орбит опасных объектов. Эту задачу могут выполнять существующие телескопы умеренного размера (0.5–1 м), оснащенные однотипными современными приемниками излучения и однотипным программным обеспечением для обработки наблюдений.

К сожалению, в настоящее время в России нет современных инструментов для работы в режиме службы и полного обзора неба. Существующие телескопы имеют малые поля зрения и не могут эффективно использоваться для массового обнаружения и детального исследования опасных небесных тел.

Поступающую со средств наблюдения информацию можно разделить на координатную и некоординатную. Точность единичного наблюдения для случая координатных наблюдений для современных наземных систем обнаружения и мониторинга опасных небесных тел достигает 0.5 угловых секунд. Для космических систем наблюдения достижима точность 0.1 угловой секунды. Применительно к проблеме АКО, повышение точности прогноза движения опасного небесного тела означает повышение возможности оценить вероятность столкновения небесного тела с Землей и определить район возможного столкновения для выработки оптимальной стратегии дальнейших действий.

Для того чтобы система предупреждения была эффективна, должны выполняться требования заблаговременного обнаружения опасных небесных тел. Например, астероид размером около 140 метров должен быть обнаружен на расстоянии 2 а.е. от Земли. Такое расстояние астероид преодолет за 2 месяца. Этого времени достаточно, чтобы организовать противодействие или, по крайней мере, подготовиться к нему (организовать эвакуацию населения, остановить опасные производства и т.п.).

Как правило, все астероиды, сближающиеся с Землей, имеют сближения с внутренними планетами, некоторые имеют много сближений с Землей, в том числе – тесных. Орбиты многих астероидов вообще проходят через сферу тяготения Земли, орбиты некоторых астероидов лежат внутри орбиты Земли. Все орбиты после тесных сближений характеризуются возможностью новых периодических сближений и новыми изменениями траектории. При прохождении астероида через сферу тяготения при тесных сближениях с Землей происходит резкое падение точности интегрирования и значительное увеличение вероятностной области движения астероида. Поэтому важной задачей является определение момента времени, после которого движение становится непредсказуемым. Пример определения предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли, дан в работе [1]. Выявлено 17 астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли в ближайшие 190 лет.

Задача оперативного анализа орбит всех вновь открываемых тел очень сложна и трудоемка. Прослеживание номинальной, т.е. определенной при обнаружении нового объекта, орбиты не позволяет решить вопрос о вероятности столкновения из-за ошибок наблюдений, положенных в основу расчета. Неопределенность в положении реального

тела постепенно нарастает и, спустя некоторое время, точный прогноз движения становится практически невозможным.

Более эффективным может быть вероятностный подход, основанный на прослеживании движения множества виртуальных тел, орбиты которых совместимы с имеющимися наблюдениями. При этом часть виртуальных тел может столкнуться с Землей, а часть – нет. Прогнозировать столкновение реального тела можно только с определенной вероятностью. Эта задача имеет нелинейный характер, влияние которого возрастет с течением времени, особенно, как уже сказано, после тесных сближений тел с Землей и с другими планетами.

Задача прогнозирования орбиты опасного тела требует также учета тонких эффектов, приводящих на длительных интервалах времени к ощутимым отклонениям вычисляемых положений от реальных (эффекты сублимации вещества, световое давление, эффект Ярковского и др.) При подготовке проекта НАСА OSIRIS – REX, предназначенного для полета к астероиду 1999RQ36, группе исследователей НАСА пришлось максимально точно вычислить орбиту этого астероида и определить влияние на нее различных сил, в том числе эффекта Ярковского. Выяснилось, что за 12 лет наблюдений со дня открытия, астероид 1999RQ36, диаметром в 0.5 км изменил свою орбиту на 160 км. Это очень много.

Прогресс вычислительной техники и программных средств дали новый импульс развитию современной небесной механики. «В течение веков понимание Солнечной системы проэволюционировало от представленной Ньютоном и Лапласом детерминистской модели движения планет до хаотической модели, открытой в современных численных и аналитических исследованиях» [2]. Все эволюционные процессы в Солнечной системе требуют качественного анализа, чтобы сделать более предсказуемыми процессы сближения и возможных соударений малых небесных тел с Землей.

С пониманием регулярной и хаотической динамики тел Солнечной системы и динамического хаоса в движении астероидов обозначился существенный прогресс в изучении динамики тел Солнечной системы.

Из-за тесных сближений с планетами аналитические методы оказались мало пригодными для длительного прогнозирования движения таких тел. А при численном интегрировании уравнений движения быстро накапливаются ошибки округления. Первоначально близкие орбиты могут расходиться со временем экспоненциально. Поэтому для исследования долговременной орбитальной эволюции астероидов, хаотической динамики движения АСЗ, оценки времени предсказуемости движения АСЗ нужны новые эффективные алгоритмы для построения доверительных областей движения.

Пока работ, посвященных исследованию долговременной эволюции и хаотической динамики АСЗ и оценки времени предсказуемости их движения мало и полученные оценки не всегда согласуются.

Фундаментальная научная проблема возможного столкновения с Землей достаточно крупных небесных тел - астероидов и комет, остается в ряду комплексных глобальных проблем, стоящих перед человечеством. Многие задачи еще ждут своего решения. Среди них – разработка комплексной модели возможных последствий столкновения с Землей космического тела и разработка критериев для оценки риска.

Одна из наиболее интригующих задач - поиск ответа на вопрос об источниках резервуарах пополнения астероидной популяции в околоземном пространстве.

Открытие астероида Апофис, который по всем расчетам в 2029 году подойдет к Земле на расстояние геостационарной орбиты, и возможный полет космического аппарата с выводом его на астероидоцентрическую орбиту обозначили новую проблему, связанную с особенностями динамики полета КА в близкой окрестности малого небесного тела. Такая ситуация представлена пока единственной миссией посещения малого

астероида АСЗ 25413Итокава японским аппаратом Хаябуса. Аппарат был запущен в 2003 году с целью посадки на астероид и доставки на Землю его вещества. Ничтожная доля вещества астероида была доставлена на Землю в июне 2007 года. Проблемы такого рода миссий могут быть связаны с недооценкой специфики маневрирования КА в гравитационном поле малого тела, неправильностью фигуры астероида, дополнительными возмущениями со стороны небесных тел Солнечной системы. Нужны новые решения повышения точности определения движения малого астероида, вероятно выходящие за рамки традиционного определения эфемерид небесных тел [3].

В заключение, суммируя все выше сказанное, перечислим основные научные задачи проблемы АКО.

- Исследование процессов миграции малых тел, основных резервуаров и механизмов воспроизводства популяции объектов, сближающихся с Землей.
- Исследование долговременной орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы, хаотической динамики АСЗ, оценки времени предсказуемости движения АСЗ, возможности резонансных возвратов после тесных сближений с планетами.
- Исследование особенностей динамики астероидов с орбитами, лежащими в окрестности орбиты Земли, квазиспутниковых режимов, обеспечивающих длительное существование астероидов в окрестности Земли.
- Исследование физических характеристик, химического и минералогического состава малых тел Солнечной системы.
- Разработка критериев определения степени угрозы (степени риска).
- Исследование фундаментальных аспектов возможных мер предотвращения столкновений объектов, сближающихся с Землей.
- Исследование фундаментальных аспектов противодействия и уменьшения ущерба.

Р.С. 23 ноября 2012 года в Федеральном космическом агентстве под руководством В.А. Поповкина состоялось заседание первой секции Научно-технического совета.

Участники заседания рассмотрели Системный проект по развитию существующих и созданию перспективных средств измерений, наблюдения и контроля околоземных космических объектов в интересах информационного обеспечения единой системы предупреждения и парирования космических угроз. Данный проект разработан ОАО «МАК «Вымпел» в кооперации с другими предприятиями и организациями в соответствии с техническим заданием Федерального космического агентства.

В проекте были предложены направления работ по развитию существующих и созданию новых специализированных средств обнаружения и мониторинга околоземного космического мусора и опасных астероидов и комет, а также по развитию информационно-аналитических центров сбора, обработки и анализа измерительной информации.

Секция НТС решила, что разработанный системный проект может быть положен в основу формирования дальнейших планов наращивания информационных возможностей средств Роскосмоса в интересах мониторинга ОКП и выявления объектов естественного происхождения, опасно сближающихся с Землей.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. Т.Ю. Галушина, О.Н. Раздымакина. О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли. Вестник СибГАУ, выпуск 6(39) по материалам конференции «Околоземная астрономия - 2011», 2011, с. 9-14.
2. К. Мюррей, С. Дермонт. Динамика Солнечной системы. М., Физматлит, 2009, 588 с.

3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Под ред. *Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой*, М., Физматлит, 2010, 384 с.

ASTEROID AND COMETARY DANGER. SCIENTIFIC PROBLEMS

Rykhlova L.V.

INASAN, Moscow, Russia

Scientific understanding and justification of a problem of asteroid and cometary danger become possible as a result of information explosion at a turn of the twenty first century.

Special services of supervision led to opening of a huge number of earlier unknown small bodies of Solar system, including objects of a special class of asteroids approaching with Earth.

Basis of the solution of all scientific and practical problems of asteroid and cometary danger are search survey supervision for detection and forecast of orbit of asteroids and comets dangerous to Earth, an assessment of time of their predictable trajectory, definition of time and a place of possible collision, research of the main sources of replenishment of population of asteroids and comets in internal areas of Solar system, ways of their migration, processes of long evolution under the influence of various gravitational perturbations.

ОРБИТАЛЬНАЯ ЗВЕЗДНАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ: НАУЧНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА

Чубей М.С.¹, Куприянов В.В.¹, Львов В.Н.¹, Цекмейстер С.Д.¹,
Толчельникова С.А.¹, Бахолдин А.В.², Цуканова Г.И.², Маркелов С.В.³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия

Кратко изложен итог развития проекта создания Орбитальной Звездной Стереоскопической Обсерватории. Научная программа исследований определяется с учетом свойств стереометрии. Предлагаемое приборное оснащение ориентировано на получение глубоких снимков высокого оптического разрешения с прониканием до 25^m в интегральном свете. Разработаны методические приемы решения задач программы, представлены оценки точности и ценности ожидаемых результатов, оценки научного и прикладного значений проекта.

Введение

Проект «Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория» (ОЗСО) [1] разработан как «производная» от НИР «Межпланетная Солнечная Стереоскопическая Обсерватория» (МССО) [2, 3]. Конфигурации и МССО, и ОЗСО формируются одинаково – путем установки двух идентично оснащенных космических аппаратов (КА) в окрестностях круговых лагранжевых центров либрации L_4 , L_5 в системе «Солнце – «барицентр системы Земля+Луна»», рис. 1. Физические условия вблизи центров L_4 , L_5 [1] свободны от действия геосферных факторов, от периодических входов КА в тень Земли, наконец, от угрозы столкновения с объектами техногенного загрязнения околоземного космоса. Обсерватория предлагаемой конфигурации выгодна для использования метода синхронных наблюдений, нацеленных на фундаментальное изучение свойств Солнечной системы и близкого к Солнцу пространства Галактики.

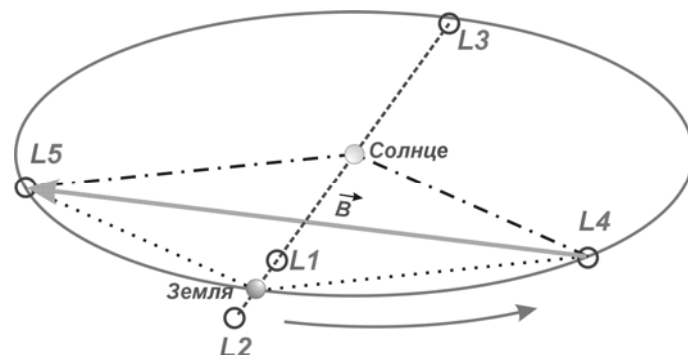


Рис. 1. Центры либрации в системе «Солнце – «барицентр системы Земля+Луна»». Космические аппараты ОЗСО устанавливаются в окрестностях центров L_4 и L_5 , положение которых определяется текущим положением Земли в орбите [4, стр. 275]. Вектор базы ОЗСО $\vec{B} = \overline{L_4L_5} = \sqrt{3} \cdot a$, его длина $|\vec{B}| \cong 259.111$ млн.км.

Целевая программа МССО на ранних этапах разработки [2, 3] ориентировалась на выполнение фундаментальных исследований в рамках двух групп проблем астрономии: (1) проблем физики Солнца и солнечно-земных связей; (2) проблем небесной механики,

звездной астрономии, астрометрии и астрофизики – все с одной общей платформы. Разделение сложной компоновки на специализированные солнечную и звездную [1] естественным образом улучшает технологические условия создания каждой из обсерваторий. Работы над звездной компоновкой осуществляет инициативная группа астрономов ГАО РАН в кооперации с сотрудниками других институтов.

Значительный стимул разработке придает уверенность в том, что, применив оптимальное планирование, построить астрографы и выполнить наземную подготовку ОЗСО возможно за меньший срок, чем солнечную, которая содержит комплекс из примерно 12–15 специализированных инструментов [3] и по ряду причин начало работ над ней перенесено на 2014 год. В то же время НИР ОЗСО с достаточной подробностью выполнена. ОЗСО имеет сторонников, а равно и критиков. Сторонники уверены в том, что создать ОЗСО возможно без «долгостроя», не потеряв актуальности программы, свежести идеи, ценности и новизны задач и наработок, и, наконец, накопив опыт, который может быть использован при создании солнечного варианта. Конструктивный потенциал развития идеи орбитальной стереообсерватории велик и весьма интересен. Проект не повторяет представленных в мире проектов и является оригинальным.

Подобно телескопу HUBBLE [5], астрограф ОЗСО проектируется для выполнения всех видов астрономических наблюдений, свойственных наземным астрографам, за исключением спектральных, при выполнении которых эффект стереоскопии не проявляется, а требуемый ресурс огромен. Отличие ОЗСО от астрографа HUBBLE состоит и в том, что ОЗСО содержит два астрографа, разнесенных в пространстве эклиптики на расстояние, равное 0.86% диаметра орбиты Земли, а каждый из телескопов удален от Земли на 1 а.е. Соответственно имеет значительно более жесткие ограничения по весу, ресурсу и компоновочному пространству, чем телескоп HUBBLE. С другой стороны, прошло три десятилетия со времени, когда проектировался HUBBLE, сменились эпоха, элементная технологическая база, приоритеты. По причине этих ограничений и изменений группа, разрабатывающая ОЗСО, основное внимание уделила именно инструментальному оснащению, ориентируясь на образцы выполненных экспериментов с КА HUBBLE, HERSCHEL [6], проходящих интеграцию КА «Спектр-УФ» [7], GAIA [8], и проектируемых экспериментов SNAP [9], JASMINE [10], OBSS [11] и др.

В дополнение к естественнонаучным и научно-техническим основаниям проекта, изложенным в [1], отметим, что после исчерпания ресурса космические аппараты не будут источником загрязнения околоземного пространства.

О научной программе ОЗСО

Научная программа ОЗСО учитывает существующие актуальные задачи современной астрономии: (1) задачи астероидно-кометной опасности (АКО), (2) задачи изучения фундаментальных свойств планетной системы Солнца, звезд с прямым определением «мгновенных» их параллаксов, и других объектов близкой к Солнцу части Галактики, и, наконец, (3) ОЗСО безусловно сможет быть использована и для наблюдений комет, сверхновых звезд и других транзиентов, по мере их появления. Планируемое оборудование ОЗСО весьма выгодно и эффективно может быть использовано для этой цели, равно как и для получения наблюдений, верифицирующих сами явления, например, явление точечного линзирования [12, 4]. Фотометрические наблюдения экзопланет, полученные синхронно, с высоким фотометрическим и астрометрическим разрешением и свободные от влияния атмосферы, несомненно, также были бы оригинальным вкладом в изучение объектов этого класса.

Таким образом, – мы осуществляем **Комбинированный Орбитальный Стереоскопический Мониторинг Объектов Солнечной Системы (КОСМОСС), (Combined Orbital Stereoscopic Monitoring of the Objects of the Solar System, COSMOSS).**

Мы полностью разделяем точку зрения Международного Астрономического Союза: фундаментальное изучение Солнечной системы на базе новых технологий, развитых к началу XXI века – проблема назревшая, и к тому же она обозначена астрономическим сообществом как одна из наиболее актуальных [13].

Трехзеркальный астрограф ОЗСО

Система наведения и управления экспонированием телескопа HUBBLE блестяще зарекомендовала метод точечного наведения и удержания направления в течение времени экспонирования. В отечественном проекте «Спектр-УФ» [7] эта система наведения также разработана. Ее аналог планируется к использованию в проекте ОЗСО с соответствующей адаптацией.

В работах [1, 14] приведены параметры трехзеркальной оптической системы с фокусным расстоянием 20 м, с использованием светофильтровой системы. В развитие этих работ нами велся дальнейший поиск возможностей увеличить разрешение и точность астрометрических наблюдений [15]. Рассмотрены только центрированные системы, работающие полным полем [14, 15]. Здесь представлен вариант (Рис. 2) с эквивалентным фокусным расстоянием $f' = 30$ м, $2\omega = 40'$. Компоновка системы с $f' = 20$ м, [1, стр. 364], занимает объем пространства $(130 \times 200 \times 270 \text{ см}^3)$, компоновка (Рис. 2) – $130 \times 150 \times 400 \text{ см}^3$. Линейное поле диаметром $d = 350$ мм покрыто мозаикой ПЗС-матриц, одинаково для обеих компоновок. Мозаики ПЗС такого размера пока не использовались в отечественных проектах, но освоены в проектах [8, 9, 10, 11], и их создание осваивается, наконец, отечественной электроникой [16, 17]. Длиннофокусность системы расширяет пределы глубины резкости, что облегчает условия работы мозаики.

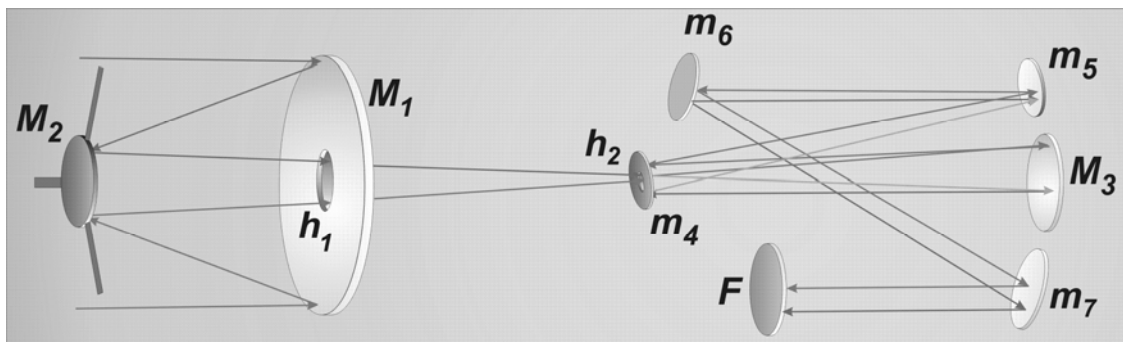


Рис. 2. Пространственная оптическая схема с угловым полем ($2\omega = 40'$) и с двумя отверстиями h_1 и h_2 . Зеркала M_1 и M_3 – имеют форму эллипсоидов вращения; зеркало M_2 – гиперолоид вращения, m_4, m_5, m_6, m_7 – дополнительные плоские зеркала, F – фокальная плоскость приемника – мозаика из ПЗС-матриц.

Из работ [16, 17] ясно, что для выбора системы регистрации возможны две стратегии набора ПЗС-матриц в мозаику, имеющих каждая свои преимущества: а) много отдельных матриц небольшого формата; б) меньшее количество крупноформатных матриц. Разделение всей мозаики, [16], «... на отдельные составляющие обосновано несколькими причинами:

- 1) чтение данных с малой матрицы происходит значительно быстрее, чем с большой;
- 2) в случае производственного дефекта выйдет из строя только один блок, т.е. покрытие фокальной плоскости большим числом малых матриц уменьшает шанс выхода из строя всего устройства;
- 3) производство ПЗС матрицы небольшого размера обходится дешевле, доля годных изделий выше;
- 4) влияние ярких звезд на соседние части мозаики будет снижено ...».

На стадии НИР мы принимаем обе стратегии (Рис. 3, 4). Любая может быть использована в любом из двух вариантов астрографа. Матрицы *A*, *B*, *C*, *D* предназначены для функций гидирования и удержания на время экспонирования.

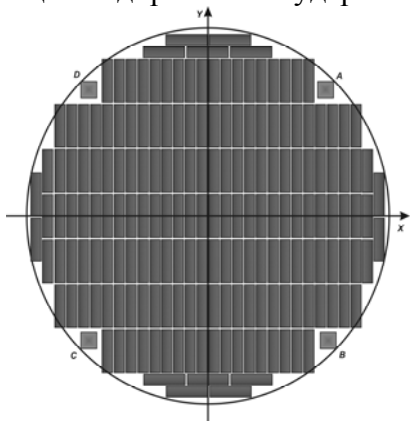


Рис. 3. Стратегия а). Базовый размер ПЗС $4K \times 1K$, число элементов 186, число регистров считывания 186, число выходных узлов считывания 186.

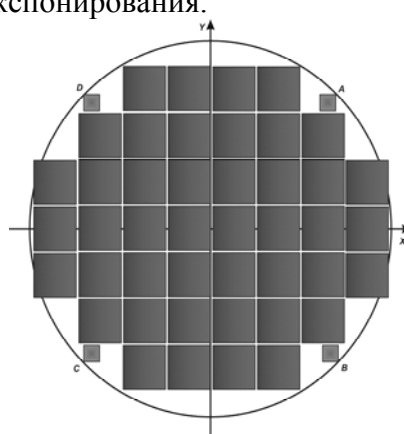


Рис. 4. Стратегия б). Базовый размер ПЗС $4K \times 4K$, число элементов 44, число регистров 88, число выходных узлов 176.

Пиксел – квадрат со стороной 10 микрон. При использовании аппроксимации функцией рассеяния точки (ФРТ) положение фотоцентра изображения точечного источника определяется с точностью на уровне не грубее 0.01 пиксела, а ошибка одиночного измерения заключена в пределы $0.00062'' \geq |\sigma_1| \geq 0.00012''$ при избранных параметрах оптической системы. Геометрическая калибровка поля каждого из астрографов, включая калибровку чувствительности пиксельного поля, принципиальных трудностей не вызывает и является обязательной для любого телескопа, орбитального или наземного, при вводе в рабочий режим. Для ОЗСО калибровка производится сначала в наземных испытаниях. Опыт и стандартные требования таких испытаний и калибровок накапливается с 70-х годов XX века [18].

Окончательная калибровка осуществляется в развернутом состоянии на орбите при выполнении операций вывода телескопа в рабочий режим. Астрометрическая калибровка сводится к определению параметров модели искажений, включая совокупное влияние остаточных аберраций оптики астрографа, нерегулярность пиксельной структуры отдельных ПЗС-матриц и неточности взаимной ориентации ПЗС-матриц, а также их остаточных наклонов к фокальной плоскости, возникающих при сборке и коррекции неплоскостности мозаики. Характеризующие все эти типы искажений параметры модели определяются путем сопоставления тангенциальных координат звезд опорного каталога измеренным их координатам. Минимизация влияния ошибок каталога и ошибок измерения достигается при этом усреднением по достаточному количеству калибровочных площадок. Такая методика калибровки основана на методах классической наземной фотографической астрометрии (см., напр., монографию [19]). Фотометрическая калибровка проводится методами, аналогичными используемым в наземной ПЗС-фотометрии.

Применение данной методики существенно облегчается отсутствием атмосферных искажений и строго дифракционными ограничениями качества изображений. Калибровка каждого из двух телескопов комплекса выполняется полностью независимо.

Основные подходы

Основной метод наблюдения тел Солнечной системы (Рис. 5) – построение «веера» барицентрических векторов $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$, уравнивание по методу наименьших квадратов очевидной избыточной системы уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} \overline{R}_i(t_i) &= \overline{R}_0(t_0) + \overline{V}_0(t_i - t_0) + \overline{\delta R}_i; \\ \overline{\delta R}_i &= \vec{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с выводом радиуса-вектора $\mathbf{R}(t_0)$ и скорости $\mathbf{V}(t_0)$ в средний момент серии (1).

В околоземном пространстве контролируется сфера радиусом 0.5 а.е. [20, стр. 179–182] с Землей в центре с подлетным временем в 30 суток. Пересечение на Земле конусов лучей обоих телескопов ОЗСО с раствором угла в 1° формирует сферу вокруг Земли диаметром 0.017 а.е. = 2.618 млн. км = \mathbf{D} (Рис. 6). Величина \mathbf{D} лишь немного меньше расстояния между центрами L1, L2. Затрачивая в среднем 4 минуты на глубокий снимок (360 снимков в сутки), каждый из инструментов ОЗСО, контролируя ту же сферу в 0.5 а.е. или телесный угол пространства размером $60^\circ \times 60^\circ$, затратит 10 суток.

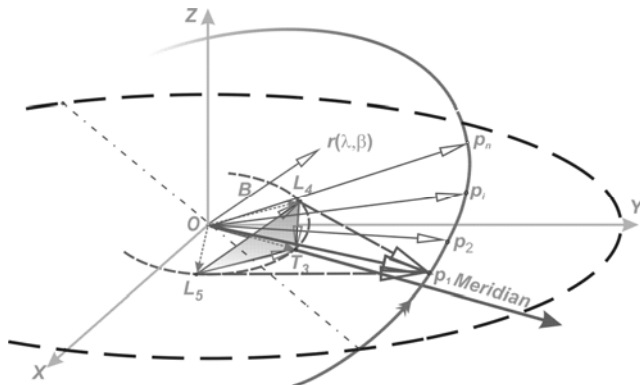


Рис. 5. «Веер» радиус-векторов определяемого тела Солнечной системы.

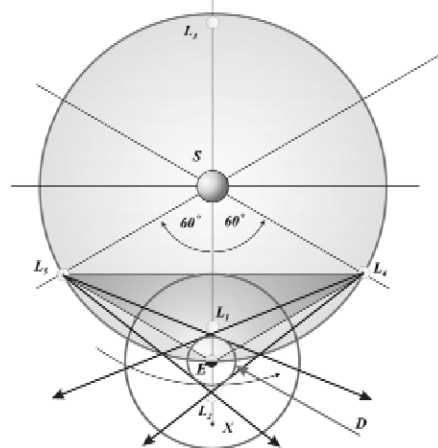


Рис. 6. Контроль околоземного пространства.

Наибольшую угрозу представляют тела размерами в 50–100 м [20, с. 13–14]. Для оценки эффективности ОЗСО имеет значение проникающая сила телескопов или их предельная звездная величина m , которую оценим по формуле (2), [20, с. 167]

$$m = 7.1 + 0.5\mu + 2.5 \lg \frac{\sqrt{S\eta T}}{k\Delta}, \quad (2)$$

дающей для нас предел яркости 25^m . Минимальные размеры астероида для ОЗСО составляют 19 м, 25 м, 60 м в зависимости от визуального альbedo. Моделирование решения задач АКО [21, 22] показывает высокую точность наблюдений ОЗСО.

Выводы и заключение

Проект ОЗСО даст: {1} существенный вклад в решение фундаментальных задач АКО; {2} материал для современной уникальной базы данных прямых синхронных глубоких кадров высокого астрометрического и фотометрического разрешения, со стереоэффектом, отсутствующим в мировых базах; {3} опыт создания долговременной орбитальной обсерватории в окрестностях Лагранжевых центров либрационных движений. Проект прошел апробацию, доложен в профессиональных аудиториях, на семинарах и конференциях, в периодической печати и получил поддержку в ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, ИКИ РАН, ИПМ РАН, САО РАН, СПбГУ, СПбГТУИТМО, НИИ ТВ, НИИ ЭЛЕКТРОН, ЛОМО, ГОИ, НПО им. С.А. Лавочкина, ОАО ИСС им. М.Ф. Решетнева. Проект может быть выполнен в формате международной кооперации.

Литература

1. Чубей М.С. Межпл. Стереоскоп. Обсерв.: астрономич. часть научн. программы и компоновки. Известия ГАО РАН №219, выпуск 4, 2009. С. 361–368.

2. Чубей М.С., Копылов И.М., и др. Астрометрия и фотометрия в рамках проекта «МССО». Тр. IV Съезда АО, 19–29 ноября 1997 г. ГАИШ, Москва, 1998. С. 103–109.
3. В.М. Григорьев, П.Г. Папушев, С.А. Чупраков, М.С. Чубей, и др. МССО. Оптический Журнал, том 73, №4, 2006. С. 43–48.
4. Чубей М.С. Известия ГАО РАН, № 213, 1998, стр. 273–278.
5. Hubble Space Telescope. http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope
6. http://www.esa.int/SPECIALS/Herschel/SEMBJRTTGOF_0.html
7. Шустов Б.М., Боярчук А.А., Мошнеев А.А., Сачков М.Е. Проект «Всемирн. косм. обсерв. – ультрафиолет». В сб. Мат. Всеросс. Конф. 19–20 мая 2008 г., М., Росс./ Под ред. Б.М. Шустова, М.Е.Сачкова и Е.Ю. Кульпио. – М.: Янус-К, 2008. 344 с., илл.
8. GAIA <http://www.rssd.esa.int/gaia/>
9. SNAP (arXiv:astro-ph/0405232v1 12 May 2004).
10. JASMINE (<http://www.jasmine-galaxy.org/pub/index.html>).
11. *Grillmair Carl J. et al.* OBSS. The Origins Billion Star Survey. (<http://ad.usno.navy.mil/OBSS/>), 2007.
12. *Andrew Gould.* MACHO velocities from satellite-based parallaxes. AJ, 421 :L75–L78, 1994 February 1.
13. *Tim de Zeeuw et al.* A Science Vision for European Astronomy. ASTRONET SVWG. DRAFT. December 19, 2006. <http://www.strw.leidenuniv.nl/sciencevision>
14. Чубей М.С., Цуканова Г.И., Бахолдин А.В. Специфика расч. опт. сист. астрографа для проекта “МССО” // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 7. С. 37–41.
15. М.С. Чубей, А.В. Бахолдин, Г.И. Цуканова, В.С. Пашков. Орб. широкоуг. астрограф для получ. изображ. высокого астрометрич. и фотометрич. разреш.. Сб.тр. II Всеросс. н-т. конф. (ИКИ РАН, 13–16 сент. 2010, Росс., Таруса) «Совр. пробл. ориент. и навиг. косм. аппаратов» / под ред. Г.А.Аванесова. Москва, 2011, ISSN 2075-6836, с. 174–182.
16. Левко Г.В. Анализ конструкт. особ. ФПЗС мозаик // «Сист. наблюд., мониторинг. и дистанционного зонд. Земли». Материалы VIII научно-технической конференции. М. 2011.
17. Алымов О.В., Левко Г.В., Минкин В.А., Стерлядкин О.К. Крупноформ. ФПЗС пр. ОАО «ЦНИИ “Электрон”». Мат. 9-й межд. Конф. «ТВ: передача и обраб. изобр.», 26–27 июня 2012 г., Санкт-Петербург.
18. Р.Х. Мейер. Калибровка и оценка характеристик систем и устройств для космической астрономии. Анализ испытательной установки. В кн. Космич. оптика. Тр. IX Межд. Конгр; Межд. комиссии по оптике. Пер. с англ. А.В. Фролова. М., Машиностр., 1980. С. 72–100.
19. А.А. Киселев. Теоретич. Основ. Фотографич. астрометрии. М., «Наука» ФМ, 1989. 260 с.
20. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2010. – 383 стр. – ISBN 978-5-9221-1241-3.
21. M.S. Chubey, et al. In: Proceed. Int. Conf. Asteroid-Comet Hazard-2009, SPb, 2009, p.110-114.
22. Чубей М.С., и др. Известия ГАО РАН, № 219, вып. 4, с. 369–374.

ORBITAL STELLAR STEREO SCOPIC OBSERVATORY: SCIENTIFIC AND APPLIED VALUE OF THE PROJECT

**Chubey M.S.¹, Kouprianov V.V.¹, L’vov V.N.¹, Tsekmejster S.D.¹,
Tolchel’nikova S.A.¹, Bakholdin A.V.², Tsukanova G.I.², Markelov S.V.³**

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

³*Special Astrophysical Observatory of the Russian academy of sciences*

The result of the work on the project of creation the Orbital Stellar Stereoscopic Observatory is briefly described. The scientific program of researches is defined in view of properties of stereometry. The suggested instrumental equipment is focused on acquisition of deep images of the high optical authority with penetrating up to 25^m in integrated light. Methodical approach to the solving of the scientific program problems are developed; estimations of accuracy and value of expected results, estimations of scientific and applied values of the project are submitted.

Секция 2

**ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ
И ГЕОДИНАМИКА**

КИНЕМАТИКА ГНСС-СТАНЦИЙ ВОКРУГ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Горшков В.Л.¹, Смирнов С.С.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, СПб

²Астрономический Институт СПбГУ, СПб

Точности ГНСС определений достаточны для производства таких научных исследований как глобальная геодинамика и выявление локальных аномалий в движении литосферных плит. В работе представлены результаты обработки полевых (Россия) и перманентных (Россия, Финляндия и Эстония) ГНСС станций, окружающих Финский залив. Наблюдения на полевых станциях в Кронштадте, Шепелево и Гогланде впервые используются в совместной обработке с помощью GIPSY 6.1.2 для оценки поля деформаций в этом регионе. При обработке учтены атмосферные и гидрологические нагрузки, особенно сильно искажающие данные оценок скоростей полевых станций.

В последнее десятилетие на южном побережье Финского залива (в Эстонии) и в Санкт-Петербурге появился ряд перманентных ГНСС-станций (GPS/ГЛОНАСС), позволяющих более детально изучать геодинамику этого региона. Точности ГНСС-определений достаточны для производства таких научных исследований как глобальная геодинамика и выявление локальных аномалий в движении литосферных плит. В работе представлены результаты обработки полевых (Россия) и перманентных (Россия, Финляндия и Эстония) ГНСС-станций, расположенных на южной окраине Балтийского щита и окружающих Финский залив. Наблюдения на полевых станциях в Кронштадте, Шепелево и Гогланде впервые используются в совместной обработке с помощью GIPSY 6.1.2 для оценки поля деформаций в этом регионе. Данная работа продолжает наше исследование геодинамики района Финского залива (Горшков, Смирнов, Щербатова, 2012).

Большинство исследуемых в данной работе станций (METS, SUUR, TOIL, SVTL, PULK) включены в Европейскую сеть (EPN) и их характеристики и данные наблюдений доступны для общего пользования (<http://epncb.oma.be/>). Станция Астрономического Института СПбГУ (SPBU) функционирует в перманентном режиме с мая 2006 года, но пока не входит в сеть EPN. Наблюдения на полевых станциях произведены силами сотрудников ИФЗ РАН в течение нескольких летних сезонов 1997-2011 годов.

Обработка наблюдений с помощью пакета GIPSY-OASIS II (версия 6.1.2) была произведена в ГАО РАН с использованием стратегии PPP (точное определение положения станции). Фазовые неопределенности учтены по таблицам (WLPB), вычисляемым в JPL по глобальной сети. Необходимые для обработки точные орбиты спутников, поправки часов и параметры вращения Земли, были взяты из сайта <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/>. Использовалась абсолютная калибровка антенн и модель тропосферы (картирующая функция) GMF. Океанические приливные нагрузки учитывались по данным соот-ветствующей службы [Schernack, 1991, <http://www.oso.chalmers.se/~loading/>]. Также учитывались и твердотельные приливы.

Кроме того при обработке учтены атмосферные и гидрологические нагрузки, особенно сильно искажающие данные оценок скоростей полевых станций (Petrov, Voy, 2004). Координаты отнесены к эллипсоиду WGS84 и переведены в систему IGS08.

Для обработки GPS наблюдений на перманентных станциях использовались только полные суточные данные всех станций. Помимо этого были удалены некачественные наблюдения по элементарным статистическим критериям. Для полевых станций

использовались все возможные наблюдения. Станция GOGI исключена из окончательных вычислений поля деформаций ввиду её особенности. При исключении одного дня наблюдений с превосходящим по статистическим критериям уклонением, горизонтальная скорость станции значительно меняет как своё направление, так и величину, как это видно из рис. 1. Возможно, это связано с самым ранним периодом наблюдений (1994 и 1997 года) либо с повреждением марки, на которой эти наблюдения проводились.

После учёта всех нагрузочных поправок методом наименьших квадратов были оценены скорости станций по широте, долготе и высоте (табл.1). Оценки горизонтальных скоростей станций, также как их ошибки, практически не изменяются при учете нагрузочных поправок, что естественно ввиду «вертикального» их характера. Вертикальные скорости значимо меняются при учете этих поправок, а их ошибки уменьшаются незначительно

Таблица 1. Оценки скоростей станций приведены как с учётом нагрузочных эффектов (с нагр.), так и без них (б/нагр). ADEV - вариации Аллана.

Станции	Полных дней	V_N (мм/год)		V_E (мм/год)		V_U (мм/год)		ADEV (мм)		
		б/нагр.	с нагр.	б/нагр.	с нагр.	б/нагр.	с нагр.	N	E	U
SPBU	1359	11.49±.07	11.56±.07	20.63±.06	20.60±.07	3.34 ±.24	4.50±.19	2.1	2.1	5.6
PULK	1520	11.96±.06	12.01±.06	21.37±.06	21.33±.07	-0.86±.17	0.21±.16	1.8	2.0	5.5
SVTL	1451	11.50±.06	11.54±.06	21.39±.06	21.29±.06	2.18 ±.19	3.13±.15	1.9	2.0	4.1
TOIL	866	12.30±.16	12.52±.16	20.30±.15	20.18±.15	3.20 ±.35	4.46±.34	1.8	2.0	4.2
SUUR	1317	12.11 ±.07	12.14±.07	20.58±.07	20.34±.07	4.10 ±.18	4.14±.22	2.0	2.1	4.8
METS	1664	12.76±.06	12.76±.06	19.92±.07	19.79±.07	3.82 ±.12	5.42±.14	1.9	2.5	4.2
KRON	28		12.2±0.3		20.1±0.4		3.8±1.0			
SHEP	26		12.0±0.1		20.1±0.1		5.3±0.2			

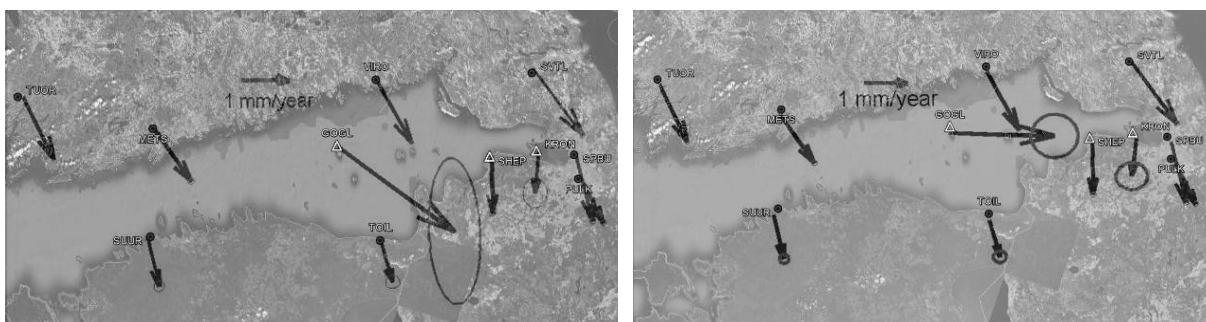


Рис. 1. Горизонтальные скорости станций после снятия модельного движения евроазиатской плиты в системе ITRF2005 (Altamimi et al., 2007).

Несмотря на немногочисленность станций, окружающих Финский залив, по взаимным горизонтальным скоростям этих станций можно оценить поле деформаций региона. Предварительно горизонтальные скорости станций были редуцированы за движение Евроазиатской (ЕА) плиты в системе ITRF2005 (Altamimi et al., 2007).

На рис. 2. приведены локальные деформации ($\Delta L/L$, в нанострейнах за год) с помощью программного обеспечения GRID-STRAIN (Teza et al., 2007). Данное ПО пред-

ставляет структуру деформационного поля как набор главных компонент напряжений вычисленных на регулярной сетке. Естественно, что выбор масштаба сетки должен быть соотнесен с характерным расстоянием между станциями региона для получения приемлемого уровня точности решения. Для этих целей в GRID-STRAIN используется масштабная функция $\exp(d(n)/d0)$, где $d(n)$ – расстояние между n -ой GPS станцией и выбранным узлом сетки, а $d0$ – задаваемый пользователем масштабный фактор. Таким образом, только станции внутри радиуса $d0$ от узла сетки дают значимый вклад в оценку напряжения на этом узле сетки. Отсюда вытекает предлагаемый в данном ПО качественный критерий для оценки значимости напряжений. Плоскость сетки разбивается на три равных сектора с центром в каждом узле. Напряжение считается высоко значимым в данном узле, если хотя бы одна GPS станция на расстоянии менее $d0$ от этого узла присутствует в каждом секторе. Если только два сектора содержат GPS станции, удовлетворяющих данному условию, результат рассматривается как средне значимый. В остальных случаях результат считается не значимым.

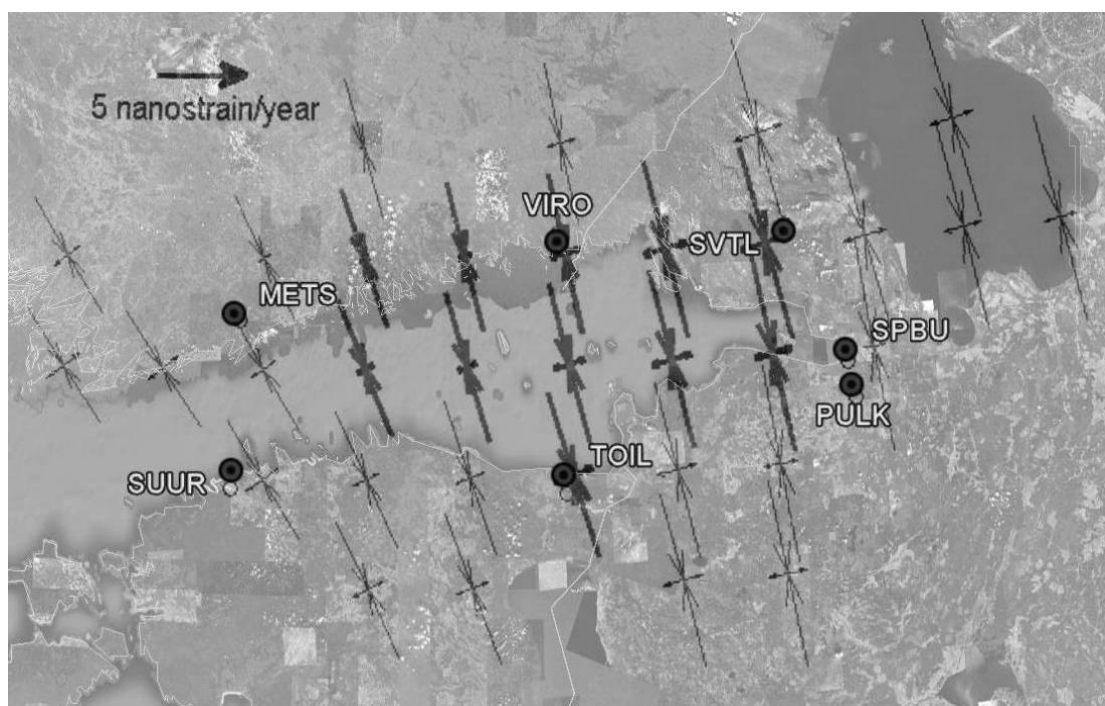


Рис. 2. Расширение и сжатие в узлах сетки 55×55 км, толстые линии – значимые величины, тонкие – среднезначимые деформации.

Видно, что Финский залив испытывает слабое (до 7 нанострейн в год) субмеридиональное сжатие в районе Финского залива и Невской губы, что в целом отражает ситуацию на южных окраинах Фенноскандии, испытывающей постгляциологическое поднятие.

Таким образом, используя данные наблюдений за последние годы на перманентных и полевых ГНСС-станциях в районе Финского залива, можно заключить, что в данном регионе отсутствуют существенные горизонтальные деформации земной коры.

Литература

1. Горшков В.Л., С.С. Смирнов, Н.В.Щербакова. 2012. Нагрузочные эффекты в ГНСС-наблюдениях при исследовании региональной геодинимики. Вестник Санкт-Петербургского университета, серия 1: Мат, Мех, Астр. №2, 148-156.

2. *Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C.*, 2007, ITRF2005: A new Release of the International Terrestrial Reference Frame based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949
3. *Petrov L., Boy J.-P.*, 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2003JB002500, Vol. 109, No. B03405.
4. *Scherneck, H.G.*, 1991. A parameterized solid Earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurement, *Geoph. J. Int.*, 106, 677-694.
5. *Teza G., A. Pesci, A. Galgaro*, 2008. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments, *Computers & Geosciences*, 34, 9, 1142-1153.

KINEMATICS OF GNSS-STATIONS AROUND GULF OF FINLAND

Gorshkov V.¹, SmirnovS.^{1,2}

¹*Pulkovo's observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia*

²*Astronomical Institute of St.-Petersburg State University, Russia*

The measurement accuracy of GNSS-observations is high enough for scientific research of global geodynamics and discovery of local motions of lithospheric microplate. The results of GNSS-solution of permanent and field observations of Russian, Finnish and Estonian GNSS-stations around Gulf of Finland are presented in this paper. The GNSS-observations of the field stations in Shepelevo, Kronstadt and Hogland are firstly used in GNSS-solution for assessment of deformation field in this region. There were taken into account the reductions for atmospheric and hydrologic loading effects which are especially important for velocity assessment of field GNSS-stations.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК НАБЛЮДЕНИЙ СЕТИ GPS-СТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Горшков В.Л., Щербакова Н.В.
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

По данным трёх перманентных GPS-станций, снабженных разными приёмниками и антеннами и компактно расположенных на территории ГАО РАН, исследовано поведение шумовых и низкочастотных составляющих их координат. Исходные данные, имеющие на каждой станции разную продолжительность, обработаны с помощью пакета GIPSY 6.1.2. В низкочастотной составляющей координат станций помимо линейного тренда, отражающего движение евроазиатской плиты, присутствуют вариации от 0.15 года до доминирующих сезонных вариаций. Эти вариации различны как на разных станциях, так и в разных координатах. Оценен вклад атмосферных нагрузок в случайную и систематическую составляющие координат станций. Динамика освобождённых от низкочастотных составляющих координат станций и базовых линий между ними использована для оценки спектра ошибок GPS-наблюдений. Оценен тип распределения ошибок, оказавшийся, в основном, фликер-шумом. По данным всех станций вычислены компоненты средневзвешенной скорости и приведены их ошибки в зависимости от типа шумовой составляющей.

Введение

Плотные сети GPS-станций, с базами до нескольких километров, создаются для контроля подвижек либо технических сооружений, либо в районах с большой естественной динамикой грунтов, в том числе из-за сейсмичности. В некоторых геодинамических пунктах также иногда имеются по несколько постоянно функционирующих ГНСС-приёмников, расположенных в непосредственной близости и даже на одном фундаменте. Их основные систематические ошибки из-за всевозможных нагрузочных эффектов, локальной динамики грунтов, набора наблюдаемых спутников (а, следовательно, ошибки распространения сигнала) и другие, зачастую модельные, эффекты должны быть одинаковыми и могут быть исключены в разностях результатов наблюдений. Такого рода данные наиболее подходят для исследования закона распределения ошибок наблюдений и получения достоверных оценок скоростей станций, т.к. дают возможность оценить «внешнюю» ошибку наблюдений и, таким образом получить более реалистичные средневзвешенные значения скоростей станций для последующих геодинамических исследований.

Таблица 1. Вертикальные скорости перманентных станций вокруг Финского залива. Данные по станции VIRO взяты из работы (Lidberg et al., 2009).

Станции (период)	V_U (мм/год)
PULK (2002-2010)	0.56 ± 0.07
SPBU (2005-2010)	3.53 ± 0.19
SVTL (2005-2010)	2.77 ± 0.08
TOIL (2008-2010)	3.90 ± 0.31
SUUR (1998-2010)	3.82 ± 0.06
METS (2006-2010)	4.85 ± 0.14
VIRO (1998-2009)	3.69 ± 0.06

В наших предыдущих работах по исследованию геодинамики юго-западных окраин Балтийского щита были вычислены положения и оценены скорости перманентных станций Эстонии, Финляндии и России, окружающих Финский залив (Assinovskaya et al., 2011; Горшков и др., 2012). Вертикальные скорости этих станций отражают, в основном, послеледниковое поднятие южных окраин Балтийского щита и позволяют оценить вязкость мантии в данном регионе. Как видно из табл. 1 вертикальные скорости станции PULK статистически значимо отличались в меньшую сторону от данных других станций региона. В этой связи наличие синхронных GPS-наблюдений на территории ГАО РАН даёт возможность решить как задачу по верификации величины скорости станции PULK, так и определить наиболее реалистичную величину её ошибки.

Данные и метод обработки

На территории ГАО РАН проводятся наблюдения на трёх станциях (PULK, SPTR и PULJ) с разнотипными двухчастотными GPS-приёмниками и антеннами, разнесёнными на несколько сотен метров (базы 407, 354 и 327 м). Антенны установлены на крышах зданий, существенно различающихся размерами и высотой, покрытиями крыш, системой монтировки антенн и видимостью горизонта (рис.1). Эти различия могут обуславливать некоторые систематические расхождения.

Исходные данные по станциям SPTR и PULJ любезно предоставлены нам соответственно ОАО «Российские космические системы» и ЦНИИГАиК. Наблюдения обработаны нами с помощью пакета GYPSI 6.1.2 с применением стратегии PPP и с учётом абсолютной калибровки антенн, точных орбит ИСЗ (в системе *IGS 08*), поправок часов и параметров вращения Земли (*eop IERS*), модели тропосферы *GMF*, океанической приливной модели *FES-2004* и твердотельных приливов.

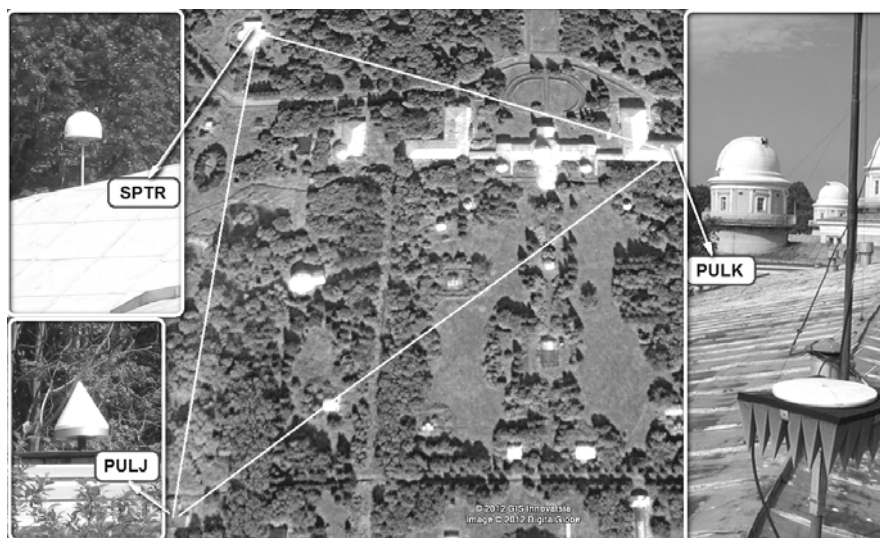


Рис. 1. ГНСС сеть Пулково.

Для правильной оценки скоростей и их ошибок обязательным является предварительное исключение низкочастотных, в основном сезонных и полугодовых компонент. Вариации положений станций обусловлены в основном сезонными вариациями атмосферных и гидрологических нагрузок, достигающих в вертикальной составляющей нескольких сантиметров, и частично были учтены с помощью соответствующих поправок (Petrov, Voy, 2004). На данной сети станций наблюдения имеют разную продолжительность и большие пропуски на станции PULJ и, частично, SPTR, ограничивающие возможность полноценного сравнения данных. Все изменения, вызванные сменой и принудительным изменением положения антенн (для станции SPTR), были учтены.

Результаты

На рис. 2 представлены оценки горизонтальных скоростей станций, а на рис. 3 – сезонная составляющая вертикальной компоненты для станции PULK и соответствующие поправки за атмосферные и гидрологические нагрузки. Для станции SPTR вариации вертикальной компоненты не имеют сезонной составляющей и представлены более высокочастотными (до 0.15 года) вариациями. Из сводной табл. 2 видно, что северная компонента станции SPTR значительно превосходит среднее по станциям значение. Для неё также характерно наименьшее значение вертикальной составляющей. Причина этого может быть связана с расположением станции на северном краю пулковского холма, водоносный слой которого постоянно вымывает породу, что приводит к постепенному его проседанию на север. Напомним, что пулковский холм является частью древнего берега Литоринового моря.

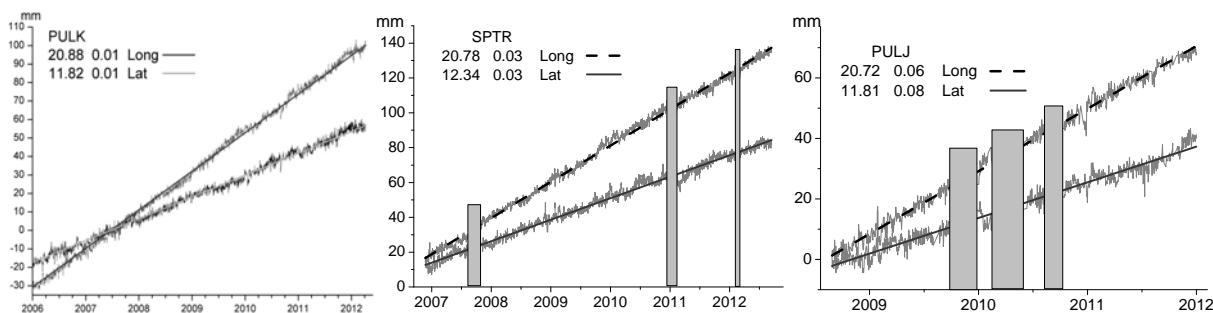


Рис. 2. Динамика горизонтальных координат станций. Серыми прямоугольниками отмечены превышающие неделю пропуски в наблюдениях.

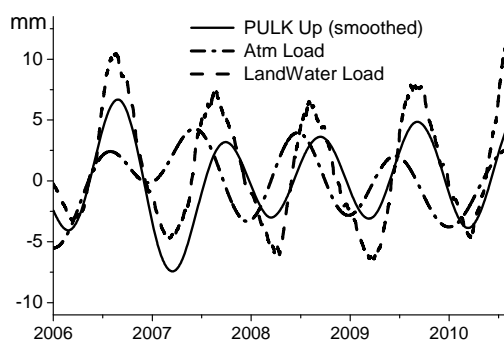


Рис. 3. Вертикальные компоненты атмосферных и гидрологических нагрузок для станций и соответствующая сезонная составляющая для станции PULK.

Таблица 2. МНК оценки скоростей станций (в мм/год) и вариации Аллана (в мм). Для оценки средней скорости по станциям в качестве весов использовалось количество наблюдений N .

Станции	ΔT	N	$d\varphi/dt$	$d\lambda/dt$	dh/dt	$ADEV$		
						φ	λ	h
PULK	2006-2012	2236	11.82 ± 0.01	20.88 ± 0.01	0.66 ± 0.08	1.41	1.09	4.66
PULJ	2008-2011	724	11.81 ± 0.07	20.72 ± 0.06	1.27 ± 0.31	1.63	1.35	5.95
SPTR	2007-2011	1358	12.34 ± 0.03	20.78 ± 0.03	0.20 ± 0.11	1.50	1.18	4.98
Средневзвешенное по станциям			11.99 ± 0.25	20.82 ± 0.06	0.61 ± 0.35	База SPTR-PULK		1.16

Ошибки, формально получаемые при оценке скоростей станций с помощью метода наименьших квадратов (МНК), всегда занижены ввиду редкого соответствия шумов GPS-наблюдений нормальному распределению и, как правило, большого количества наблюдений на перманентных станциях. Для надёжного определения скорости станции естественно использовать средневзвешенное её значение по всем GPS-станциям, имеющим наблюдения в данном месте. При этом можно получить также более достоверную «внешнюю» ошибку этой величины.

В качестве дисперсионной меры для последующего вычисления ошибки скоростей станции можно использовать несколько оценок.

1. Можно определить скорости с помощью робастных оценок, не зависящих от закона распределения, например, используя минимизацию абсолютных уклонений от подбираемой прямой ($y = a + bt$):

$$\min \sum_i |y_i - a - bt_i|$$

Здесь и в дальнейшем суммирование происходит по всем наблюдениям n . В этом случае дисперсионной мерой V_r может служить среднее абсолютное уклонение наблюдаемых значений от полученной таким образом прямой.

2. Можно использовать в этом качестве величину дисперсии вариации Аллана, обычно очень близкую V_r :

$$ADEV = \sqrt{\sum_i (y_i - y_{i+1})^2 / 2(n-1)}.$$

3. И, наконец, большое количество наблюдений на станциях позволяет исследовать закон распределения ошибок (тип шумовой составляющей) конкретного ряда и вычислить в зависимости от этого подходящую для него ошибку скорости станции из следующих наиболее распространённых и простых для вычислений оценок (Williams, 2003):

– для нормально распределённых

$$\sigma_n \cong \frac{a}{T} \sqrt{12/n},$$

где a – средняя величина амплитуды шума, в качестве которой может быть использована любая из предыдущих оценок (V_r или $ADEV$), $T = \Delta T(n-1)$ – продолжительность ряда наблюдений с постоянным приращением ΔT (обычно в годах, т.к. скорость в мм/год);

– для случайных блужданий $\sigma_b = \frac{b}{\sqrt{T}}$,

где b – амплитуда броуновских блужданий также может быть аппроксимирована любой из предыдущих оценок;

– и для распределения типа фликер-шума

$$\sigma_f \cong 0.75 \frac{a}{T}.$$

Видно, что только при нормально распределённых случайных ошибках наблюдений, ошибка определения скорости станций зависит от количества наблюдений. При многолетних наблюдениях на перманентных станциях это приводит к формальным ошибкам скоростей станций в сотые доли миллиметра в год. В остальных случаях ошибка определения скорости станций зависит только от продолжительности наблюдений, будучи наихудшей для броуновских блужданий.

GPS-наблюдения, после удаления трендов и квазипериодических компонент, являются стохастическим сигналом (шумом) со спектральной плотностью мощности аппроксимируемой степенной зависимостью от частоты f :

$$S(f) \sim f^{-\beta}.$$

Нормальное распределение не зависит от f и характеризуется степенным показателем $\beta = 0$, $0 < \beta < 2$ соответствует фликер-шуму (так называемый розовый шум) и $\beta = 2$ – случайным блужданиям (коричневый шум).

Для оценки величины β существует несколько возможностей, одна из которых опирается на вычисление β по соотношению $\beta = 2H + 1$ (Кроновер, 2000), где H – параметр Хёрста ($0 < H < 1$), определяемый по приращению исследуемой реализации сигнала методом нормированного размаха (Hurst, 1957). Другой способ основан на определении коэффициента (k) наклона $\log\text{-}\log$ зависимости ошибок наблюдений от продолжительности выборки (Allan, Barnes, 1981). В качестве меры шумовой составляющей, как уже упоминалось, можно использовать дисперсии вариаций Аллана. Оба способа были реализованы для оценки типа шумовой составляющей координат станций (табл. 3).

Таблица 3. Ячейки без окраски соответствуют нормальному распределению шумов, тёмно-серым выделены распределения соответствующие фликер-шуму, светло-серым – промежуточный тип шума.

Station	H			k		
	φ	λ	h	φ	λ	h
PULK	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.02	0.16 ± 0.02	-1.14 ± 0.23	-1.04 ± 0.33	-1.12 ± 0.22
SPTR	0.28 .02	0.25 .01	0.18 .02	-0.16 .16	0.09 .10	-0.12 .13
PULJ	0.21 .03	0.29 .03	0.36 .04	-0.12 .15	-0.52 .27	-0.47 .20
PULK-SPTR	0.23 ± 0.02			-1.04 ± 0.37		

Видно, что, как и в большинстве GPS-станций международных сетей (Feissel et al., 2007), распределение шумов на исследуемых станциях в Пулкове близки к фликер-шумам или занимают промежуточное положение между последними и нормально распределёнными шумами. В табл.4 представлены ошибки скоростей исследуемых станций в зависимости от всех типов распределения шумов, вычисленные по $ADEV$ из табл. 2. Видно, что для станции PULK, входящей в международную EPN сеть, оценка ошибок скоростей соответствующих фликер-шумам наиболее адекватна ошибке, полученной по средневзвешенному из трёх станций (табл. 2).

По результатам наших исследований следует признать неверными приписанные в EPN ошибки для станции PULK (± 0.40 , ± 0.35 , ± 1.94 мм/год соответственно по широте долготе и высоте), близкие к оценкам в случае их распределения по типу случайных блужданий. Можно предположить, что при определении типа распределения ошибок в EPN не удалялись низкочастотные вариации, что приводит смещению оценок типа шума в сторону более коричневого шума.

Таблица 4. Ошибки скоростей станций в зависимости от типа распределения шумов.

Station (N)	фликер			белый			сл. блуждания		
	φ	λ	h	φ	λ	h	φ	λ	h
PULK (2236)	0.16	0.13	0.54	0.02	0.01	0.05	0.55	0.43	1.83
PULJ (724)	0.41	0.34	1.49	0.07	0.06	0.26	0.94	0.63	3.43
SPTR (1358)	0.20	0.16	0.68	0.03	0.02	0.09	0.64	0.50	2.12

Выводы

Низкочастотные изменения координат станций имеют схожие амплитуды и значительные фазовые расхождения для разных составляющих координат. Эти вариации

для станции PULK сопоставлены с сезонными нагрузочными эффектами атмосферными и от грунтовых вод.

Получены оценки ошибок скоростей станций в зависимости от типа шумов, характерных для каждой станции. Вычислены компоненты средневзвешенной скорости локальной сети станций в Пулкове.

Подтверждена достоверность аномально низкой вертикальной скорости станции PULK по отношению к соседним GPS-станциям в районе Финского залива, что, вероятно, объясняется геологическими и гидрологическими особенностями строения пулковского холма.

Литература

1. Горшков В.Л., С.С. Смирнов, Н.В. Щербак ова, 2012. Нагрузочные эффекты в ГНСС-наблюдениях при исследовании региональной геодин амики. Вестник Санкт-Петербургского университета, (2012), №2,
2. Кроновер Р.М., 2000, Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Пост-маркет, Москва, с. 387.
3. Allan, D.W. and J.A. Barnes, 1981, A Modified “Allan Variance” with Increased Oscillator Characterization Ability, Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium, 470–475.
4. Assinovskaya B., Shchulin J., Gorshkov V., Shcherbakova N., 2011. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region. *Baltrica*, 24 (2), 61-70. Vilnius.
5. Feissel-Vernier M., O. de Viron, and K. Le Bail, 2007, Stability of VLBI, SLR, DORIS, and GPS positioning, *Earth Planets Space*, 59, 475–497.
6. Hurst H.E., 1957. A suggestial statistical model of some time series which occur in Nature, *Nature*, v.180, № 4584, pp.494-495.
7. Lidberg M., J.M. Jonsson, H.-G. Scherneck, G.A. Milne, 2009. Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST, *J. Geodyn.* (2010), doi:10.1016/j.jog. 2009.11.010.
8. Petrov L., Boy J.-P., 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2003JB002500, Vol. 109, No. B03405.
9. Williams S.D.P., 2003. The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. *J. Geodesy* (2003) 76, 483–494.

THE NOISE AND SYSTEMATIC ERROR INVESTIGATION OF GPS OBSERVATION BY GPS NET IN PULKOVO OBSERVATORY TERRITORY

Gorshkov V. and Shcherbakova N.

Pulkovo’s observatory of RAS, SPb, Russia

Using the data of three permanent GPS stations with different receivers and antennas and compactly located in the territory of the Pulkovo’s Observatory, the behavior of noise and low-frequency components of its coordinates has been analyzed. Observations at the stations have a different time span. Source data were processed by the package GIPSY 6.1.2. In the low-frequency component of the coordinates of the stations in addition to a linear trend, reflecting the movement of the Eurasian plate, there are variations from 0.15 year to the dominant seasonal variations. These variations change as at the each station, so for different coordinates. Contribution of atmospheric load in the random and systematic components of the station coordinates were assessed. Dynamics of the free from the low-frequency components of the station coordinates and base lines between them were used to estimate the spectrum of errors of GPS observations. The type of distribution of errors was assessed. It was recognized as the flicker-noise. Using the data of all stations the components of the weighted average velocity were calculated and their errors estimated by different types of noise constituent were assessed.

ОБ ОЦЕНИВАНИИ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В. Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

При сравнении методов прогноза параметров вращения Земли (ПВЗ) используются различные методики оценки их точности. В работе приводится сравнение трех основных методов оценивания точности прогноза ПВЗ: среднеквадратичного отклонения, среднего абсолютного отклонения и максимального отклонения. На примере реальных прогнозов двух служб вычисления ПВЗ USNO и JPL (более 800 прогнозов, сделанных в 2010–2012 гг.) показано, что первые два метода практически эквивалентны при сопоставлении точности прогноза разными методами. В то же время использование статистики максимального отклонения представляется необходимым для более полного суждения о пригодности метода для того или иного практического приложения. Результаты работы могут быть полезны и в других областях, где применяется прогнозирование временных рядов.

Введение

Прогнозирование параметров вращения Земли (ПВЗ) представляет собой не только интересную научную задачу, но также имеет важные практические применения в таких приложениях, как наземные и спутниковые навигационные системы, оперативное позиционирование, космическая навигация и др. Соответствующие требования потребителей резко выросли в последние годы, что вызвало расширение работ по совершенствованию старых и разработке новых методов прогноза ПВЗ. Как правило, каждая такая работа сопровождается исследованием точности прогноза предлагаемым методом. При этом зачастую используются различные методики оценки, не всегда сопоставимые между собой. Кроме того, используемые методы исследования точности прогноза не всегда могут быть легко сопоставлены с различными требованиями потребителей. В настоящей работе на примере реальных прогнозов ПВЗ проведено сравнение трех основных методов оценки их точности.

Методы оценивания точности прогнозов ПВЗ

В литературе встречаются разные методы оценки точности прогнозов. Все они основаны на анализе разностей между прогнозными и окончательными значениями:

$$\Delta_i^l = x_i^l - x_f, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

где x_i^l – прогнозное значение, полученное в i -ом прогнозе на длину l , x_f – окончательное значение, n – число прогнозов на длину l (т.е. l – число дней в будущее на момент вычисления прогноза). Традиционно в качестве такой оценки используется среднеквадратическое отклонение предсказанных значений от окончательных:

$$RMS_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i^l)^2}{n}}. \quad (2)$$

Поскольку x_f определяется из наблюдений независимо от исследуемых прогнозов, в данном случае следует использовать формулу Гаусса, а не формулу Бесселя, т.е. в знаменателе должно быть n , а не $n-1$ [1]. Это же справедливо и для остальных статистик, рассмотренных ниже.

В последнее время (см., например, [2, 3]) также стали использовать среднее абсолютное отклонение (Mean absolute error):

$$MAE_l = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta_i^l|}{n}, \quad (3)$$

а также медианное абсолютное отклонение, устойчивое к аномально плохим значениям прогнозов (выбросам):

$$MDAE_l = median(|\Delta_i^l|), \quad (4)$$

но последняя величина используется только как вспомогательная для отбраковки выбросов. Детали использования этих статистик можно найти в [2,3].

Кроме того, можно определить максимальное отклонение прогноза от окончательного значения:

$$MaxE_l = \max_i |\Delta_i^l|. \quad (5)$$

Применяются и другие статистики. Так, например, в работе [4], авторы вычисляли кроме приведенных выше критериев также асимметрию и эксцесс распределения разностей Δ_i^l . Но они используются больше в исследовательских целях, чем для оценки качества прогноза.

Сравнение оценок точности прогноза ПВЗ

Сравнение описанных выше оценок точности прогноза ПВЗ рассмотрим на конкретном примере реальных прогнозов всемирного времени, сделанных в двух службах вычисления ПВЗ: Морская обсерватория США (USNO) и Лаборатория реактивного движения (JPL) в рамках проекта EOPCPPP (Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project, <http://maia.usno.navy.mil/eopcrppp/eopcrppp.html>). Использованы ежедневные прогнозы, сделанные в каждой службе с 1 сентября 2010 г. по 15 ноября 2012 г., всего более 807 прогнозов USNO и 805 прогнозов JPL. Окончательные значения для сравнения брались из ряда ПВЗ Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>).

Для тестирования методов были выбраны данные краткосрочных прогнозов всемирного времени, поскольку из предыдущего опыта известно, что они имеют близкую точность для этих служб. Для этих прогнозов были вычислены три основные статистики из описанных выше: RMS , MAE и $MaxE$. Каждая из них является функцией от длины прогноза l . Результаты вычислений приведены на рис. 1. Кроме трех указанных статистик приведен график отношения MAE/RMS .

Результаты вычислений позволяют сделать некоторые выводы. Два первых критерия RMS и MAE показывают, что точность прогноза на длине до 15 дней обеими службами практически одинакова. Соответствующие графики практически одинаковы с точностью до масштаба. Таким образом, обе статистики дают, фактически, одну и ту же информацию. Это подтверждается также графиком отношения MAE/RMS , который показывает, что эти статистики почти пропорциональны и, следовательно, на практике взаимозаменяемы при анализе точности прогноза.

В то же время точность прогнозов по критерию $MaxE$ отличается для длин прогноза около 10 дней вдвое. Заметим, что в аналогичном исследовании других серий прогнозов [5] получился обратный результат – применение критериев RMS и MAE показало явное преимущество одной из серий прогнозов, тогда как с точки зрения максимальной ошибки прогноза обе серии оказались практически эквивалентны.

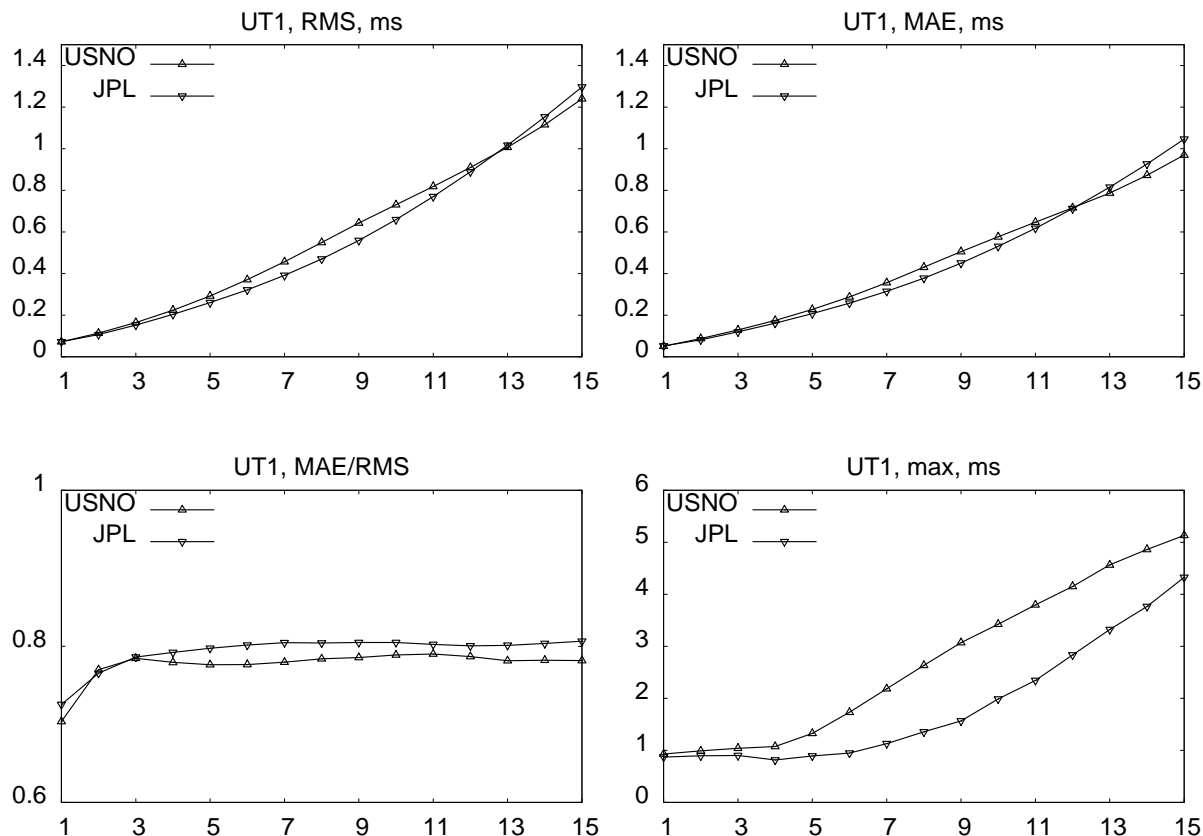


Рис. 1. Различные статистики отклонения прогнозных значений ПВЗ от окончательных, используемые в качестве оценки точности прогноза ПВЗ, мс. По оси абсцисс отложена длина прогноза в днях.

Заключение

В работе проведено сравнение трех основных методов оценивания точности прогноза ПВЗ. Все они основаны на анализе разностей между прогнозными и окончательными значениями. Рассмотренные методы прогноза включают следующие: среднеквадратичная погрешность (*RMS*), среднее абсолютное отклонение (*MAE*) и максимальное отклонение (*MaxE*).

На примере более 800 реальных прогнозов, сделанных в службах вычисления ПВЗ USNO и JPL в 2010–2012 гг. в рамках проекта ЕОРСРРР показано, что применение критериев *RMS* и *MAE* практически эквивалентно для сравнительной оценки качества прогнозов. В то же время исследование максимальной ошибки прогноза *MaxE* представляется необходимым в подобных сравнениях, поскольку позволяет получить ценную дополнительную информацию, особенно в тех случаях, когда пользователя интересует гарантированная ошибка прогноза.

Так в нашем случае сравниваемые прогнозы показали близкую точность по критериям *RMS* и *MAE*, но точность прогнозов по критерию *MaxE* отличается для некоторых длин прогноза вдвое. В предыдущих работах встретился противоположный случай. Поэтому предполагается сделать более детальное исследование для большего числа прогнозов разных длин и вычисленных разными методами

Было бы интересно проверить выводы, полученные в настоящей работе также на других примерах прогнозирования временных рядов, поскольку проблема сравнения качества прогнозов актуальна везде, где используется прогнозирование.

Литература

1. *Малкин З.М., Тиссен В.М.* Исследование точности прогноза параметров вращения Земли методом СНИИМ. Вестн. СПбГУ, Сер. 1, 2012, Вып. 3, 143–152.
2. *Kalarus M., Kosek W., Schuh H.* Current results of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign. In: Capitaine N (ed.) Proc. Journées 2007 Systèmes de référence spatio-temporels. Observatoire de Paris, 159–162.
3. *Kalarus M., Schuh H., Kosek W., Akyilmaz O., Bizouard Ch., Gambis D., Gross R., Jovanovic B., Kumakshev S., Kutterer H., Ma L., Mendes Cerveira P. J., Pasynek S., Zotov L.* Achievements of the Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign. J. of Geodesy, 2010, V. 84, 587–596.
4. *Kosek W., Luzum B., Kalarus M., Wnęk A., Zbylut M.* Analysis of Pole Coordinate Data Predictions in the Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project, Artificial Satellites, 2012, V. 46, 139–150.
5. *Tissen V., Tolstikov A., Malkin Z.* UT1 prediction based on long-time series analysis. Artificial Satellites, 2010, V. 45, 111–118.

ON ACCURACY ASSESSMENT OF PREDICTION OF EARTH ROTATION PARAMETERS

Malkin Z.M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Prediction of the Earth rotation parameters (ERP) is not only interesting scientific task, but also has many important practical applications, such as ground-based and satellite navigation systems, operational navigation, space missions control, etc. The users' requirements become much more exacting during last years, which causes intensification of the scientific researches in the field of ERP prediction including improvement of old methods and development of new ones. As a rule each such study is accompanied by the accuracy assessment of the method under investigation. Often, different methods are used for this purpose, not always compatible. Besides, methods of the accuracy assessment not always meet the users' requirements. In this paper, a comparison of several methods of the ERP prediction accuracy assessment has been made, which allows us to obtain more objective data about the quality of the prediction method and its suitability for various applications. In this paper, a comparison is made of three main methods of the ERP prediction accuracy assessment based on a differences analysis between the predicted and final values: root-mean-square error (RMS), mean absolute error (MAE), and maximum error (MaxE). For the test computations the predictions made at USNO and JPL in the framework of the EOPCPPP campaign were used. The results of this test have shown that the RMS and MAE statistics are practically equivalent for the prediction method comparison. On the other hand, MaxE statistics gives a valuable supplement information about the quality of prediction by different methods. Obtained results can be useful also in other fields where a time series prediction is used.

О НАБЛЮДАЕМОСТИ СВОБОДНОЙ НУТАЦИИ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА ЕМЛИ

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В.Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Свободная нутация внутреннего ядра Земли (FICN, Free Inner Core Nutation) является одной из четырех собственных свободных мод вращения Земли, рассматриваемых современной теорией. Согласно классической работе [5] расчетный период FICN находится в пределах 930-1140 суток. Выявление этого нутационного колебания из наблюдений является важной научной задачей, решение которой позволит существенно уточнить модель строения и вращения Земли. Ввиду ожидаемой малости FICN его обнаружение может быть успешным только из обработки наиболее точных современных наблюдений методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. В последние годы было предпринято несколько безуспешных попыток обнаружить FICN из наблюдений. В представляемой работе описаны результаты дальнейших усилий в этом направлении, тоже пока не приведшие к успеху. В частности, показано, что в широком диапазоне периодов наблюдается несколько нутационных колебаний близкой мощности. К сожалению, предсказания теории не настолько точны, чтобы однозначно связать один из найденных сигналов с FICN. Представляется, что на настоящем этапе наиболее важным является уточнение теории, которая могла бы быть использована для более успешного сравнения с наблюдениями.

Введение

Современная теория вращения Земли рассматривает четыре свободных моды вращения [5]. Две из них относятся к движению оси вращения в теле Земли (в земной системе координат): чандлеровское движение полюса и аналогичный эффект во внутреннем ядре, а две – к движению оси вращения в пространстве (в небесной системе координат): свободная нутация внешнего жидкого ядра (FCN, Free Core Nutation) и свободная нутация внутреннего твердого ядра (FICN, Free Inner Core Nutation). Если чандлеровское движение полюса и свободная нутация внешнего ядра уверенно выделяются из наблюдений и активно изучаются, две другие составляющие пока наблюдать не удалось. В то же время, обнаружение из наблюдений и определение параметров этих составляющих вращения Земли является важной научной задачей, решение которой позволит существенно уточнить модель строения Земли и ее вращения.

Согласно классической (и фактически единственной) работе [5] расчетный период FICN составляет 930-1140 суток. Ввиду ожидаемой малости сигнала FICN его обнаружение наиболее вероятно из определяемых методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) поправок к теории нутации (СПО, Celestial Pole Offset) в виде поправок к координатам небесного полюса dX и dY . В последние годы было предпринято несколько безуспешных попыток выделить сигнал FICN из этих данных, см., например, [4] и цитируемые там работы.

Заслуживают отдельного упоминания две работы. В [3] был обнаружен сигнал в ожидаемой полосе частот, соответствующей FICN, с амплитудой около 30 мксд (мкс дуги) и периодом 850–1200 суток, причем и амплитуда и период зависят от используемого каталога положений наблюдаемых радиоисточников. В результате авторы пришли к выводу, что найденный сигнал является артефактом, являющимся следствием нестабильности положений некоторых радиоисточников. Этот вывод подтверждается неустойчивостью найденного сигнала во времени. В работе [2] проведен анализ возможного возбуждения FICN атмосферой и океаном. Авторы показали, что атмосфера и океан

могут возбуждать FICN лишь на уровне долей мксд, чего явно недостаточно для объяснения колебания, обнаруженного в [3].

С другой стороны, возможны и другие, еще не исследованные источники возбуждения FICN. В любом случае, на современном уровне точности наблюдений можно уверенно выделить сигнал FICN из наблюдений (рядов СРО), если он имеет амплитуду не менее 20-30 мксд.

В настоящей работе нами был проведен спектральный и вейвлет-анализ рядов СРО, полученных по последним наблюдательным РСДБ-данным, для выявления возможного колебания на частоте FICN.

Наблюдательные данные

Мы использовали ряды СРО, полученные в центрах анализа РСДБ-наблюдений Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS, International VLBI Service for geodesy and astrometry). Были рассмотрены как сводный ряд СРО IVS, так и ряды СРО отдельных центров анализа: AUS (Австралия), BKG (Германия), CGS (Италия), GSF (США), IAA (Россия), OPA (Франция), USN (США). Все ряды взяты из центра данных IVS <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/vlbi/ivsproducts/eops/>.

На первом этапе для всех рядов был проведен спектральный анализ методом вычисления периодограммы Шустера для комплексных данных вида $dX+i*dY$. Предварительно из рядов были удалены линейный тренд и FCN по модели ZM1 [1]. Интервал исследуемых периодов был взят 500–2000 суток, т.е. с некоторым запасом включающий в себя предполагаемый в соответствии [5] интервал периодов FICN 930–1140 суток.

Результаты вычислений, приведенные к виду амплитудного спектра, показаны на рис. 1. Из полученных спектров видно, что в искомой области частот наблюдается шумоподобный сигнал, в котором нет какого-либо превалирующего колебания, которое может быть выделено как наиболее вероятный кандидат в сигнал FICN. Скорее спектр указывает на характер сигнала, близкий к шумовому. Видно также, что данные разных центров анализа не очень хорошо совпадают между собой.

Далее сводный ряд СРО, который мы считаем наиболее точным из всех используемых в настоящей работе, был подвергнут вейвлет-анализу, результаты которого приведены на рис. 2. На верхней части рисунка приведена скалограмма полного (исходного) ряда СРО. На ней, фактически, выделяется только сигнал на частоте FCN с периодом около 430 суток. После его удаления (нижняя скалограмма) видна сложная структура остаточного ряда, содержащая несколько колебаний в области предсказываемого теорией периода FICN.

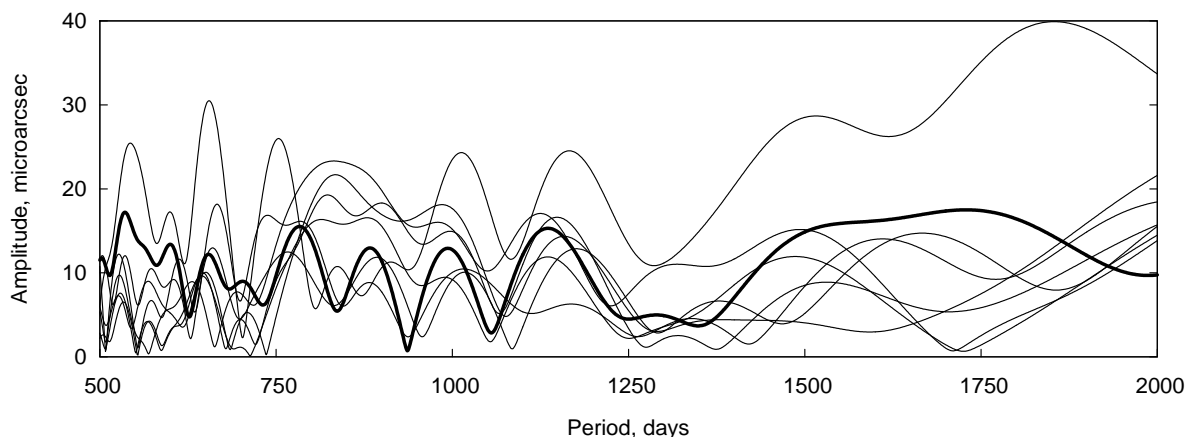


Рис. 1. Периодограмма рядов СРО IVS (жирная линия) и отдельных центров анализа РСДБ-данных (тонкие линии).

Из колебаний с максимальной амплитудой порядка 20 мксд выделяется одно с периодом около 900 суток, что наиболее близко к предсказанному в [5]. Оно также имеет довольно устойчивый характер, т.е. малые изменения амплитуды, на всем интервале дат. Это колебание и является основным кандидатом для более детального изучения. Однако оно, как и несколько других колебаний, выделяемых в нашем анализе, могут быть также обусловлены неточностью коэффициентов модели нутации МАС для членов с периодами, близкими к FICN. В исследуемом интервале периодов имеются члены с периодами около 1305 суток (средняя амплитуда 3500 мксд), 1095 суток (1000 мксд), 943 суток (50 мксд), 727 суток (35 мксд), которые должны быть исследованы с точки зрения их разделения с возможным сигналом FICN.

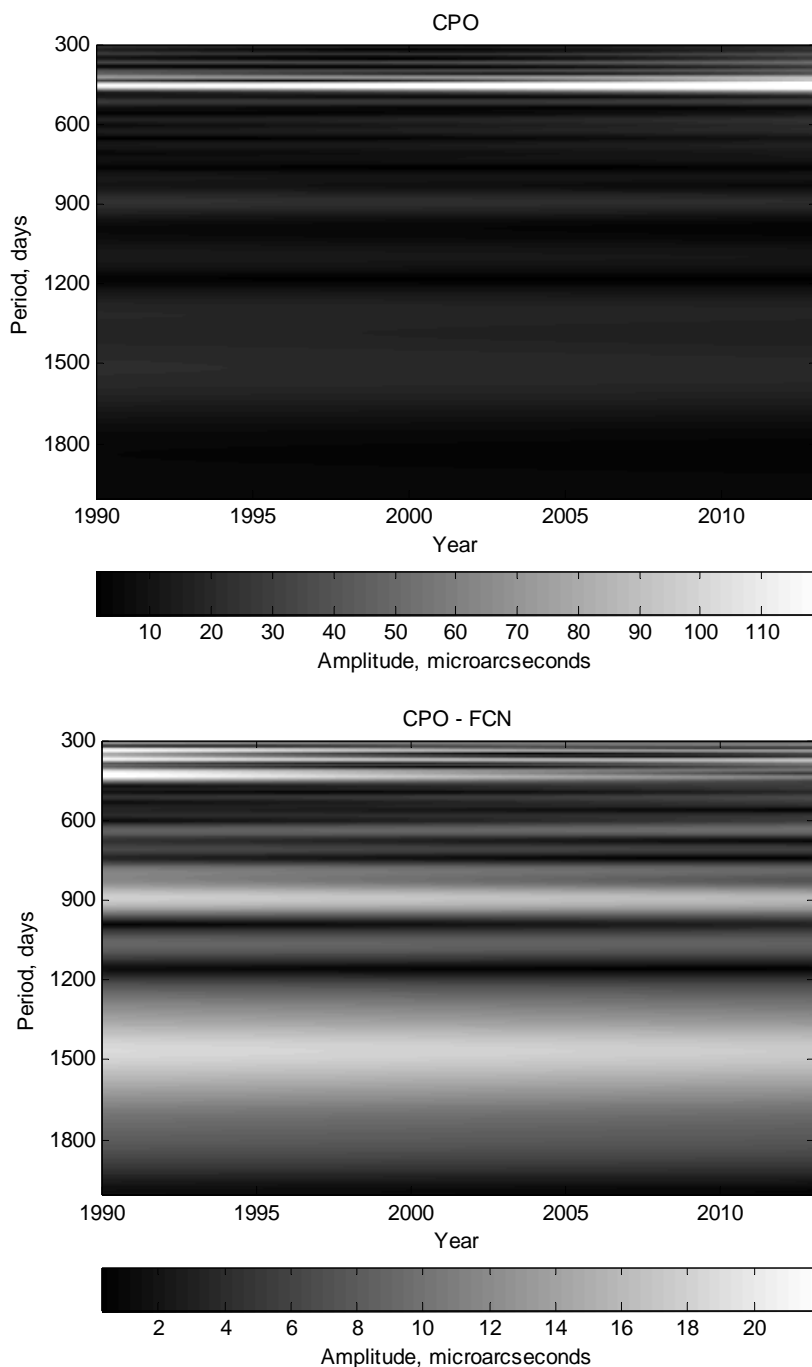


Рис. 2. Вейвлет-спектры ряда CPO IVS. На верхнем рисунке исходный ряд, на нижнем – остаточный ряд после исключения FCN.

Заключение

В работе исследованы несколько рядов СРО с целью обнаружения колебания, соответствующего FICN. Полученные результаты свидетельствуют, что в рядах углов нутации, определяемых из РСДБ-наблюдений, в изучаемом диапазоне периодов наблюдается несколько колебаний схожей амплитуды без уверенно выделяемого преобладающего компонента. К сожалению, предсказания теории не настолько точны, чтобы однозначно связать один из найденных сигналов с FICN. Ситуация осложняется тем, что результаты зависят от используемого для анализа ряда СРО. Также важной задачей для будущих исследований является разделение наблюдаемых колебаний на происходящие от FICN и обусловленные неточностью коэффициентов модели нутации MACH2000A для членов с периодами, лежащими в полосе частот FICN.

Представляется, что на настоящем этапе наиболее важным является уточнение теории, которая могла бы быть использована для более успешного сравнения с наблюдениями. Наиболее актуальной задачей является получение более точной теоретической оценки периода FICN с учетом новых геофизических данных, накопленных за время, прошедшее со времени публикации работы [5].

Литература

1. *Малкин З.М.* Эмпирические модели свободной нутации земного ядра. *Астрон. вестник*, 2007, т. 41, 531–536.
2. *Dehant V., O. de Viron O., and Greff-Lefftz M.* Atmospheric and oceanic excitation of the rotation of a three-layer Earth. *Astron. Astrophys.*, 2005, v. 438, 1149–1161.
3. *Feissel-Vernier M., Ma C., Gontier A.-M., Barache C.* Sidereal orientation of the Earth and stability of the VLBI celestial reference frame. *Astron. Astrophys.*, 2005, v. 438, 1141–1148.
4. *Lambert S., Rosat S., Cui X., Rogister Y., Bizouard C.* A Search for the Free Inner Core Nutation in VLBI Data. *IVS 2012 General Meeting Proc.*, в печати.
5. *Mathews, P.M., Herring T.A., Buffett B.* Modelling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior. *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107, 2068.

ON THE OBSERVABILITY OF THE FREE INNER CORE NUTATION

Malkin Z.M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Free Inner Core Nutation (FICN,) is one of the four free rotational modes of the Earth considered in the theory of the Earth's rotation. According to the classical paper [5] the FICN period is in the interval 930-1140 days. Detecting of this signal in the observational data is a very important scientific task allowing us to substantially improve our knowledge about the Earth's interior and rotation. Due to small expected amplitude of the FICN oscillation its detection can be successful only from the most accurate nutation series obtained from the very long baseline observations (VLBI) observations. Several attempts made during last years to find the FICN component in these series failed. In this paper, we present some results of our further steps in this direction, unfortunately not successful either. We investigated several VLBI nutation series by means of spectral and wavelet analysis. It has been shown that there are several periodic signals with close amplitude around the expected FICN period without a prevailing one, which can be associated with the FICN. So, it seems to be necessary to improve the theoretical estimates of the FICN period to make its search in the observational series more promising.

ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЕРАТИВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ UT1 НА РСДБ-СЕТИ "КВАЗАР" ОТ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ НУТАЦИИ

Малкин З.М.^{1,2}, Скурихина Е.А.³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В.Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для оперативного определения всемирного времени (UT1) проводятся 1-часовые сессии РСДБ-наблюдений на двух или трех станциях. Такие наблюдения ведутся в рамках нескольких международных программ, а также в России на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" для отечественных потребителей и для координатно-временной поддержки системы "ГЛОНАСС". Из-за ограниченной геометрии сети и малой продолжительности сессий из этих наблюдений невозможно получить все параметры вращения Земли. Определяется только UT1, а координаты полюса и модель нутации принимаются по другим данным. Поэтому получаемые значения UT1 существенно зависят, в частности, от принятой модели нутации. Поскольку недостаточная точность существующей официальной модели прецессии-нутации МАС ограничивает точность UT1, на практике применяются различные дополнительные эмпирические модели поправок к теории (CPO, Celestial Pole Offset). Как было показано ранее [5], применение разных моделей CPO может приводить к систематическим различиям в UT1. Это влияние зависит от длины и расположения базы. Настоящая работа посвящена исследованию влияния принятой модели CPO на результаты оперативных определений UT1 на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО". В результате тестовой обработки 192 часовых сессий на базе Зеленчукская-Бадары с тремя моделями CPO были найдены небольшие систематические различия в UT1 в виде тренда и сезонных вариаций на уровне 1–3 микросекунд. Случайная ошибка определения UT1 практически не зависит от применяемой модели CPO.

Введение

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами является основным современным методом определения всемирного времени (UT1). Наиболее точные значения UT1 получаются при определении всемирного времени совместно с другими параметрами вращения Земли (ПВЗ): координатами полюса Земли и поправками к углам нутации, из 24-часовых серий наблюдений на глобальных сетях станций (в настоящее время, как правило, 7–9). К сожалению, результаты этих наблюдений бывают обычно доступны с задержкой 8–15 дней, включая время почтовой доставки данных наблюдений на коррелятор и время корреляции. Это неприемлемо для некоторых практических приложений, в первую очередь обеспечения работы глобальных спутниковых навигационных систем.

Для сокращения времени получения данных о всемирном времени организуются специальные короткие 1-часовые сессии РСДБ-наблюдений на двух-трех станциях, время обработки которых составляет до нескольких часов. Такое короткое время достигается, в основном, за счет передачи данных наблюдений со станций на коррелятор по высокоскоростным линиям передачи данных. Однако из-за ограниченной геометрии сети станций и короткого времени наблюдений из таких наблюдений нельзя определить все ПВЗ. Поэтому координаты полюса и углы прецессии-нутации должны быть известны априори по другим данным.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния априорной модели нутации на результаты определения всемирного времени из коротких серий наблюдений. Поскольку точность существующей модели прецессии-нутации МАС недостаточна, на практике применяются эмпирические поправки к теории (CPO, Celestial Pole Offset).

Как было показано ранее [5], для международных программ оперативного определения UT1 применение разных моделей СРО приводит к заметным систематическим различиям в результатах. Это различие зависит от длины и расположения базы и может достигать в наиболее неблагоприятных случаях до 10 мкс. Настоящая работа посвящена изучению влияния модели СРО на результаты определений UT1 на РСДБ-комплексе "Квazar-КВО" из коротких серий наблюдений.

Модели СРО

В настоящее время нет устоявшегося стандарта в отношении единой модели СРО. Разные источники рекомендуют разные модели, и, соответственно, разные модели используются в разных центрах обработки РСДБ-наблюдений для оперативных определений UT1. Наиболее полный обзор этих моделей приведен в [6].

Как отмечалось выше, наиболее точные данные СРО получаются из 24-часовых серий РСДБ-наблюдений. К сожалению, эти данные не могут быть непосредственно использованы при обработке наблюдений по программе оперативных определений UT1, поскольку они получаются с большой задержкой, т.е. просто недоступны на момент оперативных вычислений. Поэтому при оперативных определениях приходится, фактически, иметь дело с прогнозом.

Нами проведено сравнение трех моделей СРО, представляющих наибольший практический интерес: модель ИПА РАН, используемая в настоящее время при обработке наблюдений на РСДБ-комплексе "Квazar-КВО", модель Морской обсерватории США (USNO), которая является официальной моделью Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS) для оперативных приложений, и модель ZM2, которая вычисляется в ГАО РАН и по некоторым параметрам может иметь преимущество перед остальными моделями [5,6]. В сравнении не использована модель Ламбера (Парижская обсерватория), рекомендованная IERS Conventions (2010) [7]. Она имеет существенные систематические отличия от остальных, поскольку моделирует только часть истинных поправок СРО, связанную со свободной нутацией ядра Земли (FCN). Поэтому ее применение приводит к неудовлетворительным результатам [5].

Эти модели (ряды) СРО различаются как в методах их построения, так и в методах прогноза. Во-первых, 24-часовые РСДБ-наблюдения обрабатываются в нескольких центрах обработки данных, в каждом из которых получается, соответственно, свой ряд СРО. Эти ряды можно назвать исходным для дальнейшей процедуры построения окончательной модели СРО. Все перечисленные модели основаны на комбинации исходных рядов. Но они отличаются как составом используемых исходных рядов, так и методом построения сводного (комбинированного) ряда. Во-вторых, поскольку значения СРО из 24-часовых серий наблюдений получаются, в среднем, около трех раз в неделю и на моменты середины сессий, их необходимо приводить к началу каждого суток, что является стандартом для сводных рядов ПВЗ. При этом в разных центрах используются разные методы интерполяции исходных данных СРО. Методы прогноза рядов СРО, используемые в разных центрах, также различаются. Все эти различия приводят к тому, что различные ряды (модели) СРО существенно различаются в систематическом отношении, в уровне шумовой составляющей и в точности прогноза.

Краткая характеристика использованных нами моделей СРО следующая:

1. Модель USNO, доступна на <http://maia.usno.navy.mil/>. Построена на основе комбинации четырех избранных рядов СРО методом построения сглаживающего сплайна. Прогноз производится методом комбинации наблюдаемых данных с одной из стандартных моделей прецессии-нутации.

2. Модель ИПА РАН. Ряд СРО состоит из трех частей. Основная часть ряда копирует ряд IERS C04, который заканчивается за месяц до текущей даты. Ряд IERS C04

вычисляется в Парижской обсерватории на основе комбинации большинства доступных исходных рядов СРО. Приведение на начало суток производится путем интерполяции. Значения СРО за последний месяц берутся из ряда USNO. Последнюю часть ряда составляет прогноз, вычисляемый в ИПА РАН методом авторегрессии.

3. Модель ГАО РАН ZM2 [1], доступна на <http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/>. Вычисляется путем гауссовой процедуры сглаживания-интерполяции комбинированного ряда ПВЗ Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS), <http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/>. Прогноз вычисляется методом авторегрессии.

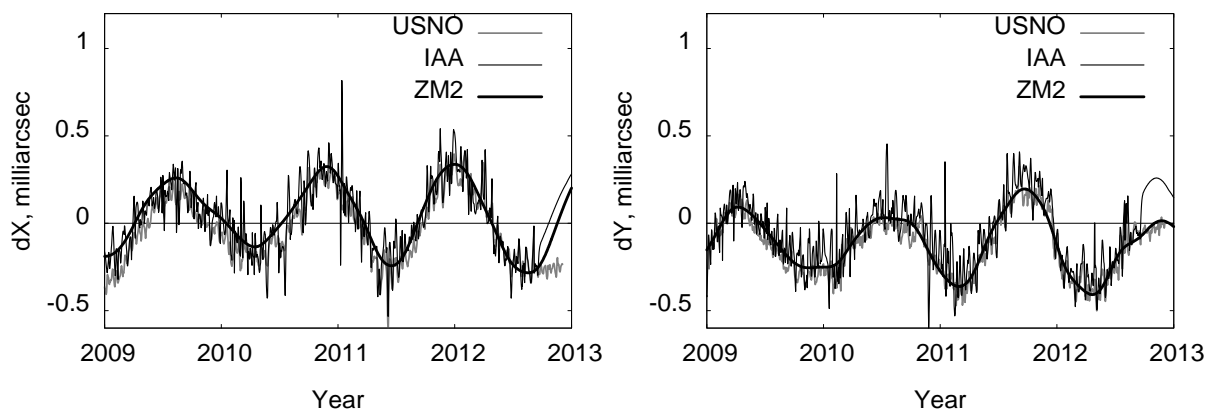


Рис. 1. Сравнение трех моделей СРО. После эпохи 2012.7 – прогнозные данные.

Три ряда СРО, описанные выше, приведены на рис. 1 для периода наблюдений, использованного в настоящей работе (см. следующий раздел). На графиках можно ясно видеть основные различия между моделями. Во-первых, заметны систематические сдвиги, например между ZM2 и USNO для dX или между ИПА(C04) и ZM2 для dY. Также эти ряды имеют разный уровень шума – ряд ZM2 является наиболее гладким, а ряд ИПА(C04) наиболее шумным. Конец каждого ряда после эпохи 2012.7 представляет собой прогноз, также существенно разный для трех сравниваемых рядов. Последнее различие особенно важно для оперативных определений UT1, для которого доступен только прогноз СРО. Более детальное описание и сравнение этих и других моделей СРО приведено в [6].

Результаты обработки наблюдений

Для оценки влияния выбора модели СРО были использованы наблюдения часовых серий на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" ИПА РАН по программе Ru-U [3] на базе Зеленчукская–Бадары с 27 февраля 2009 г. по 12 сентября 2012 г. До июля 2012 г. наблюдения производились в среднем раз в неделю, а затем ежедневно. Всего в обработку вошло 192 сессии.

База Зеленчукская–Бадары является самой длинной базой сети и имеет самую длинную экваториальную составляющую, что обеспечивает самую высокую точность оперативных определений UT1. Поэтому эта база используется как основная для таких наблюдений [4]. За указанный период также было наблюденно 9 сессий на базе Светлое–Зеленчукская, 37 сессий на базе Светлое–Бадары (из них 21 в июне–июле 2012 г.) и 3 сессии на всех трех станциях сети Светлое–Зеленчукская–Бадары. Однако количество и распределение по времени этих наблюдений не позволяет провести их надежное статистическое исследование и сравнение с результатами, полученными на основной базе. Поэтому в данной работе они не используются.

Обработка наблюдений производилась с программным пакетом OCCAM/GROSS [2] с применением редукций, рекомендованных IERS Conventions (2010) [7]. По каждой сессии вычислены значения UT1 с тремя моделями СРО, описанными выше. Все остальные режимы обработки были одинаковыми во всех трех случаях. Далее был проведен статистический анализ трех полученных рядов UT1 в отношении их случайных и систематических ошибок.

Разности между тремя рядами UT1, полученными с тремя моделями СРО, приведены на рис. 2. Их сравнение показывает небольшие систематические изменения, отражающие, предположительно, систематические разности между моделями СРО, на фоне довольно больших случайных вариаций, коррелирующих с шумовой составляющей моделей СРО – использование более "шумных" моделей СРО приводит к большему шуму разностей рядов UT1.

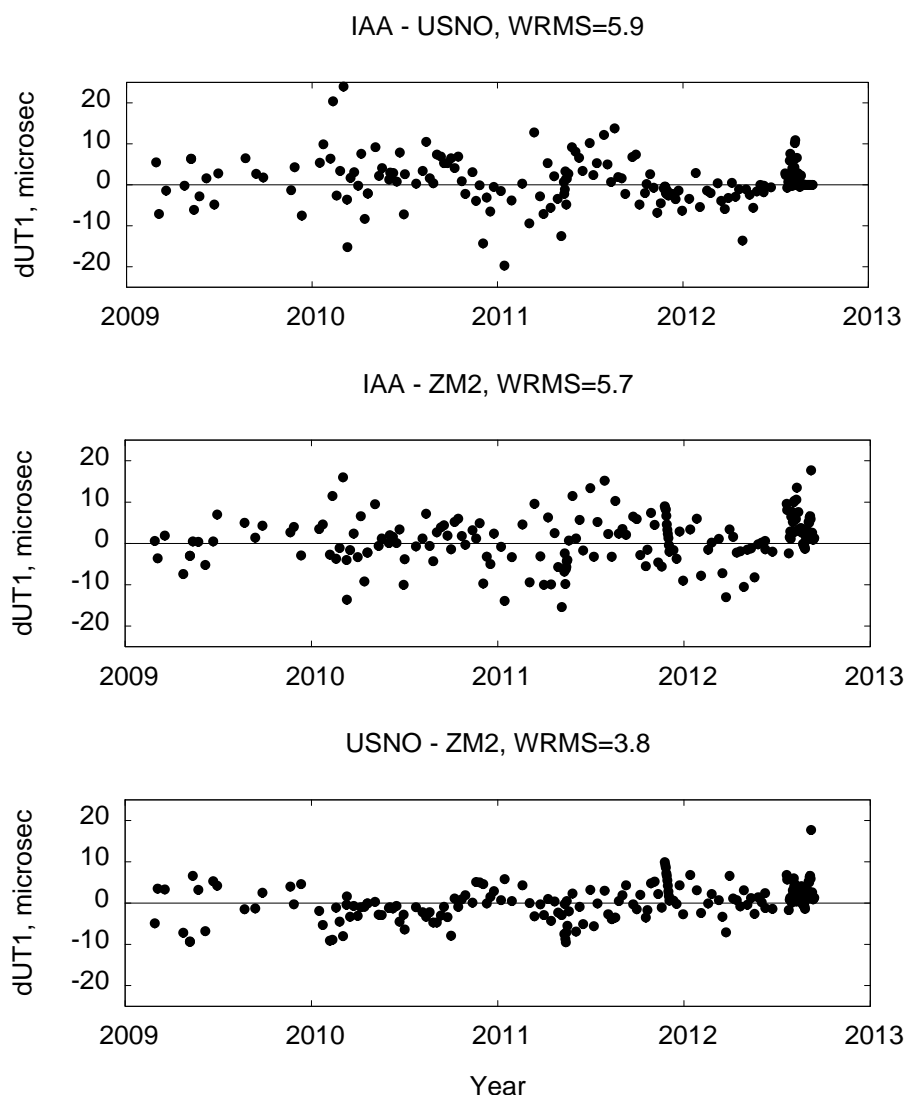


Рис. 2. Разности рядов UT1, полученные с тремя моделями СРО. В заголовках приведены среднеквадратические значения разностей в мкс.

Для получения более определенных результатов было проведено два вида сравнения: анализ разностей трех вычисленных нами рядов UT1 с рядами UT1 IERS, вычисляемыми в Парижской обсерватории (ряд С04) и Морской обсерватории США (ряд USNO) и анализ разностей между нашими тремя рядами.

В первом случае в разностях между тестовыми рядами UT1 и рядами IERS выделялись линейный тренд, а также годовая и полугодовая гармоника. Кроме того вычислялись среднеквадратические разности после исключения этих систематических членов, которые можно рассматривать, как внешние случайные ошибки определения UT1. Результаты приведены в табл. 1 вместе с медианными формальными (внутренними) ошибками определения UT1.

Данные табл. 1 показывают, что как внутренняя, так и внешняя случайная ошибка определения UT1 мало зависят от используемой модели СРО. В то же время обнаруживаются небольшие систематические различия между рядами. Этот вывод подтверждается более точными данными табл. 2, где приведены систематические различия между сериями: линейный тренд и сезонные члены.

Таблица 1. Разности между тестовыми рядами UT1 и рядами IERS: линейный тренд $b+ct$, амплитуда годового (a) и полугодового (sa) членов и среднеквадратические уклонения после удаления систематической части (WRMS), а также медианные формальные ошибки тестовых рядов UT1 (m).

Модель	C04					USNO					m , мкс
	b , мкс	c , мкс/год	a , мкс	sa , мкс	WRMS, мкс	b , мкс	c , мкс/год	a , мкс	sa , мкс	WRMS, мкс	
ИПА	51.8 ±4.0	8.1 ±4.1	15.9 ±5.7	14.0 ±6.0	48.7	55.0 ±3.8	6.1 ±3.9	16.8 ±5.4	12.7 ±5.6	46.2	28.9
USNO	52.7 ±4.0	6.6 ±4.1	13.4 ±5.7	14.6 ±5.9	48.6	56.0 ±3.8	4.5 ±3.9	14.6 ±5.3	13.3 ±5.5	45.7	28.9
ZM2	52.2 ±4.0	8.0 ±4.1	13.1 ±5.6	14.5 ±5.9	48.5	55.4 ±3.8	5.9 ±3.9	14.1 ±5.3	13.1 ±5.6	45.7	28.8

Таблица 2. Систематические разности между тестовыми рядами UT1.

Разность моделей	Сдвиг, мкс	Тренд, мкс/год	Годовой член, мкс	Полугодовой член, мкс
ИПА – USNO	1.0±0.4	-1.7±0.4	3.1±0.6	1.4±0.5
ИПА – ZM2	0.5±0.4	-0.2±0.4	2.7±0.6	1.1±0.5
USNO – ZM2	-0.5±0.3	1.4±0.3	2.1±0.4	0.3±0.3

Заключение

В работе проведено сравнение результатов определения UT1 из часовых сессий наблюдений на базе Зеленчукская-Бадары РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" ИПА РАН, полученных с использованием трех моделей СРО. Анализ трех серий UT1, полученных с этими моделями, показал наличие между ними небольших систематических разностей – линейного тренда и сезонных составляющих, с амплитудой 1–3 мкс. Случайная ошибка определения UT1 практически не зависит от используемой модели СРО.

Литература

1. Малкин З.М. Эмпирические модели свободной нутации земного ядра. Астрон. вестник, 2007, т. 41, № 6, 531–536.
2. Малкин З.М., Скурихина Е.А. Пакет OCCAM/GROSS для обработки РСДБ-наблюдений в службе ПВЗ ИПА РАН. Тр. ИПА РАН, 2005, вып. 12, 54–67.

3. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Скурихина Е.А., Суркис И.Ф., Смоленцев С.Г., Федотов Л.В.* Геодинамические наблюдения на РСДБ-сети "Квазар-КВО" в 2009–2011 гг. Письма в Астрон. журн., 2012, т. 38, № 6, 446–451.
4. *Финкельштейн А.М., Кайдановский М.Н., Сальников А.И., Михайлов А.Г., Безруков И.А., Скурихина Е.А., Суркис И.Ф.* Оперативное определение поправок всемирного времени в режиме e-РСДБ Письма в Астрон. журн., 2011, т. 37, № 6, 470–479.
5. *Malkin Z.* The impact of celestial pole offset modelling on VLBI UT1 intensive results. *J. of Geodesy*, 2011, v. 85, No. 9, 617–622.
6. *Malkin Z.M.* Comparison of CPO and FCN empirical models. In: Proc. Journées 2010, Paris, France, 20-22 Sep 2010, ed. N. Capitaine, Paris, 2011, 172–175
7. *Petit G., Luzum B.* (Eds) IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010.

DEPENDENCE OF THE RAPID UT1 RESULTS OBTAINED FROM THE VLBI NETWORK "QUASAR" ON NUTATION MODEL

Malkin Z.M.^{1,2}, Skurikhina E.A.³

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

³*Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia*

Intensive VLBI sessions at a single baseline are observed for rapid determinations of Universal Time (UT1) in the framework of several international programs. A similar program is conducted on the Russian VLBI network "Quasar" operated by the Institute of Applied Astronomy RAS in interest of GLONASS and other domestic users. These sessions do not allow us to obtain all the Earth orientation parameters with reasonable accuracy, and only UT1 can be effectively estimated. For this reason, reliable terrestrial and celestial pole coordinates are needed for data processing of the Intensives. Hence the UT1 estimates obtained from these observations heavily depend, in particular, on the model of the celestial pole motion used during data processing. However, even the most accurate precession-nutation model, IAU 2000/2006, is not accurate enough to realize the full potential of VLBI observations. To achieve the highest possible accuracy in UT1 estimates, a celestial pole offset (CPO), which is the difference between the actual and modeled precession-nutation angles, should be applied. In this paper, these models have been tested and the differences between UT1 estimates obtained with those models are investigated. It has been shown earlier that using different CPO models can cause the differences in UT1 estimates reaching 10 μ s, depending on the baseline length and orientation. In this paper we investigated the impact of different CPO modelling on the UT1 results obtained from the 1-hour sessions on the baseline Zelenchukskaya–Badary of the "Quasar" VLBI network. We processed observations of 192 sessions with three CPO models. In result, it was found that the systematic differences between the UT1 estimates computed with different models (trend and seasonal terms) are at a level of 1–3 μ s. On the other hand, the formal error of the UT1 estimates practically does not depend on the CPO model used.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

Миллер Н.О.

ГАО РАН, С-Петербург

В данной работе демонстрируются структурные особенности ЧДП. Для этой цели используются наиболее длительные ряды координат полюса. Методом сингулярного спектрального анализа выделено шесть компонент в интервале 1.1-1.3 г. Первые две компоненты имеют повторяющиеся структурные особенности. Сумма этих компонент соответствуют двум главным пикам спектра ЧДП. Спектральный анализ изменения амплитуды суммы остальных компонент, показал наличие гармоник с периодами 11, 20, 27, 40 лет, которые могут быть связаны с солнечной активностью и волнами Марковица. При совместном анализе ЧДП и геомагнитных индексов Kp, Ap обнаружено синхронное поведение слабого компонента ЧДП с аналогичной компонентой, полученной при разложении индексов. В области вековых вариаций амплитуды ЧДП приблизительно 40 летние ее вариации согласованы с СА. Кроме того в работе выполнены оценки параметров ЧДП – период, добротность, изменения амплитуды и фазы во времени.

Введение

Движение полюса, имеет сложный нерегулярный характер, зависящий от различных астрономических и геофизических причин и обусловленный влиянием взаимодействий между различными процессами. Поэтому исследование движения полюса естественным образом разбивается на несколько задач:

- 1) Выделение компонент с последующим выявлением структурных особенностей и закономерностей в их поведении.
- 2) Оценка параметров колебаний (период, добротность, изменения амплитуды и фазы со временем).
- 3) Поиск взаимосвязи между геофизическими процессами и структурными особенностями вариаций движения полюса.

Наиболее значимым колебанием в движении полюса является чандлеровское (ЧДП), которое представляет собой квазигармоническое колебание сложной структуры. Это колебание, начиная с его открытия Чандлером в конце XIX в., исследовалось разными авторами. Несмотря на большую историю исследования, до сих пор остаются вопросы, связанные с выделением ЧДП из наблюдений полярного движения, оценкой параметров этого колебания, поиском причин возбуждения.

При исследовании ЧДП спектральными методами в зависимости от интервала наблюдений получаются разные значения параметров. Амплитуда чандлеровского колебания меняется от 0".04 до 0".25, а значение периода от 1.15 до 1.25 года. При анализе изменения фазы этого колебания со временем обнаруживаются фазовые смещения, наибольшее из которых приходится на интервал практически полного затухания чандлеровского колебания около 1929 г., а два других находятся на краях ряда (в начале - около 1850 г., в конце - около 2005 г.).

В данной работе для выделения ЧДП используется многомерный сингулярный спектральный анализ (МССА) (www.gistatgroup.com/cat), с помощью которого можно увидеть тонкую структуру данной гармоники и исследовать отклик структурных особенностей этих рядов на вариации внешних факторов. Этот метод очень чувствителен к

наличию сигнала и поэтому, даже при максимальных ошибках в начале ряда, удаётся выделить и исследовать полезный сигнал на всём интервале.

Наблюдаемые вариации могут быть обусловлены различными возбуждающими геофизическими факторами. Ввиду этого полезны любые дополнительные, в том числе статистические, данные и предположения о входных возбуждениях. Примером этого может служить исследование зависимости некоторых компонент ЧДП от индексов солнечной и геомагнитной активности. Для исследования были использованы наиболее продолжительные сводные ряды координат полюса Международной службы вращения Земли IERS (1846-2012) (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>), ряды площадей и чисел солнечных пятен (SSAr, SSN) [1] (1750-2010), а также геомагнитные индексы Ap (1932-2010) и Dst (1957-2008) (ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/).

Компоненты ЧДП

Методом MSSA при длине окна, равной половине длины ряда, были получены три основных составляющих движения полюса: трендовая, чандлеровская (X_{cw} , Y_{cw}) (рис.1, слева) и годовая. Их вклад в исходный ряд составляет 90% (37%, 40%, 13% соответственно). В результате мы видим две аналогичные по своему поведению структуры ЧДП с тремя областями сильного падения амплитуды и смены фазы почти на 180° , что указывает на наличие низкочастотной вариации с периодом около 80 лет [2]. На рис.1 (справа) приведен результат комплексного анализа Фурье в полосе частот соответствующих ЧДП ряда $Z=X_p-iY_p$, где X_p и Y_p координаты движения полюса. Горизонтальная линия соответствует уровню значимости 99%.

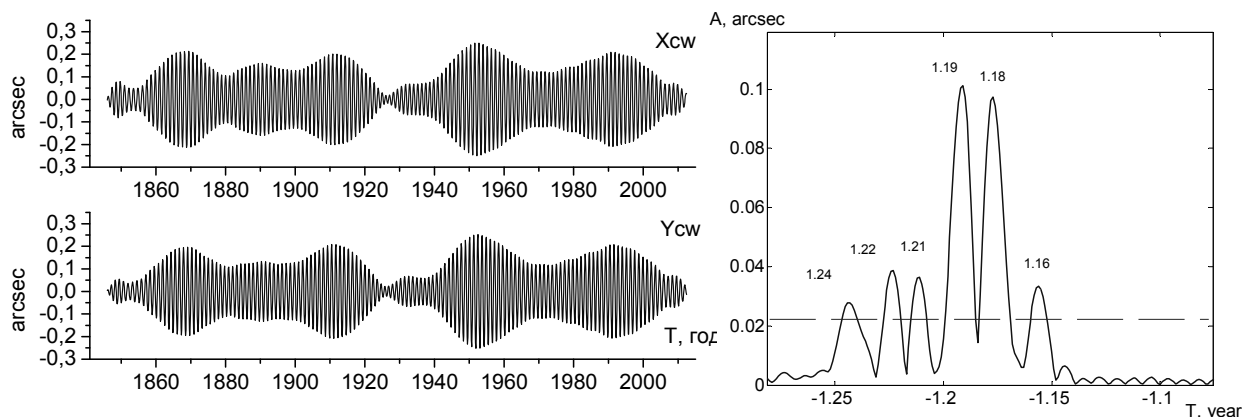


Рис. 1. Слева - чандлеровское движение полюса, полученное ССА, справа - результат комплексного Фурье анализа координат полюса.

Методом МССА на частоте чандлеровского колебания, также как и при Фурье анализе, было получено шесть компонент. На рис.2 приведены эти компоненты для координаты X_p , для Y_p поведение кривой аналогичное. Все компоненты, кроме первых двух, являются независимыми и соответствуют спектральным пикам на рис. 1 (справа) (табл. 1.). На первые две компоненты приходится 33% энергии, а на остальные четыре - всего только 7%.

Сумма первых двух компонент («1+2», рис. 3) соответствует двум максимальным пикам вычисленного Фурье спектра (рис. 1, справа). Обе компоненты («1», «2» рис.3) имеют две области падения амплитуды. Если разбить эти ряды на три интервала от одного минимума амплитуды до другого и выполнить спектральный анализ для каждого интервала отдельно, то для каждого интервала получается значение периода, близкое к 1.184 г. (432.8 дней) (табл. 2). Для первой компоненты точки минимума

приходятся на ~1875 и ~1929 г., а для второй - на ~1929 и ~1983 г. Т.е. интервал между точками минимума для обеих компонент оказывается равным ~54 г.

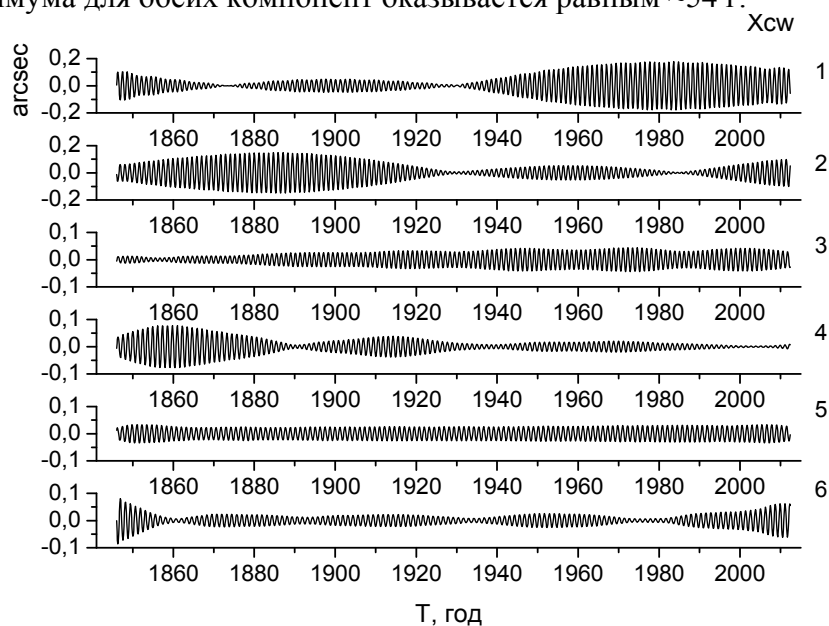


Рис. 2. Компоненты чандлеровского движения полюса, полученные ССА

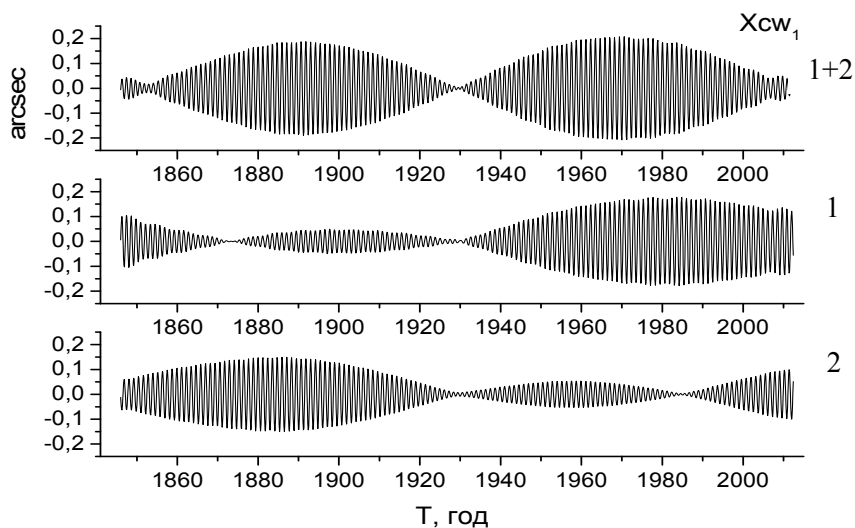


Рис. 3. Первые компоненты чандлеровского движения полюса и их сумма

Таблица 1.

№	P (год)	max A (arcsec)	
		Xp	Yp
1+2	1.18 1.19	0.207	0.206
3	1.16	0.044	0.042
4	1.21	0.078	0.069
5	1.22	0.034	0.037
6	1.24	0.086	0.074

Таблица 2.

	Интервал	Период (год)	Амплитуда (mas)
1	1846-1875	1.179	25
	1875-1929	1.185	12
	1929-2008	1.184	172
2	1846-1929	1.184	97
	1929-1984	1.185	9
	1984-2008	1.184	29
1+2	1853-1929	1.183	164
	1929-2006	1.185	198

Суммарную компоненту («1+2», рис. 3) также можно разбить на два интервала, со схожей структурой, причем значение периода внутри каждого интервала остается постоянным (табл. 2). Сопоставление изменения амплитуды (arcsec) и фазы (град.) суммарной компоненты «1+2» (рис. 4, слева) показывает совпадение интервалов резкого падения амплитуды с интервалом смены фазы почти на 180° в середине исследуемого ряда (1929 г.) и указывает на аналогичный процесс в начале (1850 г.) и конце ряда (2005 г.).

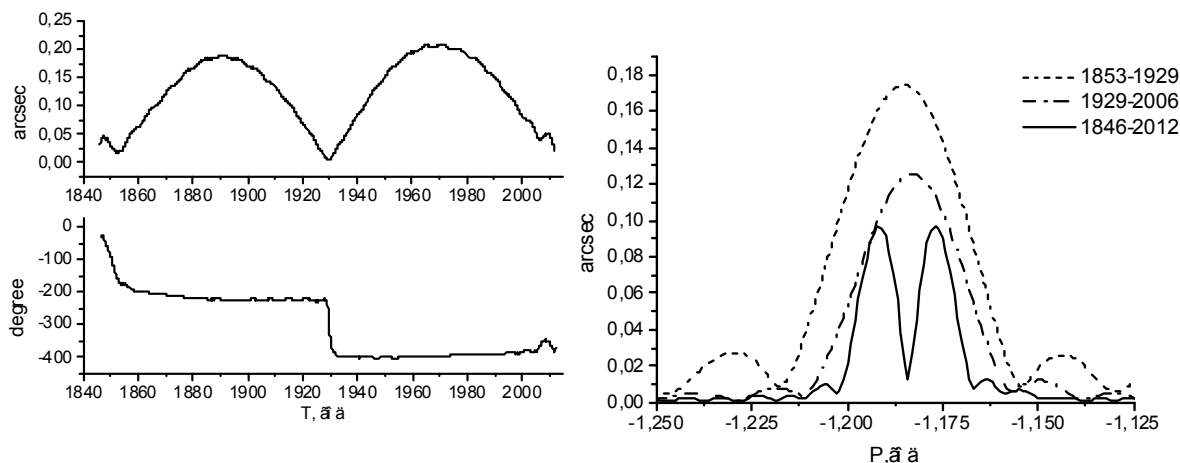


Рис. 4. Слева – изменение амплитуды и фазы главной составляющей ЧДП (сумма первых двух компонент), справа – результат спектрального анализа ЧДП на различных интервалах.

На рис. 4 (справа) приведен результат спектрального анализа для суммарной компоненты: на всем интервале и на двух интервалах, на которых фаза не меняется. Раздвоение пика ЧДП, происходит только в том случае, если спектр был вычислен на интервале, включающем в себя смену фазы, а на интервалах постоянства фазы период не меняется (табл. 2). Это объяснение раздвоения спектра на частоте ЧДП сменой фазы неоднократно приводилось в работах различных авторов, например в [3]. Для оценки значения добротности колебания полюса Земли Q_{sw} использовалась сумма первых двух компонент МССА разложения. Причем расчеты выполнялись по ширине спектральной линии отдельно для двух интервалов с заведомо постоянной фазой. В результате были получены: $Q_{1858-1929}=70$, $Q_{1934-2005}=73$.

Сумма остальных четырех компонент (X_{sw2}) приведена на рис. 5. Результат комплексного спектрального анализа для X_{sw2} , Y_{sw2} приведен на рис. 6, слева. Если выполнить спектральный анализ изменения амплитуды этой компоненты на интервале после 1900 г., то в области низкочастотных компонент обнаруживаются пики, соответствующие 11, 20, 27, 40 летним периодам (рис. 6, справа).

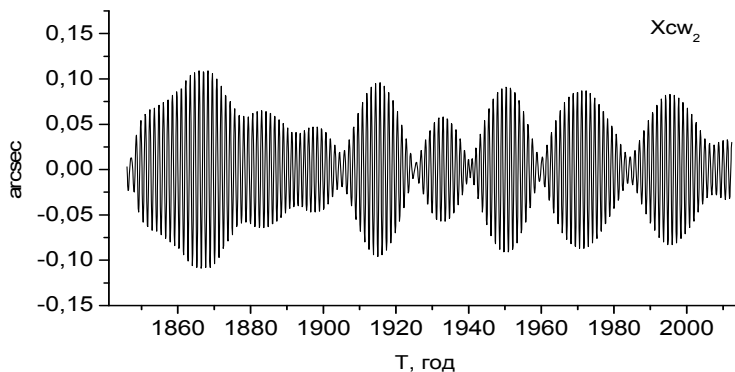


Рис. 5. Слабая составляющая ЧДП, сумма 3-6 компонент.

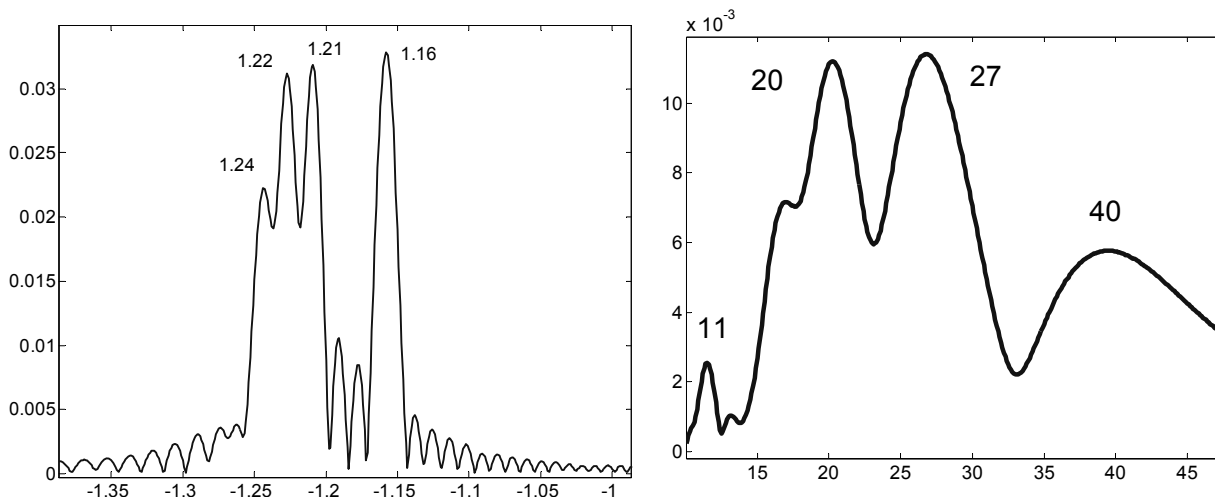


Рис. 6. Слева – результат спектрального анализа слабого компонента ЧДП, справа - результат спектрального анализа изменения амплитуды слабого компонента ЧДП.

Солнечная и геомагнитная активность и ЧДП

При исследовании низкочастотных вариаций наиболее интересный результат получен при совместном МССА разложении SSA γ и радиуса полудия ЧДП ($R_{\text{ЧДП}}$) (рис. 11), оцениваемом после удаления движения среднего полюса из рядов X ρ , Y ρ . На хорошем уровне значимости (9%) с минимальными фазовыми расхождениями ~40 летние вариации амплитуды ЧДП согласованы с СА. При этом росту СА соответствует увеличение амплитуды ЧДП. 40 летние амплитудные вариации в ЧДП впервые были отмечены в работе [4]. Коэффициент корреляции равен 0.72. На рис. 7 приведены значения соответствующие нормированному значению нормированных амплитуды X sw_2 и гармоники SSN с (P=20.5 г.), полученные МССА.

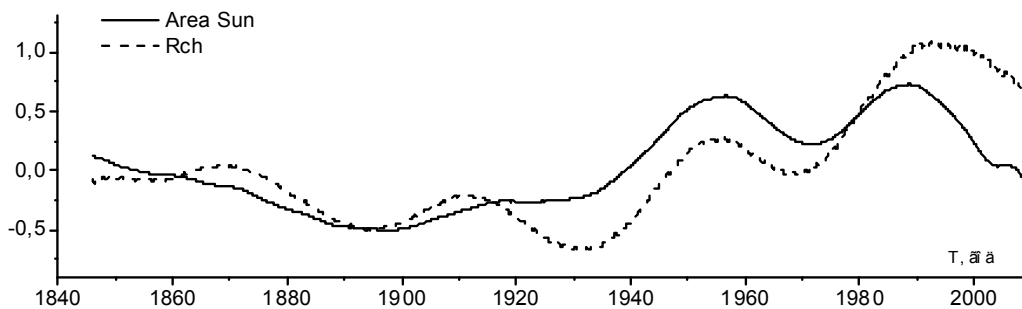


Рис. 7. Совместный МССА ряда площадей солнечных пятен (SSA γ) и радиуса полудия ЧДП ($R_{\text{ЧДП}}$).

В результате МССА разложения X ρ , Y ρ и SSN были выделены компоненты, соответствующие слабым компонентам ЧДП: 1.16, 1.24, 1.22 года, в результате разложения X ρ , Y ρ и A ρ - 1.16, 1.22, 1.10 г., а X ρ , Y ρ и Dst - 1.16, 1.24 г., 1.10г. При этом, при изменении амплитуды Dst и A ρ каждой компоненты происходит аналогичное изменение амплитуды соответствующих компонент ЧДП [5]. Это может свидетельствовать о влиянии солнечной активности на модуляцию амплитуды ЧДП. Можно предположить, что одним из факторов возбуждения вариаций амплитуды ЧДП может быть электромагнитное воздействие солнечного ветра во время магнитных бурь в соответствии с механизмом, предложенным в работе [6].

Заключение

1. В результате анализа ЧДП обнаружены две похожие структуры (рис.1, слева), которые прослеживаются в изменениях амплитуды и фазы, повторяющиеся с периодом около 80 лет [2].

2. Имеются четыре максимума амплитуды ЧДП: 1868, 1912, 1952 и 1991 гг., интервал между которыми составляет около 40 лет. Была обнаружена статистическая зависимость между ~40-летними вариациями амплитуды ЧДП и солнечной активности

3. Главная составляющая ЧДП (рис.3) при анализе методом ССА разделяется на две компоненты, у которых имеется четко выраженная структура. Сумма этих компонент соответствует двум максимальным пикам спектра (рис.1, справа). У каждой из компонент имеется два интервала уменьшения амплитуды и смены фазы на 180°. В обоих случаях интервал между минимумами составляет ~ 54 года.

4. Раздвоение пика ЧДП (рис.4, справа) происходит только в том случае, если спектр вычисляется на интервале, включающем в себя смену фазы, а на интервалах постоянства фазы период получается примерно одинаковым: 1.183 г. и 1.185 г., фактор добротности равен 65 и 67 соответственно.

5. Спектральный анализ изменения амплитуды слабой составляющей ЧДП (рис. 5) на частотах, соответствующих периодам от 10 до 45 лет, показал наличие гармоник с периодами 11, 20, 27, 40 лет, которые могут быть связаны с периодичностью солнечной активности и волнами Марковица.

Литература

1. *Nagovitsyn Yu.A.* To the Description of Long-Term Variations in the Solar Magnetic Flux: The Sunspot Area Index . *Astronomy Letters*, 2005, vol. 31, Issue 8, p.557-562.
2. *Миллер Н.О.* Чандлеровское колебание в изменениях широты Пулкова за 170 лет. *Астрономический вестник*. 2011. Vol. 45. No. 4. С. 342–353.
3. *Федоров Е.П., Яцкив Я.С.* О причинах кажущегося “раздвоения” периода свободной нутации Земли. *Астрон. журн*. 1964. №4. С. 764-768.
4. *Костина Л.Д., Сахаров В.И.* Анализ долгопериодических вариаций амплитуд чандлеровой и годичной компонент движения полюса Земли, *Изв. ГАО в Пулкове*, 1985, т.201, с.60-63.
5. *Горшков В.Л., Миллер Н.О., Воротков М.В.* Проявление солнечной и геомагнитной активности в динамике вращения земли. *Геомагнетизм и аэрономия*, №7, 2012.
6. *Holme R.* Electromagnetic core-mantle coupling – I. Explaining decadal changes in the length of day// *Geophys. J. Int.* (1998) 132, 167-180.

THIN STRUCTURE AND CHANDLER WOBBLE PARAMETERS

Miller N.

GAO RAN, St. Petersburg

The structural features of Chandler Wobble (CW) are shown in this paper. The longest time series of the pole coordinates are used for this purpose. Six components in the interval of 1.1-1.3 year were found by the method of singular spectral analysis. The first two components possess repeated structural features. Sum of these components corresponds to two main peaks of the CW spectrum. The spectral analysis of the variations of other components sum amplitude showed the existence of harmonics with the periods of 11, 20, 27, 40 years which can be connected with Sun activity and Markovits's waves. During the Multidimensional Singular Spectrum Analysis of CW and geomagnetic indexes of K_p , A_p it was found that the behavior of the CW weak component was synchronized with the similar one, found during the decomposition of indexes. There are about 40 variations coordinated with Solar Activity in the field of century variations of CW amplitude. Besides this, such CW parameters as period, quality factor Q , amplitude and phase of the time variations are estimated in this work.

АНАЛИЗ ОСТАТКОВ ПОСЛЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Миллер Н.О., Воротков М.В.

ГАО РАН, С-Петербург

В данной работе остатки получаются после исключения из рядов параметров вращения Земли C01, C04 IERS основных компонент. Выделение компонент выполнено сингулярным спектральным анализом. Анализ остатков позволяет протестировать качество выделенных компонент разными методами, выявить слабые квазигармонические компоненты, исследовать случайную составляющую ряда. Случайная составляющая получается путем последовательного исключения небольших по значимости компонент, имеющих квазипериодический характер. Исследование случайной составляющей позволяет выявить динамику изменения её параметров во времени и построить математическую модель для её описания. Полученные результаты можно использовать для прогнозирования рядов параметров вращения Земли.

Введение

В данной работе остатки получаются после исключения из рядов координат полюса Xp, Yp (1846-2012) (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>) основных компонент. Выделение компонент выполняется методом сингулярного спектрального анализа (www.gistatgroup.com/cat).

Анализ остатков позволяет:

- протестировать качество процедуры выделения компонент,
- выявить слабые квазигармонические компоненты,
- показать, что ряд остатков не содержит периодичностей,
- выяснить, каким случайным процессом этот ряд можно аппроксимировать.

Исследуемые ряды остатков получаются путем исключения из движения полюса тренда, включающего в себя долгопериодические компоненты от 3-х до 20 лет, чандлеровское движение полюса, годовую составляющую. Исследование случайной составляющей позволяет выявить динамику изменения её параметров во времени и построить математическую модель для её описания. Полученные результаты можно использовать для прогнозирования движения полюса. Существуют различные методы для анализа рядов остатков.

При этом одни методы указывают на случайность ряда остатков, а другие — на наличие в нем определенных регулярностей. Это вовсе не является неразрешимым противоречием, так как разные тесты на регулярность понимают эту регулярность в разных смыслах. В данной работе для анализа остатков используется метод Хёрста, строится эмпирическая функция распределения и ее гауссовская аппроксимация. Выбирается интервал и на каждом диапазоне времени строится показатель Хёрста, выполняется аппроксимация ряда случайным гауссовским процессом. Таким образом получают динамические характеристики, показывающие изменение во времени исследуемого показателя. Тестирование этого метода для рядов ПВЗ было выполнено в работе [Горшков, Миллер, 1998].

Метод Хёрста

Суть метода Хёрста проста и состоит в исследовании накопленных за интервал времени τ отклонений процесса $x(t)$ от среднего значения. Пусть для дискретного ряда

$\tau = n$ и \bar{x}_n - среднее процесса, тогда накопленное отклонение процесса в момент $t = j$ равно

$$X(j, n) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)_i.$$

Размах этой величины для n значений ряда равен: $R(n) = \max X(j, n) - \min X(j, n)$.

Хёрст исследовал нормированный размах $r = R/S$, где S – стандартное отклонение процесса от среднего $x(t)$. Этот метод был предложен Хёрстом в 50-е годы [Федер, 1988]. За прошедшее с тех пор время этим методом исследовались атмосферные, гидрологические, геологические и астрономические ряды, характеризующие самый широкий спектр явлений.

При этом оказалось, что величина r хорошо аппроксимируется степенной зависимостью $r(\tau) \sim \tau^H$, где H - показатель Хёрста. Значению $H = 0.5$ отвечает ряд, кумулятивная сумма, которого является обычным броуновским движением (процессом с независимыми приращениями). Если $H \neq 0.5$, то приращения процесса $H(t)$ на непересекающихся временных интервалах зависимы, причем значениям $H > 0.5$ отвечает положительная корреляция приращений, а значениям $H < 0.5$ - отрицательная. В первом случае говорят о персистентности приращений (persistent - устойчивый, инертный), а во втором - об антиперсистентности. Персистентность свидетельствует о наличии в системе процессов, поддерживающих (в целом) наметившиеся тенденции к изменению её состояния, а антиперсистентность, наоборот, - о процессах, препятствующих изменению состояния системы.

Показатель Хёрста является робастным (устойчивым) по отношению к варьированию типа распределения приращений процесса $x(t)$. На этом основании по оценке H показателя Хёрста, полученного для некоторого временного ряда, делают вывод о наличии персистентности ($H > 0.5$), её отсутствии ($H \approx 0.5$) или о наличии антиперсистентности ($H < 0.5$) в данном временном ряде.

Главные компоненты движения полюса

Методом многомерного сингулярного спектрального анализа при длине окна, равной половине длины ряда, были получены три основные составляющие движения полюса: трендовая, чандлеровская, годовая (рис. 1). Их суммарный вклад в исходный ряд для координаты составляет 90% (37%, 40%, 13% соответственно). На среднем рисунке видны две похожие структуры в 1849–1929 и 1929–2009 гг. в изменениях амплитуды. Наличие данных структур свидетельствует о низкочастотных закономерностях поведения ЧДП, одним из проявления которых является хорошо известная особенность в 1920-х гг. Изменение амплитуды происходит с одновременным изменением фазы этого колебания с периодом около 80 лет [Миллер, 2011]. На рис. 2 приведены результаты комплексного анализа Фурье $Z = Xr - iYr$, где Xr (рис. 3) и Yr - остатки после выделения главных компонент движения полюса (по оси X – год).

Показатель Хёрста (H) вычислялся для всего ряда на интервалах длительностью 300 (3 г.) точек со сдвигом 0.1 г. (рис. 4) $H(Xr) = 0.73$, $H(Yr) = 0.70$. Такая персистентность характерна для многих шумов «естественного происхождения» [Федер, 1988].

Среднеквадратичное отклонение (СКО) вычислялось на интервале 100 точек со сдвигом 0.1 г. (рис. 5, слева) Заметно уменьшение ошибки с течением времени. На рис. 5 (справа) приведена эмпирическая функция распределения (ЭФР) и её аппроксимация гауссовским процессом с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией, равной среднеквадратическому отклонению исследуемого ряда. На рис. 6 приведена динамическая ЭФР второго ряда для Xr (интервал 300 точек, шаг 0.1 г.), и её аппроксимация гауссовским процессом приведена на рис. 7.

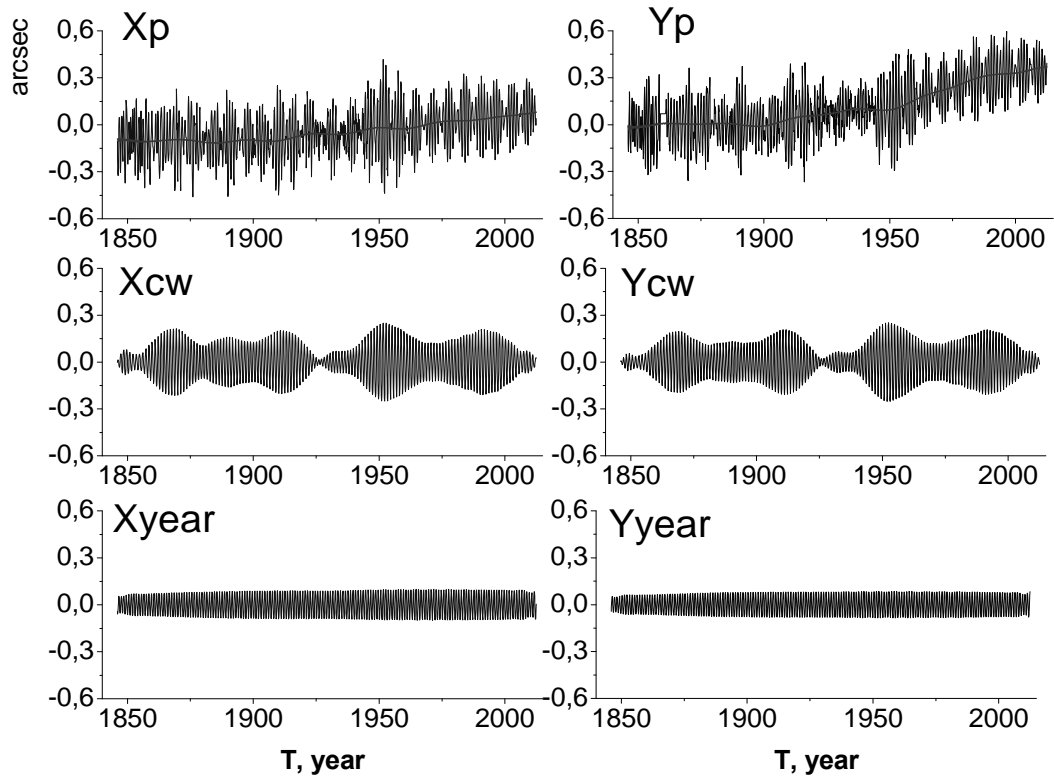


Рис. 1. Главные компоненты движения полюса.

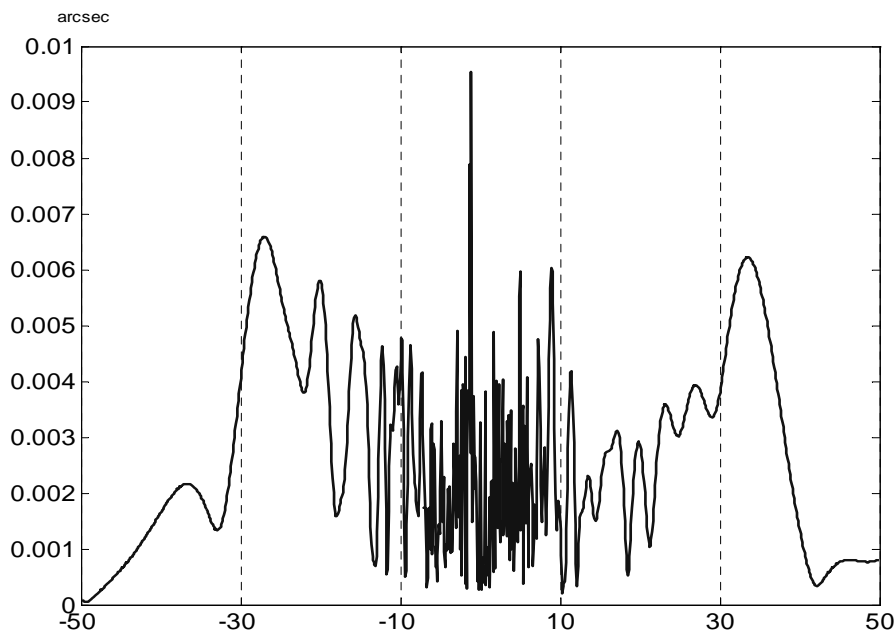


Рис. 2. Результат комплексного анализа Фурье остатков после выделения главных компонент движения полюса (по оси X – год).

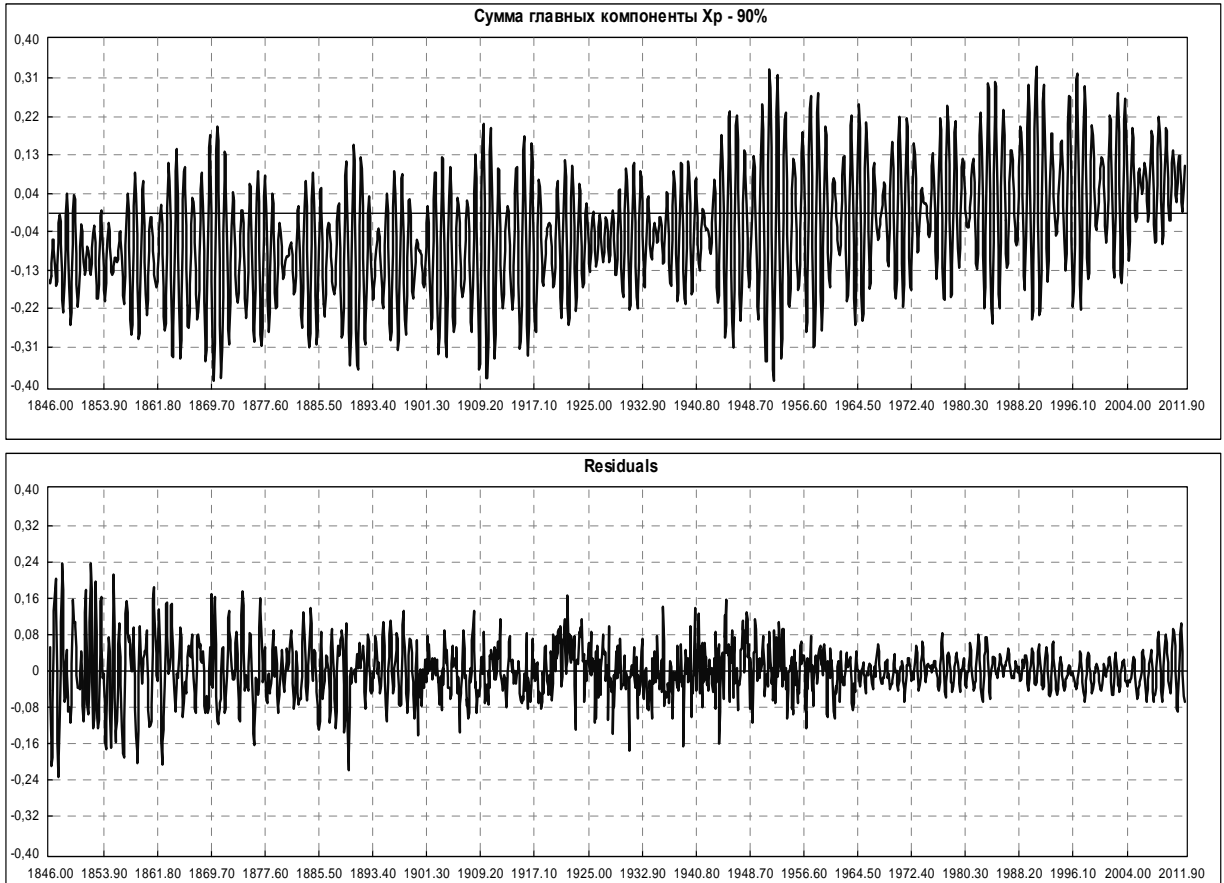


Рис. 3. На рисунке приведена сумма выделенных компонент (верхний) и остатки (нижний) после их исключения для X_p (1846-2011 гг.).

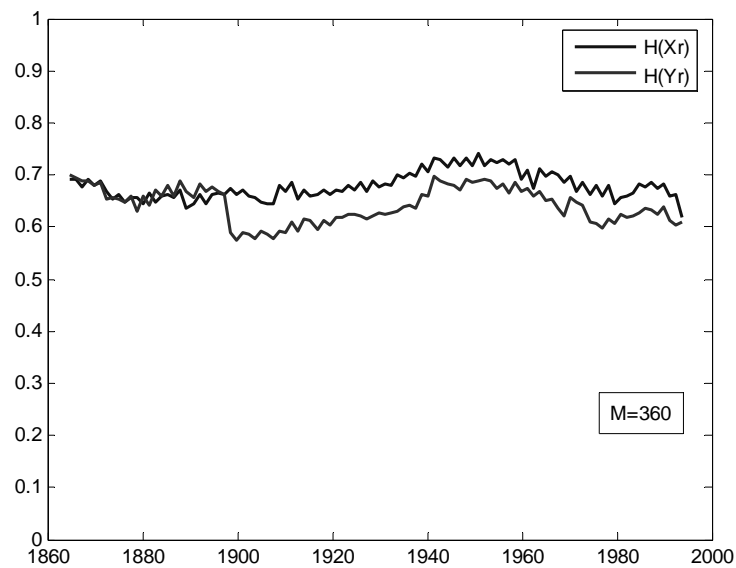


Рис. 4. Динамика изменения показателя Хёрста H для ряда остатков (верхняя кривая для X_p , нижняя для Y_p)

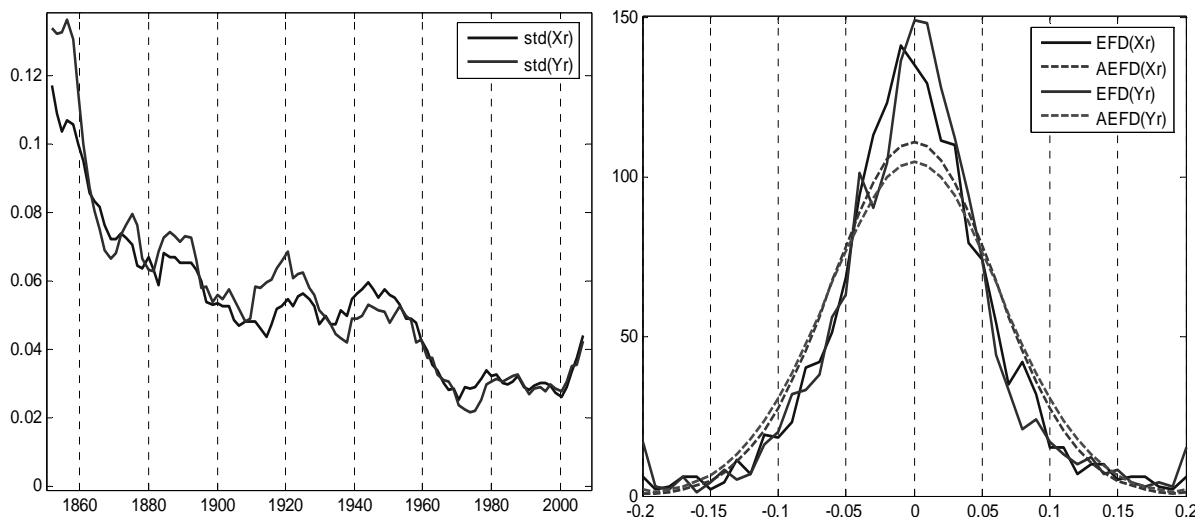


Рис. 5. Слева - динамика изменения средне-квадратичного отклонения, справа - эмпирическая функция распределения

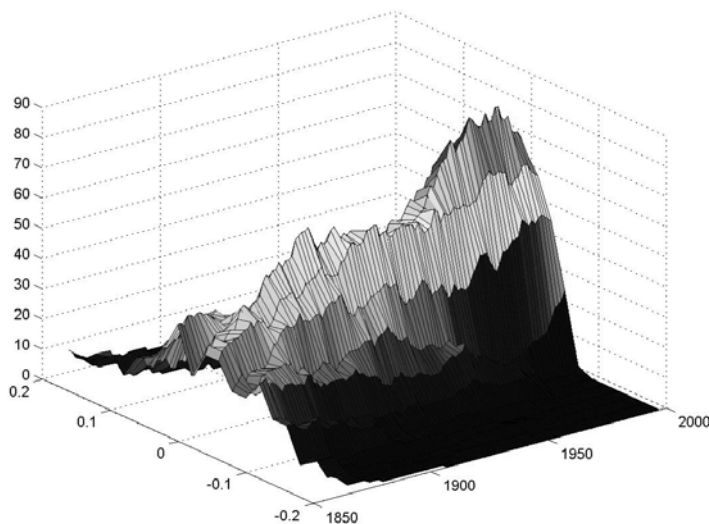


Рис. 6. Динамическая ЭФР второго ряда для X_r .

Заключение

Главные компоненты движения полюса X_p , Y_p – тренд, чандлеровское и годовое колебания, полученные методом сингулярного спектрального анализа, составляют 90%.

Ряд, оставшийся после удаления 10%, хорошо аппроксимируется случайным процессом. Это означает, что основная часть закономерных составляющих уже исключена. Данный процесс нестационарен (дисперсия уменьшается), но имеет постоянную персистентность. Возможно, он определяется совокупностью двух процессов: уменьшающейся со временем ошибкой наблюдений, имеющей в любом выбранном диапазоне времени гауссовское распределение, и физическим шумом, представимым дробно-броуновским процессом с персистентностью 0.7. Из динамических кривых эмпирических функций распределения (рис. 6, 7) хорошо видно, что ряд на каждом временном интервале хорошо аппроксимируется случайным гауссовским процессом, а параметры этого процесса меняются со временем.

Т.о., движение полюса может быть представлено как сумма следующих составляющих:

$$P(t) = f_{tr}(t) + f_{cw}(t) + f_y(t) + f_r(t),$$

где $f_{tr}(t)$ – в тренд входят негармоническая монотонная составляющая и медленные колебания,

$f_{cw}(t)$ – чандлеровское колебание: $f_{cw}(t) = f_{cw1} + f_{cw2}$, где f_{cw1} – сумма первых двух компонент ЧДП, f_{cw2} – сумма четырех компонент ЧДП [Миллер, 2012], $f_y(t)$ – годовое колебание, $f_r(t)$ – случайный процесс, имеющий гауссовское распределение.

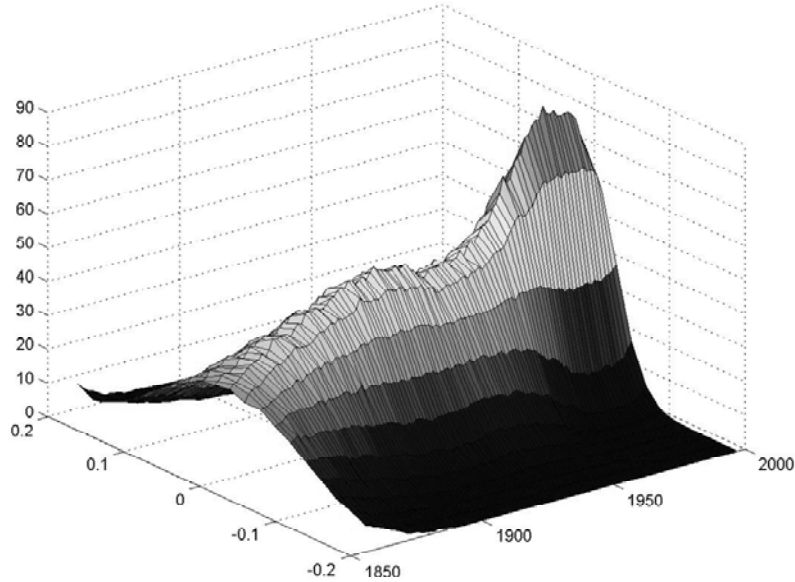


Рис. 7. Динамическая аппроксимация ЭФР гауссовским процессом для X_p .

Литература

1. Горшков В.Л., Миллер Н.О., Баушев Н.О., Воротков М.В. О персистентности параметров ориентации Земли. Изв. ГАО №213. 1998. С. 269-272.
2. Feder J., 1988, Fractals, NY, Pergamon Press.
3. Миллер Н.О. Тонкая структура и параметры чандлеровского движения полюса (в настоящем сборнике).

ANALYSIS OF THE RESIDUALS AFTER A SEPARATION OF THE MAIN COMPONENTS OF POLAR MOTION

Miller N., Vorotkov M.
GAO RAN, St. Petersburg

In this work the residuals are obtained after an exclusion of the main components from time series C01, C04 IERS. A separation of the components is carried out by the Singular Spectrum Analysis. An analysis of the residuals allows to test quality of allocated components and to investigate a random component of a row. The random component is obtained by a consecutive exclusion of insignificant components with quasi-periodic character. The research of a casual component allows to reveal the dynamics of its parameters variation in time and to construct mathematical model for its description. The received results can be used for forecasting time series of Earth rotation parameters.

ПОСТРОЕНИЕ ДОЛГОСРОЧНЫХ ЧИСЛЕННОГО И ПОЛУ- АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ О ВРАЩЕНИИ ЗЕМЛИ

Пашкевич В.В.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Данная статья является продолжением наших исследований вращения абсолютно твёрдой Земли на длительных интервалах времени [3, 4]. Основная цель данного исследования является построение новых высокоточных рядов вращения абсолютно твёрдой Земли RERS2012 (Rigid Earth Rotation Series 2012), которые являются динамически адекватными эфемериде DE406/LE406 [5]. Динамика вращательного движения абсолютно твёрдой Земли изучается численно с помощью параметров Родрига-Гамильтона на 2000-летнем и 6000-летнем интервалах времени. Все вычисления в данном исследовании производятся с четверной точностью. Орбитальное движение возмущающих небесных тел определяется эфемеридой DE406/LE406. Результаты численного решения рассматриваемой проблемы сравниваются с полуаналитическими решениями задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли SMART97 [2] и S9000 [4], соответственно, относительно неподвижной эклиптики эпохи J2000. Начальные условия для численного интегрирования берутся из соответствующих полуаналитических решений. Исследование невязок сравнения между высокоточными численными решениями задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли и полуаналитическими решениями этой задачи производятся методами наименьших квадратов и спектрального анализа. Задача решалась с учётом наиболее существенных из релятивистских возмущений во вращательном движении Земли – геодезических возмущений.

1. Введение

В предыдущей работе [4] были построены высокоточные ряды вращения абсолютно твёрдой Земли S9000, динамически адекватные эфемериде DE404/LE404 на 2000 летнем интервале времени. Основная цель данного исследования является построение новых высокоточных рядов вращения абсолютно твёрдой Земли RERS2012A/B и RERS2012C/D, динамически адекватными эфемериде DE406/LE406 [5] на 2000 летнем и 6000 летнем интервалах времени, соответственно. В настоящем исследовании разработана итерационная схема для исследования проблемы вращения Земли. В результате её применения были построены новые высокоточные численное и полуаналитическое решения вращения Земли на интервале времени в 2000 и 6000 лет. Задача решалась с учётом наиболее существенных из релятивистских возмущений во вращательном движении Земли – геодезических возмущений. Все вычисления в данном исследовании производятся с четверной точностью.

2. Математическая модель задачи

Численное решение задачи получается из решения дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода для вращения абсолютно твёрдой Земли относительно неподвижной эклиптики и равноденствия эпохи J2000:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_i} - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (1)$$

Здесь и далее точка над буквами означает дифференцирование по времени. Функция Лагранжа в (1) имеет вид:

$$L = T + U, \quad (2)$$

где U – силовая функция гравитационного взаимодействия Земли с возмущающими телами (Луной, Солнцем и большими планетами). Силовая функция U разлагается по

сферическим гармоникам и учитывает только члены с коэффициентами C_{j0} для $j = 2, \dots, 5$, C_{22} , C_{3k} , S_{3k} для $k = 1, 2, 3$ и C_{41} , S_{41} . Орбитальное движение возмущающих тел определяется эфемеридой DE406/LE406. Кинетическая энергия вращательного движения абсолютно твёрдой Земли, учитывающая существенную часть из релятивистских возмущений во вращательном движении Земли – геодезического вращения [3], определяется следующим образом:

$$T = \frac{1}{2}(A\omega_{*1}^2 + B\omega_{*2}^2 + C\omega_{*3}^2), \quad (3)$$

где $\bar{\omega}_* = \bar{\omega} + \bar{\sigma}$ является релятивистским вектором угловой скорости вращения Земли, включающим геодезическое вращение; $\bar{\omega}$ является Ньютоновым вектором угловой скорости вращения Земли; A , B и C – главные моменты инерции Земли; ω_{*1} , ω_{*2} и ω_{*3} – проекции релятивистского вектора угловой скорости на оси главных моментов инерции. Вектор угловой скорости геодезического вращения Земли, который является наиболее существенным релятивистским компонентом вращательного движения Земли вокруг собственного центра масс, определяется следующим выражением:

$$\bar{\sigma} = \sum_{j \neq \oplus} \frac{Gm_j}{c^2 |\bar{R}_j - \bar{R}_{\oplus}|^3} \left\{ \left(2\dot{\bar{R}}_j - \frac{3}{2}\dot{\bar{R}}_{\oplus} \right) \times (\bar{R}_j - \bar{R}_{\oplus}) \right\}, \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме; G – гравитационная постоянная; m_j – масса j -го возмущающего тела; \bar{R}_{\oplus} , $\dot{\bar{R}}_{\oplus}$, \bar{R}_j , $\dot{\bar{R}}_j$ – барицентрические векторы положений и скоростей Земли и j -го возмущающего тела, соответственно. Символ \times обозначает векторное произведение; индекс \oplus относится к обозначению Земли и индекс j относится к обозначению Луны, Солнца и больших планет. В качестве переменных, описывающих вращение Земли вокруг собственного центра масс, в (1) используются четыре параметра Родрига-Гамильтона, связанные с углами Эйлера ψ , θ и φ следующими соотношениями:

$$\lambda_0 = \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi + \varphi}{2}, \quad \lambda_1 = \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi - \varphi}{2}, \quad \lambda_2 = \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi - \varphi}{2}, \quad \lambda_3 = \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi + \varphi}{2}. \quad (5)$$

Параметры Родрига-Гамильтона – ограниченные переменные. Это очень важно для численного решения задачи. Заметим, что дифференциальные уравнения вращательного движения Земли в углах Эйлера содержат аналитическую особенность вида $\sin^{-1} \theta$, ограничивающую выбор координатной системы. Использование параметров Родрига-Гамильтона в качестве переменных задачи позволяет устранить эту особенность. Дифференциальные уравнения вращательного движения Земли в параметрах Родрига-Гамильтона были нами получены из уравнений Лагранжа второго рода. Их вид, как и более подробное описание математической модели проблемы приводится в нашей статье [3].

Для численного решения задачи применяется метод высокоточного численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений НРПИ [1], основанного на равномерной чебышевской интерполяции правых частей дифференциальных уравнений. Интегрирование выполнялось с постоянным шагом, равным 1 суткам, от начальной эпохи 1 января 2000 года (JD = 2451545.0). В результате применения итерационной схемы, численное решение строится заново для каждой новой итерации. На первой итерации итерационного алгоритма начальные условия численного интегрирования берутся из полуаналитического решения SMART97 [2] для построения рядов RERS2012A/C или S9000 [4] для построения рядов RERS2012B/D. Для каждой последующей итерации берутся новые начальные условия из нового, построенного на предыдущей итерации, полуаналитического решения, и производится новое численное интегрирование.

3. Итеративный алгоритм

При построении полуаналитических решений для упрощения решения дифференциальных уравнений, как правило, пренебрегают некоторыми составляющими их членами. Это обстоятельство ограничивает интервал применения этих решений. Численные решения являются более точными, так как при их построении численно решаются более полные дифференциальные уравнения. Таким образом, увеличивается интервал их применения. Точность численных решений зависит от точности начальных условий численного интегрирования, которые обычно берутся из полуаналитических решений.

В настоящем исследовании разработан итеративный алгоритм, уточняющий и согласующий численные и полуаналитические решения:

1. Начальные условия численного интегрирования вычисляются из полуаналитического решения задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли (S9000 или SMART97). На всём исследуемом интервале времени с шагом в 1 сутки в углах Эйлера производится сравнение численного решения с исходным полуаналитическим решением.

Выражения для невязок сравнения между численным и полуаналитическим решениями задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi &= \sum_{k=0}^6 \psi_k t^k + \sum_j \sum_{k=0}^4 [\psi_{Sjk} \sin(\nu_{j0} + \nu_{j1}t) + \psi_{Cjk} \cos(\nu_{j0} + \nu_{j1}t)] t^k \\ \Delta\theta &= \sum_{k=0}^6 \theta_k t^k + \sum_j \sum_{k=0}^4 [\theta_{Sjk} \sin(\nu_{j0} + \nu_{j1}t) + \theta_{Cjk} \cos(\nu_{j0} + \nu_{j1}t)] t^k \\ \Delta\varphi &= \sum_{k=0}^6 \varphi_k t^k + \sum_j \sum_{k=0}^4 [\varphi_{Sjk} \sin(\nu_{j0} + \nu_{j1}t) + \varphi_{Cjk} \cos(\nu_{j0} + \nu_{j1}t)] t^k \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где ψ – угол долготы восходящего узла динамического экватора Земли на неподвижной эклиптике эпохи J2000; θ – угол наклона динамического экватора Земли к неподвижной эклиптике эпохи J2000; φ – угол собственного вращения Земли между восходящим узлом динамического экватора Земли и главной осью минимального момента инерции Земли; ν_{j0}, ν_{j1} – фазы и частоты соответствующих полуаналитических решений, соответственно; t – время в Юлианских днях; $\psi_k, \theta_k, \varphi_k$ – коэффициенты систематических членов; $\psi_{sjk}, \theta_{sjk}, \varphi_{sjk}, \psi_{cjk}, \theta_{cjk}, \varphi_{cjk}$ – коэффициенты периодических и Пуассоновых членов.

2. Исследование невязок сравнения производится методами наименьших квадратов и спектрального анализа [4]. Совокупность частот теории вращения Земли (S9000 или SMART97) используются без изменений. В новых рядах вращения абсолютно твёрдой Земли только уточняются коэффициенты систематических, периодических и Пуассоновых членов. Вычисляются члены нового (i -го) ряда, равные сумме вычисленных из невязок сравнения коэффициентов систематических, периодических и Пуассоновых членов и коэффициентов соответствующих членов ($i-1$ -го) ряда:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\text{RERS2012Xi}} &= \Delta\psi_{i-1} + \psi_{\text{RERS2012Xi-1}} \\ \theta_{\text{RERS2012Xi}} &= \Delta\theta_{i-1} + \theta_{\text{RERS2012Xi-1}} \\ \varphi_{\text{RERS2012Xi}} &= \Delta\varphi_{i-1} + \varphi_{\text{RERS2012Xi-1}} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Систематические, периодические и Пуассоновые члены представляют новые высокоточные ряды вращения абсолютно твёрдой Земли RERS2012Xi (где i – номер итерации, $X = A, B, C, D$ – индекс рядов). Ряды с индексами A и C строятся из рядов SMART97 на 2000 летнем и 6000 летнем интервале времени, соответственно. Ряды с

индексами В и D строятся из рядов S9000 SMART97 на 2000 летнем и 6000 летнем интервале времени, соответственно.

3. Численное решение задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли строится заново с новыми начальными условиями, которые вычисляются из RERS2012Xi.

4. Шаги 2 и 3 повторяются до получения наилучших результатов невязок сравнения между новым численным решением и новыми рядами RERS2012Xi.

4. Результаты

Предыдущее исследование [4] вращения абсолютно твёрдой Земли проводилось на Parsytec CSe20 компьютере с использованием эфемериды DE404/LE404 на 2000 летнем интервале времени. На рис. 1 (слева) изображено поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим SMART97 решениями задачи о вращении абсолютно твёрдой Земли после устранения систематического хода.

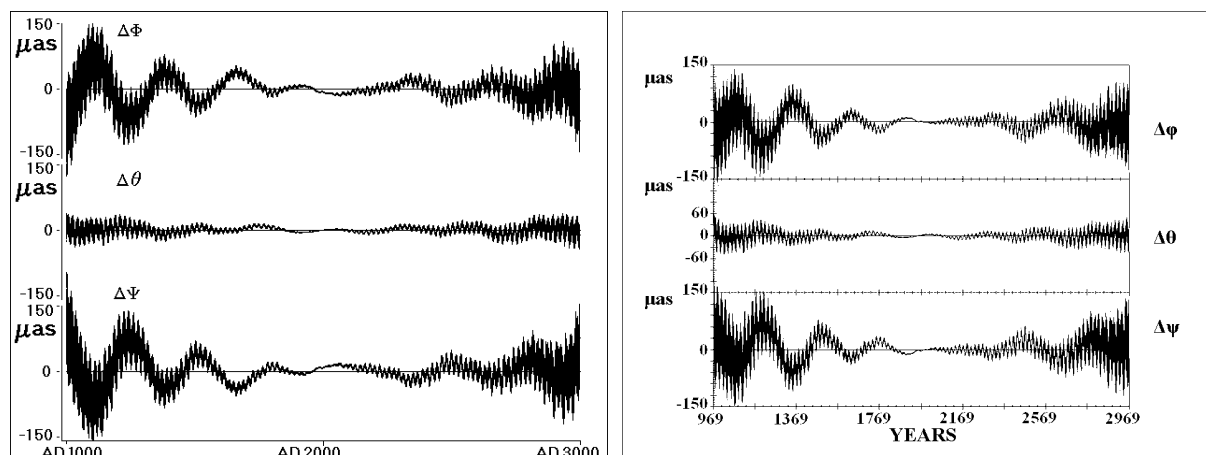


Рис. 1. Поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим SMART97 решениями после устранения систематического хода с использованием эфемерид DE404/LE404 (слева) и DE406/LE406 (справа) на 2000-летнем интервале времени.

Данное исследование проводилось на 4-х ядерном компьютере с использованием DE406/LE406 эфемериды. В начале было проведено исследование на 2000-летнем интервале времени. Поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим SMART97 решениями данной задачи после устранения систематического хода в углах Эйлера представлено на рис. 1 (справа). Результаты сравнения на рис. 1 (слева) и рис. 1 (справа) похожи друг на друга и не превосходят 150 микросекунд дуги (μas).

На рис. 2 изображено поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим RERS2012A-1 (слева) и RERS2012B-2 (справа) решениями данной задачи после устранения систематического хода. Результаты сравнения в углах Эйлера на рис. 2 (слева) и рис. 2 (справа) не превосходят 12 μas и 4 μas , соответственно. Выполнение итерационного алгоритма было завершено после 1-й итерации для ряда RERS2012A-1 и после 2-й итерации для ряда RERS2012B-2. Выполненных итераций оказалось достаточно для выполнения условия прекращения выполнения итерационного алгоритма, в результате были построены новые высокоточные ряды, описывающие вращение абсолютно твёрдой земли RERS2012A/B динамически адекватные эфемериде DE406/LE406, на временном интервале 2000 лет.

Данное исследование было продолжено и завершено на 6000 летнем интервале времени. На рис. 3 изображено поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим RERS2012C-2 (слева) и RERS2012D-2 (справа) решениями данной задачи после устранения систематического хода в угле собственного вращения. Результаты

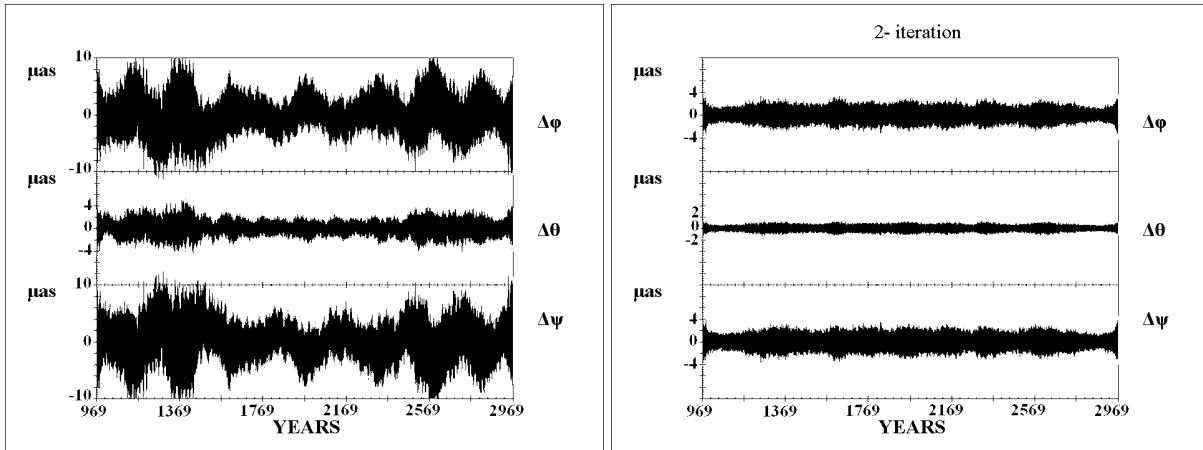


Рис. 2. Поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим RERS2012A-1 (слева) и RERS2012B-2 (справа) решениями данной задачи после устранения систематического хода на 2000-летнем интервале времени.

сравнения в углах Эйлера после 2-й итерации на рис. 3 (слева) и рис. 3 (справа) не превосходят 1.2 миллисекунды дуги (mas) и 2 mas, соответственно. Остаточные невязки после 2-й и 3-й итерации итерационного алгоритма оказались достаточно близкими друг другу. Таким образом, выполнение итерационного алгоритма было завершено на данном шаге. В результате были построены новые высокоточные ряды, описывающие вращение абсолютно твёрдой земли RERS2012C/D динамически адекватные эфемериде DE406/LE406, на временном интервале 6000 лет.

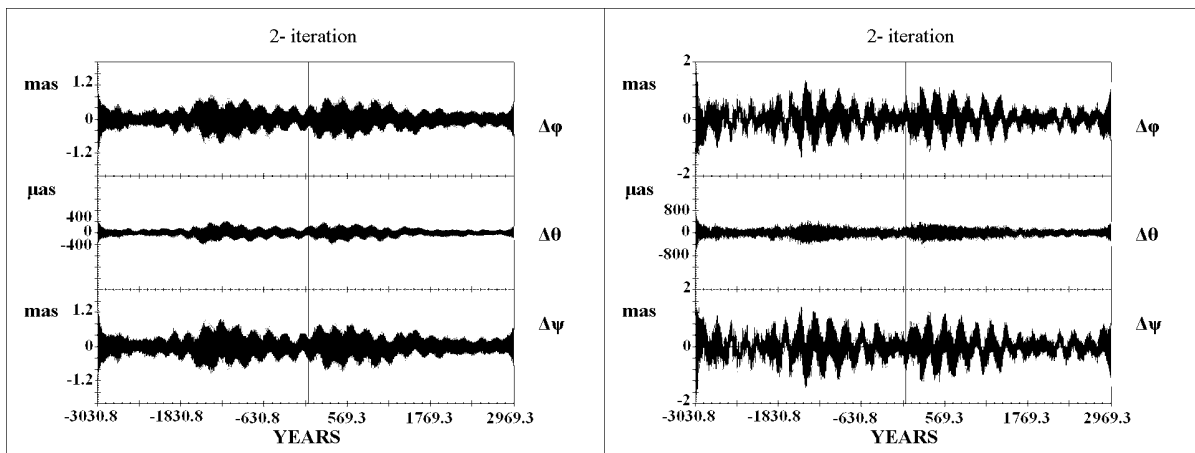


Рис. 3. поведение невязок сравнения между численным и полуаналитическим RERS2012C-2 (слева) и RERS2012D-2 (справа) решениями данной задачи после устранения систематического хода в угле собственного вращения на 6000-летнем интервале времени.

5. Заключение

В результате данного исследования, построены новые высокоточные ряды, описывающие вращение абсолютно твёрдой земли RERS2012A/B и RERS2012C/D динамически адекватные эфемериде DE406/LE406, на временном интервале 2000 и 6000 лет, соответственно. Ряды RERS2012 содержат 4113 периодических и Пуассоновых членов (без включения новых субсуточных и суточных членов). Исследование субсуточных и суточных периодических и Пуассоновых членов в данной работе не производилось. Таким образом, в новые ряды RERS2012A/C и RERS2012B/D эти члены вошли без

изменений из рядов SMART97 и S9000, соответственно. Невязки сравнения между численным решением и RERS2012A/B/C/D не превосходят:

12 микросекунд дуги и 4 микросекунды дуги на 2000 летнем интервале времени,

1.2 миллисекунды дуги и 2 миллисекунды дуги на 6000 летнем интервале времени, соответственно, что является хорошей согласованностью рядов RERS2012 с эфемеридой DE406/LE406.

Благодарность

Исследования проводились в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (РАН) и в Центре космических исследований Польской академии наук (ПАН). При финансовой поддержке в рамках сотрудничества между Польской и Российской академиями наук: Тема № 34.

Литература

1. *Ерошкин Г.И.* (2000) Высокоточный метод численного интегрирования, основанный на чебышевской полиномиальной интерполяции, Материалы конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века» (19-23 июня, 2000 г., Санкт-Петербург), с. 229-230.
2. *Bretagnon P., Francou G., Rocher P., Simon J.L.* (1998) SMART97: a new solution for the rotation of the rigid Earth, *Astron. Astrophys.*, Vol. 329, pp. 329–338.
3. *Eroshkin G.I., Pashkevich V.V. and Brzeziński A.* (2002): Extension of the high-precision numerical theory of the rigid Earth rotation to the case of a long time interval, *Artificial Satellites*, 37, 4, pp. 169–183.
4. *Pashkevich V.V., Eroshkin G.I.* (2005) Application of the spectral analysis for the mathematical modelling of the rigid Earth rotation, *Artificial Satellites*, Vol. 40, No. 4, pp. 251–259.
5. *Standish E.M.* (1998) JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, JPL Interoffice Memorandum 312.F-98-048.

CONSTRUCTION OF THE NUMERICAL AND SEMI-ANALYTICAL SOLUTIONS OF THE EARTH ROTATION PROBLEM AT A LONG TIME INTERVALS

Pashkevich V.V.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

This research is the continuation of our studies of the rigid Earth rotation at a long time intervals [4]. The main purpose of this investigation is the construction of the new high-precision Rigid Earth Rotation Series 2012 (RERS2012), dynamically adequate to the JPL DE406/LE406 ephemeris [5]. The dynamics of the rotational motion of the rigid Earth is studied numerically by using Rodrigues-Hamilton parameters over 2000 and 6000 years. The numerical solution of the rigid Earth rotation is implemented with the quadruple precision of the calculations. The orbital motions of the disturbing celestial bodies are defined by the DE406/LE406 ephemeris. The results of the numerical solutions of the problem are compared with the semi-analytical solutions of the rigid Earth rotation SMART97 [2] and S9000 [4], respectively, with respect to the fixed ecliptic of epoch J2000. The initial conditions of the numerical integration are taken from the corresponding semi-analytical solutions of the rigid Earth rotation. The investigation of the discrepancies between high-precision numerical solutions and semi-analytical solutions of the rigid Earth rotation problem is carried out by the least squares and spectral analysis methods. The problem was solved taking into account most significant of the relativistic perturbation in the rotational motion of the Earth - geodetic perturbations.

ПРИРОДА АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

Сидоренков Н.С.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

Эффективные функции атмосферного и океанического угловых моментов способны объяснить до 90% необходимого возбуждения чандлеровского движения полюса. Возбуждение происходит на основной частоте форсинга климатической системы с периодом тропического года 365,24 г. Помимо этого основного солнечнообусловленного форсинга климатическая система имеет еще дополнительные форсинги на периодах лунных годов за счет вариаций притока солнечной радиации вследствие изменений облачности. Эти форсинги движения полюсов модулируются вследствие прецессии лунной орбиты с периодом 18,61 г. и вследствие движения лунного перигея с периодом 8,85 лет. В итоге результирующие «лунные годовые» форсинги движения полюсов имеют периоды: сидерический – 1,160 г. аномалистический – 1,172 г., синодический – 1,157 г.

Вследствие сложения чандлеровского колебания 1,20 г. с этими луннообусловленными колебаниями возникают биения, то есть медленные периодические изменение амплитуды чандлеровского движения полюса, с периодами от 32 до 51 года. Они и наблюдаются в реальной действительности.

Введение

В работах автора [1, 5] сделано обобщение о том, что Земля, океан и атмосфера совершают согласованные колебания, влияя друг на друга, т.е. имеют место совместные колебания системы Земля-океан-атмосфера, изначально инициируемые приливами. Видимыми проявлениями этих колебаний являются движение полюсов Земли, Эль Ниньо и Ла Ниньо в океане, Южное колебание и квазидвухлетняя цикличность в атмосфере. Движение полюсов Земли и квазидвухлетняя цикличность ветров в атмосфере, имеют подобные спектры (с отношением периодов 1:2) и общий механизм возбуждения, связанный с лунно-солнечными приливами.

Однако, несмотря на столетнюю историю исследований, природа чандлеровского движения полюсов (ЧДП) еще далека от ясности. Анализ наблюдений свидетельствует, что в 1890-1915 гг. и 1947-1960 гг. амплитуды ЧДП были в три, пять раз большими, чем в 1925-1943 гг. Отчетливо проявляется амплитудная модуляция ЧДП. Период между максимумами амплитуды – период биений – равен ≈ 40 лет. Это свидетельствует о том, что ЧДП состоит из суммы двух колебаний с очень близкими периодами. Цель статьи объяснить эту проблему.

Форсинги климатической системы

Мониторинг приливных колебаний скорости вращения Земли, эволюции синоптических процессов в атмосфере, режимов атмосферной циркуляции и вариаций гидрометеорологических характеристик во времени показал, что большая часть типов синоптических процессов в атмосфере изменяется согласованно с приливными колебаниями угловой скорости V вращения Земли [1, 5]. На рис. 1 приведены графики величин V для 2008 и 2010 г. Можно видеть, что скорость вращения Земли варьирует преимущественно внутри сидерического месяца (27,3 дня). В течение этого периода времени Луна перемещается из своего крайнего положения в Северном полушарии, когда её положительное склонение максимально, к минимальному отрицательному склонению в Южном полушарии и затем снова возвращается в Северное полушарие к макси-

мальному склонению. При этом скорость V испытывает два полумесячных колебания с максимумами при максимальном удалении Луны от небесного экватора, как в Север-

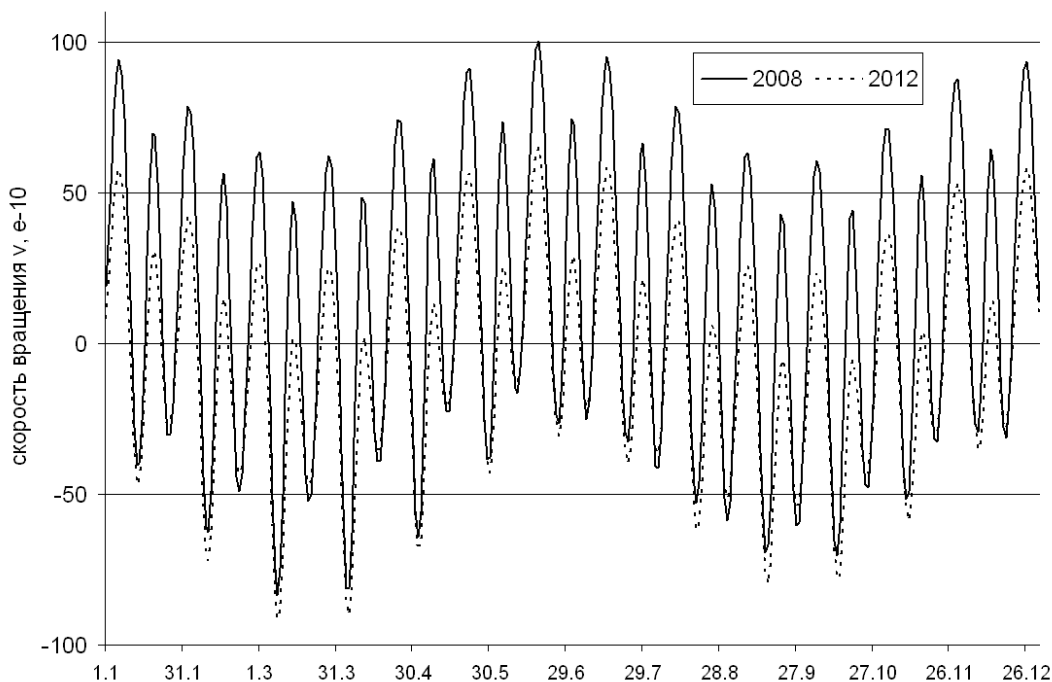


Рис. 1. Приливные колебания скорости вращения Земли V в 2008 г. (сплошная) и в 2012 г. (пунктир). Видно хорошее совпадение обеих кривых по фазе.

ное, так и в Южное полушарие, и минимумами при пересечении Луной экватора. На ретроспективных данных, было установлено, что в 76% случаев моменты перестроек синоптических процессов в атмосфере (изменения погоды) совпадают с экстремумами скорости V [1, 5].

Естественно, что погода генерируется Солнцем с годовым периодом 365,24 сут. Но описанная выше связь свидетельствует о наличии другого источника изменений погоды, связанного с лунно-солнечными приливами, а точнее, с месячным обращением Земли вокруг барицентра системы Земля – Луна. Эти геодинамические изменения погоды имеют период 355 суток (13 сидерических или 12 синодических месяцев), который называется лунным годом.

Сложение двух колебаний одинаковой амплитуды, но с разными частотами f_1 и f_2 дает

$$\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t = 2 \cos \frac{2\pi(f_1 - f_2)t}{2} \cos \frac{2\pi(f_1 + f_2)t}{2} \quad (1)$$

Последний косинус в правой части (1) описывает колебание, частота которого равна средней частоте исходных колебаний. Первый косинус описывает изменение его амплитуды. Амплитуда нарастает и спадает с удвоенной частотой $(f_1 - f_2)$. Она называется частотой биений.

Биения – это периодическое изменение амплитуды результирующего колебания. Когда фазы колебаний совпадают, амплитуды суммируемых колебаний складываются, и амплитуда результирующего колебания становится максимальной. Затем фазы колебаний постепенно расходятся, и амплитуда результирующего колебания уменьшается.

Минимальной она становится, когда разность фаз достигает 180° , так как тогда амплитуды суммируемых колебаний вычитаются.

При сложении солнечнообусловленного 365 суточного колебания с лунным 355 суточным колебанием период биений равен 35,2 лет ($1/355,16 - 1/365,24 = 1/12869$ сут. = $1/35,2$ лет). В работе [2] показано, что холодные зимы и жаркие летние сезоны наблюдались в центре ЕТР в годы близкие к 2002/2010 г., 1972 г., 1936/1938 г. и 1901 г. Найденная последовательность аномально жарких летних сезонов и холодных зим, подтверждает существование квази 35-летних биений годовой амплитуды температуры воздуха T .

Механизм формирования 35-летних биений T заключается в изменениях облачности, от которой зависит радиационный баланс атмосферы. Наиболее объективную оценку количества облачности на небе получают с помощью гелиографов, измеряя продолжительность солнечного сияния (ПСС) за день.

Для доказательства зависимости изменений амплитуды T от вариаций ПСС мы подготовили ряд разности максимальной и минимальной температуры воздуха в Москве для каждых суток с 1966 по 2011 г., вычислили их скользящие среднегодовые значения, и сравнили со скользящими среднегодовыми значениями ПСС, которые были вычислены в работах [2, 3] (рис. 2). Линейные тренды исключены из хода обеих кривых.

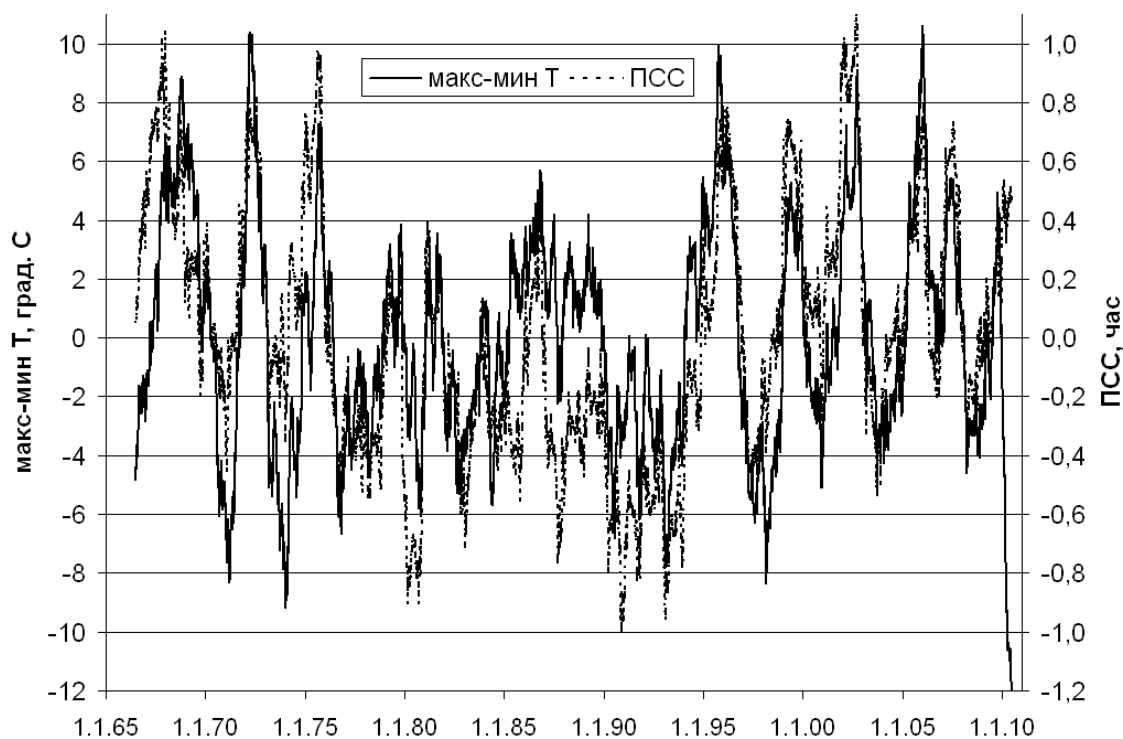


Рис. 2. Синхронный ход скользящих среднегодовых значений продолжительности солнечного сияния (пунктир) и разности максимальной и минимальной температуры T (сплошная) в Москве с 1966 по 2011 год.

На рис. 2 видно, что ПСС тесно коррелирует с ходом удвоенной годовой амплитуды температуры воздуха (коэффициент корреляции $r = 0.65$). Изменения амплитуды T определяются вариациями ПСС, а точнее, количества притекающей солнечной радиации. Приращение ПСС на 1 час приводит к увеличению разности максимальной и минимальной температур T на 1° .

Помимо квази 35-летней волны на рис. 2 видны также большие квази-четырёхлетние флуктуации ПСС и разности температуры T . Они возникают вследствие того, что

кривые приливных колебаний скорости вращения Земли V и даты экстремумов на них почти повторяются через четыре года (рис. 1). Эту закономерность в ходе V впервые заметила Н.С. Шаповалова. То есть через четыре года почти повторяется последовательность конфигураций во взаимных положениях Земли, Луны, Солнца, больших осей их орбит (линий апсид). Продолжительность семи лунных периодов 206 суток примерно равна четырем солнечным годам. Наличие квази-четырёхлетних флуктуаций ПСС и T на рис. 2 является неоспоримым свидетельством связи изменений погоды в Москве с ходом приливных колебаний скорости вращения Земли V .

Возбуждение движения полюса

Перераспределение масс воздуха в атмосфере вызывает годовые колебания полюса возбуждения Земли в плоскости меридианов 80° в.д - 100° з.д. Амплитуда этих колебаний составляет примерно 19×10^{-8} рад или 1,2 м на поверхности Земли, а начальная фаза около 180° [1, 5]. Определяющую роль в этом движении играет сезонное изменение массы воздуха над континентом Евразия, где в январе масса воздуха на 5×10^{15} кг больше, чем в июле. Годовое колебание полюса возбуждения обуславливает движения полюса вращения Земли с тем же периодом. Траектория движения полюса вращения, вычисленная по метеорологическим данным, хорошо совпадает с наблюдаемой по ориентации осей эллипсов и направлению движения. Большие оси эллипсов в обоих случаях расположены в плоскости меридианов 10° з.д. - 170° в.д., а движение происходит в положительном направлении (с запада на восток). Но начальные фазы и величины осей обнаруживают расхождения. Метеорологический полюс вращения Земли по оценкам всех авторов запаздывает по сравнению с наблюдаемым на 30° - 60° . В начале года первый располагается на меридиане 80° в.д., а последний - на меридиане 115° - 130° в.д. Величины осей траектории метеорологического полюса вращения немного (примерно в 1.2 раза) больше осей наблюдаемой траектории. Вычисленная большая полуось составляет 50×10^{-8} рад или 3,2 м, в то время как наблюдаемая 43×10^{-8} рад или 2,7 м [1, 5]. Эти небольшие расхождения объясняются сезонными не изостатическими колебаниями масс воды в Мировом океане и сезонными вариациями количества грунтовой воды на суше.

Известно, что узлы лунной орбиты непрерывно перемещаются по эклиптике к западу, совершая полный оборот за 18.61 г. Перигей же лунной орбиты движется к востоку, оборачиваясь за 8.85 г. В результате такого встречного движения соединения узла с перигеем происходят ровно через 6 лет. Шестилетняя цикличность четко проявлялась в колебаниях урожайности зерна в СССР. Прослеживается она также в вариациях длительности суток и интенсивности Сибирского антициклона зимой. Поэтому амплитуда годового колебание полюса возбуждения должна модулироваться шестилетним циклом. В результате годовое колебание полюса возбуждения, обусловленное сезонным перераспределением массы, должно вызывать движения полюса вращения Земли не только с годовым, но и с чандлеровским периодами.

Форсинг движения полюсов с периодом солнечного года 365,24 сут модулируется вследствие прецессии месячной орбиты Земли с периодом 18,61 г. и вследствие движения ее перигея с периодом 8,85 лет. В итоге результирующий солнечный годовой форсинг порождает движения полюсов с периодом 1,20 года

$$\frac{1}{1,0} - \left(\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} \right) = \frac{1}{1,20}.$$

В восьмидесятых годах XX века организованы непрерывные мониторинги гидрометеорологических эффектов во вращении Земли путем вычисления компонент эффективных функций атмосферного (ААМ) и океанического (ОАМ) угловых моментов в

ведущих мировых метеорологических центрах прогноза погоды [4]. Оказалось, что функции ААМ и ОАМ способны объяснить до 90% необходимого возбуждения ЧДП (см. сайт <http://hpiers.obspm.fr/eor-pc>).

Считается, что это возбуждение происходит на основной частоте форсинга климатической системы с периодом 365,24 суток. Однако в последних работах автора показано, что помимо этого основного форсинга климатическая система имеет еще дополнительные форсинги за счет изменений облачности с периодами, которые возникают из-за не кратности лунных периодов солнечному тропическому году 365,24 сут. Обнаружены колебания климатических характеристик и экваториального компонента момента импульса атмосферы h_2 с периодом 355 суток [2].

Форсинг движения полюсов с периодом лунного сидерического года 355 сут (13 сидерических месяцев) модулируется вследствие прецессии месячной орбиты Земли с периодом 18,61 г. и вследствие движения ее перигея с периодом 8,85 лет. В итоге результирующий «лунный сидерический» форсинг порождает движение полюса с периодом 1,16 года:

$$\frac{1}{355,18 \text{сут} / 365,24 \text{сут} / \varepsilon} - \left(\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} \right) = \frac{1}{1,1606 \varepsilon}$$

В результате сложения чандлеровского колебания 1,20 г. с колебанием 1,16 г. возникают биения, то есть периодические изменение амплитуды движения полюса с периодом около 35 лет:

$$\frac{1}{1,16} - \frac{1}{1,2} = \frac{1}{35,3}$$

Аналогично лунный синодический год (12 синодических месяцев) должен возбуждать движение полюса с периодом 1,1574 года:

$$\frac{1}{354,37 \text{сут} / 365,24 \text{сут} / \varepsilon} - \left(\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} \right) = \frac{1}{1,1574 \varepsilon}$$

Сложение этого возбуждения с ЧДП порождает биения с периодом 32,585 лет.

«Лунное» годовое (13 аномалистических месяцев) возбуждение может генерировать движение полюса с периодом 1,172 года:

$$\frac{1}{358,21 \text{сут} / 365,24 \text{сут} / \varepsilon} - \left(\frac{1}{18,61} + \frac{1}{8,85} \right) = \frac{1}{1,172 \varepsilon}$$

Сложение этого движения полюса с ЧДП может порождать биения с периодом 50,93 лет:

$$\frac{1}{1,172} - \frac{1}{1,2} = \frac{1}{50,9}$$

Таким образом, вследствие сложения ЧДП (период 1,20 г.) с этими луннообусловленными колебаниями возникают биения, то есть медленные периодические изменение амплитуды ЧДП с периодами от 32 до 51 года. Они и наблюдаются в реальной действительности.

Выводы

Возбуждающие функции ААМ и ОАМ способны объяснить до 90% необходимого возбуждения ЧДП. Возбуждение происходит на основной частоте форсинга климатической системы с периодом 365,24 г.

Помимо этого основного солнечнообусловленного форсинга климатическая система имеет еще дополнительные форсинги на периодах лунных годов за счет вариаций притока солнечной радиации вследствие изменений облачности. Эти форсинги движения полюсов модулируются вследствие прецессии лунной орбиты с периодом 18,61 г. и

вследствие движения лунного перигея с периодом 8,85 лет. В итоге результирующие «лунные годовые» форсинги движения полюсов имеют периоды: сидерический – 1,160 г. аномалистический – 1,172 г., синодический – 1,157 г. Вследствие сложения чандлеровского колебания 1,20 г. с этими луннообусловленными колебаниями возникают биения, то есть медленные периодические изменение амплитуды движения полюса с периодами от 32 до 51 года

Литература

1. *Сидоренков Н.С.* Физика нестабильностей вращения Земли. – М.: Наука. Физматлит, 2002. – 384 с.
2. *Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова.* Биения колебаний температуры как причина аномально жаркого лета 2010 г. на европейской территории России. // *Метеорология и Гидрология.* № 6, 2012. С. 81–94.
3. *Сидоренков Н.С., Переведенцев Ю.П., Горбаренко Е.В., Неушкин А.И., Сумерова К.А., Шарипова М.М., Шерстюков Б.Г.* Брикнеров цикл в изменении облачности и продолжительности солнечного сияния в Москве и Казани. // *Труды Гидрометцентра России.* - 2012. – Вып. 347. – С. 35–43.
4. *Barnes, R.T.H., Hide, R., White, A.A., Wilson, C.A.,* 1983. Atmospheric angular momentum fluctuations, length-of-day changes and polar motion. // *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.* V. 387. – P. 31-73.
5. *Sidorenkov N.S.,* 2009: The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 317 pp.

NATURE OF AMPLITUDE MODULATION OF CHANDLER WOBBLE

Sidorenkov N.S.

Hydrometcentre of Russia

The effective atmospheric and oceanic angular momentum functions are able to account for up to 90% of the excitation of the Chandler wobble. The Chandler wobble is excited at the fundamental frequency of climate forcing with a tropical year period of 365.24 days. In addition to this basic solar forcing, the climate system experiences additional forcings with lunar year periods due to the solar radiation variations caused by cloudiness variations. These forcings of the wobble are modulated by the precession of the lunar orbit with a period of 18.61 years and by the precession of the lunar perigee with a period of 8.85 years. Finally, the resulting "lunar annual" forcings of the Chandler wobble have the following periods: sidereal (1.160 yr), anomalistic (1.172 yr), and synodic (1.157 yr).

The addition of the 1.20-year Chandler wobble to these lunar oscillations gives rise to beats, i.e., slow periodic variations in the wobble amplitude with periods of 32 to 51 years. It is them that are observed in reality.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПИСАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ И ИХ ПРОГНОЗА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ И ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Тиссен В.М.

ФГУП "СНИИМ", г. Новосибирск, Россия

Неравномерности вращения Земли и движение ее географических полюсов являются существенными факторами, ограничивающими точность КВНО современными ГНСС. Поэтому, в мире проблеме создания адекватных физических и математических моделей учета этих факторов уделяется все большее внимание. В настоящей работе приведены данные об основных гармонических и трендовых составляющих в движении северного полюса Земли и неравномерностях ее вращения, вычисленные с помощью разработанных в СНИИМ методик прогнозирования ПВЗ. На их основе получены высокоточные и устойчивые результаты в прогнозах всемирного времени и координат полюса на различные дальности.

1. Введение

Изучение процесса вращения Земли имеет большое значение для многих направлений научной и практической деятельности человека. Данные о неравномерностях вращения Земли и движении ее полюсов используются:

- при построении геофизических моделей внутреннего строения Земли и моделей изменений климата на десятилетия вперед;
- в задачах эфемеридной астрономии при разработке теоретических основ определения координатных систем;
- при обработке результатов астрономических и геодезических наблюдений;
- при составлении эфемерид для наблюдений ИСЗ как оптическими, так и радиотехническими и лазерными средствами;
- в космической геодезии при решении задач спутниковой триангуляции и при проведении разновременных наблюдений ИСЗ с удаленных пунктов Земли.

Высокоточное определение и прогнозирование основных параметров вращения Земли (ПВЗ) – координат полюса x_p , y_p и разностей $dUT1 = UT1 - UTC$ между всемирным временем $UT1$ и координированным временем UTC в настоящее время наиболее актуально для задач эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС. Так, в случае штатной работы ГЛОНАСС обновления ЭВО производится через каждые 12 часов. В случае же вынужденного перехода на автономный режим работы эти сроки могут возрасти от 7 до 60 дней. Погрешности прогнозов ПВЗ, в конечном итоге, накладывают принципиальные ограничения на точность координатно-временных и навигационных определений (КВНО), так как другие причины возникновения погрешностей можно свести к минимуму, за счет новых разработок измерительной аппаратуры и более полного учета различных природных и технических факторов при обработке поступающей измерительной информации.

В настоящее время точность оперативных значений ПВЗ, вычисляемых как в МСВЗ, так и в ГМЦ ГСВЧ возросла на два три порядка в сравнении с эпохой астрооптических наблюдений конца прошлого столетия. По данным статистической обработки бюллетеней ГСВЧ и МСВЗ за первое полугодие 2012 г. точность срочных определений ПВЗ, как в ГСВЧ, так и в МСВЗ (USNO) соизмерима между собой. В частности, СКП

определения всемирного времени последнего известного дня составляет порядка 30-40 мкс и 120-180 мкс дуги для координат полюса x_p и y_p .

Приведенные значения СКП определений ПВЗ вполне удовлетворяют современным требованиям ЭВО ГЛОНАСС. Однако, ошибки прогнозов ПВЗ существенно выше. На первый день прогноза они уже увеличиваются в 1,5-2 раза, а на 10 и 15 дни в 15 и 30 раз соответственно. Такие погрешности приводят к неопределенностям в определении координат земных объектов до нескольких метров и таким образом могут стать доминирующими в ряду других погрешностей навигационных определений.

Планируемое повышение точности КВНО, отраженное в ФЦП развития ГЛОНАСС выдвигает повышенные требования к точности определений и прогнозирования ПВЗ. В перспективе постоянное совершенствование методов и алгоритмов учета поправок в навигационных измерениях за задержки распространения радиосигналов в атмосфере и аппаратуре, за влияние многопутности и более точного учета других мешающих факторов и сил, действующих на КА, неизбежно будет приводить к непрерывному росту требований к качеству прогнозов ПВЗ. Выполнение этих растущих требований уже сегодня выходит за рамки возможностей отдельных методов. Поэтому, в последнее время все большее внимание уделяется так называемым комбинированным методам, частично включающим в себя возможности всех других методов, вследствие объединения по определенным правилам, вычисляемых с их помощью прогнозов.

2. Особенности методики прогнозирования ПВЗ, разработанной в СНИИМ

Работы по созданию методик и программ прогнозирования ПВЗ в СНИИМе начались в 2004 году по заказу ОАО "ИСС им М.Ф. Решетнева" для целей ЭВО ГЛОНАСС. К настоящему времени они получили плановую поддержку со стороны ГМЦ ГСВЧ России и проводятся при научно-техническом сотрудничестве с Сибирской государственной геодезической академией (СГГА) и Главной астрономической обсерваторией российской академии наук (ГАО РАН) Пулково.

Особенность применяемого в СНИИМ метода заключается в том, что для оценивания прогностических параметров модели прогноза ПВЗ, используются лаги длинной порядка 70-100 лет. В то время, как в существующих методах их длина не превышает 6 лет. Основанием такого подхода к выбору данных как можно большей длины послужили исследования, выполненные в ГМЦ ГСВЧ М.Б. Кауфманом [1]. Согласно этим исследованиям вклад в общую погрешность прогноза всемирного времени на 1 год за непредсказуемые изменения тренда составляет порядка 99% в сравнении с вкладом, обусловленного несовершенством моделей учета приливных и сезонных изменений в скорости вращения Земли. Отсюда следует, что для существенного повышения точности и надежности прогнозов ПВЗ необходимо с наибольшей вероятностью учитывать их трендовые изменения в будущем.

Из всех рядов ПВЗ наиболее трудно прогнозируемым традиционно считается параметр $dUT1$, так как его динамику в наибольшей степени определяют глобальные изменения тренда. В то время как в движении полюсов Земли влияние тренда практически пренебрежимо мало в сравнении с периодическими и квазипериодическими составляющими. Более подробно методика прогнозирования ПВЗ, разработанная в СНИИМ приведена в работе [2].

В данной статье из-за требований к ее объему, приведены только основные результаты, полученные при построении гармонических моделей ПВЗ. В частности, при моделировании движения полюса на 50 летнем интервале данных основной Чандлеров период 1,19 года разделяется на две составляющие с периодами близкими 1,18 и 1,21 года и амплитудами порядка 130 и 50 мс. дуги соответственно. Кроме этого, выделяются гармоники с периодами: 1,23 (27 мс.), 1,31 (18 мс.); 1,15 (15 мс.). Среди гармоник

близких к годовому периоду с амплитудой порядка 85 мс. дуги уверенно определяются с периодами: 1,10 (12 мс); 1,02 (15 мс) и 0,95 (8 мс) года. Всего гармонические модели движения полюса насчитывают да 100 компонент. Следует отметить, что в отличие от полюса в изменениях всемирного времени наблюдается намного более значительное влияние долго периодических составляющих, среди которых наиболее заметны колебания с периодами около 70, 30, 20, 13 и 6 лет. Кроме этого, заметны циклы с периодами кратными основному чандлеровскому колебанию полюса: 2,4; 3,6 и 4,8 года, а также 6 летние. Видимо эти колебания вызываются соответствующими периодическими изменениями положения координат полюса и имеют общие причины происхождения.

На рис. 1 приведены аппроксимирующие изменения координат полюса x_p , y_p относительно известных данных с 2007 по декабрь 2012 г., с прогнозом до 2019 г. (по оси X отложена эпоха в MJD, по оси Y значения координат положения текущего полюса сек дуги). До MJD 56260 действительные значения x_p , y_p совмещены с модельными данными. На рис. 2 показана картина изменений всемирного времени за 2012 г. с прогнозом на 2 года от 1-го декабря 2012 г.

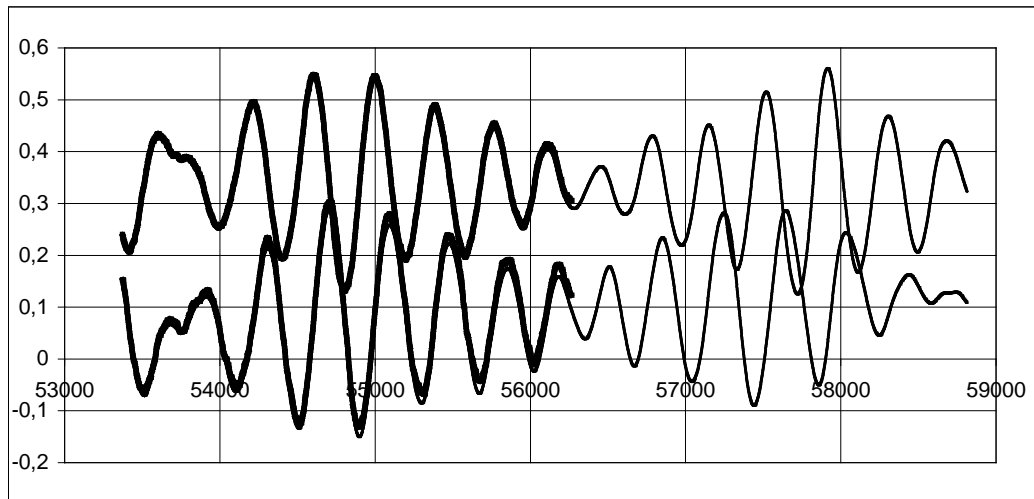


Рис. 1. Изменения координат полюса y_p (верхний график), x_p (нижний график) с 1 января 2005 г. по 1 декабря 2012 г. и их прогнозы до 1 января 2019 г.

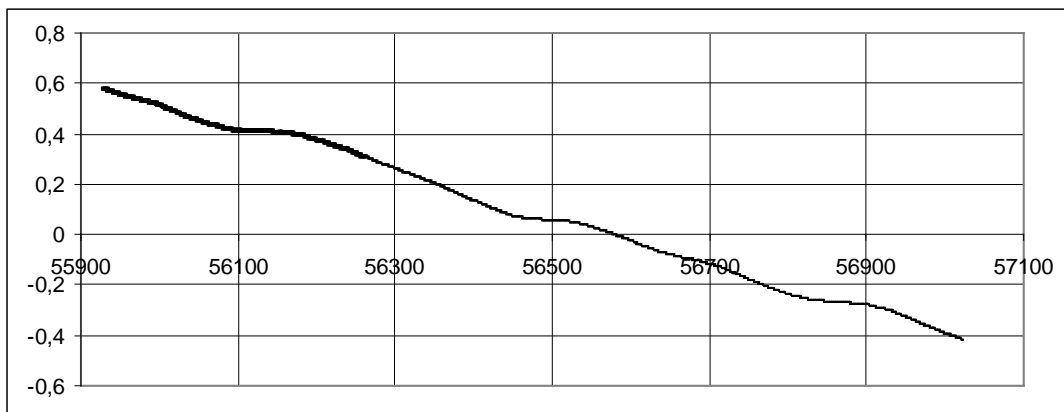


Рис. 2. Характер изменений всемирного времени в 2012 г. (выделенный начальный участок) с двухгодовым прогнозом от 1 декабря 2012 г.

Приведенные на рис. 1 и 2 графики показывают адекватность изменений ПВЗ на интервалах аппроксимации и экстраполяции. Это в основном достигается благодаря использованию для оценок параметров моделей длительных интервалов исходных данных.

На рис. 3 и 4 показаны трендовые составляющие изменений всемирного времени и координат полюса и с января 2000 г. по декабрь 2012 г.

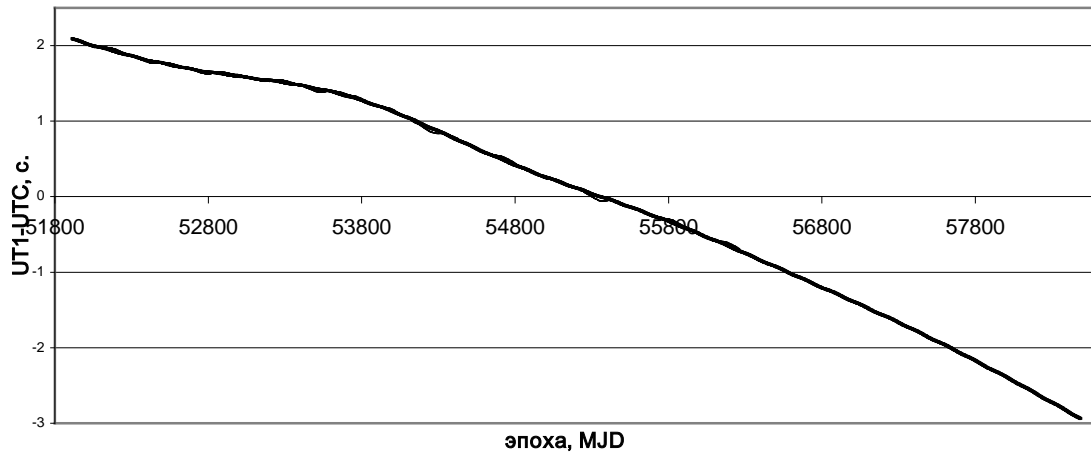


Рис. 3. Трендовая составляющая изменений всемирного времени за последние 12 лет (на фоне годовых волн) и ее прогноз до 2019 г.

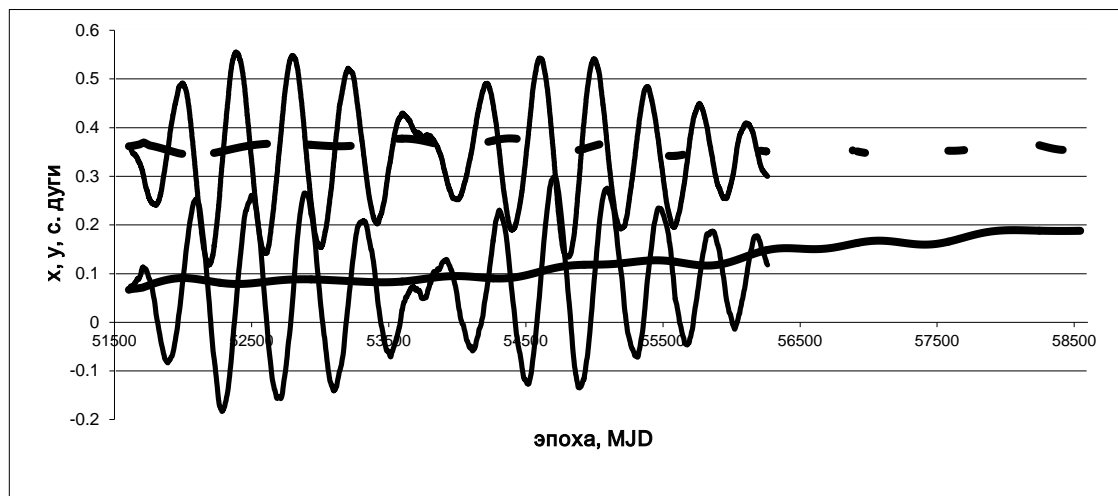


Рис. 4. Трендовые, периодические и квазипериодические составляющие движения северного полюса Земли по координатам x_p (нижний график) и y_p (верхний график) с прогнозами тренда до 2019 г.

3. Результаты

На рис. 5 в графическом виде приведены оценки СКП прогнозов ПВЗ за время 2-х годового участия СНИИМ в международном пилотном проекте ЕОРСРРР в сравнении с аналогичными оценками других участников, показавших лучшие результаты на глубину прогноза до 90 дней.

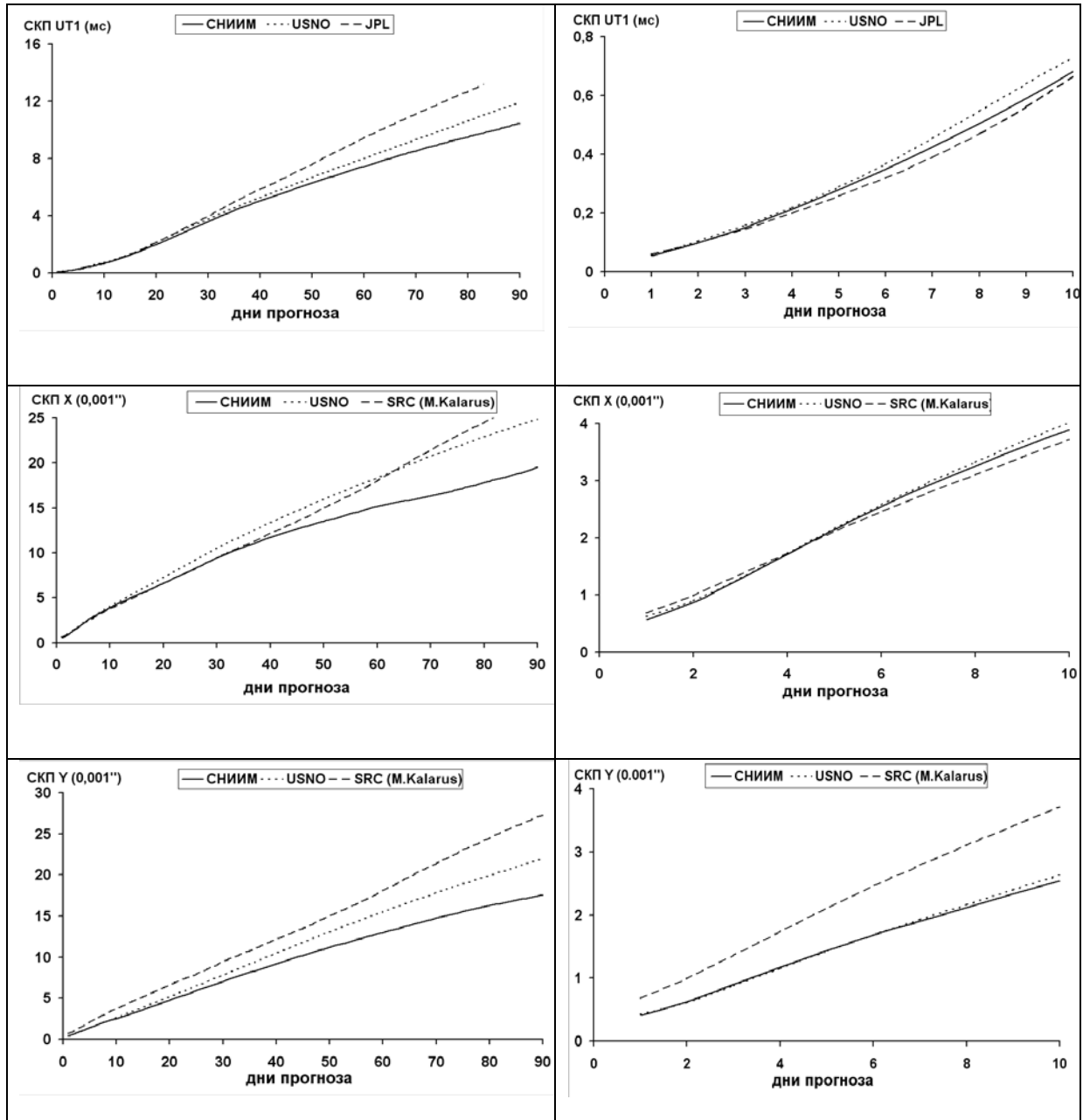


Рис. 5. Сравнение СКП прогнозов всемирного времени $UT1$ и координат полюса x_p, y_p на каждый день до глубины 90 дней (слева) с детализацией до 10 дней (справа) СНИИМ с лучшими мировыми результатами за период с 1 октября 2010 по 1 ноября 2012 г.

Приведенные на рис. 5 данные показывают, что метод прогнозирования ПВЗ, разработанный в СНИИМ обладает высокой точностью и надежностью независимо от выбранного параметра. В частности, для всемирного времени получены оценки СКП, превосходящие официальные мировые данные, представляемые обсерваторией USNO на всех глубинах прогноза. Однако, следует отметить успехи Р. Гросса из лаборатории реактивного движения (JPL, NASA) в прогнозировании этого параметра короткие интервалы до 10-15 дней. Тем не менее, на первые 2 дня качество прогнозов СНИИМ не уступает, получаемых в JPL, а после 13 все более превышает их с увеличением глубины прогноза.

4. Заключение

Приведенные в работе сведения об основных составляющих в движении полюса и неравномерностях вращения Земли, получены на основе разработанного в СНИИМ метода прогноза временных рядов ПВЗ. Для построения прогностических моделей использовались длительные ряды ПВЗ, публикуемые на сайтах международной службы вращения Земли (IERS) <http://maia.usno.navy.mil>.

Представление Чандлерова периода на 50 летнем интервале данных в виде двух основных составляющих с периодами: 1,18; 1,21, а также менее мощных с периодами: 1,15; 1,23, 1,31 года позволило существенно улучшить точность прогнозов координат полюса на различные сроки. Выявленные периодические составляющие в изменениях всемирного времени, кратных основному Чандлеровскому периоду около 1,2 года, подтверждает гипотезу комбинационного резонанса, при котором даже воздействия малой мощности способны возбудить наблюдаемые изменения вектора угловой скорости вращения Земли [3].

За прошедшие 2 года проведения международного пилотного проекта EOPCPPP, в котором представлено более 10 различных методов прогнозирования ПВЗ метод, разработанный в СНИИМ, показывает наиболее устойчивые результаты независимо от выбранного параметра ПВЗ.

В настоящее время работа совершенствованием алгоритмов и программ прогнозирования ПВЗ продолжается. По предварительным оценкам потенциально возможно получение среднегодового значения СКП прогнозов всемирного времени на 10 и 15 дней на уровне 0,5 мс и 0,9 мс соответственно.

Литература

1. Белоцерковский Д.Ю., Кауфман М.Б. Оценка точности предвычислений разностей между всемирным и координированным временем с заблаговременностью до года // Исследования в области измерений времени и частоты, Труды ВНИИФТРИ, 1977, вып. 35(65).
2. Тиссен В.М., Толстиков А.С., Балахненко А.Ю., Малкин З.М. Высокоточное прогнозирование всемирного времени по 100-летним данным // Измерительная техника. – 2009, №12. С. 3-6.
3. Сидоренков Н.С. Влияние Южного колебания Эль-Ниньо на возбуждение чандлеровского движения полюса, АЖ, 1997, т. 74, в. 5, с. 792 –795.

IMPROVING ACCURACY OF THE DESCRIPTION OF UNEVEN ROTATION AND MOTION OF THE NORTH POLE AND THEIR PREDICTION BY THE USE OF LONG SERIES OBSERVATIONS AND OPTIMIZATION OF MATHEMATICAL MODELS

Tissen V.M.

FSUE "SNIIM", Novosibirsk, Russia

Unevenness of the earth's rotation and movement of its geographic poles are significant factors limiting the accuracy KVNO modern GNSS. Therefore, in a world of trouble establishing adequate physical and mathematical models accounting for these factors is receiving increasing attention. In this paper we present data on the main harmonic and trend components in the movement of the North Pole of the Earth's rotation and uneven calculated by developed SNIIM forecasting techniques EOP. Them to obtain highly accurate and consistent results in universal time and projections of the polar coordinates for various distances.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СМЕЩЕНИЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ В МЕРИДИАНЕ ПОЛТАВЫ ПО ДАННЫМ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Халявина Л.Я.

Полтавская гравиметрическая обсерватория НАНУ, Полтава, Украина

Рассмотрены долгосрочные перемещения отвесной линии в меридиане Полтавы за период 1962-2011 гг., воспроизведенные из анализа данных астрометрических наблюдений широты на призменной астролябии и зенит-телескопе. При этом использованы уточненные модели всех известных эффектов, влияющих на положение локального зенита: новейшие каталоги координат и собственных движений звезд; модель прецессии-нутаии IAU2000; модель движения полюса C01; модель тектоники плит NUVEL 1A. Декадные изменения отвесной линии показывают наличие трендовой части, состоящей из двух ветвей: в течение почти 30 лет (1962-1991) – отмечается дрейф зенита к югу на величину $0.04''$, а с конца 90-х – в северном направлении. Обнаружена значительная коррелированность этой кривой с декадными полярными вариациями на долготе Полтавы – $k = 0.93$. Предпринята попытка объяснения особенностей поведения отвесной линии на основе гипотезы Баркина Ю.В. о дрейфе ядра Земли относительно внешней оболочки.

1. Введение

Изменения гравитационного поля Земли со временем - важная геодинамическая характеристика. Одним из источников такой информации являются ряды астрометрических наблюдений, которые выполнялись в XX веке. Действительно, астрометрические инструменты имеют в качестве опорной оси направление локальной отвесной линии. Поэтому медленные перемещения зенита обсерватории, определенные из астрометрических измерений, можно интерпретировать как изменения **направления силы тяжести (НСТ)** в пункте наблюдений [1].

Использовать координатные ряды для изучения поведения отвесной линии впервые предложил В.А. Наумов в 80-е, когда остро стал вопрос о целесообразности астрометрических наблюдений, которые не могли конкурировать по точности с новыми технологиями определения ПОЗ.

В Полтавской гравиметрической обсерватории более 85-ти лет комплексно изучаются характеристики гравитационного поля геофизическими методами и накоплены продолжительные ряды астрометрических наблюдений. Поэтому изучение данных о долгосрочных изменениях **НСТ** включено в программу научных исследований ПГО.

Практическая реконструкция поведения **НСТ** стала возможной в 2000-х, благодаря успехам современной астрометрии и геодинамики в создании: 1) высокоточных каталогов (HIPPARCOS, ARHIP, Tycho-2); 2) высокоточных рядов параметров ориентации Земли (модели C01, C04); 3) усовершенствованных теорий вращения Земли (IAU2000); 4) моделей тектоники плит (NUVEL1A-NNR).

Цель работы – показать значимость данных об **НСТ** для геодинамики.

2. Особенности поведения НСТ на пункте Полтава

Воссоздание долгосрочных изменений **НСТ** в меридиане Полтавы за период 1962-2011 гг. выполнено на основе данных многолетних наблюдений широты на астролябии Данжона и зенит-телескопе ЗТЛ-180. Методика реконструкции **НСТ** изложена в [2]. Кривая **ZM** на рис.1 характеризует медленные изменения меридиональной компоненты **НСТ**, которые не содержат вариаций с периодами менее 6 лет.

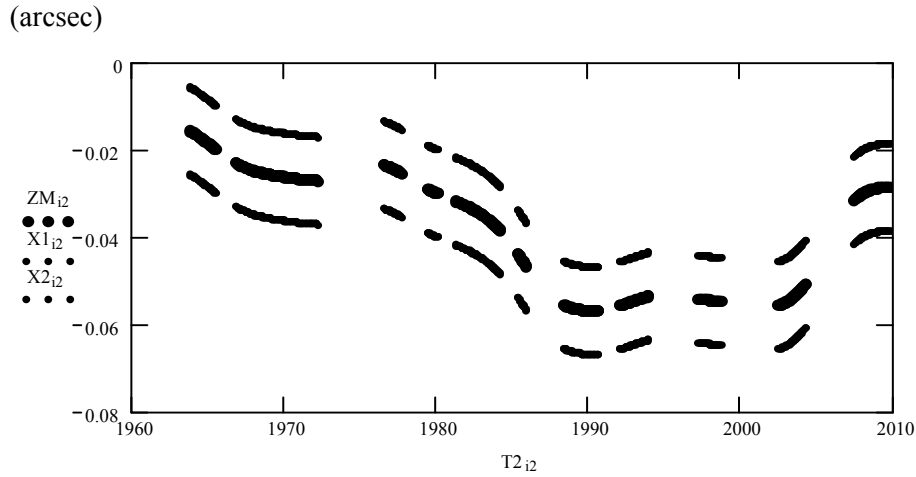


Рис. 1. Медленные изменения НСТ в меридиане по данным астрометрических определений в Полтаве.

Данное приближение вариаций НСТ уверенно демонстрирует трендовую часть ZL (рис. 2а), выделенную сильным сглаживанием ZM (ширина окна - 12 лет) и слабые остаточные вариации НСТ - $ZR=ZM-ZL$ (рис. 2б). Примечательно, что составляющая ZL подобна соответствующим полярным колебаниям FPL (рис.2а) на долготе Полтавы, вычисленным на основе модели C01, причем $corr(ZL, FPL)=0.93$.

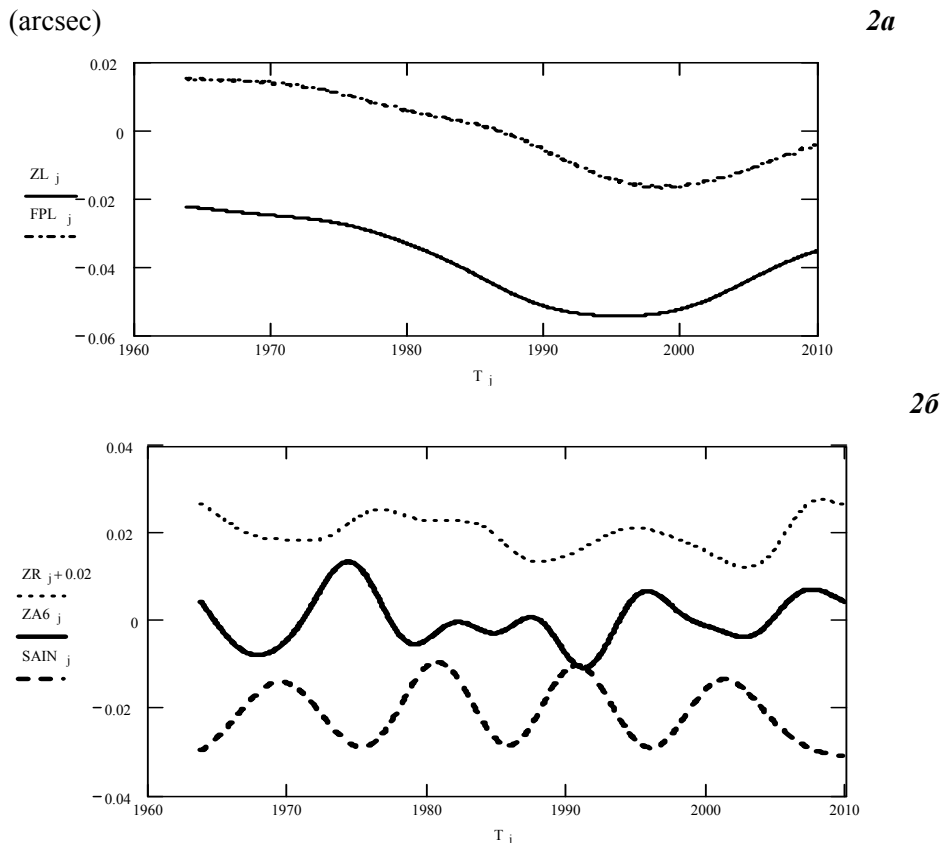


Рис.2. Смещения зенита в меридиане Полтавы: а) долгопериодические компоненты НСТ (ZL) и полярных колебаний широты Полтавы (FPL); б) остаточные вариации НСТ (ZR), аналогичные вариации из наблюдений на астролябии ($ZA6$), нормированные вариации 11-летней составляющей индекса солнечной активности ($SAIN$).

Кривая **ZL** состоит из двух ветвей многолетних дрейфов: в 1962-1991 гг. отвес смещался в южном направлении - общее смещение за это время составило $0.04''$; с 2000 по 2011 г. отмечается явный северный тренд.

Слабые вариации **ZR** возникают в результате того, что в неполярных колебаниях широты по наблюдениям с призменной астролябией (**ZA6**) имеется волна с периодом, близким главному циклу солнечной активности [3]. Рис. 2б показывает, что вариации зенита **ZA6** - в противофазе с вариациями 11-летнего периода **SAIN**, причем $corr(ZA6, SAIN) = -0.73$. Солнечная волна, однако, не обнаруживается в наблюдениях на зенит-телескопе. Это говорит о негравитационной природе волны **ZA6** и оставляет открытым вопрос о причинах ее возникновения в наблюдениях на астролябии.

Наиболее интересным для обсуждения является многолетний дрейф отвеса Полтавы в южном направлении в 1962-1991гг., т.к. в этот период существовала полноценная сеть астрометрических станций. Это позволяет прояснить, является ли обнаруженный дрейф **НСТ** в Полтаве следствием некоторого глобального процесса.

В работе [4] представлен глобальный анализ длительных рядов астрометрических наблюдений на 14-ти станциях северного полушария (табл.1) с целью изучения векового движения полюса. Наряду с долгопериодическими компонентами движения полюса рассмотрено и поведение обобщенного **Z**-члена, который представляет среднее смещение локальных зенитов для указанных станций. Анализ показал наличие согласованных неполярных смещений зенитов обсерваторий. Так в 1920-1955гг. зениты большинства станций интенсивно смещались к северу со скоростями $0.108''/cy \pm 0.540''/cy$. Хотя автор не исключал, что причина этого феномена может носить методический характер из-за некорректных наблюдений на станции Юкайя, но нельзя исключать и реальность смещений зенитов станций, обусловленных глобальным перераспределением масс.

Из этой же работы следует, что в период 1955-1990гг., включающий исследуемый нами интервал, отмечался более скромный по размаху южный дрейф зенитов северных обсерваторий ($\sim 0.05''$), который согласуется с нашими данными. Но для полной уверенности в глобальном характере явления следует изучить индивидуальные характеристики медленных смещений зенитов для всех астрометрических станций.

3. Оценки изменений НСТ на основе модели северного дрейфа ядра

Объяснение особенностей поведения **НСТ** на обозначенном интервале можно найти в рамках модели Баркина Ю.В. об изменении гравитационного поля, обусловленного северным дрейфом ядра Земли относительно мантии. Автор гипотезы системно применял ее для объяснения многих наблюдаемых явлений: вековых изменений гравитационного поля, неприливного ускорения вращения Земли, глобальной тектоники плит, вековых деформаций фигуры Земли, а также векового движения полюса [5].

На основе элементарной двухкомпонентной модели Земли (ядро – точечная масса m_2 и внешняя шарообразная оболочка массой m_1 : $m_{\oplus} = m_1 + m_2$ и радиусом – R), где происходит смещение ядра вдоль полярной оси OP (рис.3), оценим изменение направлений локальных отвесов.

Исходное направление отвеса в пункте S , широта которого - $\varphi = \angle ZOE$, – OZ . Перемещение ядра на расстояние $OC = dr$ сместит центр масс системы в точку O' на расстояние $OO' = dr_1 = \frac{m_2 \cdot dr}{m_1 + m_2}$. Тогда направление силы тяжести в точке S будет совпа-

дать с направлением $O'Z'$. Отклонение **НСТ** относительно исходного направления OZ

равно $\angle ZSZ' = \varepsilon$, который легко получить из геометрических соотношений:

$$\varepsilon = \varphi - \arctg\left(\operatorname{tg}\varphi - \frac{dr_1}{R \cdot \cos\varphi}\right).$$

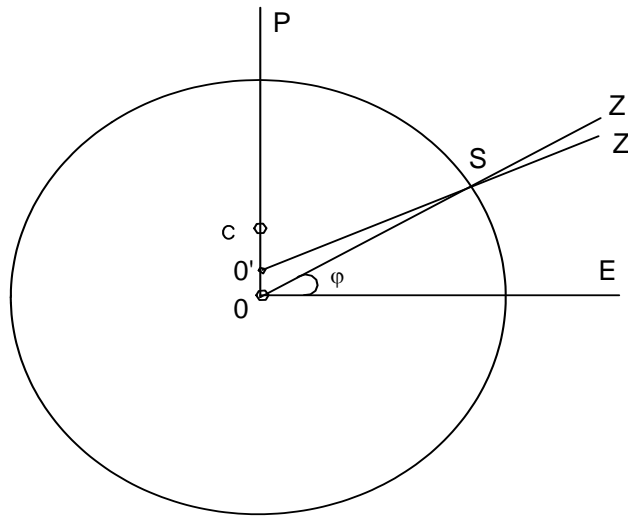


Рис. 3. Схема влияния смещений внутреннего ядра на положение отвесной линии в пункте S.

Используя это выражение, и варьируя параметры m_2 и dr , получим зависимость отклонений отвесных линий пунктов от широты. На рис.4 приведена зависимость $\varepsilon(\varphi)$ для следующих значений параметров: $m_2=0.02m_{\oplus}$; $dr=100\text{м}$. Смещения отвесных линий, обусловленные северным дрейфом ядра: 1) одинаковы для всех пунктов, расположенных на одной параллели; 2) приводят к уменьшению широт пунктов в северном полушарии; 3) зависят от широты станций, причем, чем ближе станция к экватору, тем больше отклонение НСТ.

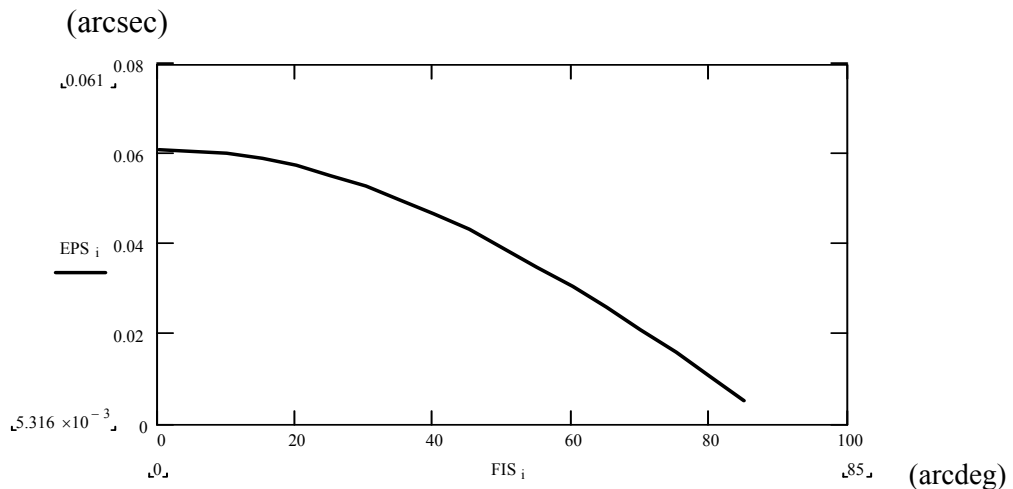


Рис. 4. Зависимость отклонений отвесных линий, обусловленных смещением ядра, от широты пункта наблюдений.

Согласно [5], перемещение ядра происходит вдоль оси, которая пересекает поверхность Земли в точке с координатами $\varphi_N=72.7^{\circ}N$ и $\lambda_N=115.4^{\circ}E$. Вышеизложенные результаты легко адаптировать, перейдя в систему с полюсом в указанной точке. В новой системе значения «широт» ϕ легко получить из сферического треугольника (рис.5),

вершинами которого являются точки P – полюс вращения Земли, P' – полюс дрейфа ядра, S – пункт на земной поверхности с геоцентрическими координатами (λ, φ) . Соотношение, связывающее сферические координаты узловых точек треугольника: $\sin \phi = \sin \varphi \cdot \sin \varphi_N + \cos \varphi \cdot \cos \varphi_N \cdot \cos(\lambda_N - \lambda)$.

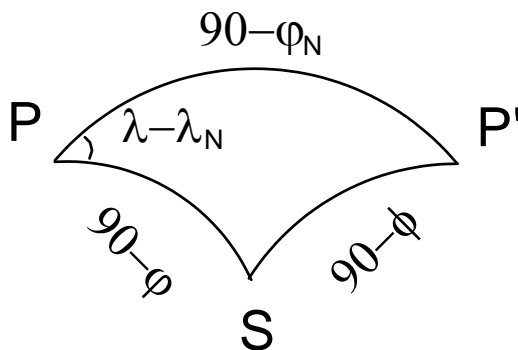


Рис. 5. Связь координат узловых точек: полюса вращения P , полюса дрейфа P' и пункта S .

Модель смещения ядра в направлении OP' , дает оценки уклонений отвесных линий ε для широтных станций, представленные в табл. 1, наряду, с координатами обсерваторий (λ, φ, ϕ) .

Таблица 1. Оценки уклонений НСТ для некоторых обсерваторий.

Пункт	$\lambda(W)$	φ	ϕ	ε	Пункт	$\lambda(W)$	φ	ϕ	ε
Вашингтон	77.1 ⁰	+38.9 ⁰	21.2 ⁰	0.057"	Новосибирск	277.1 ⁰	55.0 ⁰	68.3 ⁰	0.023"
Гейтесберг	77.2	39.1	21.4	0.057	Китаб	293.1	39.1	49.5	0.040
Ричмонд	80.4	25.8	8.4	0.060	Казань	311.2	55.8	58.9	0.032
Юкайя	123.2	39.1	21.3	0.057	Полтава	325.5	49.6	49.3	0.040
Мицузава	218.9	39.1	41.7	0.046	Пулково	329.8	59.8	56.7	0.033
Благовещенск	232.5	50.3	67.6	0.023	Белград	339.5	44.8	40.8	0.046
Иркутск	255.7	52.3	69.7	0.021	Карлофорте	351.7	39.1	32.3	0.052

Центр созвездия зенитов (= локальных отвесов) станций определяет положение полюса вращения. Изменения локальных отвесов из-за дрейфа ядра, обусловят видимое смещение среднего полюса, которое неотлично от динамического векового дрейфа полюса. Используя формулу Костинского и оценки ε , приведенные в табл.1, получим, что фиктивное смещение полюса составляет 0.016" в направлении 77.9⁰ W, которое практически совпадает с направлением дрейфа реального полюса.

Если гипотеза о глобальном перемещении масс верна, то оценки векового дрейфа полюса вращения, полученные из астрометрических наблюдений, должны быть пересмотрены.

4. Заключение

Полученный результат: 1) объясняет подобие долгопериодических полярных и неполярных вариаций широты Полтавы; 2) подтверждает вероятность северного дрейфа ядра в 1955-90 гг.; 3) демонстрирует полезность астрометрии при проверке геодинамических гипотез.

Однако мы отдаем себе отчет в том, что результаты носят предварительный характер. Модель весьма упрощена. Принятые параметры модели обеспечивают смещение отвеса $\varepsilon = 0.04''$ на широте Полтавы, но они же задают общее смещение центра масс Земли на $dr_1 = 2$ м. С учетом 30-летнего интервала наблюдаемого дрейфа, скорость смещения центра масс $dr_1/dt \approx 6.5$ см/год, что существенно превышает значения, полученные средствами космической геодезии [5]. Поэтому окончательные выводы можно сделать только после исследований широтных рядов, полученных на других станциях. Тем более, что в настоящее время ряды астрометрических данных существенно улучшены [6].

Литература

1. Гожий А.В., Тыщук Н.Ф. Изучение временных изменений направления силы тяжести по данным астрономических наблюдений // Тр. III междунар. Орлов. конф., 1992 г. Одесса - Киев, 1994. - С.197-199.
2. Khalyavina L.Ya., Borisyuk T.Ye. Problems of local plumb reconstruction from long-term astrometrical sets. // Odessa astr. publ. – 2007. – vol. 20, part 1. – P. 82 – 83.
3. Zalivadnyi N.M., Khalyavina L.Ya., Borisyuk T.Ye. Search of traces of geophysical phenomena in series of determinations of latitude changes with a Danjon astrolabe in Poltava. // Odessa astr. publ. – 2007. – vol. 20, part 1. – P. 233– 234.
4. Vondrak Jan. Secular polar motion – reality or artefact? // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. - Киев, 1999, №1. – С.131-36.
5. Barkin Yu. Mechanism of non-tidal acceleration and secular pole drift of the Earth and prediction of similar phenomena for Mars The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy. // The 6th Orlov conference proceedings. Kiev: Akademiya Nauk – 2010. – P. 104 – 106.
6. Vondrak J., Stefka V., Ron C. Improved optical reference frames for determining Earth orientation parameters in 20th century. // The 6th Orlov conference proceedings. Kiev: Akademiya Nauk – 2010. – P. 64 – 71.

INTERPRATATION OF LOCAL PLUMB DRIFT IN POLTAVA MERIDIAN DERIVED FROM ASTROMETRICAL OBSERVATIONS

Khalyavina L.Ya.

Poltava Gravimetric Observatory of NASU, Poltava, Ukraine

The long-term drifts of local plumb in Poltava meridian reconstructed from latitude astrometrical observation with prismatic astrolabe and zenith-telescope are considered. More accurate models of known effects influencing on local zenith were used: the new catalogues of position and proper motion of stars; the IAU2000 precession-nutation model; C01 polar motion model; the NUVEL 1a of plate tectonic model. The decadal variations of local plumb show the trend consisting of two parts: during 30 years (1962-1991) the zenith drifted to south on $0.04''$, from the end of 90-th the drift direction changed on the north. The significant correlation of this curve with decadal polar variations in Poltava ($k=0.93$) was found. The attempt to explain the plumb behavior on the base of Barkin Yu. hypothesis about the drift of the Earth core relatively outer shell was made.

Секция 3

ЭФЕМЕРИДНАЯ АСТРОНОМИЯ, КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ HCRF ОТНОСИТЕЛЬНО СИСТЕМ ЧИСЛЕННЫХ ЭФЕМЕРИД ПО НАБЛЮДЕНИЯМ АСТЕРОИДОВ

Бережной А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается возможность использования массовых наблюдений астероидов, полученных с конца 90-х годов прошлого века для определения параметров взаимного вращения системы HCRF относительно систем численных эфемерид. На основе анализа наблюдений нумерованных астероидов, имеющихся в базе Центра Малых Планет, делается предварительная выборка наблюдений, пригодных для рассматриваемой задачи. Определяется пригодность полученной выборки наблюдений для представления решения методом разложения по векторным сферическим гармоникам. Для предложенного метода интерполяции наблюдательных данных, необходимых для равномерного распределения, были выполнены модельные вычисления.

1. Введение

Одним из важнейших свойств фундаментальной опорной системы является инерциальность. При создании первых фундаментальных звёздных каталогов этого добивались, выполняя привязку к динамической опорной системе координат, представленной движением тел Солнечной системы. Для этого использовались длительные ряды позиционных наблюдений больших планет в оптическом, а затем и радио, диапазоне. С конца 40-х годов для установления параметров связи опорных систем стали проводиться наблюдения астероидов по программе Нумерова-Брауера [1-3], которая с рядом изменений просуществовала до 2000 года. За это время было накоплено большое количество фотографических наблюдений. Кроме того, за последние 15-20 лет, с развитием техники наблюдений при помощи ПЗС-камер, интенсивность и точность наблюдений астероидов значительно возросли, что может позволить значительно расширить наблюдательную базу для подобных исследований.

Взаимная ориентация численных эфемерид относительно системы HCRF одна из звеньев взаимосвязи существующих астрометрических опорных систем, формирующих общую пространственно-временную систему координат. Для формирования непротиворечивой картины необходимо, чтобы все компоненты имели максимально точные оценки взаимных связей. Каталог внегалактических радиоисточников ICRF, является на сегодняшний день лучшей реализацией международной небесной системы отсчета ICRS. Привязка к ней HCRF сопряжена в ряд сложностей, связанных с наличием лишь одного общего объекта (3C373). Взаимосвязь ICRF и динамической системой, представленной различными численными эфемеридами, выполнена на основе высокоточных радио наблюдений тел Солнечной системы. В ходе проекта Hipparcos было получено ~5000 наблюдения 48 астероидов, что позволило установить с высокой точностью мгновенную взаимную ориентацию динамической системы и HCRF. Однако для определения характера изменения этих величин требуются наблюдения на более длительном интервале времени.

По одной из последних оценок параметров ориентации HCRF относительно системы численных эфемерид серии DE, создаваемой в Лаборатории Реактивного Движения (JPL), и динамики их изменения, выполненной в ИПА РАН [4], показало взаимную ориентацию на уровне <10 мсд, со скоростью остаточного вращения <1 мсд/год на эпоху J2000. При этом было использовано порядка 50 тысяч наблюдений 116 астероидов.

Используемый в подобных работах метод наименьших квадратов (МНК), даёт наиболее точную несмещенную оценку параметров в рамках заданной модели, в кото-

рую, помимо твердотельного вращения, включают, например, оценку эффекта фазы. Однако систематические эффекты, входящие в разности (O-C) как со стороны измеренного положения объекта, так и со стороны вычисленного теоретического значения эфемериды, могут иметь более сложный характер взаимной ориентации. Кроме того, использованные наблюдения астероидов, как правило, сконцентрированы вблизи плоскости эклиптики. Такое распределение может вызывать дополнительную ошибку при нахождении МНК оценки.

С развитием к концу 90-х годов прошлого века техники ПЗС-наблюдений, сильно возросла интенсивность наблюдений, в том числе и астероидов. Накопленный к настоящему времени наблюдательный материал может позволить по новому взглянуть на решение проблемы определения параметров взаимной ориентации системы звёздного каталога и динамической системы.

Метод представления решения в виде разложения по векторным сферическим гармоникам (VSH), успешно применяющийся при анализе звёздных каталогов, лишен указанных недостатков, однако для его применения требуется плотное распределение наблюдательных данных в пределах выбранной на сфере зоны. Для этого требуется проанализировать доступные на данный момент наблюдения и выбрать пригодные для решения указанной задачи.

2. База наблюдений MPC

Результаты наблюдений астероидов, полученные на мировых обсерваториях, как правило, отправляются в Центр Малых Планет (Minor Planet Center), который занимается сбором наблюдательных данных и публикацией Циркуляров Малых Планет (Minor Planet Circulars), выпускаемых с 1947 г. База MPC с наблюдениями нумерованных астероидов содержит свыше 68 миллионов наблюдений 264 тысяч объектов с эпохой наблюдений позднее 1950 г., из которых 204 тысячи имеют более 100 наблюдений за указанный период. На рис. 1 представлена гистограмма распределения наблюдений по времени. Видно, что интенсивность наблюдений за указанный период возрастает от нескольких тысяч до нескольких миллионов в год.

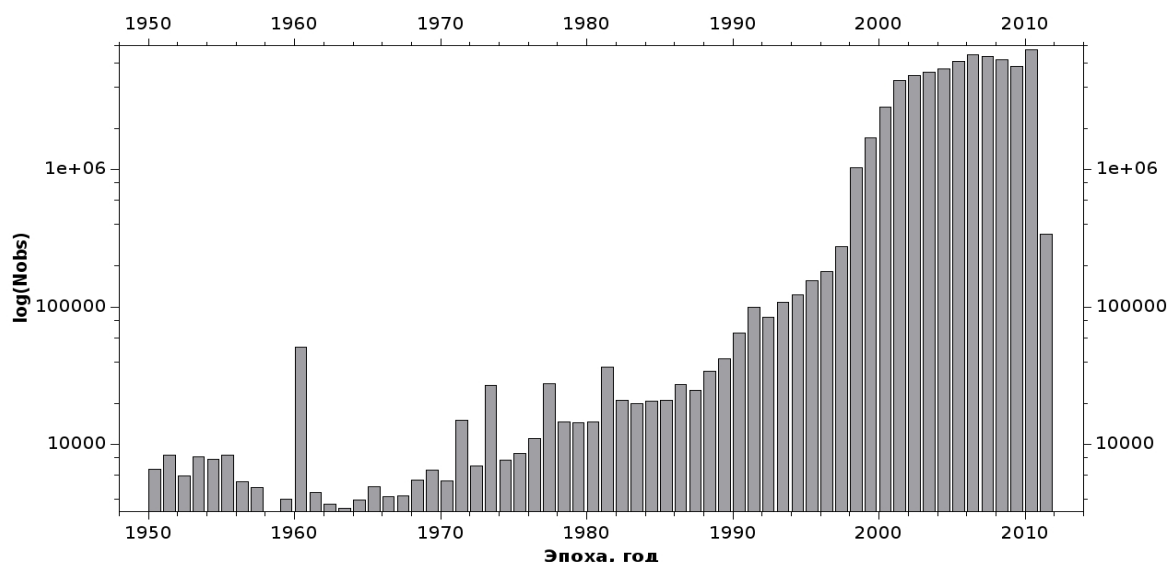


Рис. 1. Эпоха наблюдений нумерованных астероидов базы MPC.

Для рассматриваемой в данной работе задачи могут быть использованы только наиболее точные наблюдения астероидов, имеющих достаточную историю наблюдений, необходимую для уточнения параметров их орбитального движения. Поэтому следует

тщательно подходить к выбору наблюдательного материала, основываясь на исследовании величин (O-C) для рядов наблюдений, полученных на различных обсерваториях. Для того, чтобы сократить объём вычислений и оценить доступный на сегодняшний момент массив наблюдений, пригодный для рассматриваемой задачи, необходимо сделать предварительную выборку наблюдательных данных, основываясь на имеющейся информации.

Ряды наблюдений нумерованных астероидов, содержащиеся в базе MPC, могут сильно отличаться по точности в зависимости от инструмента, на которой они были получены. Если посмотреть на распределение наблюдений по обсерваториям (табл. 1), то можно отметить, что наиболее продуктивными по количеству наблюдений за указанный период являются обсерватории, выполнявшие различные обзорные программы, нацеленные на поиск астероидов, сближающихся с Землёй. Задействованные в таких проектах инструменты обладают, как правило, большим полем зрения, что негативно отражается на астрометрической точности полученных наблюдений. Кроме того, наибольшее число наблюдений приходится на объекты в диапазоне 18-20 зв. вел. Редукция столь слабых объектов может давать точность, необходимую для определения орбит таких объектов, которая, однако, может быть не достаточна для рассматриваемой задачи.

Таблица 1. Распределение наблюдений по обсерваториям.

Обсерватории	Код	Кол-во набл.
Lincoln Laboratory ETS, New Mexico	704	27850803
Catalina Sky Survey	703	7985692
Mt. Lemmon Survey	G96	6166214
Steward Observatory, Kitt Peak-Spacewatch	691	5577879
Lowell Observatory-LONEOS	699	5045619
Palomar Mountain/NEAT	644	3400684
Siding Spring Survey	E12	1422146
WISE	C51	1385976
Haleakala-AMOS	608	1227341
OAM Observatory, La Sagra	J75	1003839
...

Точность наблюдений в значительной степени зависит от точности опорного каталога, используемого при редукции. Как показано в статье Steven R. Chesley, James Baer и David G. Monet [5], среди наиболее распространенных опорных каталогов, использованных при обработке наблюдений, представленных в базе MPC, каталоги серии USNO (USNO A1.0, USNO A2.0 и USNO B1.0) демонстрируют значительные систематические отклонения относительно опорной системы сравнения, в качестве которого использовался каталог 2MASS. В то же время каталоги Tycho-2 и серии UCAC достаточно близки к эталонной системе. Особенно остро эта проблема проявляется в наблюдениях начала 2000-х, для которых в роли опорного каталога преобладает USNO A2.0. Авторы приведенной выше статьи предлагают метод исправления имеющихся наблюдений, что может помочь снизить влияние ошибок указанных каталогов на результаты, однако они могут быть успешно применены только для наблюдений, полученные вблизи эпохи J2000.

На основании изложенных выше предположений относительно точности наблюдений, была сделана выборка из наблюдений 2000-2010 года. В неё были включены наблюдения, выполненные в системе каталогов, для которых определены систематические поправки. Также из выбранных наблюдений были исключены наблюдения наиболее массовых обзоров неба, и наблюдения слабее 17.5 зв. вел. В результате была получена

выборка из ~670000 наблюдений. На рис. 2а представлено распределение данной выборки (в эклиптической системе координат) по небесной сфере в виде равномерного разбиения на заданное число площадок (с помощью пакета HEALpix). Каждая точка, представленная на рисунке, соответствует площадке, в которой после выборки оказалось больше 10 наблюдений.

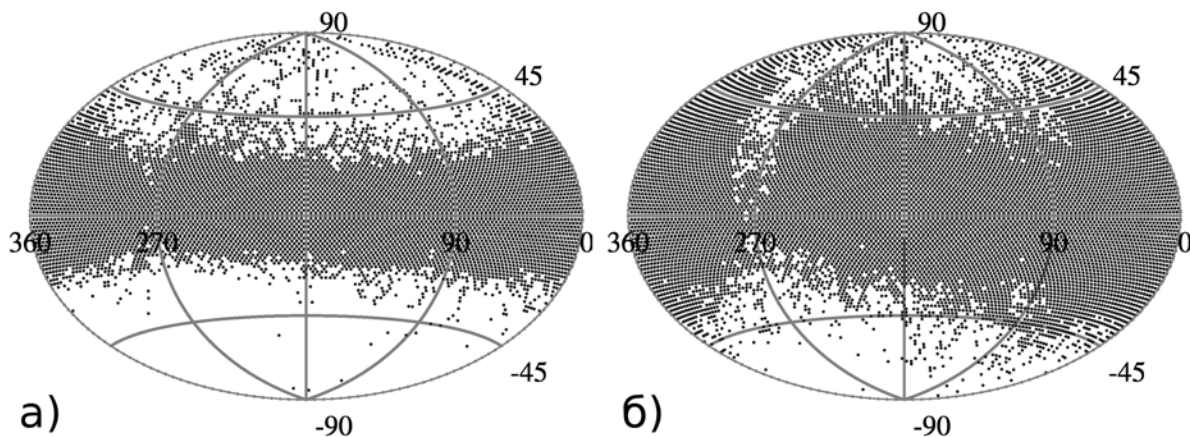


Рис. 2. Распределение выборки наблюдений: а) по всей сфере, б) после преобразования для зоны $-30 < \beta < +30$.

3. Модельная задача

Для того чтобы использовать метод разложения остаточных разностей вида (О-С) по векторным сферическим гармоникам (VSH) необходимо равномерное разбиение опорных точек по сфере, в которой все площадки заполнены достаточным для осреднения количеством наблюдений.

В работе Витязева В.В. и Цветкова А.С. [6] приводится модификация данного метода на случай зонального каталога, суть которой заключается в замене переменной, задающей ограничения зоны. В нашем случае требуется следующая замена эклиптической широты β :

$$\hat{\beta} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot \sin(\beta\beta)}{s_2 - s_1} - \frac{s_2 + s_1}{s_2 - s_1}\right), s_1 = \sin(\beta_{min}), s_2 = \sin(\beta_{max}). \quad (1)$$

В случае наблюдений астероидов данный подход наиболее близок к существующей картине распределения. Для указанной выборки наиболее рационально выбрать зону в пределах $-30^\circ < \beta < +30^\circ$. Результат преобразования (1) для данных из указанной зоны представлен на рис. 2б. Видно, что во многих площадках наблюдений не достаточно.

Для заполнения пустующих ячеек можно воспользоваться интерполированием. В рамках данной работы был выбран способ интерполяции, при котором значения в пустых ячейках находятся из соседних, для которых назначаются веса, обратно пропорциональные их расстоянию от искомой ячейки. Данный принцип был заложен в итерационный алгоритм, который последовательно перебирал пустые ячейки, заполняя в первую очередь те из них, которые имели по соседству наибольшее число заполненных ячеек.

В результате нескольких десятков итераций удалось заполнить всю сферу в приведенном выше примере. Для проверки качества интерполяции было поставлено несколько вариантов модельной задачи. Выбранным реальным наблюдениям были присвоены модельные значения величин (О-С), найденные путём твердотельного вращения, пред-

ставленного вектором ϵ . Полученный таким образом набор площадок интерполировался, а затем параметры вращения восстанавливались методом МНК.

В первом случае использовалась модель поворота без шума (Таблица 2). Интерполированный набор точек в данном случае достаточно хорошо восстанавливает исходные значения. При введении в модель вращения шумовой компоненты (Вариант 2) с дисперсией в 100 мсд, точность восстановления заметно ухудшается. Причем интерполяционный набор точек даёт наиболее заметную ошибку в первой компоненте вектора вращения. И наконец, для третьего варианта, чтобы получить распределение ошибок близким к реальности, была добавлена шумовая компонента с дисперсией вида:

$$\sigma_m = K \cdot magn + B \quad (2)$$

моделирующая линейное уравнение блеска, являющегося наиболее распространенной систематической зависимостью в результатах астрометрических наблюдений. В данном случае точности определения параметров вектора вращения для исходного ряда близки к значениям, полученным по интерполированному набору площадок.

Таблица 2. Модельная задача.

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
Исходные значения ϵ , мсд	10	10	10
Наборы площадок	Вариант 1		
Исходный	10	10	10
Интерполированный	9.09 ± 0.04	9.86 ± 0.04	10.03 ± 0.005
	Вариант 2		
Исходный	9.29 ± 1.52	10.5 ± 1.47	7.92 ± 1.1
Интерполированный	4.8 ± 1.14	10.66 ± 1.14	9.44 ± 0.83
	Вариант 3		
Исходный	6.86 ± 1.56	8.47 ± 1.51	10.4 ± 1.13
Интерполированный	8.04 ± 1.19	8.19 ± 1.19	11.1 ± 0.88

4. Выводы

База Центра Малых Планет содержит огромное количество наблюдений нумерованных астероидов, полученных за последние 10-15 лет с помощью развившейся за это время техники ПЗС-наблюдений. Анализ точности рядов имеющихся наблюдений, может позволить использовать намного большую чем ранее наблюдательную базу для решения задачи по определению параметров взаимной ориентации опорных систем, а также по новому взглянуть на методы её решения.

Предложенные в данной работе критерии позволяют сделать предварительную выборку наблюдений. Плотность распределения по сфере полученной выборки даёт возможность применить метод представления решения в виде векторных сферических гармоник в пределах выбранной зоны вблизи эклиптики при условии использования интерполяции для площадок с недостаточным числом наблюдений.

Литература

1. Нумеров Б.В. К вопросу об определении систематических ошибок склонений фундаментальных звезд. Бюллетень Астрономического Института. 1933. № 32. С. 139-147.

2. *Brouwer D.* On the determination of systematic correction to star position from observations of minor planets. *A.J.* 1935. V. 44, P. 57.
3. *Chernetenko Yu.A.* Reduction of photographic observations of asteroids to the reference frame of a single catalog. *Solar System Research*, Volume 42, Issue 2, pp.144-153, 2008.
4. *Chernetenko, Yu.A.* Orientation of the hipparcos frame with respect to the reference frames of the DE403/LE403 and DE405/LE405 ephemerides based on asteroid observations. *Astronomy Letters*, Volume 34, Issue 4, pp.266-270, 2008.
5. *Steven R. Chesley, James Baer b, David G. Monet.* Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. *Icarus*, №210, pp. 158–181 , 2010.
6. *V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov.* Application of Vector Spherical Harmonics for Kinematic Analysis of Stars from Zonal Catalogues. *Astronomy Letters*, Vol. 37, No. 12, pp. 874–887, 2011.

REFINEMENT OF THE PARAMETERS OF ROTATION HCRF WITH RESPECT TO THE SYSTEMS OF NUMERICAL EPHEMERIDES FROM OBSERVATIONS OF ASTEROIDS

Berezhnoy A.A.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

This paper describes the possibility of using mass observations of asteroids, obtained from the late 90's of the last century, to define the parameters of mutual rotation of HCRF with respect to systems of numerical ephemerides. Preliminary selection of observations suitable for the problem based on the analysis of observations of numbered asteroids, available in the database Minor Planet Center, is being performed. The possibility of using the method of expansion in Vector Spherical Harmonics for the resulting sample of observations was obtained. For the proposed method of interpolation of the observational data required for even distribution the model calculations were performed.

HALLEY – ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭФЕМЕРИДЫ

Бондаренко Ю.С.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Автором разработан и реализован программно-вычислительный комплекс (ПВК) HALLEY названный в честь составителя первого каталога кометных орбит Галлея. ПВК HALLEY представляет собой компьютерное приложение, позволяющее работать с регулярно обновляемой базой данных (БД) малых тел Солнечной системы, содержащей, орбитальные и физические параметры астероидов и комет. Подготовка новых записей БД, производится при помощи специально разработанного автором программного обеспечения. База данных ПВК HALLEY обновляется автоматически, а файлы с регулярными обновлениями хранятся на сервере ИПА РАН. В число задач, выполняемых ПВК, помимо управления БД (поиск, выборка и сортировка элементов БД, добавление новых и редактирование уже существующих записей и др.) включено исследование эволюции орбит малых тел Солнечной системы, построение пространственного изображения орбит и визуализация орбитального движения астероидов и комет, вычисление эфемерид в различных системах координат, определение обстоятельств сближения малых тел с большими планетами на заданном интервале времени, а также ряд других вспомогательных действий. ПВК HALLEY имеет интерфейс на русском и английском языках и предназначен для использования на персональном компьютере под управлением операционных систем Microsoft Windows XP, Vista или 7.

1. Введение

Число малых тел Солнечной системы неуклонно растет, что делает неактуальным ежегодное издание бумажных версий каталогов и эфемерид малых планет. Одним из решений этой проблемы стал ежемесячный выпуск Центром малых планет циркуляров, содержащих астрометрические наблюдения, орбиты и эфемериды астероидов и комет. В настоящее время циркуляры малых планет публикуются в интернете в текстовом виде. С развитием компьютерных технологий и интернета наиболее популярным направлением в предоставлении информации о небесных объектах стали интернет-сервисы. Так, например, на сайте динамики солнечной системы Лаборатории реактивного движения NASA можно получить информацию обо всех известных на сегодняшний день малых телах Солнечной системы, включающую орбитальные элементы, физические характеристики, обстоятельства открытий, визуализацию орбит и высокоточные эфемериды. В отличие от циркуляров малых планет, выходящих ежемесячно, новые обнаруженные объекты и элементы их орбит добавляются практически ежедневно. Аналогичный сервис предоставляется и Центром малых планет. Также необходимо отметить пакеты программ, такие как ЭПОС [1] созданный в ГАО РАН и AMPLE [2] созданный в ИПА РАН. Эти пакеты устанавливаются на персональный компьютер и решают ряд проблем, связанных с исследованием астероидов и комет, такие как вычисление эфемерид, в различных координатных системах, сравнение наблюдаемых топоцентрических положений комет с вычисленными положениями, построение и визуализация видимой траектории движения кометы на заданном интервале времени, построение пространственного изображения орбиты и визуализация ее орбитального движения, вычисление минимального расстояния между орбитой некоторого заданного тела (большой планеты или кометы) и др.

Постоянно увеличивающееся число наблюдений малых тел Солнечной системы ставит задачу оперативного и высокоточного определения и улучшения их орбит для выявления новых и уточнения движения уже известных объектов. Это обстоятельство вызывает необходимость своевременного предоставления элементов орбит и позици-

онных наблюдений исследователям и наблюдателям, желательно в наиболее удобном для использования виде. К удобству использования в данном случае можно отнести как вычислительные средства, позволяющие производить высокоточные исследования, так и возможность оперативного получения данных, поиска и отождествления. Таким образом, возникает задача организации управления и работы с орбитальными и наблюдательными данными, решением которой является, программно-вычислительный комплекс HALLEY.

Некоторыми реализованными преимуществами ПВК HALLEY по сравнению с существующими на сегодняшний день аналогами являются:

- Работа с ПВК не зависит от соединения с интернетом.
- Оперативное обновление БД малых тел Солнечной системы.
- Быстрый поиск (выборка и сортировка) по любому элементу малых тел Солнечной системы.
- Полное управление БД с возможностью добавления в БД собственных объектов, а также редактирование существующих записей.
- Возможность импорта/экспорта записей базы данных в/из общепринятые международные форматы.
- Высокая скорость интегрирования уравнений движения (не зависит от соединения с интернетом и загруженностью сервера, а только от вычислительной мощности компьютера, на котором установлен ПВК) и высокая точность вычисления элементов орбит малых тел Солнечной системы (благодаря применяемой методике и алгоритмам), с возможностью учета негравитационных параметров.
- Возможность производить вычисления с собственными и уже существующими данными, такие как определение моментов прохождения перигелиев и тесных сближений астероидов и комет с планетами.

2. Реализация

Основное ядро программно-вычислительного комплекса HALLEY, реализовано на языке FORTRAN, что позволяет с повышенной точностью производить интегрирование уравнений движения малых тел Солнечной системы. В уравнениях движения учитываются гравитационные возмущения от всех больших планет и Плутона. Координаты возмущающих планет вычисляются по численным эфемеридам JPL Planetary and Lunar Ephemerides, созданным в Лаборатории реактивного движения JPL NASA [3]. В текущей версии ПВК вычисления можно производить на основе численных теорий DE406 или DE423. Модель движения также включает релятивистские возмущения от Солнца. Учет возмущений от Земли и Луны выполняется отдельно. Негравитационные ускорения учитываются по модели Марсдена [4] с возможностью учета величины смещения максимума газопродуктивности относительно перигелия [5]. Численное интегрирование уравнений движения выполняется методом Эверхарта 11-го порядка с автоматическим выбором шага интегрирования [6]. Увеличение точности интегрирования достигается путем применения модифицированного метода Энке численного интегрирования уравнений движения. Модификация метода Энке состоит в том, что смещения оскуляции происходит на каждом шаге интегрирования. При этом параметры невозмущенного движения вычисляются с учетверенной точностью (32 десятичных знака). Управление базой данных осуществляется, с использованием библиотеки SQLite, реализованной на языке программирования C++.

В 2011 г. был создан и постоянно обновляется интернет сайт загрузки и поддержки HALLEY – <http://www.ipa.nw.ru/halley>, а также подготовлена и опубликована подробная документация и руководство пользователя на русском и английском языках.

3. Краткое описание

Созданный для применения в среде Microsoft Windows, ПВК HALLEY встроен в графическую оболочку, упрощающую взаимодействие пользователя с приложением (рис. 1). HALLEY реализован в виде многооконного диалогового Windows приложения, специально разработанного для наиболее удобной и эффективной работы.

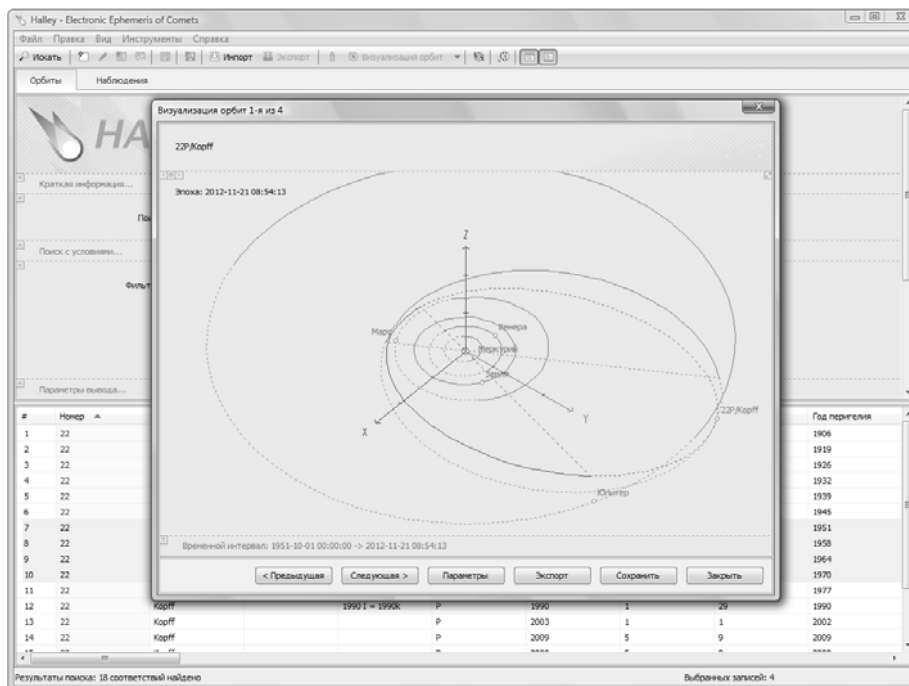


Рис. 1. Задача визуализации орбит в ПВК HALLEY.

Работа с приложением начинается с выбора записей из базы данных. После успешного поиска, в области вывода формируется таблица с найденными результатами.

База данных является основой ПВК, поэтому управление базой данных занимает отдельное место при работе с приложением. ПВК HALLEY позволяет производить следующие действия с записями базы данных:

- Сохранение выбранных строк в текстовый файл в виде таблицы;
- Импорт строк из файла в базу данных;
- Экспорт выбранных строк в файл;
- Добавление новых записей в базу данных;
- Редактирование существующих записей;
- Создание копий уже существующих записей с возможностью их редактирования и добавления в качестве новых;
- Удаление существующих записей;
- Обновление или восстановление записей базы данных через интернет соединение.

Текущая версия HALLEY при работе с базой данных позволяет решать следующие основные задачи:

- Визуализация трехмерной проекции орбит малых тел и планет.
- Вычисление орбитальных элементов, вектора состояния или наблюдательных величин малых тел.
- Вычисление моментов тесных сближений малых тел с планетами и моментов прохождения перигелия на заданном интервале времени.

4. Перспективы

В ближайшее время автором планируется существенно расширить возможности ПБК HALLEY. Предполагается включить в БД информацию о позиционных наблюдениях и звездных величинах астероидов и комет, добавить такие возможности как вычисление элементов предварительной орбиты, улучшение орбитальных элементов и определение негравитационных параметров методом, разработанным в ИПА РАН [7], сравнение наблюдаемых положений исследуемого объекта с вычисленными положениями, идентификация малых тел Солнечной системы и возможность исследования кривых блеска.

Предварительная орбита будет определяться методами Гаусса и Лапласа. Улучшение орбит комет и астероидов будет осуществляться дифференциальным методом. Идентификацию малых тел Солнечной системы по элементам орбиты планируется осуществлять по нескольким критериям, аналогичным критериям, используемым для определения принадлежности метеоров к метеорному потоку. Кривые блеска будут аппроксимироваться многочленами, коэффициенты которых будут определяться методом наименьших квадратов. Управление базой данных наблюдений планируется осуществлять, как и для элементов, с использованием библиотеки SQLite, реализованной на языке программирования C++.

Статья написана при поддержке РФФИ. Грант № 12-02-31059

Литература

1. *Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Использование программного пакета эпос для исследования объектов солнечной системы. *Астрон. вестник*, 2012, т. 46, No. 2, 190-192.
2. *Железнов Н.Б., Новиков Ф.А., Шор В.А. и др.* AMPLE 3 - многоцелевой программный пакет для исследования малых планет и комет. *Труды ИПА РАН*, 2012, т. 21, 230-235.
3. *Standish, E.* JPL Planetary and lunar ephemeris DE405/LE405, JPL Interoffice Memorandum 312. F-98-04, 1998.
4. *Marsden, B., Sekanina Z., Yeomans D.* Comets and nongravita-tional forces, *Astron. J.*, Vol. 78, pp. 211–225, 1973.
5. *Sekanina, Z.* Outgassing asymmetry of periodic Comet Encke. I – Apparitions 1924–1984, *Astron. J.*, Vol. 95, pp. 911–924, 1988.
6. *Everhart, E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits, *Celest. Mech.*, Vol. 10, – 35 p. 1974.
7. *Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д.* Долгосрочные численные теории движения комет. *Астрон. Вестник*, 2010, т. 44, No. 2, 158–166.

HALLEY – ELECTRONIC EPHEMERIS

Yuri S. Bondarenko

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

The author developed and realized software named HALLEY after Edmond Halley – the originator of the first catalog of cometary orbits. HALLEY is software that allows you to work with regularly updated data base of small bodies of the Solar System. The database contains orbital and physical parameters of asteroids and comets. Preparation of new database records is made using specially developed software. The HALLEY database is updated automatically and files with regular updates are stored on the IAA RAS server. The tasks performed by the HALLEY, in addition to database management (search, selecting and sorting the elements of the database, adding new and editing existing records etc.) include calculation of the orbital evolution of small bodies of the Solar System, visualization of the orbital motion, the ephemeris calculation in various coordinate systems, detection of close approaches with the major planets in a given time interval as well as a number of other tasks. The HALLEY is intended for use with a personal computer with Microsoft Windows ® XP, Vista or 7 and has an interface in Russian and English.

УТОЧНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ПЛУТОНА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ 2005-2011 ГГ.

Бондаренко Ю.С.¹, Медведев Ю.Д.¹, Ясько П.П.²

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

Для решения задач эфемеридной астрономии предлагается использовать метод дифференциальных возмущений, в котором орбита представляется в виде суммы двух слагаемых: промежуточной орбиты и отклонений от нее. В этом методе в качестве промежуточной орбиты используется орбита, которая дается уже существующей численной теорией, и возмущения рассчитываются относительно этой орбиты. Используя предлагаемый метод, сделаны оценки возмущений в движении Нептуна, вызываемых совокупностью не учитываемых тел пояса Койпера. Рассмотрена задача корректировки существующей эфемериды на основе ее сравнения с новыми наблюдениями. В качестве примера произведено уточнение эфемериды Плутона на основе сравнения его положений по эфемериде DE405 с 748 позиционными наблюдениями положений барицентра системы Плутон-Харон на интервале с 27 марта 2005г. по 14 октября 2011 г., не использованными при построении DE405.

1. Введение

Повышение количества и качества наблюдений небесных тел требует постоянного совершенствования динамических моделей их движения, уточнения входящих в них параметров. Так для построения численных теорий больших планет и Луны требуется уточнение около 300 различных параметров, учет большого количества факторов, таких как сжатие Солнца или учет гравитационного влияния большого числа астероидов [1]. Поскольку в большинстве случаев высокоточные теории движения являются численными, то основное время при построении этих теорий тратится на интегрирование достаточно громоздких дифференциальных уравнений. Для уточнения численных теорий приходится решать ряд вспомогательных задач, таких как: необходимость учета «тонких» эффектов, оценка параметров новых возмущений, включаемых в теорию. Кроме того, появление новых наблюдений требует уточнения параметров численных теорий. В данной работе предлагается ряд усовершенствований, позволяющих облегчить решение этих вопросов. Для интегрирования уравнений движения тел предлагается использовать метод возмущений, в котором орбита представляется в виде суммы двух слагаемых: промежуточной орбиты и отклонений от нее. В литературе, посвященной движению тел Солнечной системы, этот метод называется методом Энке. Однако в отличие от классического подхода, при котором в этом методе в качестве промежуточной орбиты используется невозмущенная кеплеровская орбита, в данном методе предлагается в качестве промежуточной использовать орбиту, полученную из численной теории. Естественно, этот подход может быть реализован только в случае, когда численная теория задана таблично, либо в виде многочленов Чебышева, как это сделано в эфемеридах больших планет серии DE [2] или в эфемеридах EPM [1]. Применение предлагаемой методики эффективно, когда для получения положений тела на опорной орбите не требуется интегрировать уравнения движения.

2. Описание методики

Пусть у нас имеется численная эфемерида некоторого небесного тела. Для простоты будем считать, что это таблица моментов времени t_i и соответствующих им векторов положений $\vec{r}(t_i)$ и скоростей $\vec{v}(t_i)$. Пусть имеется динамическая модель, которая позволяет воспроизводить орбиту этого тела интегрированием уравнений движения вида:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}} &= \sum \overline{F}_0(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) + \sum \overline{F}_1(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) \\ \vec{r}(t_0) &= \vec{r}_0; \quad \dot{\vec{r}}(t_0) = \dot{\vec{r}}_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Заметим, что правые части системы (1), помимо вектора состояния тела, зависят от целого ряда констант и координат других возмущающих тел, которые для упрощения изложения мы здесь опускаем. В системе дифференциальных уравнений (1) выделим две группы возмущений: $\sum \overline{F}_0(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}})$ – основные возмущения, с учетом которых вычислена существующая эфемерида, и $\sum \overline{F}_1(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}})$ – небольшие по абсолютной величине, малые возмущения. Рассмотрим влияние некоторого малого возмущения на движение рассматриваемого тела. В этом случае положения и скорости будут отличаться от эфемеридных положений и скоростей. Обозначим их через \vec{r}_1 и $\dot{\vec{r}}_1$, соответственно. Тогда уравнения движения с дополнительным ускорением \vec{a} представляется в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}_1 &= \sum \overline{F}_0(t, \vec{r}_1, \dot{\vec{r}}_1) + \sum \overline{F}_1(t, \vec{r}_1, \dot{\vec{r}}_1) + \vec{a}, \\ \vec{r}_1(t_0) &= \vec{r}_0; \quad \dot{\vec{r}}_1(t_0) = \dot{\vec{r}}_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\vec{a}(t, \vec{r}_1, \dot{\vec{r}}_1)$ – дополнительное ускорение, которое также как и вторая группа возмущений, предполагается малым. Далее возможно два пути: первый – интегрировать систему дифференциальных уравнений (2) и сравнивать получаемые значения с эфемеридой и второй – составить систему дифференциальных уравнений для отклонений от эфемеридных положений, вызываемых дополнительным возмущением \vec{a} . Уравнения для отклонений будут значительно проще системы (2), если воспользоваться свойством, что возмущения разделены на две группы, и предположением, что дифференциальными возмущениями во второй группе можно пренебречь. Выведем эти уравнения. Пусть $\overrightarrow{\Delta r} = \vec{r}_1 - \vec{r}$; $\overrightarrow{\Delta \dot{r}} = \dot{\vec{r}}_1 - \dot{\vec{r}}$, тогда дифференциальные уравнения для отклонений будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\Delta \ddot{r}} &= \sum \left[\overline{F}_0(t, \vec{r} + \overrightarrow{\Delta r}, \dot{\vec{r}} + \overrightarrow{\Delta \dot{r}}) - \overline{F}_0(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) \right] + \vec{a}(t, \vec{r} + \overrightarrow{\Delta r}, \dot{\vec{r}} + \overrightarrow{\Delta \dot{r}}), \\ \overrightarrow{\Delta r} &= \vec{0}; \quad \overrightarrow{\Delta \dot{r}} = \vec{0}. \end{aligned} \quad (3)$$

В правой части векторного дифференциального уравнения (3) отсутствуют вторая, как правило, многочисленная группа небольших возмущений. Поэтому система (3) значительно проще (меньше слагаемых), чем система (1).

Векторные уравнения (3) могут быть использованы также и при улучшении параметров опорной орбиты по новым наблюдениям. В этом случае уравнение движения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\Delta \ddot{r}} &= \sum \left[\overline{F}_0(t, \vec{r} + \overrightarrow{\Delta r}, \dot{\vec{r}} + \overrightarrow{\Delta \dot{r}}) - \overline{F}_0(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) \right] \\ \overrightarrow{\Delta r} &= \vec{a}; \quad \overrightarrow{\Delta \dot{r}} = \vec{b}, \end{aligned} \quad (4)$$

где векторы \vec{a} и \vec{b} – это поправки к начальным векторам положения и скорости, которые могут быть найдены методом наименьших квадратов из улучшения опорной орбиты по новым наблюдениям. В следующих разделах мы применим описанную методику к конкретным задачам.

3. Возмущения от астероидов в поясе Койпера на движение Нептуна

Первым рассмотренным примером использования предлагаемой методики была оценка возмущений от астероидов в поясе Койпера на движение Нептуна. Эфемеридные положения Нептуна брались из эфемериды DE405 возмущения от астероидов в поясе Койпера аппроксимировались кольцом, находящимся в экваториальной плоскости на расстоянии 43 а.е. и имеющим массу $528 \cdot 10^{-10} M_{\text{Sun}}$. Масса и радиус кольца были нами взяты из работы [1]. Результаты численного эксперимента на 120-летнем интервале приведены на рис. 1. Здесь по оси ординат приведены отклонения положений

Нептуна, выраженные в км, от эфемеридных, полученных по DE403, в которой возмущения от астероидов пояса Койпера не учитываются.

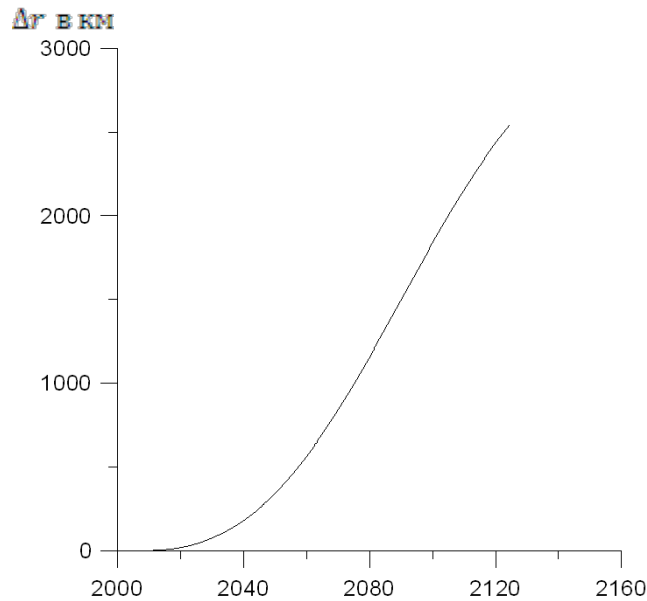


Рис. 1. Возмущения от объектов пояса Койпера в движении Нептуна на 120-летнем интервале.

Численные эксперименты показывают достаточно значимые отклонения в положении Нептуна, что указывает на необходимость учета возмущений от объектов пояса Койпера при построении высокоточных численных теорий.

4. Уточнение положений Плутона

Рассмотрена задача уточнения имеющейся эфемериды небесного тела с использованием его новых наблюдений, т.е. наблюдений, не учтенных при построении рассматриваемой эфемериды. Принцип уточнения эфемериды небесного тела заключается в следующем: предполагается, что имеется некоторая эфемерида (эфемерида барицентра системы Плутон-Харон согласно DE405), имеется ряд новых наблюдений, который воспроизводит истинную траекторию с точностью до ошибок наблюдений. Считаем, что ошибки наблюдений меньше ошибок эфемериды этого небесного тела. По новым наблюдениям методом наименьших квадратов определяем поправки к вектору состояния тела $\vec{\Delta r}; \dot{\vec{\Delta r}}$. После чего, интегрированием дифференциальных уравнений, описывающих отклонение положения небесного тела от эфемеридного с начальными данными $\vec{\Delta r}; \dot{\vec{\Delta r}}$, находят поправки к эфемериде на любой заданный момент времени. Система дифференциальных уравнений, описывающая отклонения в положениях для системы Плутон-Харон, была взята в следующем виде:

$$\Delta \ddot{r} = -k^2 \left(\frac{r^2 + \Delta r^2}{r_1^3} - \frac{r^2}{r^3} \right) + \sum_{j=5}^8 k^2 m_j \left(\frac{r_j^2 - (r^2 + \Delta r^2)}{\Delta_{j1}^3} - \frac{r_j^2 - r^2}{\Delta_j^3} \right),$$

где k – постоянная Гаусса, r_1, r – гелиоцентрические радиусы векторы барицентра системы и Δ_{j1}, Δ_j – расстояния от возмущающей планеты до барицентра с учетом и без учета поправок Δr , соответственно, m_j ($j = \overline{5,8}$) – массы возмущающих планет (учитывались дифференциальные возмущения только от четырех планет – гигантов). Использовались 748 позиционных наблюдений положения барицентра системы Плутон-Харон на интервале с 27 марта 2005 г. по 14 октября 2011 г., которые были получены уже после создания эфемериды DE405. Для получения коэффициентов условных уравнений были составлены дифференциальные уравнения в вариациях. По условным

уравнениям методом наименьших квадратов были получены поправки к координатам и скоростям на эпоху 25 марта 2008 г.:

$$\begin{aligned} (\vec{r})_x &= 1785.5 \pm 217.7 \text{ км} & (\dot{\vec{r}})_x &= -3.7 \pm 1.1 \text{ см/с} \\ (\vec{r})_y &= -5502.5 \pm 6812.7 & (\dot{\vec{r}})_y &= -18.1 \pm 5.0 \\ (\vec{r})_z &= 95.2 \pm 2109.9 & (\dot{\vec{r}})_z &= 2.9 \pm 1.4 \end{aligned}$$

Положения эфемериды DE405, скорректированные с использованием новых наблюдений, назовем DE405+. Для оценки эффективности и точности разработанной методики произведено сравнение двух эфемерид — DE405 и более современной DE423. Сравнивались положения барицентра системы Плутон-Харон, вычисленные по эфемеридам DE423, и положения, полученные по эфемеридам DE405 и DE405+. Результаты сравнения приведены на рис. 2.

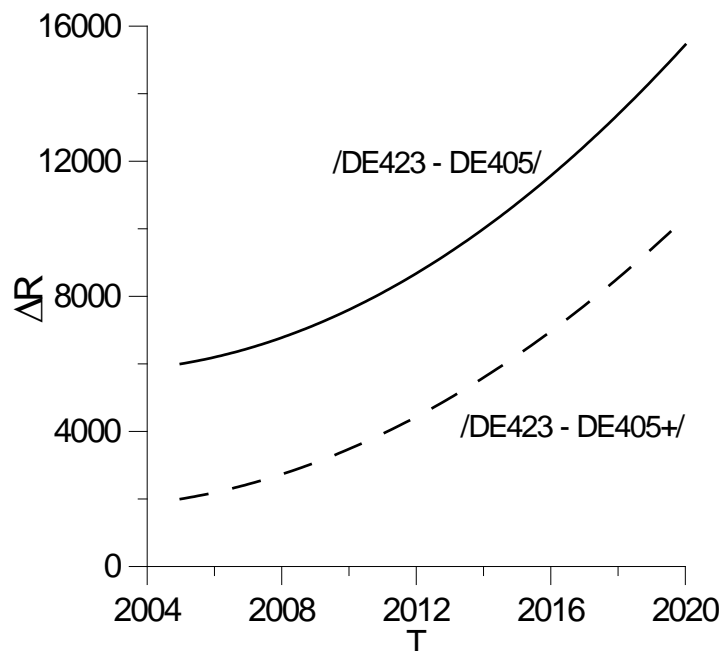


Рис. 2. Сравнение эфемеридных положений Плутона в DE405 и DE423 на интервале 15 лет.

Здесь по оси абсцисс отложены годы, по оси ординат - расстояние между положениями барицентра в км. Непрерывной линией показано расстояния между положениями Плутона, полученными по эфемеридам DE405 и DE423, но без внесения поправок, а пунктирной линией - расстояния между положениями Плутона по DE423 и по DE405+, исправленными в соответствии с предложенной методикой. Как показывают вычисления, поправки позволяют существенно повысить точность положения Плутона по DE405 на пятнадцатилетнем интервале. На рисунке видно, что на момент первого наблюдения в 2005 г. расхождения в координатах барицентра системы, составили порядка шести тысяч километров, а через 15 лет расхождения составляли шестнадцать тысяч километров. После применения корректировки расхождение между положениями, которые вычисляются по каждой из эфемерид, сократилось и составило порядка двух тысяч километров. Также видно, что на интервале примерно в 15 лет скорректированная теория успешно сохраняет «выигранные» четыре тысячи километров. Таким образом, на небольших интервалах времени корректировка, справляется со своей задачей. Она позволяет оперативно вносить изменения в существующие высокоточные теории для дальнейшего их изучения, развития или использования в численных экспериментах. Одна-

ко, как показывают вычисления, на более длительных интервалах времени все преимущества данного метода теряются.

4. Уточнение положений Луны

Кроме положений Плутона, уточнялись положения Луны из эфемериды DE403 [2]. Интегрировались разностные векторные дифференциальные уравнения. В правых частях этих уравнений учитывались только дифференциальные возмущения от Солнца и Земли как от материальных точек. В качестве наблюдений использовались 30 значений расстояния до Луны, вычисленных с помощью DE423 с однодневным шагом на интервале с 1 по 30 января 2012 г. Правые части условных уравнений были представлены разностями между положениями Луны по DE423 и положениями по DE403, дополненными отклонениями, которые получались численным интегрированием уравнений для отклонений. Были составлены дифференциальные уравнения в вариациях для получения коэффициентов условных уравнений. Методом наименьших квадратов были получены поправки к координатам и скоростям на эпоху 1 января 2012 г. На интервале в 60 суток было произведено сравнение положений Луны по DE423 и положений по DE403, уточненных полученными поправками Δr . На рис. 3 приведены результаты полученных вычислений.

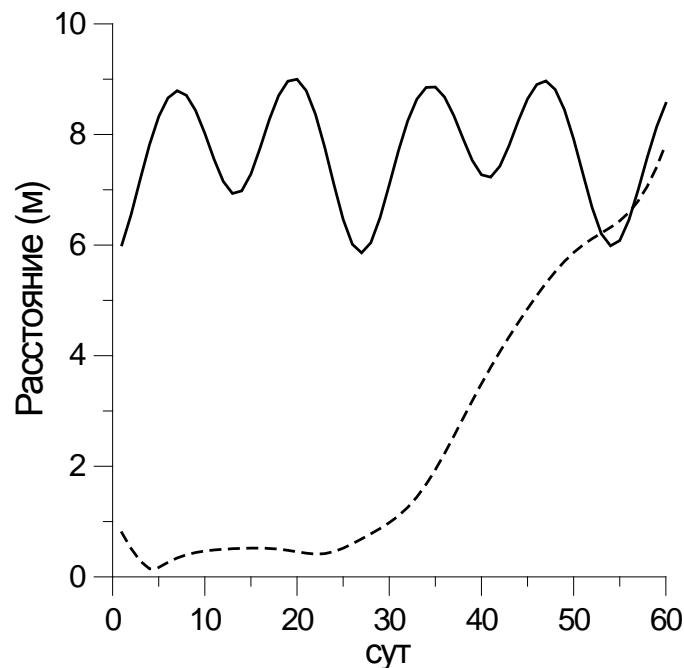


Рис. 3. Сравнение улучшенных и неулучшенных положений Луны.

По оси абсцисс отложены дни, по оси ординат расстояние между положениями Луны в метрах. Непрерывной линией показано расстояние между положениями Луны по эфемеридам DE403 и DE423 без внесения поправок, а пунктирной линией — расстояние между положениями Луны по DE423 и по DE403, исправленное в соответствии с нашими вычислениями. Как показывают вычисления, поправки позволяют существенно повысить точность положения Луны по DE403 на тридцатидневном интервале наблюдений. Кроме того, полученные поправки позволяют вполне удовлетворительно делать прогноз положения Луны, в нашем примере, на 1 месяц.

5. Заключение

Предлагаемый способ представления движения небесных тел в виде суммы эфемеридного положения и дифференциальных отклонений позволяет оперативно решать целый ряд задач эфемеридной астрономии: 1) оценивать дополнительные возмущения; 2) оценивать величины отдельных констант в динамических моделях этих тел; 3) оперативно уточнять эфемериды небесных тел. Применение описанной методики позволило оценить возмущения, вызываемые гравитационным влиянием объектов пояса Койпера, в движении Нептуна, уточнить положения барицентра системы Плутон-Харон из эфемериды DE405 на 4000 км, приблизив их к положениям этой системы в более современных эфемериде DE423. На примере движения Луны показана принципиальная возможность уточнения эфемеридных положений по наблюдениям дальности без пересчета всех параметров ее численной теории.

Литература

1. *Путьева Е.В.* Фундаментальные национальные эфемериды планет и Луны – ЕРМ и их параметры, определенные из наблюдений. Труды ИПА РАН. СПб, 2010. – вып.21, 184–190.
2. *Standish, E.M., Newhall, X.X., Williams, J.G. and Folkner, W.F.* JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE403/LE403. 1995. JPL IOM 314.10-127.

IMPROVEMENT OF PLUTO POSITION USING OBSERVATIONS IN 2005-2011

Bondarenko Yu.S.¹, Medvedev Yu.D.¹, Yas'ko P.P.²

¹*Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State University, Russia*

The method of differential perturbations is proposed to solve the problems of ephemeris astronomy. In this method the intermediate orbit is determined by the existing numerical theory and the perturbations are calculated relative to this intermediate orbit. Using the proposed method the perturbations of Neptune from objects of Kuiper belt were estimated. Also, the problem of corrections of existing ephemerides is considered taking into account new observations. As an example, using 748 position observations on the interval from March 27, 2005 to October 14, 2011 the improvement of Pluto-Charon barycentre positions from DE405 has been made. Application of the developed method improved the accuracy of Pluto positions and brought it close to modern ephemeris DE423. As one more example, the refined position of the Moon from the ephemeris DE403 were obtained. As the observations 30 positions of the Moon according to DE423 on the interval from 1 to 30 January 2012 with one-day step were used.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Вавилов Д.Е., Медведев Ю.Д.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Разработан универсальный метод определения орбит вновь открываемых небесных тел по позиционным наблюдениям. В рассматриваемом методе геоцентрические расстояния тела находятся перебором плоскостей (перебором углов наклона орбиты i и долготы восходящего узла Ω) и определением расстояний до точек пересечения выбранной плоскости с векторами направления на объект. Отбрасывая заведомо маловероятные орбиты (гелиоцентрические расстояния, большие 50 а.е.), по двум гелиоцентрическим положениям и интервалу времени между ними классическим методом Гаусса определяются остальные неизвестные элементы орбиты. По полученным системам элементов вычисляется значение среднеквадратического уклонения наблюдаемых положений от вычисленных. Системы элементов, дающие наименьшие среднеквадратические уклонения, считаются наиболее вероятными для вновь открытого тела. Затем эти элементы уточняются дифференциальным методом.

1. Введение

Быстрый рост числа вновь открываемых астероидов и комет, различные типы их орбит, разнообразие числа наличных наблюдений, их точности, длины дуги орбиты, покрытой наблюдениями, вызывают необходимость применения различных методов определения предварительных орбит небесных тел. Задача предотвращения столкновений астероидов и комет с Землей требуют оперативного и по возможности надежного определения орбит вновь открытых тел, а в тех случаях, когда имеющиеся наблюдения не позволяют однозначно найти орбиту, возникает необходимость рассмотрения всей совокупности орбит, согласующихся с имеющимся набором наблюдений, с тем, чтобы опасность столкновения вновь открытого тела с Землей была учтена для каждой из таких орбит. Применение классических методов Гаусса или Лапласа, а также их модификаций вызывает определенные затруднения в указанных случаях, в частности, приходится применять несколько методов, поскольку заранее неизвестно, к какому типу орбит (близкоуголовому, эллиптическому или почти параболическому) относится орбита вновь открытого тела. В данной работе ставится задача разработки универсального метода, пригодного для определения орбиты любого типа. Метод является двухэтапным. На первом этапе определяется невозмущенная предварительная орбита. На втором этапе невозмущенная предварительная орбита улучшается дифференциальным методом с учетом гравитационных возмущений.

2. Описание метода

Пусть имеются $n \geq 3$ позиционных наблюдений небесного тела: моменты времени t_j ($j = \overline{1, n}$), прямое восхождение α_j и склонение δ_j . Тогда единичный вектор направления на тело L_j в экваториальной топоцентрической системе имеет вид:

$$L_j = (\cos \alpha_j \cdot \cos \delta_j, \sin \alpha_j \cdot \cos \delta_j, \sin \delta_j), \quad j = \overline{1, n}.$$

Связь гелиоцентрических и топоцентрических векторов положений небесного тела дается уравнениями:

$$X_j = \rho_j \cdot L_j + E_j, \quad j = \overline{1, n},$$

где ρ_j – топоцентрическое расстояния, X_j – гелиоцентрический вектор положения небесного тела, E_j – гелиоцентрический вектор положение наблюдателя.

Таким образом, для нахождения вектора X_j необходимо знать значения ρ_j . Обычно эти значения находятся итерациями, при этом приходится определяться с типом

орбиты (эллиптическая, параболическая или гиперболическая) заранее, поскольку для разных типов орбит приходится применять различные формулы, что не всегда удобно. Кроме того, итерации могут расходиться, что делает невозможным нахождение орбиты тела.

В рассматриваемом методе мы отказываемся от итераций, и геоцентрические расстояния находим перебором плоскостей (перебором углов наклона орбиты i и долготы восходящего узла Ω). В этом случае значения ρ_j находятся как длины отрезка вектора направления на объект L_i до его пересечения с плоскостью с выбранным наклоном и долготой восходящего узла. Величина ρ_j определяется формулой:

$$\rho_j = \frac{|(N, E_j)|}{|(N, L_j)|},$$

где $N = (\sin i \cdot \sin \Omega, -\sin i \cdot \cos \Omega, \cos i)$ – вектор нормали к плоскости орбиты.

После этого в моменты наблюдений вводятся поправки за абберацию $-\frac{1}{c}\rho_j$ (c – скорость света) и выбираются два опорных наблюдения. Обычно это первое и последнее по времени наблюдения, но могут быть и другие комбинации, особенно в тех случаях, когда возникает подозрение, что одно из выбранных наблюдений имеет большую ошибку. Далее, используя метод Гаусса определения элементов орбиты по двум гелиоцентрическим положениям и моментам времени [1], находится орбита. По полученным элементам вычисляются сферические координаты объекта. Затем вычисляются величины «O – C» – разности наблюденного и вычисленного положения тела и определяется значение среднеквадратической ошибки представления наблюдений:

$$\sigma = \frac{1}{2n} \sqrt{\sum_{j=0}^n (\alpha_j - \alpha_j^c)^2 \cos^2 \delta_j + (\delta_j - \delta_j^c)^2},$$

где α_j^c, δ_j^c – вычисленные положения объекта.

Так поступаем для каждой выбранной плоскости. Среди вычисленных значений σ выбирается наименьшее. Элементы, дающие наименьшее σ , считаются наиболее вероятными. В случаях, когда имеется несколько орбит с близкими значениями σ и сильно различающимися элементами, рассматривается несколько возможных вариантов орбит. На втором этапе, как уже отмечалось, полученная наиболее вероятная система элементов улучшается дифференциальным методом. В случае, если орбита, найденная на первом этапе, не улучшается, осуществляется поиск более точной невозмущенной орбиты. Для этого шаги по значениям углов наклона и восходящего узла уменьшаются вдвое. Предусмотрена также возможность выбора различных вариантов опорных наблюдений, отличных от крайних. В случае, если невозмущенная орбита, найденная даже с небольшими шагами (0.01^0) и с другими опорными наблюдениями, не улучшается, то найденная невозмущенная орбита считается окончательной для имеющегося набора наблюдений. Для надежности в этом случае рассматриваются несколько наборов элементов орбиты, особенно если среди них встречаются орбиты с радикально различными значениями одних и тех же элементов.

3. Определение орбит астероидов, сближающихся с Землей

Предложенный метод был реализован на языке ФОРТРАН-90. На втором этапе при интегрировании уравнений движения учитывались гравитационные возмущения от всех больших планет. Координаты возмущающих планет вычислялись по численной эфемериде DE405. Модель также включала релятивистские возмущения от Солнца. Учет возмущений от Земли и Луны выполнялся отдельно. Численное интегрирование уравнений движения и уравнений в вариациях, которые определяют частные производ-

ные текущих координат по их начальным значениям в выбранную эпоху, выполнялось методом Эверхарта 15 порядка. В качестве проверки предложенного метода были проведены следующие вычисления. С сайта Центра малых планет [2] в автоматическом режиме считывались электронные циркуляры (Minor Planet Circulars (MPC)), содержащие наблюдения и элементы орбит новых малых тел Солнечной системы. В качестве теста использовались циркуляры на интервалах: 17-29 сентября 2010 г., 24 мая – 3 июня 2011 г. Эти циркуляры были выбраны, поскольку для большинства малых тел, наблюдения и орбиты которых опубликованы в этих циркулярах, в более поздних циркулярах имеются дополнительные наблюдения, что позволяет вычислить более точные орбиты и, таким образом получить объективную оценку точности орбит по первым наблюдениям.

Всего в циркулярах оказалось 59 малых тел. Вычисление элементов орбит всех этих тел показало хорошее совпадение с элементами, опубликованными в MPC. Для оценки точности, получаемых элементов по предлагаемой методике были отобраны 28 астероидов, сближающихся с Землей, имеющих дополнительные наблюдения, достаточные для определения надежной эфемериды. Используя дополнительные наблюдения, были вычислены более точные орбиты для этих тел. Эти точные орбиты сравнивались с орбитами, полученными по первым наблюдениям. Сравнение проводилось по следующему алгоритму. На один и тот же момент времени считались эфемеридные положения тела по элементам, полученным по первым наблюдения с помощью предлагаемой методике и по элементам, опубликованным в MPC, а также по элементам более точной орбиты. Эфемеридные положения вычислялись на два момента: через 2 и через 10 суток от момента последнего наблюдения. В качестве критерия точности вычисляемых положений использовалась видимое угловое расстояние между эфемеридными положениями, вычисленным по двум орбитам: орбите, определенной по описываемой методике (ИПА), и орбите, опубликованной в MPC. Результаты сравнения приведены в табл. 1. Здесь в 1-й колонке приведены предварительные обозначения астероидов. Во 2-ой и 4-ой – угловые расстояния между эфемеридными положениями, определенным по орбитам MPC и ИПА, при прогнозе на 2 и 10 суток, соответственно. В 3-ей и 5-ой колонках приведены абсолютные значения угловых расстояний между эфемеридными положениями, вычисленными по орбитам ИПА, и положениями по более точным орбитам, определенным с использованием дополнительных наблюдений. В 3-ей колонке приведены данные прогноза на 2-ое суток, в 5-ой колонке – данные прогноза на 10 суток. Данные этих колонок рассматриваются нами как оценки абсолютной погрешности предлагаемой методике для рассматриваемых примеров. В 6-ой – число первых наблюдений и в 7-ой – дуга, охватываемая первыми наблюдениями.

Анализ данных показывает, что предлагаемая методика позволяет вычислить более точную орбиту практически для всех приведенных в табл.1 астероидов. Преобладание положительных величин во 2-ой колонке показывает, что при прогнозе на двое суток эфемеридные положения, вычисленные по орбитам ИПА, находятся ближе к более точным положениям, чем положения, вычисленные по орбитам MPC. Наихудший прогноз движения на двое суток по нашей методике получен для астероида 2010 SH13, однако, и для него эфемеридное положение, вычисленное по орбите ИПА, всего лишь на 4.9" дальше от более точного положения этого астероида, чем положение, определенное по орбите MPC. Кроме того, оценка погрешности двухдневного прогноза составляет лишь 11.0". Такая же тенденция сохраняется и для десятидневного прогноза. В колонке 4 преобладают величины с положительными значениями. Наихудший десятидневный прогноз зафиксирован для уже упомянутого астероида 2010 SH13, однако и здесь абсолютная погрешность эфемеридного положения не велика 96.7". Наибольшую

погрешность десятидневного прогноза имеет астероид 2010 SJ – 672.8", при этом прогноз, сделанный по орбите ИПА, точнее на 226.1" прогноза по орбите МРС.

Таблица 1. Угловые расстояния между эфемеридными положениями, вычисленным по орбитам ИПА и МРС

1	2	3	4	5	6	7
Обозначение	МРС –ИПА ₂	ИПА ₂	МРС – ИПА ₁₀	ИПА ₁₀	N	ΔT
2010 S1	55.6"	1.9"	-11.9"	25.4"	40	3.06 ^d
2011 KO17	19.4	8.3	114.2	51.7	33	1.32
2010 SJ	6.8	21.7	226.1	672.8	21	0.97
2011 K1	5.2	2.9	-3.7	11.1	61	5.66
2010 SS3	4.7	1.5	58.6	58.7	18	1.96
2010 SX11	2.7	3.1	117.5	101.0	9	1.24
2011 KD11	2.4	10.4	13.3	58.6	16	1.09
2011 KR12	1.8	3.6	56.9	157.2	13	1.93
2011 KJ15	1.4	11.6	33.9	365.7	27	1.74
2010 SY3	1.2	4.6	8.5	27.9	10	2.77
2011 KC15	0.7	2.6	4.0	20.7	19	1.99
2011 KH4	0.5	2.9	8.6	28.9	17	1.68
2011 KF9	0.4	1.9	1.0	21.1	36	1.83
2011 KK15	0.4	1.8	0.1	16.0	27	1.63
2011 KN17	0.1	1.2	-1.1	7.8	35	1.72
2011 KW19	0.0	2.1	-0.8	26.8	10	3.08
2011 KQ12	0.0	1.6	-0.1	15.6	11	4.71
2010 SA12	-0.1	0.4	6.1	5.5	19	2.98
2010 SP3	-0.1	31.4	0.8	98.8	18	0.58
2011 KW15	-0.2	1.5	0.6	116.8	13	1.87
2010 SV3	-0.2	2.3	-0.7	6.3	32	1.66
2011 KQ19	-0.3	2.2	-2.3	15.1	16	3.00
2011 KP16	-0.4	1.5	-26.7	43.4	25	1.78
2010 SG13	-0.7	2.4	3.2	26.6	12	2.12
2010 SD13	-0.9	3.1	-16.0	33.8	23	1.40
2010 SR3	-1.1	6.0	-14.8	72.7	18	1.96
2010 SE12	-1.3	10.7	-12.4	111.4	15	2.03
2010 SH13	-4.9	11.0	-41.0	96.7	22	2.11

4. Заключение

Разработана универсальная методика определения орбит небесных тел по позиционным наблюдениям. Эффективность методики проверена на 59 новых небесных объектах, наблюдения и орбиты которых были опубликованы в циркулярах Центра малых планет в периоды: с 17 по 29 сентября 2010г. и с 24 мая по 3 июня 2011г. Сравнение вычисленных орбит с результатами, опубликованными в циркулярах, показало надежность и точность предлагаемой методики.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант РФФИ № 12-02- 31059).

Литература

1. Субботин М.Ф. Введение в теоретическую астрономию. «Наука», 1968, 800 с.
2. Сайт Minor Planet Centre. http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/.

DETERMINATION OF THE ORBITS OF THE NEAR-EARTH OBJECTS

Vavilov D.E., Medvedev Yu.D.

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

A universal method for the determination of the orbits of newly discovered celestial bodies from several positional observations is developed. In the considered method the geocentric distances of a body at the times of any two observations are found by variation of hypothetical orbital plane which is determined by the inclination angle i and the longitude of the ascending node Ω with some step. The unknown geocentric distance of a body at the time of observation can be determined as a length of segment of positional vector from observer till its crossing point with hypothetical plane. Having two heliocentric positions (usually those limiting the observation arc) at any two moments of time one can find four remaining unknown elements of an orbit by Gauss method. Using orbit elements (those giving heliocentric distances greater than 50 AU are rejected as unlikely) the value of the least-mean-square deviation of O-C, σ , is computed. The sets of elements which give the lowest value of σ are considered as the most probable. Then these elements are improved by the differential method.

ОБЪЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В РЕЗОНАНСЕ 1:1

Василькова О.О., Львов В.Н., Смирнов С.С., Цекмейстер С.Д.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены возможности новой опции программного пакета ЭПОС [4], позволяющей визуализировать движение реального астероида, находящегося в (приблизительном) резонансе 1:1 с одной из планет. Новая опция допускает определение типа орбиты коорбитального астероида во вращающейся системе координат: HS (подковообразная); QS (квазиспутниковая); Cir (циркулирующая); Tr (орбита троянца). Основное внимание уделяется квазиспутниковым орбитам как менее известным.

Численное интегрирование производится методом Эверхарта 15-го порядка, с учетом возмущений от всех планет и трех наибольших астероидов, при использовании численной эфемериды DE406. Основные характерные признаки квазиспутникового движения (выведенные в основополагающих работах для ограниченной задачи трех тел) получили дальнейшее развитие в этой неограниченной задаче.

Показано, что квазиспутник Венеры 2002 VE68 в будущем перейдет на орбиту троянца.

1. Описание проблемы

В системе координат, вращающейся вместе с планетой вокруг Солнца, существуют [6, 7] три типа орбит, ассоциированных с резонансом 1:1 между периодами обращения астероида и планеты вокруг Солнца: подковообразная орбита (HS); квазиспутниковая орбита (QS) и орбита троянца (Tr). Четвертый тип орбит [6] – циркулирующая (Cir) может существовать как в резонансе 1:1 так и вне резонанса. Tr-эпициклы либрируют около треугольных точек либрации L_4 или L_5 ; HS-эпициклы, кроме и L_4 и L_5 , охватывают еще коллинеарную точку либрации L_3 ; а квазиспутниковые орбиты “дрейфуют” вокруг самой планеты (Рис.1). Основное отличие текущей работы от основополагающих работ [1-3] и [5-8] (где обсуждаемые объекты исследуются в рамках ограниченной задачи трех тел) – рассмотрение общих свойств астероидов в резонансе 1:1 (преимущественно квазиспутников) в неограниченной задаче. В программе ЭПОС [4] визуализируется движение астероида, полученное численным интегрированием методом Эверхарта 15-го порядка. При использовании численной эфемериды DE406 учитываются возмущения от всех планет и трех наибольших астероидов. Движение астероида может быть прослежено во вращающейся и невращающейся системах координат, центр которых может находиться либо в Солнце, либо в планете, либо в другом астероиде. Ось X вращающейся системы координат неизменно проходит через Солнце и планету, так что Солнце и планета остаются неподвижными в данной системе. В невращающейся системе координат направление осей остается неизменным.

На Рис. 1,2 изображены все типы 1:1 орбит реальных астероидов во вращающейся системе координат: квазиспутниковая орбита астероида 2004 GU9; орбита единственного троянца Земли 2010 TK7; подковообразная орбита астероида 2010 SO16, циркулирующая – астероида 1998 UP1. Отметим, что циркулирующая орбита – наиболее общий вид орбит астероидов. Например, и Апофис (Рис.1), не находящийся в резонансе 1:1 с Землей, и астероид 1998 UP1 (Рис. 2), чье среднее движение отличается от земного менее чем на 10 секунд дуги в сутки (почти резонанс 1:1 с Землей), - оба находятся на циркулирующих орбитах.

Благодаря возможности установить центр системы координат в любом объекте, в том числе, в астероиде, было выявлено свойство “обратимости” QS-состояния: *квазиспутники планеты являются квазиспутниками друг друга, а сама планета - квазиспут-*

ник своего квазиспутника (см. Рис. 6, где центр вращающейся системы координат помещен в квазиспутник Земли 2004 GU9).

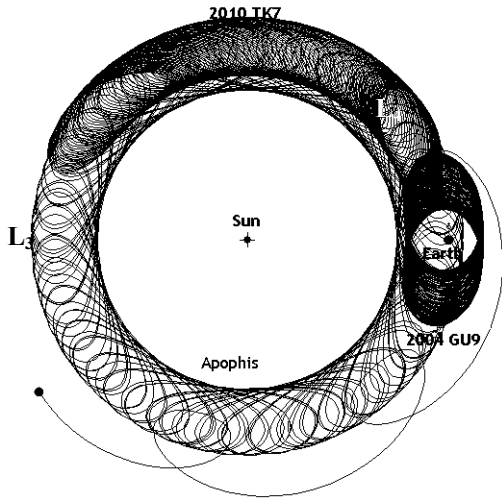


Рис. 1. QS 2004 GU9 и Tr 2010 ТК7 Земли.

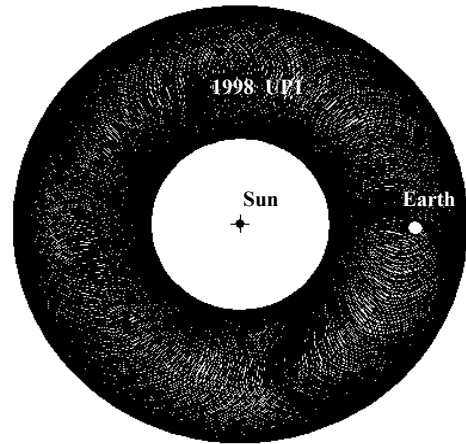


Рис. 2. Cir 1998 UP1 Земли.

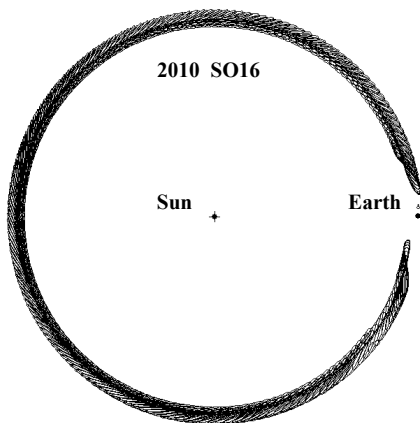


Рис. 3. HS 2010 SO16 (1900-2340).

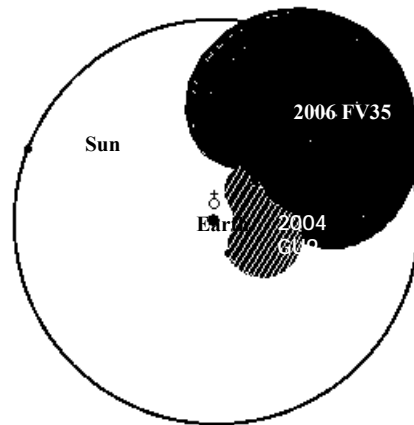


Рис. 4. Невращающаяся с.к. (1900-2300).

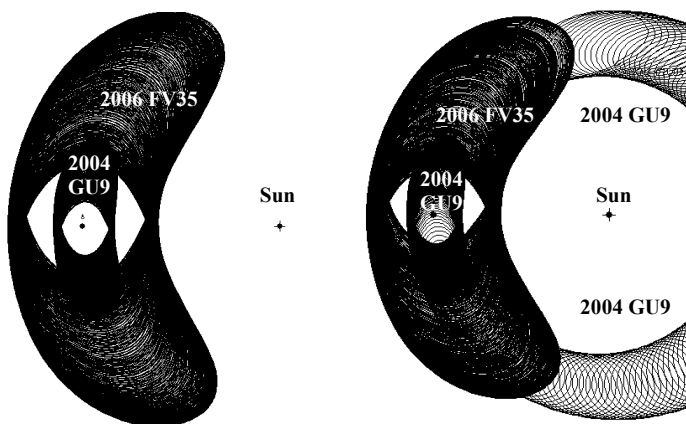


Рис. 5. (1900-2742): с 2606 г. 2004 GU9 – не QS

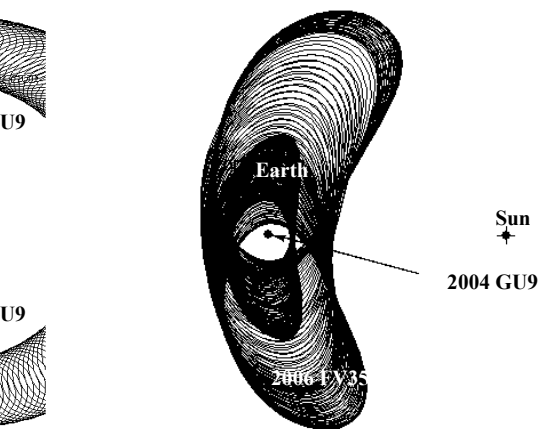


Рис. 6. Earth и 2006 FV35 – QS 2004 GU9.

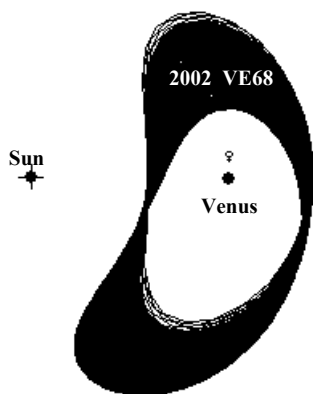


Рис. 7. QS Венеры 2002 VE68 (1900-2130).

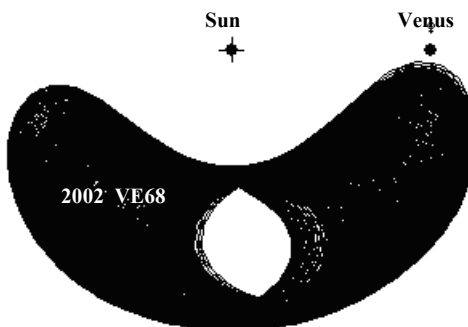


Рис. 8. Tr Венеры 2002 VE68 (2600-3000).

2. Сравнение с ограниченной задачей трех тел

В работе [1] QS-орбиты описываются в рамках ограниченной круговой задачи трех тел. Приводятся формулы для вычисления параметров эпицикла и полный цикл изображается как “дрейф” эпицикла вперед и назад *по прямой*. Но, как видно из Рис. 5,7, в случае, близком к реальному (при учете большего числа возмущений), форма огибающей всех эпициклов не прямолинейна (бананообразна) и изогнута тем больше, чем больше амплитуда колебаний долготы квазиспутника относительно долготы планеты. Сами же орбиты настолько удалены от планеты, что максимальное расстояние астероида от нее сравнимо с расстоянием планеты от Солнца (например, для QS Земли 2006 FV35 на Рис. 5 и QS Венеры 2002 VE68 на Рис. 7). Такая орбита, приближающаяся к одной из треугольных точек либрации, может трансформироваться со временем в орбиту троянца, что произойдет, например, с орбитой текущего квазиспутника Венеры 2002 VE68 в будущем (Рис. 7,8).

В реальном случае астероид не может бесконечно оставаться на QS-орбите. На Рис. 5,6 изображен уход устойчивого квазиспутника Земли 2004 GU9 с QS-орбиты и его переход на циркулирующую орбиту в 2606 году, после чего сближение с Землей становится редким. Близко к этому моменту (приблизительно в 2617 году) произойдет и переход квазиспутника Венеры на орбиту троянца. Надо отметить, что в момент ухода с QS-орбиты (Рис. 5) астероид становится опасным объектом, так как начинается серия частых и непредсказуемо близких приближений к планете (Рис. 5, справа).

Отметим еще одно, упоминаемое в том числе в работе [7], свойство QS оставаться с одной и той же стороны от планеты в невращающейся системе координат. Было замечено, что это свойство может сохраняться и в сильно возмущенной задаче, но только ограниченный промежуток времени. В общем случае, область, заметаемая QS-орбитой (Рис. 4), прецессирует вокруг планеты, со скоростью, которая различна для различных квазиспутников.

Литература

1. Коган А.Ю. 1988. Далекие спутниковые орбиты в ограниченной круговой задаче трех тел. Космич. Исслед. 1988, т.26, № 6, 813-818.
2. Лидов М.Л., Вашковьяк М.А. О квазиспутниковых орбитах для эксперимента по уточнению гравитационной постоянной. Письма в АЖ. 1994, т.20, № 3, 229-240.
3. Лидов М.Л., Вашковьяк М.А. 1994. О квазиспутниковых орбитах в ограниченной эллиптической задаче трех тел. Письма в АЖ. 1994, т.20, № 10, 781-795.
4. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. 2012. Использование программного пакета ЭПОС для изучения объектов Солнечной системы. Астрономический Вестник. 2012, 46, № 2, 190-192.

5. *Benest D.* Libration effects for retrograde satellites in the restricted three-body problem. *Cel. Mech.* 1976, v.13, № 2, 203-215.
6. *Murray C.D., Dermott S.F.* 2000. *Solar System Dynamics.* Cambridge Univ. Press, Cambridge.
7. *Mikkola S., Innanen K., Wiegert P., Connors M., Brassier R.* 2006. Stability limits for the quasi-satellite orbit. *MNRAS*, 2006, 369, 15-24.
8. *Szebehely V.* 1967. *Theory of orbits.* New York. Academic Press.

SOLAR SYSTEM OBJECTS IN 1:1 RESONANCE WITH A PLANET

Vasilkova O.O., L'vov V.N., Smirnov S.S., Tsekmeister S.D.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

The new possibilities of the program package EPOS are presented which allow to visualize the motion of a real asteroid which is in resonance 1:1 with a planet. The new option allows to determine the type of orbit of a coorbital asteroid: HS (horseshoe), QS (quasi-satellite), Cir (circulating) or Tr (Trojan). The QS orbits are paid more attention as they are less known.

The numerical integration with Everhart method of 15-th order is used at accounting for perturbations from all planets and three largest asteroids and using DE406 ephemeris. The main features of QS state (obtained earlier in basic works for restricted three-body problem) are developed for current unrestricted case.

It is shown that Venus quasi-satellite 2002 VE68 will be its Trojan in the future.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВОЙНОГО АСТЕРОИДА 22 KALLIOPE

**Верещагина И.А.¹, Соков Е.Н.¹, Рощина Е.А.¹, Горшанов Д.Л.¹, Растегаев Д.А.²,
Балега Ю.Ю.², Малоголовец Е.В.², Дьяченко В.В.², Максимов А.Ф.²**

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

²Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН

Впервые для определения точных положений спутников кратных астероидов, были проведены наблюдения двойного астероида 22 Kalliope на телескопе БТА САО РАН с использованием метода спекл-интерферометрии. На основе наблюдений, полученных в течение 6 ночей, была определена истинная орбита спутника Linus астероида 22 Kalliope. Впервые для данного типа объектов орбита была определена с использованием геометрического метода А.А. Киселёва, который был разработан и до сих пор использовался только для визуально-двойных звезд. Некоторые элементы орбиты (долгота перицентра) спутника Linus были получены впервые.

Метод спекл-интерферометрии

Метод спекл-интерферометрии – метод наблюдения астрономических объектов через турбулентную атмосферу с дифракционным пределом разрешения. Для выявления деталей строения космических объектов необходима четкость изображений. Но даже в идеальном оптическом приборе четкость ограничена дифракцией, и точечный источник излучения виден как диск с размером, обратно пропорциональным диаметру объектива телескопа. Поэтому реальное изображение протяженного источника, состоящего из многих излучающих точек, также всегда размыто. Метод спекл-интерферометрии позволяет в значительной мере исключить размытость, вызванную искажениями в атмосфере и оптической системе телескопа, и довести разрешающую способность оптического прибора практически до дифракционной.

В методе спекл-интерферометрии регистрируют сильно увеличенное изображение с короткой экспозицией ($\sim 10^{-2}$ с). Такое изображение состоит из множества мелких пятнышек-спеклов, которые возникают из-за интерференции лучей света, попадающих в фокальную плоскость телескопа от разных участков объектива. Каждый такой спекл похож на дифракционный диск в фокальной плоскости идеального телескопа, работающего вне атмосферы. Влияние атмосферы заключается в том, что дошедший до наземного телескопа волновой фронт всегда искажен оптическими неоднородностями атмосферы. При регистрации с малыми экспозициями фиксируется «мгновенное» распределение спеклов, а при больших экспозициях оно усредняется, изображение теряет свою структуру и приобретает размытый вид. В изображениях неточечных (протяженных, кратных) источников излучения характер спеклов (их форма, размеры) отражает особенности самого источника. Например, если наблюдается двойной объект (двойная звезда или двойной астероид), то спеклы располагаются парами и каждая пара – это как дифракционные диски от двух компонентов звезды или астероида. Для получения информации о структуре наблюдаемого объекта подвергаются статистическому анализу десятки и сотни его «мгновенных» снимков.

Спекл-интерферометрия двойного астероида 22 Kalliope

В период с 10 по 18 декабря 2011 года на телескопе БТА в САО РАН (<http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/descrip.html>) были проведены наблюдения двойного астероида главного пояса 22 Kalliope с использованием спекл-интерферометра. В результате было получено 9 снимков астероида, и, таким образом, 9 положений

спутника Linus на орбите вокруг главного компонента 22 Kalliope. Одно из полученных изображений представлено на рис. 1. В табл.1 приведены полученные для 9 изображений полярные координаты (ρ , Θ) спутника Linus с ошибками измерительных данных, а также разность в звездной величине (Δm) между спутником и главным компонентом.

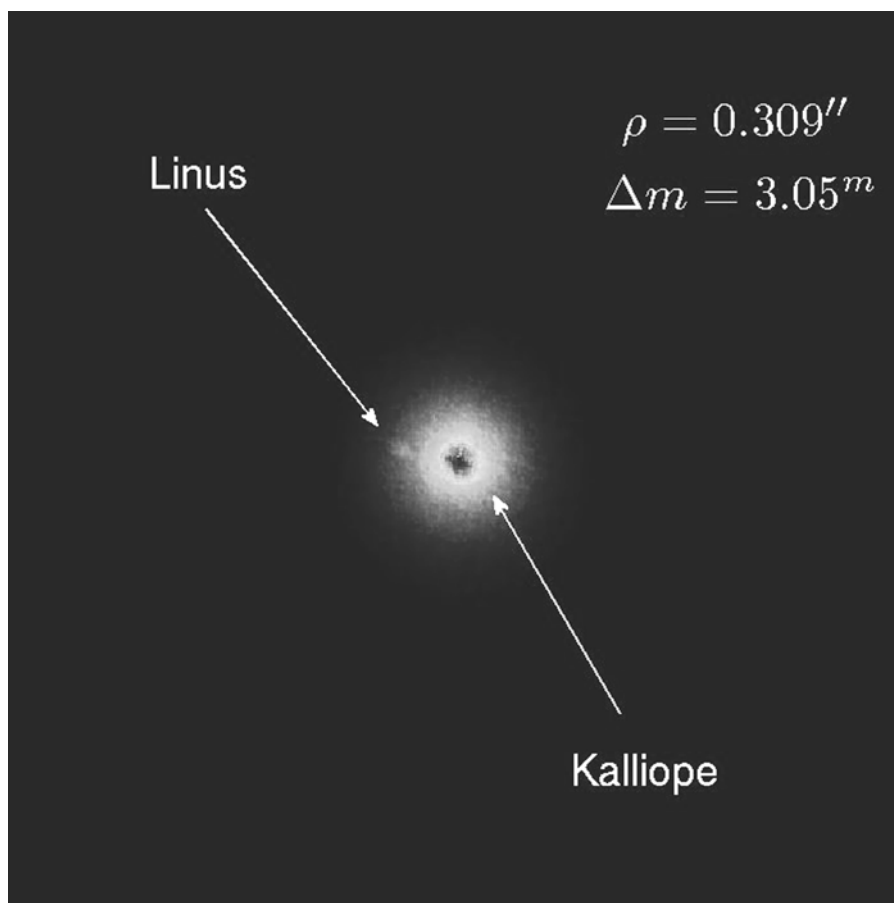


Рис. 1.

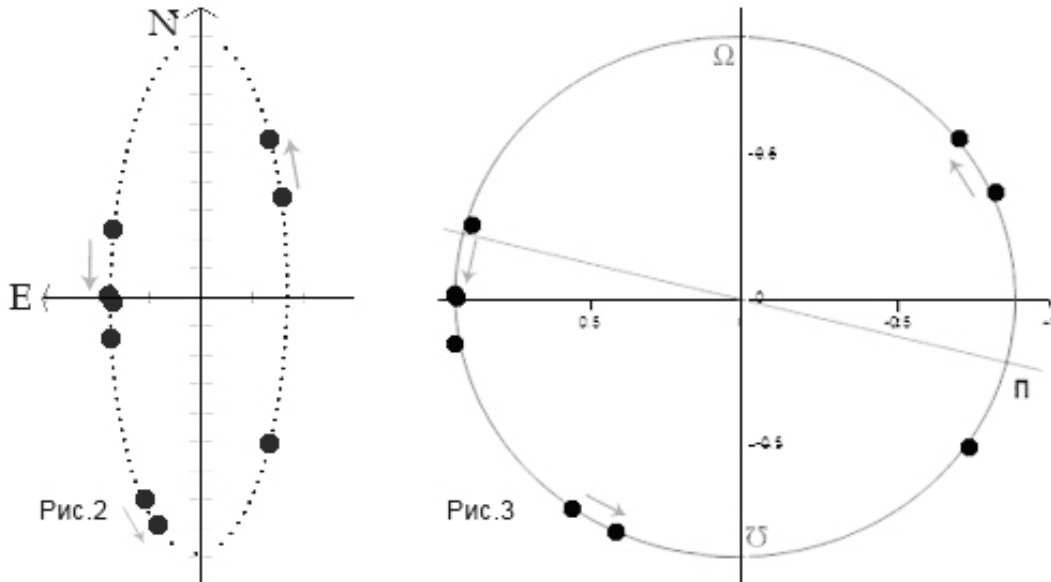
Таблица 1.

Эпоха 2011.0+	ρ [mas]	$\sigma\rho$ [mas]	Θ [deg]	$\sigma\Theta$ [mas]	Δm [mag]	$\sigma\Delta m$ [mag]
.94433	398	16	336.2	2.3	3.21	0.17
.94470	567	10	345.9	1.0	3.20	0.11
.95000	724	22	171.1	1.7	3.18	0.14
.95033	801	13	174.0	1.0	3.34	0.14
.95248	530	7	195.2	0.8	3.35	0.08
.95789	509	4	33.5	0.8	3.05	0.09
.95834	181	7	86.0	2.2	2.47	0.13
.95835	184	7	86.9	2.1	3.03	0.13
.95864	236	7	128.9	1.7	3.19	0.14

Для определения параметров видимого эллипса была разработана программа, основанная на методе наименьших квадратов. Для определения эллипса, наилучшим образом вписывающегося в набор наблюдательных положений спутника Linus относительно фото-центра главного компонента 22 Kalliope, использовалось предположение о возможном наклоне проекции эллипса Linus по отношению к наблюдателю с Земли и

предположение о незначительном смещении центра эллипса относительно фото-центра главного компонента. Таким образом, были рассмотрены все возможные варианты проекции видимого эллипса и были определены параметры данного эллипса для дальнейшего определения из них реальной орбиты спутника *Linus*.

На рис. 2 точками показаны полученные наблюдения вместе с вписанным видимым эллипсом. На рис. 3 показан полученный истинный эллипс, отражающий истинную орбиту *Linus*.



Определение орбиты спутника *Linus*

Для определения истинной орбиты *Linus* на основе видимого эллипса, был использован геометрический метод, предложенный А.А. Киселевым для двойных звезд [1]. Данный метод использовался для определения орбит визуально-двойных звезд по полному видимому эллипсу, но для двойных астероидов использовался впервые.

Прямой геометрический метод, используя параметры видимого движения и координаты проекции барицентра, позволяет получить параметры истинного эллипса и его ориентацию относительно видимого в пространстве. В отличие от динамических методов, он не дает возможность получить период и момент прохождения периастра. Поэтому было взято значение периода (3.59 сут. = 0.009829086 года) из работ других авторов [2, 3], который использовался при вычислении момента прохождения периастра по относительным положениям *Linus* в системе координат истинного эллипса и позиционному углу линии апсид.

При вычислении орбиты *Linus* также были учтены поправки за скорость света и за смещение астероида и Земли относительно друг друга за время наблюдений. Однако, величины этих поправок оказались порядка 3 mas, что ниже уровня точности (6 mas).

Таким образом, были найдены элементы орбиты спутника *Linus*. При этом, впервые был определен полный набор элементов орбиты, включая ее ориентацию. В табл. 2 приведены полученные результаты определения орбиты *Linus*. Также приведены результаты, полученные авторами работ [2, 3] для аналогичных элементов орбиты. Элементы орбиты, которые определялись другими авторами, выделены жирным шрифтом. Видно, что в целом результаты, полученные в настоящей работе, согласуются с результатами других авторов.

Для проверки качества определенной орбиты спутника *Linus*, были на ее основе рассчитаны эфемериды и проведено сравнение полученных эфемерид с наблюдатель-

ными данными. Полученные результаты показали, что наблюдательные данные согласуются с эфемеридами, однако, присутствуют периодические отклонения наблюдений от эфемерид, что может свидетельствовать о том, что орбита Linus испытывает возмущения. Для более детального изучения этого факта требуются дальнейшие более детальные наблюдения астероида 22 Kalliope методом спекл-интерферометрии.

Таблица 2.

Parameters	Our results	P.Descamps et al.,2008 [3]	F. Vachier et al., 2012 [2]
semi-major axis a	911.95 mas = 1111.17±7 km	1099±11 km	1081.5 ± 33.5 km
semi-minor axis b	911.69 mas = 1110.85±7 km		
eccentricity e	0.024 ± 0.002		0.0069 ± 0.03
inclination i	258.8 ± 1.4 deg		
position angle of nodes line Ω	258.8 ± 1.4 deg		
longitude of periastron (position angle of semi-major axis) ω	258.7 ± 5 deg		
Moment of passage of periastrum	T _p =2011.943395 ± 0.000033y.		
Ecliptic coordinate of the pole	β=-10.9± 2 λ=191.1± 2 deg	β=-3±2 λ=197±2 deg	
Ecliptic coordinate of the periastrum	β=-63.7± 5 λ=304.1± 5 deg		
Ecliptic longitude of ascending node	λ=281.1± 1.5 deg	λ=284.5 ± 2.0 deg	λ=285.05±2.11deg
Inclination to ecliptic	i_c=100.9± 1.4 deg	i=99.4 ± 0.5 deg	i=94.18 ± 1.92 deg

Заключение

Таким образом, в результате данной работы была получена орбита спутника 22 Kalliope с использованием метода спекл-интерферометрии и геометрического метода А.А. Киселева, который для данного класса объектов был применен впервые.

В результате был получен полный набор элементов орбиты спутника Linus, при этом элементы орбиты, которые определялись другими авторами, согласуются с результатами данной работы.

Однако, в рамках данного исследования было выявлено периодическое отклонение полученных эфемерид от наблюдений, что может свидетельствовать о том, что орбиты спутника испытывает возмущения. Для изучения данного факта будут проводиться дальнейшие наблюдения и исследования с использованием метода спекл-интерферометрии. Помимо геометрического метода А.А. Киселева также планируется применить метод ПВД (параметров видимого движения), также предложенный А.А. Киселевым для визуально-двойных звезд.

Литература

1. A.A. Kiselev, 1997, Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks. Edited by J.A. Docobo et al., Dordrecht: Kluwer Academic, p.357.
2. Vachier F., Berthier J., Marchis F., Determination of binary asteroid orbits with a genetic-based algorithm, 2012, Astronomy & Astrophysics, Volume 543, id.A68, pp. 9.
3. Descamps, P.; Marchis, F.; Pollock, J.; Berthier, J.; Vachier, F.; Birlan, M.; Kaasalainen, M.; Harris, A.W.; Wong, M.H.; Romanishin, W.J.; Cooper, E.M.; Kettner, K.A.; Wiggins, P.; Kryszczyńska, A.; Polinska, M.; Coliac, J.-F.; Devyatkin, A.; Vereshchagina, I.; Gorshanov, D. «New determination of the size and bulk density of the binary Asteroid 22 Kalliope from observations of mutual eclipses» Icarus, Volume 196, Issue 2, p. 578-600. 08/2008.

INVESTIGATION OF THE 22 KALLIOPE ASTEROID BINARY SYSTEM.

**Vereshchagina I.A.¹, Sokov E.N.¹, Roshina E.A.¹, Gorshanov D.L.¹, Rastegaev D.A.²,
Balega Yu.Yu.², Malogolovec E.V.², D'achenko V.V.², Maksimov A.F.²**

¹*Pulkovo observatory of RAS*

²*Special Astrophysical observatory of RAS*

For the first time for determine of the exact positions of multiple asteroid satellites observations were carried out of binary 22 Kalliope asteroid on the BTA telescope of the SAO using the speckle-interferometry. Based on observations obtained during 6 nights, the true orbit of the Linus satellite of the 22 Kalliope asteroid was determined. For the first time for this type of objects the orbit was determined using the geometric method by A.A Kiselev, which was developed and was still used only for visual double stars. Some of the orbit elements (perihelion longitude) of the Linus satellite were first obtained.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОИСК СЕМЕЙСТВ СРЕДИ ТРОЯНЦЕВ

Виноградова Т.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Предложен геометрический метод исключения вековых возмущений из элементов орбит астероидов. Метод использует только элементарные формулы преобразования координат. Описанным методом вычислены собственные элементы для троянцев Юпитера и произведен поиск семейств астероидов. Метод идентификации семейств использует критерий расстояния между точками в трехмерном пространстве собственных элементов. В результате около точки либрации L_4 уверенно выявлены два семейства (3548) *Eurybates* и (2148) *Epeios*. Менее надежно определяется семейство (624) *Hektor*. Среди L_5 -троянцев семейств астероидов не обнаружено.*

1. Введение

Семейства астероидов представляют собой популяции, появившиеся в результате катастрофического распада одного родительского тела. Возникшие в результате распада астероиды первоначально движутся практически по одной и той же орбите, но затем в результате действия разного рода возмущений их орбиты расходятся. Поэтому каждое семейство является самостоятельной динамической подсистемой, отражающей особенности эволюционных процессов в данной области пояса астероидов. Основной вклад в изменение элементов орбит вносят вековые возмущения. Исключение вековых и короткопериодических возмущений позволяет получить собственные элементы орбит астероидов. Собственные элементы, такие как большая полуось, наклон и эксцентриситет не изменяются со временем, поэтому в трехмерном пространстве этих элементов точки, представляющие орбиты астероидов отдельного семейства, продолжают оставаться близкими. Впервые основные семейства астероидов были выделены Хираямой [5] в 1918 году с использованием теории вековых возмущений. С тех пор методы вычисления собственных элементов совершенствовались, создавались все более точные динамические теории. Обзор современных аналитических, полуаналитических и синтетических теорий содержится в работе [6]. Для идентификации семейств по собственным элементам также были предложены несколько методов. Описание этих методов можно найти в работе [2].

Тем не менее, существуют разногласия в списках семейств, полученных разными авторами. Особенно это касается троянцев, так как движение в резонансе средних движений 1:1 с Юпитером, требует создания сложной динамической теории. В результате количество обнаруженных среди троянцев семейств колеблется от одного [4] до почти 40 [1].

В настоящей работе предложен очень простой геометрический метод исключения вековых возмущений, который позволяет эффективно выделять семейства астероидов. Особенно удобен этот метод именно в применении к троянцам, так как вековые возмущения в виде вынужденных элементов для них известны, поскольку совпадают с элементами орбиты Юпитера. Для поиска членов семейств предложен метод, использующий критерий расстояния между точками в трехмерном пространстве собственных элементов.

2. Результаты теории вековых возмущений

В результате действия вековых возмущений со стороны больших планет наклоны и эксцентриситеты орбит астероидов испытывают периодические колебания на очень больших промежутках времени. Значения оскулирующих наклона i и эксцентриситета e , усредненные за короткопериодические возмущения, согласно теории вековых возмущений планетных орбит [3] представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sin i \cos \Omega &= \sin i_p \cos \Omega_p + \sin i_f \cos \Omega_f \\ \sin i \sin \Omega &= \sin i_p \sin \Omega_p + \sin i_f \sin \Omega_f \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} e \cos \pi &= e_p \cos \pi_p + e_f \cos \pi_f \\ e \sin \pi &= e_p \sin \pi_p + e_f \sin \pi_f \end{aligned} \quad (2)$$

В этих выражениях подстрочным значком p (proper) отмечены собственные элементы, а значком f (forced) – вынужденные. Собственные наклоны и эксцентриситеты являются константами. Собственная долгота восходящего узла $\Omega_p = (-\alpha t + c)$ убывает с течением времени t с постоянной скоростью α , а собственная долгота перицентра $\pi_p = (\alpha t + d)$ возрастает с той же скоростью.

Такое поведение наклонов орбит объясняется тем, что под действием вековых возмущений орбиты астероидов прецессируют около некоторой плоскости, сохраняя относительно нее неизменный собственный наклон. Эта плоскость называется вынужденной, и ее положение определяется массами и элементами орбит больших планет, а также расстоянием от Солнца. Величины i_f, Ω_f определяют положение вынужденной плоскости в пространстве. Возмущенные эксцентриситеты имеют аналогичную вынужденную составляющую, которая проявляется в общей вытянутости пояса астероидов. После исключения вынужденного эксцентриситета можно получить собственные неизменные эксцентриситеты. Если в левых частях уравнений стоят не усредненные оскулирующие элементы, вычисленные собственные элементы будут включать в себя все не вековые возмущения.

3. Вычисление собственных наклонов и эксцентриситетов

Наклоны орбит астероидов можно рассматривать относительно двух координатных плоскостей. Одна из них – эклиптика, относительно которой наклоны испытывают колебания большого периода, другая – вынужденная плоскость, относительно которой наклоны орбит неизменны. Связь между элементами орбиты, отнесенными к разным системам координат, выражается элементарными формулами преобразования координат:

$$\begin{pmatrix} \sin i \sin \Omega \\ -\sin i \cos \Omega \\ \cos i \end{pmatrix} = M(i_f, \Omega_f) \begin{pmatrix} \sin i_p \sin \Omega_p \\ -\sin i_p \cos \Omega_p \\ \cos i_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{где } M(i_f, \Omega_f) = \begin{bmatrix} \cos \Omega_f & -\cos i_f \sin \Omega_f & \sin i_f \sin \Omega_f \\ \sin \Omega_f & \cos i_f \cos \Omega_f & -\sin i_f \cos \Omega_f \\ 0 & \sin i_f & \cos i_f \end{bmatrix}$$

После перемножения матрицы и вектора, первые два полученных уравнения при упрощениях $\cos i_f = 1, \cos i_p = 1$ могут быть сведены к форме уравнений вековой теории (1):

$$\begin{aligned} \sin i \sin \Omega &= \sin i_p \sin (\Omega_f + \Omega_p) - \sin i_f \sin \Omega_f \\ \sin i \cos \Omega &= \sin i_p \cos (\Omega_f + \Omega_p) + \sin i_f \cos \Omega_f \end{aligned} \quad (4)$$

Если вынужденные элементы (i_f, Ω_f) известны, то сделав обратное преобразование в выражении (3), можно по имеющимся оскулирующим элементам (i, Ω) вычислить собственные элементы (i_p, Ω_p) .

Благодаря существованию семейств, периодические изменения наклонов орбит относительно эклиптики, вызванные вековыми возмущениями, легко обнаруживаются на распределении оскулирующих элементов (i, Ω) рис. 1 (слева). Точки, образующие плотные волны синусоид на распределении, представляют собой элементы орбит астероидов, принадлежащих отдельным семействам. Форма этих синусоид содержит информацию об ориентации вынужденной плоскости. Амплитуда синусоид соответствует наклону вынужденной плоскости к эклиптике, а положение максимума соответствует долготе ее восходящего узла. Значение наклона, около которого совершается колебание такой кривой, равно среднему собственному наклону орбит астероидов соответствующего семейства. Переход к вынужденной плоскости позволяет легко выделять отдельные семейства по собственным наклонам, так как для собственных элементов (i_f, Ω_f) синусоиды преобразуются в прямые линии рис. 1 (справа).

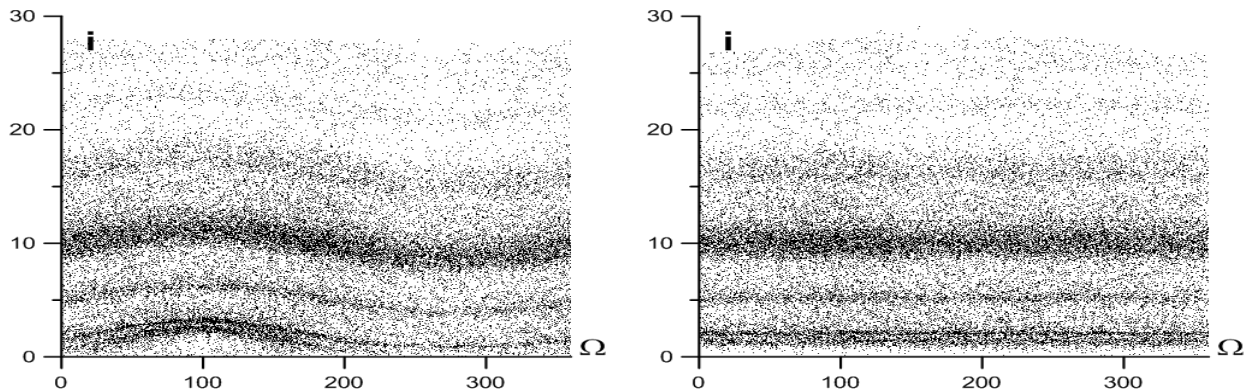


Рис. 1. Распределение оскулирующих (слева) и собственных (справа) элементов (i, Ω) для астероидов с большими полуосями в интервале 2.8-3.2 а.е.

В действительности кривые на рис. 1 (слева), конечно, не являются синусоидами. При уменьшении собственных наклонов ниже удвоенного значения вынужденного наклона, кривые начинают искажаться таким образом, что при собственном наклоне, совпадающем с наклоном вынужденной плоскости, от синусоиды остается только верхняя половина. Это хорошо видно на рис. 1, где у самой нижней линии, соответствующей семейству Фемиды, обрезается ее нижняя часть.

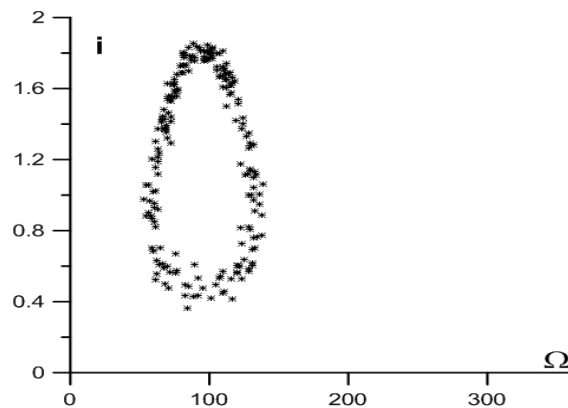


Рис. 2. Распределение оскулирующих элементов (i, Ω) орбит астероидов семейства (1128) Astrid.

При дальнейшем уменьшении собственного наклона верхняя половина синусоиды замыкается. На рис. 2. изображена такая замкнутая кривая, образованная оскулирующими элементами (i, Ω) орбит астероидов с маленькими собственными наклонами $0^{\circ}.7$, принадлежащих семейству (1128) Astrid. В случае, когда орбиты астероидов имеют такие маленькие собственные наклоны, узлы их орбит не совершают обычного обратного движения по эклиптике, а либрируют около узлов вынужденной плоскости. При стремлении собственного наклона к нулю эта замкнутая кривая стягивается в точку, соответствующую элементам вынужденной плоскости. В этом случае плоскость орбиты астероида совпадает с плоскостью прецессии, и поэтому никаких вековых изменений наклона относительно плоскости эклиптики не происходит.

Все, сказанное о наклонах орбит, относится и к эксцентриситетам, так как после представления эксцентриситета в виде $e = \sin \varphi$ уравнения (1) и (2) становятся одинаковыми. Для простоты понимания можно рассматривать угол φ как наклон к эклиптике некоторой фиктивной плоскости, долгота восходящего узла которой совпадает с долгой той же перигелия орбиты астероида. Тогда взаимосвязь между собственными (φ_p, π_p) , вынужденными (φ_f, π_f) и оскулирующими (φ, π) элементами будет более наглядной, так как будет описываться прецессионным движением построенной фиктивной плоскости около некоторой вынужденной плоскости, соответствующей эксцентриситетам. В результате, связь между этими элементами будет выражена формулой, аналогичной (3):

$$\begin{pmatrix} \sin \varphi \sin \pi \\ -\sin \varphi \cos \pi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} = M(\varphi_f, \pi_f) \begin{pmatrix} \sin \varphi_p \sin \pi_p \\ -\sin \varphi_p \cos \pi_p \\ \cos \varphi_p \end{pmatrix} \quad (5)$$

Собственный эксцентриситет и собственная долгота перигелия могут быть легко получены из этого выражения. Зависимость между оскулирующими элементами (e, π) будет иметь такой же вид, как и зависимость между элементами (i, Ω) , если не считать сдвига по оси абсцисс. Это будет кривая, близкая к синусоиде для орбит с собственными эксцентриситетами больше удвоенного значения вынужденного эксцентриситета, верхняя половина синусоиды для промежуточных значений этого параметра и замкнутая кривая для орбит, значения собственных эксцентриситетов которых меньше вынужденного эксцентриситета. В последнем случае вместо поступательного прямого движения перигелиев орбит имеет место их либрация около положения вынужденного перигелия. После исключения вынужденного эксцентриситета, все описанные кривые должны превратиться в прямые линии. Таким образом, собственные эксцентриситеты орбит астероидов, принадлежащих отдельному семейству, различаются между собой значительно меньше, чем оскулирующие. Поэтому они используются для поиска семейств астероидов.

4. Поиск семейств среди троянцев

Получить собственные элементы не представляет труда, если нам известны вынужденные элементы. Но вычисление вынужденных элементов – это очень сложная задача. Имеется только одна крупная популяция астероидов, для которой вынужденные элементы известны без вычислений - это троянцы Юпитера. Из вековой теории [3] следует, что на расстоянии от Солнца, равном большой полуоси орбиты возмущающей планеты, вынужденные элементы совпадают с элементами орбиты большой планеты. Поэтому в качестве вынужденных элементов для троянцев необходимо принять значения соответствующих элементов орбиты Юпитера: $i_f = 1^{\circ}.3$, $\Omega_f = 100^{\circ}.5$, $e_f = 0.049$. Вынужденная долгота перигелия различается для двух групп троянцев. Вынужденный

перигелий орбит троянцев, которые движутся, опережая Юпитер, вблизи точки либрации L4, располагается на расстоянии 60° впереди перигелия орбиты Юпитера, поэтому для них вынужденная долгота перигелия $\pi_f = 74^\circ.5$. Для L5-троянцев, вынужденный перигелий находится на таком же расстоянии позади перигелия орбиты Юпитера, поэтому для этой группы троянцев $\pi_f = 314^\circ.5$.

Распределение оскулирующих элементов (e, π) для большинства троянцев выглядит как замкнутая кривая, подобно рис.2, поэтому характер движения перигелиев орбит троянцев в основном будет либрационным. Это является следствием того, что их собственные эксцентриситеты близки по значению к вынужденному эксцентриситету.

С использованием вынужденных элементов по оскулирующим элементам орбит троянцев были вычислены собственные элементы. Исходные значения оскулирующих элементов были взяты из каталога MPC, версии Апр. 2012. Для вычислений были использованы орбиты всех известных астероидов-троянцев, которые наблюдались более чем в одной оппозиции. Все элементы были приведены к одной эпохе JD=2456600.5. В результате, для L4-троянцев были вычислены 2647 систем собственных элементов, и для L5-троянцев - 1496. Обнаружить существование густонаселенных семейств астероидов можно и без вычисления собственных элементов. Отчетливо прорисованная синусоида на распределении оскулирующих элементов (i, Ω) в группе L4 на рис. 3 создана астероидами семейства (3548) Eurybates. На распределении собственных элементов эта кривая превращается в прямую линию.

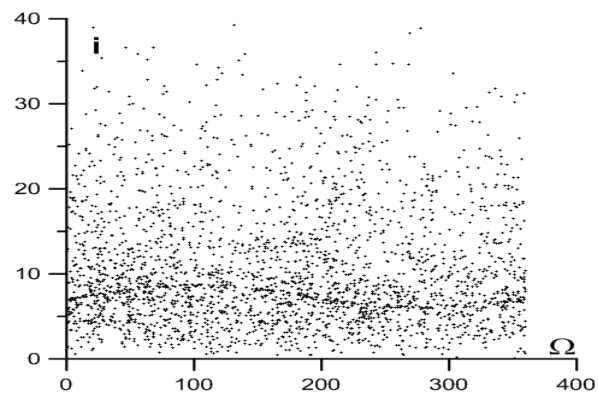


Рис. 3.

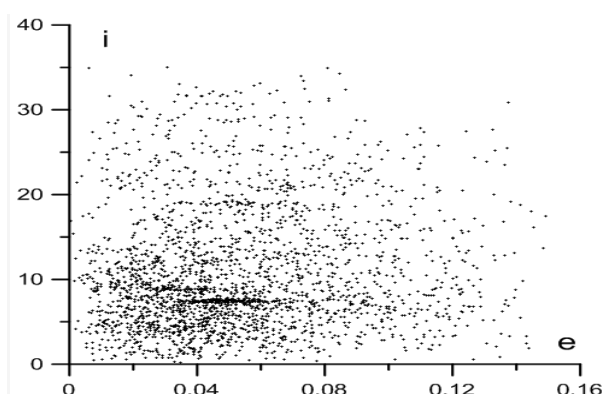


Рис. 4.

В пространстве собственных элементов точки, соответствующие элементам (e, i) орбит астероидов из одного семейства, располагаются более компактно. Поэтому в распределении собственных элементов могут проявиться семейства, которые на распределениях оскулирующих элементов не были заметны. Так, в распределении, построенном для собственных элементов (e, i) на рис. 4, хорошо заметны два семейства, тогда как в распределении оскулирующих элементов они не были видны. Первое семейство – это (3548) Eurybates с собственными наклонами 7° . Второе проявившееся семейство (2148) Eryx имеет собственные наклоны в области 9° .

Для более точного выделения членов семейств можно произвести поиск плотных скоплений точек в трехмерном пространстве собственных элементов (a, e, i). Величина большой полуоси в данном случае соответствует ее оскулирующему значению. Для поиска можно использовать критерий расстояния между двумя точками. Для того чтобы уравнивать эти элементы в правах, преобразуем их таким образом, чтобы все три элемента менялись в пределах от 0 до 1. После этого, в полученном пространстве элементов будем искать скопления точек, расстояния между которыми не превышают заданного условного значения. Это расстояние будет характеризовать плотность населенно-

сти семейства в описанном пространстве элементов. Будем считать, что очередной астероид, представленный точкой в пространстве собственных элементов, принадлежит найденному семейству, если эта точка отстоит по крайней мере от трех (или другого числа) уже найденных точек этого семейства на расстояние, не превышающее условного расстояния. Задав расстояние для поиска небольшим, можно выделить самые плотные ядра семейств. При увеличении условного расстояния, к семействам будут присоединяться более разреженные их оболочки, пока не будет достигнута плотность фона, при которой границы между семействами исчезают.

При такой организации поиска, среди троянцев L4 обнаруживаются, как и ожидалось 2 семейства. Семейство (3548) Eurybates плотное, определяется уже при небольших значениях условного расстояния, состоит из более 200 членов. Второе найденное семейство (2148) Epeios менее плотное, содержит около 70 астероидов. Вероятным семейством является скопление низкой плотности (624) Hektor с наклонами около 18°. Что касается остальных малочисленных скоплений, пока еще недостаточно оснований называть их семействами. В области точки либрации L5 никаких семейств астероидов не найдено.

Литература

1. *C. Beaugé and F. Roig* (2001) A semianalytical model for the motion of the Trojan asteroids: Proper elements and families, *Icarus*, vol. 153, pp. 391-415.
2. *Bendjoya Ph., Zappalà V.* (2002) Asteroid Family Identification, in *Asteroids III*, pp. 613–618, University of Arizona Press.
3. *Brouwer D. and van Woerkom A.J.J.* (1950) The secular variations of the orbital elements of the principal planets. *Astron. Papers Amer. Ephem.*
4. *Brož, J. Rozehnal.* (2010) Eurybates — the only asteroid family among Trojans? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 000, 1–11.
5. *Hirayama K.* (1918) Groups of asteroids probably of common origin. *Astron. J.*, 31, 185–188.
6. *Knezevic Z., Lemaître A., Milani A.* (2002) The Determination of Asteroid Proper Elements, p. 603-612 in *Asteroids III*, University of Arizona Press.

A CALCULATION OF PROPER ELEMENTS AND IDENTIFICATION OF TROJAN FAMILIES

Vinogradova T.A.

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

A geometrical method of secular perturbations elimination for asteroid orbits is proposed. The method uses simple formulas of coordinate transformation only. Proper elements were computed for Trojans of Jupiter and asteroid families were searched in this population. A method of family identification uses the criterion of a distance between two points in the 3-dimensional proper elements space. As a result, two reliable families are found among L4-trojans: (3548) Eurybates and (2148) Epeios. (624) Hektor is a probable family. No families are identified near the libration point L5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДОВ 2011 AG5 И 2007 VK184

Галушина Т.Ю., Авдюшев В.А.

Томский государственный университет, Томск, Россия

В данной работе приводятся результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции двух астероидов, имеющих в настоящее время по данным NASA оценку 1 по Туринской шкале, – 2007 VK184 и 2001 AG5. Рассматриваются различные способы построения начального облака неопределенности – линейный метод Монте-Карло и бутстрэп метод, для проверки достоверности полученных результатов во всех случаях варьируется число тестовых частиц.

1. Введение

Астероиды 2007 VK184 и 2011 AG5 привлекают к себе особое внимание тем, что это единственные объекты, которые в настоящее время имеют по данным NASA оценку 1 по Туринской шкале, наивысшую среди имеющихся для других астероидов (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>). В связи с этим представляет интерес изучение их вероятностной орбитальной эволюции с целью оценивания вероятности столкновения астероидов с Землей. В настоящее время разработаны различные способы построения на основе наблюдений начального облака виртуальных астероидов, отображения его во времени и последующего оценивания вероятности столкновения. Причем для астероидов, наблюдавшихся на короткой орбитальной дуге, таких как 2007 VK184, оценки, полученные разными методами, могут существенно отличаться.

В настоящей работе для построения начального облака виртуальных астероидов использовались метод Монте-Карло и бутстрэп метод, исследование вероятностной эволюции осуществлялось путем численного моделирования орбитального движения каждой тестовой частицы. Кроме того, для проверки достоверности полученных результатов во всех случаях варьировалось количество тестовых частиц. Выполнено сравнение между собой результатов, полученных нами и другими авторами.

2. Улучшение орбит астероидов и построение начального облака неопределенности методом Монте-Карло

Для каждого из рассматриваемых объектов предварительно было проведено исследование зависимости обусловленности матрицы нормальных уравнений от выбора начальной эпохи. Для улучшения орбиты была выбрана эпоха с наилучшей обусловленностью. В табл. 1 и 2 показаны результаты улучшения орбиты методом наименьших квадратов по имеющимся оптическим наблюдениям. В табл. 1 N – число наблюдений, используемых при улучшении; Δt – интервал наблюдений в юлианских сутках; $\sigma(\mathbf{X}_0)$ – среднеквадратическая ошибка МНК-оценки вектора положения астероида \mathbf{X}_0 ; σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений в угловых секундах; $\mu(A)$ – число обусловленности матрицы нормальных уравнений. Как видно из таблицы, астероид 2011 AG5 наблюдался на протяжении почти года, и его орбита достаточно хорошо определена. Иная ситуация у объекта 2007 VK184: он наблюдался на интервале всего 60 сут, его орбита определена несколько хуже, чем у 2011 AG5.

В табл. 2 представлены полученные в результате улучшения на момент наилучшей обусловленности t_0 элементы орбиты: большая полуось a , эксцентриситет e , наклонение плоскости орбиты к эклиптике i , долгота узла Ω и аргумент перигелия ω . Статистическое моделирование облака виртуальных астероидов на основе ковариационной матрицы выполнялось путем линейного отображения многомерного (шестимер-

ного) стандартного нормального распределения в пространство орбитальных параметров относительно точки, соответствующей номинальному динамическому состоянию астероида. В качестве линейного оператора была выбрана матрица Холецкого такая, что умножение ее на транспонированную дает ковариационную матрицу.

Таблица 1. Данные о наблюдениях и результатах МНК-оценок параметров орбит астероидов.

Объект	N	Δt , сут.	$\sigma(\mathbf{X}_0)$, а.е.	σ , "	$\mu(A)$
2007 VK184	101	60 (2007–2008 гг)	$2.5 \cdot 10^{-6}$	0.425	$3.1 \cdot 10^5$
2011 AG5	210	317 (2010–2011 гг)	$5.8 \cdot 10^{-7}$	0.410	$1.9 \cdot 10^6$

Таблица 2. Кеплеровские элементы орбит астероидов.

Объект	Эпоха	a , а.е.	e	i , °	Ω , °	ω , °
2011 AG5	10.03.2011	1.430910	0.390670	3.6809	135.7266	53.4819
2007 VK184	13.11.2007	1.726408	0.569830	1.2223	254.0638	73.0482

3. Исследование вероятностной орбитальной эволюции

Эволюция облака виртуальных астероидов исследовалась при использовании численной орбитальной модели на основе дифференциальных уравнений движения, которые интегрировались методом Эверхарта 19-го порядка с переменным шагом. При улучшении орбит и исследовании эволюции в модель сил были включены возмущения от всех больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли и релятивистских эффектов от Солнца. Кроме того, при моделировании движения астероида 2007 VK184 учитывалось световое давление. Исследование эволюции выполнялось на кластере СКИФ Cyberia с помощью специально разработанного программного обеспечения [1]. Интервал численного моделирования определялся сохранением точности интегрирования порядка 10^{-8} а.е.

Результаты исследования вероятностной эволюции астероидов показаны на рис. 1 и в табл. 3. На рис. 1 показаны сближения АСЗ с большими планетами и эволюция кеплеровских элементов: большой полуоси, эксцентриситета и наклона (относительно эклиптики). Эволюция для ансамбля из 100 тыс. частиц показана серым фоном, номинальная орбита выделена черным.

Астероид 2007 VK184 сближается с Венерой, Землей и Марсом. Из рис. 1 видно, что под влиянием тесных сближений элементы орбиты изменяются скачкообразно и облако неопределенности существенно увеличивается. Под влиянием нескольких повторяющихся сближений облако становится настолько большим, что дальнейший прогноз теряет смысл.

Аналогичная картина наблюдается для астероида 2011 AG5: под влиянием сближений с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом облако неопределенности значительно увеличивается в размерах. Следует отметить, что объект на номинальной орбите испытывает сближения только с Землей и Марсом.

В табл. 3 представлена информация о попадании виртуальных астероидов в сферу тяготения Земли. Расстояния приведены в радиусах сферы тяготения ($R_{\text{сф}} = 254316$ км) и в радиусах Земли ($R_{\oplus} = 6378.14$ км). Для астероида 2007 VK184 даны результаты для 1 млн. тестовых частиц на интервале времени до 2100 года, а для 2011 AG5 – для 100 тыс. Для краткости приведены только даты, в которые через сферу тяготения проходит больше десяти тестовых частиц.

Как видно из табл. 3, для каждого астероида были выявлены траектории, приводящие к столкновению с Землей. Одна тестовая частица астероида 2007 VK184 столк-

вается с Землей 3 июня 2048 г., для 2011 AG5 29 траекторий приводят к столкновению 5 февраля 2040 г.

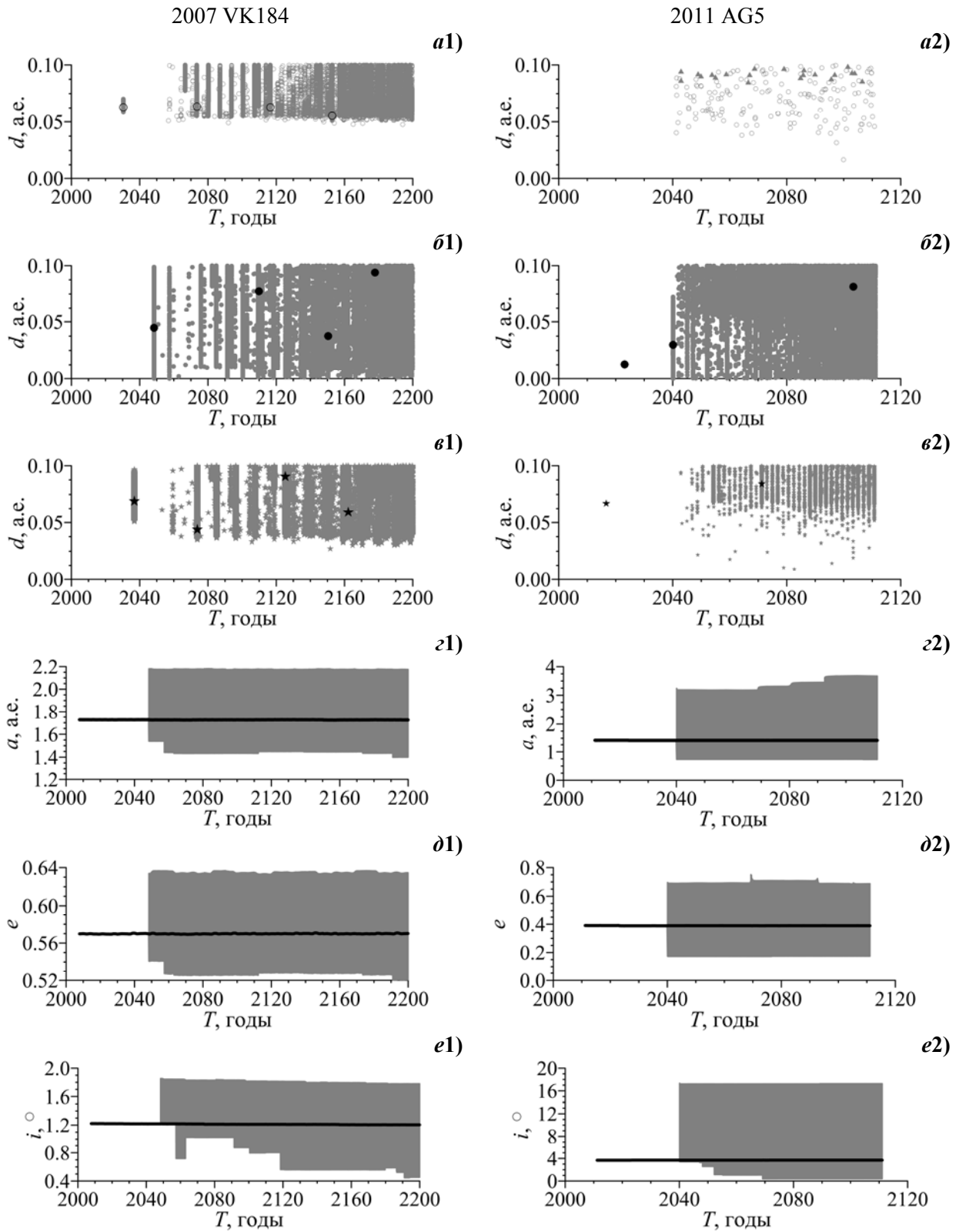


Рис. 1. Астероиды 2007 VK184 и 2011 AG5: сближения с Меркурием (« Δ »), Венерой (« $\langle \rangle$ ») (а1, а2), Землей (б1, б2) и Марсом (в1, в2), эволюция большой полуоси (г1, г2), эксцентриситета (д1, д2) и наклонения плоскости орбиты к эклиптике (е1, е2).

Таблица 3. Данные о попадании тестовых частиц астероидов 2007 VK184 и 2011 AG5 в сферу тяготения Земли.

Дата	Число частиц, попадающих в сферу тяготения, %	Минимальное расстояние до геоцентра		Число частиц, сталкивающихся с Землей, %
		$R_{сф}$	R_{\oplus}	
2007 VK184				
2-3.06.2048	0.0068	0.025	0.99	0.0001
3.06.2057	0.0018	0.028	1.12	–
3-4.06.2091	0.0055	0.729	29.08	–
4.06.2100	0.0066	0.612	24.42	–
2011 AG5				
4-5.2.2040	0.769	0.004	0.15	0.029
5.2.2052	0.043	0.036	1.44	–
4.2.2069	0.512	0.153	6.10	–
4.2.2081	0.072	0.220	8.77	–
4-5.2.2086	0.485	0.333	13.27	–
4-5.2.2093	0.105	0.348	13.88	–
5.2.2095	0.015	0.449	17.89	–
4-5.2.2098	0.017	0.574	22.89	–
6.2.2103	0.029	0.553	22.06	–
5-6.2.2105	0.059	0.421	16.80	–
6.2.2110	0.126	0.605	24.13	–
6.2.2111	0.011	0.592	23.59	–

Заметим, что по оценкам NASA вероятность столкновения для этих объектов составляет $5.5 \cdot 10^{-4}$ и $2.0 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Наши оценки ниже оценок NASA на полтора порядка для астероида 2007 VK184 и почти на порядок для 2011 AG5. Возможными причинами данного расхождения являются использование разного набора наблюдений, отличия в модели сил и способах построения начального облака неопределенности. Для подтверждения полученных результатов мы рассмотрели облака, построенные нелинейным методом.

3. Сравнение различных способов построения начальных облаков неопределенности

Метод построения начального облака неопределенности на основе ковариационной матрицы (метод Монте-Карло) опирается на ряд предположений. В частности предполагается, что вариации ошибок наблюдений связаны с соответствующими вариациями оценок параметров орбиты объекта линейным образом, и сами ошибки наблюдений случайны и независимо распределены по нормальному закону. Рассмотрим выполнение этих условий на примере астероидов 2007 VK184 и 2011 AG5.

Коэффициент нелинейности [2] на начальный момент времени для 2007 VK184 составил $2.2 \cdot 10^{-4}$, а для 2011 AG5 – $4.4 \cdot 10^{-4}$. Коэффициенты нелинейности для данного астероида не превышают порогового значения 0.1 [2], т.е. первое условие можно считать выполненным. О распределении ошибок наблюдений косвенным образом можно судить по распределению невязок. На рис. 2 в качестве примера приведены распределения невязок для прямого восхождения, кривыми представлены приближения гауссо-

выми распределениями. Из рис. 2 видно, что распределение невязок немного отличается от нормального, что позволяет предположить, что закон распределения ошибок наблюдений тоже не является нормальным. В таком случае применять метод построения облака неопределенности эллипсоидальной формы некорректно. Одним из возможных вариантов в такой ситуации является использование бутстрэп метода [3].

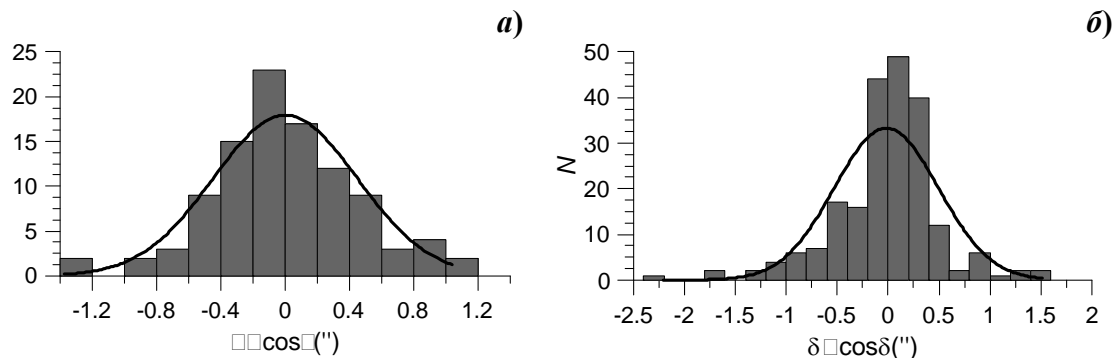


Рис. 2. Астероиды 2007 VK184 (а) и 2011 AG5 (б): распределение невязок наблюдений.

Бутстрэп метод реализуется как многократное решение задачи наименьших квадратов (определение орбиты) с искусственными выборками наблюдений, получаемыми из исходных наблюдений путем так называемого выбора с возвращением. При этом объемы исходной и моделируемых выборок должны быть одинаковыми. Таким образом, в выборках одни наблюдения могут встречаться несколько раз, а другие — ни разу. Следовательно, бутстрэп метод фактически реализуется посредством решения взвешенной задачи наименьших квадратов, где в качестве весовой выступает случайная диагональная матрица с целочисленными неотрицательными диагональными элементами, каждый из которых указывает на то, сколько раз в выборке используется соответствующее реальное измерение. Причем полагается, что появление каждого измерения в генерируемой выборке при каждом выборе с возвращением равновероятно.

На рис. 3 показаны проекции на плоскость геоэкватора начальных облаков неопределенности, полученных двумя методами. Крестиком и звездочкой выделены начальные данные, приводящие к столкновению с Землей и полученные методами Монте-Карло и бутстрэп соответственно. Координаты тестовых частиц показаны относительно номинальных орбиты, элементы которых даны в табл. 2. Из рисунка видно, что облака, построенные разными методами, отличаются незначительно. Однако облако, построенное бутстрэп методом, немного больше по размеру.

Далее нами была исследована орбитальная эволюция всех построенных облаков неопределенности. В результате исследования во всех рассматриваемых облаках выявлены траектории, приводящие к столкновению с Землей. В табл. 4 показано процентное соотношение таких траекторий в различных облаках неопределенности для различного числа тестовых частиц. Из таблицы видно, что для разных облаков оценки вероятности столкновения отличаются незначительно. Можно сделать вывод, что для астероидов 2007 VK184 и 2011 AG5 возможно использование любого из рассмотренных методов.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведено исследование вероятностной орбитальной эволюции астероидов 2007 VK184 и 2011 AG5, имеющих оценку 1 по Туринской шкале по данным NASA. Начальные облака виртуальных астероидов моделировались статистически линейным и нелинейным (бутстрэп) методами с выборками различного объема. Для каждого объекта были выявлены траектории, приводящие к столкновению с Землей. Однако полученные нами значения вероятности столкновения

оказались несколько меньше значений, полученных NASA. В соответствие с представленными в работе результатами только астероид 2011 AG5 относится к первой категории по Туринской шкале. Для уточнения оценок вероятности столкновения 2007 VK184 необходимо получение новых наблюдений.

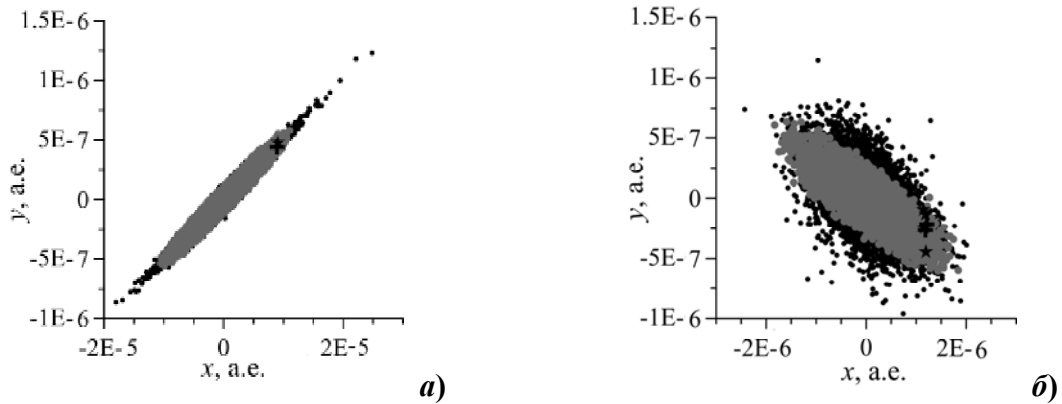


Рис. 3. Начальные облака неопределенности астероидов 2007 VK184 (а) и 2011 AG5 (б), полученные методом Монте Карло (серые точки) и бутстрэп методом (черные точки) в проекции на плоскость экватора (а)

Таблица 4. Процент траекторий, приводящих к столкновению.

Число тестовых частиц	2007 VK184		2011 AG5	
	Монте Карло	Бутстрэп	Монте Карло	Бутстрэп
10 тыс	0	0	0.02	0.04
100 тыс	0	0	0.029	0.025
1 млн	0.0001	0.0002	0.0295	0.0273

Данная работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Соглашение № 8343).

Литература

1. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землёй, в среде параллельного программирования // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 10/2. С. 12–19.
2. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т.46. № 3. С. 209–222.
3. Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. The Annals of Statistics. 1979. V. 7. P. 411–420

RESEARCH OF PROBABILITY ORBITAL EVOLUTION OF ASTEROIDS 2011 AG5 AND 2007 VK184

Galushina T.Yu., Avdushev V.A.
Tomsk State University, Tomsk, Russia

The paper is devoted to research of probabilistic orbital evolution of asteroids 2007 VK184 and 2011 AG5 that have estimation 1 on Torino scale according to NASA. Different methods for construction of uncertainty clouds are considered.

ЭФЕМЕРИДНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЕЖЕГОДНИКОВ

**Глебова Н.И., Лукашова М.В., Нецветаева Г.А., Парийская Е.Ю.,
Свешников М.Л., Скрипниченко В.И.**

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

В ИПА РАН разработаны две пользовательские программные системы, предназначенные для вычисления эфемерид, PersAY и «Штурман».

Система PersAY фактически является электронной версией «Астрономического ежегодника». PersAY предназначен для решения задач, связанных с вычислением гелио-, гео- и топцентрических эфемерид Солнца, Луны, больших планет и звезд в различных шкалах времени. Система построена на той же эфемеридной, теоретической и вычислительной базе, что и «Астрономический ежегодник». Кроме эфемериды EPM 2004, используемой в АЕ, вычисления можно производить по эфемериде DE405/LE405. Система предлагается пользователям для вычислений на интервале 2010–2015 гг.

Астронавигационные эфемериды представляет интерактивная система «Штурман», позволяющая пользователю решать задачи мореходной астрономии из списка задач двухлетнего «Морского астрономического альманаха», который включает в себя не только задачи по вычислению эфемерид, как в «Морском астрономическом ежегоднике», но и задачи по определению поправки курсоуказателя и положения судна из наблюдений навигационных светил. Пользователь, введя через Интернет исходные данные, получает протокол решения в форме публикуемых в объяснении к Альманаху примеров в полном соответствии с точностью, принятой в этом издании (0.1), что имеет немаловажное учебно-методическое значение.

В настоящее время в ИПА РАН издается 3 эфемеридных издания. Одно профессиональное российское эфемеридное издание «Астрономический ежегодник» (АЕ) [1] и два морских навигационных издания «Морской астрономический ежегодник» (МАЕ) [2] и двухлетний «Морской астрономический альманах» (МАО-2) [3]. В них публикуются эфемериды Солнца, Луны, планет и звезд в соответствии со стандартами, утвержденными Международным астрономическим союзом. Для вычисления данных для этих изданий создана программная система Вюка, позволяющая на языке СЛОН вычислять эфемериды (язык системы многофункциональной программной системы ERA, разработанной в ИПА РАН [4]). Для подготовки к публикации табличной составляющей изданий создан комплекс «Издатель», который на языке TEX помогает создавать оригинал-макеты изданий. Однако встала задача создания программных систем для пользователей, нуждающихся в вычислении более обширного круга астрономических данных – не только гео- и гелио-, но и топцентрических эфемерид. Облегчить пользователям проведение эфемеридных вычислений предназначена программная система PersAY [5].

1. PersAY

Системой PersAY могут пользоваться также пользователи МАЕ, поскольку издание АЕ содержит практически все виды эфемерид МАЕ. Однако каждое из изданий предназначено для выполнения определенного вида вычислений и это накладывает на них отпечаток:

1. МАЕ предназначен для быстрых вычислений с невысокой точностью 0.1, что требует наличия в издании разностей и вспомогательных итерационных таблиц.

2. В МАЕ используется шкала прогнозируемого на год вперед среднего солнечного времени UT1, в отличие от АЕ, где за исключением некоторых таблиц используется шкала равномерного времени TT.

3. В МАЕ используется 1-я экваториальная система координат с часовым углом, что удобнее для решения навигационных задач, в АЕ – 2-я экваториальная система координат с прямым восхождением.

4. Моменты восходов/заходов в АЕ приведены только для территории России и охватывают широты 30 – 70°N. Не приводятся азимуты Солнца для моментов восходов/заходов.

Несмотря на данные несоответствия, система PersAY позволяет вычислять все используемые при решении астронавигационных задач эфемеридные данные для топцентра на заданный момент наблюдения в выбранной шкале времени.

Однако использование штурманами системы PersAY несколько осложняется богатством возможностей этой системы. При решении каждой задачи требуется ввести множество разных параметров (выбрать систему времени, координат, и т.д.), что очень удобно для проведения профессиональных астрономических расчетов, но совершенно избыточно при вычислении данных для решения навигационных задач. Нет в системе и возможности обработки наблюдений и решения обратной (навигационной) задачи – по наблюдениям получить местоположение наблюдателя.

Вычисления в системе PersAY производятся с точностью аналогичной точности АЕ в соответствии со стандартами, принятыми Генеральными ассамблеями Международного астрономического союза. В системе PersAY фундаментальные эфемериды Солнца, Луны и больших планет могут быть вычислены как по теории DE405/LE405, так и по отечественной теории ЕРМ 2004, созданной в ИПА РАН. В 2007 г. на Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВНО-2007)» теория ЕРМ 2004 рекомендована к использованию при проведении эфемеридных расчетов в России. Отметим, что с издания на 2006 г. теория ЕРМ 2004 используется при вычислении АЕ, а с издания на 2009 г. используется и в МАЕ.

Для вычисления используется прецессия P03 и нутация IAU2000A. В системе доступны каталог звезд списка АЕ, построенный на базе звездных каталогов FK6 и HIPPARCOS, и каталог FK5. Оба каталога привязаны к ICRS. Практически все 160 навигационных звезд входят в список АЕ. Для вычисления поправок за орбитальное движение двойных звезд использовался «Четвертый каталог орбит двойных звезд» WH-4. Значения элементов вращения и размеры планет и их спутников основаны на системе элементов вращения планет 2006 г.

Кроме того, подробное теоретическое обоснование алгоритмов для вычисления эфемерид и сами алгоритмы опубликованы в «Расширенном объяснении к «Астрономическому ежегоднику» [6].

Система позволяет создать и решить задачу одного из 4 типов, соответствующих различным разделам АЕ:

1. Эфемериды: вычисление гелио-, гео- и топцентрических эфемерид Солнца, Луны, больших планет и звезд; вычисление эфемерид для физических наблюдений тел Солнечной системы;

2. Астрономические явления: определение условий видимости объектов (вычисление моментов восходов, заходов, кульминаций, вычисление азимутов и высот для этих моментов); получение информации о солнечных и лунных затмениях, прохождении Меркурия и Венеры по диску Солнца;

3. Планетные конфигурации: вычисление гелио-, гео-, топцентрических планетных конфигураций;

4. Ежедневные эфемериды: одновременное определение на заданный момент времени видимых координат Солнца, Луны и больших планет, а также моменты их кульминаций, восходов и заходов и азимуты на эти моменты.

Всего система позволяет решать более 40 типов задач. В разделах «Эфемериды» и «Астрономические явления» можно вычислить практически все виды данных, используемых для решения астронавигационных задач.

После выбора типа задачи на экран выводится панель «Параметров» задачи, на которой можно проверить и изменить параметры задачи. Для каждого типа задачи отбражается свой набор параметров. При создании новой задачи все параметры принимают значения по умолчанию, которые впоследствии можно изменять. Некоторые параметры вводятся путем выбора значений из фиксированного списка или включенных в систему таблиц и изменению не подлежат.

Пользователю предоставлена возможность проводить вычисления в разных системах времени: UT1, UTC, TDB, TT, TAI, ZT, Москва (шкала UT1 – всемирное время среднего гринвичского меридиана, – соответствует шкале $T_{гр}$, используемой в навигационных изданиях).

При выборе шкалы времени UT1 желательно также ввести поправку в секундах ΔT – постоянную на всем интервале вычисления эфемерид и связанную с переходом от неравномерной шкалы UT1 к равномерным шкалам. Если поправка ΔT не введена, то при выборе шкалы UT1 ее значение на каждый момент эфемериды вычисляется с помощью таблицы параметров вращения Земли eor.era, составленной по данным файла C04n.dat Международной службы вращения Земли и систем отсчета (IERS). Вариант файла C04n.dat (с прогнозом ИПА РАН на 2 года) обновляется с заданной пользователем периодичностью с сайта <ftp://www.ipa.nw.ru/pub/EOS/IAA/c04n.dat>. Но для решения навигационных задач достаточно вводить поправку ΔT с точностью до секунд вручную (как это и сделано в МАЕ), или можно обновлять данные таблицы параметров вращения Земли не чаще, чем один раз за полгода, что позволяет использовать систему для вычислений в автономном плавании.

Система PersAY создана на базе разработанного в ИПА РАН многоцелевого программного комплекса ERA (Ephemeris Research in Astronomy; Эфемеридные Расчеты в Астрономии), являющегося универсальным инструментом для вычисления точных эфемерид и обработки любых типов позиционных астрономических наблюдений. Система ERA имеет собственный входной язык SLON. В основу PersAY заложена версия этой системы AEWInERA, адаптированная к задачам АЕ.

Система PersAY предназначена для работы на персональных компьютерах с операционной системой MS Windows XP, Vista.

2. Штурман

Главными задачами, решаемыми мореходной астрономией, являются определение места судна в море и поправки курсоуказателя по наблюдениям небесных светил. Навигационные издания МАЕ и двухлетний МАА-2 предоставляют только эфемериды для решения навигационных задач. С 2009 г. эфемеридная и вычислительная база подготовки этих печатных изданий полностью соответствует базе АЕ и поэтому система PersAY может быть использована для вычисления топоцентрических координат навигационных светил для подготовки к наблюдениям и проведения их обработки.

Тем не менее, проблемы снижения вероятности ошибок при обработке наблюдений и повышение точности вычислений эфемерид вряд ли может быть достигнуто модернизацией пособий по астронавигации в печатной форме. Поэтому исключительно важным направлением развития морских астронавигационных эфемерид стало созда-

ние специализированных программных комплексов для решения судоводительских задач.

Эта работа была начата в ИТА РАН в 90-х годах. Были опубликованы два выпуска «Астронавигационного альманаха» для использования при вычислениях на программируемых микрокалькуляторах. Для персональных компьютеров были созданы системы ОКО и Kodisav для решения некоторых астронавигационных задач. Однако работы в этом направлении были прерваны до 2008 г.

В 2009 г. в ИПА РАН разработана интерактивная система удаленного доступа «Штурман», предназначенная для решения задач, описанных в МАА-2. Пользователь вызывает через Интернет страницу системы, на которой он может выбрать задачу из предлагаемого списка. В диалоговом окне соответствующей задачи пользователю предлагается ввести исходные данные задачи. После расчетов в полном соответствии с точностью, принятой в МАА-2 и МАЕ, организуется протокол решения в форме, принятой в объяснении к МАА-2. Такая форма выдачи результата позволяет пользователю получить не только окончательный результат, но и проследить весь процесс вычислений и применения таблиц МАА-2 для различных наборов данных, что имеет немаловажное учебно-методическое значение.

В отличие от PersAY система позволяет не только вычислять эфемериды светил, но и проводить обработку наблюдений для некоторых навигационных светил с построением высотных линий положения на планшете для определения места судна графическим методом.

Система «Штурман» применяется для контрольных вычислений примеров при подготовке издания МАА-2. Однако система обладает рядом недостатков. Это фиксированная в рамках печатных изданий точность решения, небольшой набор примеров (точнее, упрощенных схем решения 20-ти задач), зависимость от интернета и др. В связи с этим необходимо создание полноценной электронной версии астронавигационных эфемерид и программной системы для решения основных штурманских задач по определению места судна по наблюдениям небесных светил.

3. Навигатор

В ИПА РАН начата работа по проектированию полной электронной версии МАЕ и МАА-2 (система «Навигатор») с характеристиками, учитывающими пожелания штурманов ВМФ РФ [7]. Предполагаемая общая структура системы показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура системы «Навигатор».

Основные требования к функциональному наполнению системы:

– система не должна представлять собой электронную копию (образ) страниц МАЕ или простой набор файлов данных;

– срок действия эфемерид должен быть как минимум 5 лет;

– точность эфемерид может быть задана по выбору в 0.'1 или 0.'01;

– система должна обеспечивать решение следующих основных астронавигационных задач:

1. планирование и определение условий наблюдений (подбор объектов, моменты восходов/заходов и кульминаций светил и пр.);

2. уравнивание и редукция измеренных высот и азимутов светил;

3. определение местоположения судна с оценкой точности решения по какому-либо методу улучшения счислимого места или прямому (независимого от результатов счисления) методу определения координат;

4. определение поправки курсоуказателя различными способами.

– представление решения должно сопровождаться протоколом решения по стандартным (принятым на флоте) шаблонам.

– система должна включать графические средства, облегчающие подготовку, проведение и обработку наблюдений;

– система должна содержать справочный блок («школу») и контекстную помощь;

– возможно наличие вспомогательных таблиц МАЕ (МАО-2) в форме, удобной для вывода на печать;

– результаты всех астроопределений места в течение рейса должны заноситься в журнал (архив).

Предполагается, что электронная версия будет поставляться вместе с печатной версией МАЕ или МАО-2 и сможет облегчить доступ к эфемеридам и их ввод в автоматизированные навигационные комплексы.

Следует отметить, что, несмотря на появление спутниковых и инерциальных навигационных систем, мореходная астрономия еще сохраняет свое значение. Более того, создание электронной версии не означает завершения издания бумажных носителей эфемеридной морской астронавигационной информации. Использование пособий на бумажном носителе, в отличие от электронных вычислительных средств, не зависит от наличия электропитания на борту и автоматических технических средств навигации и возможно в любых условиях плавания и на любом плавсредстве. В настоящее время основная функция печатных пособий – быть резервным вычислительным средством для «ручного» автономного решения мореходных задач. Пособия используются также как справочники и учебные пособия.

Недаром не только у нас в стране, но и за рубежом (несмотря на огромный технический прогресс в области электронной вычислительной техники и создания развитых спутниковых навигационных систем) до сих пор издаются различные морские пособия и таблицы.

Например, поправка компаса, как суммарное влияние земного и судового магнитного поля на магнитную стрелку компаса, в открытом море определяется пока только астрономическими методами. Постоянный же учет поправки компаса на каждой вахте, при смене курса, после стрельб и т.д. является одним из важнейших условий безопасного и экономичного плавания.

4. Заключение

Система PersAY в версии 1.0 является важным этапом в создании электронной версии АЕ и предоставляет широкие возможности для пользователей. Во многом это связано с использованием в качестве опорного программного обеспечения комплекса

ERA, позволяющего проводить вычисления самых разнообразных типов эфемерид с графическим представлением результатов. Благодаря использованию в системе той же теоретической и вычислительной базы, как и в АЕ, систему с полным правом можно рассматривать как электронную версию печатных эфемерид.

Дистрибутив демонстрационной версии системы PersAY со сроком действия на 2010–2011 гг. размещен на сайте ИПА РАН

<ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/PERSAY/persay.zip>.

Система Штурман уже используется для решения отдельных навигационных задач в качестве учебного пособия и доступна на сайте <http://shturman.ipa.nw.ru>. Однако отсутствие автономности сильно ограничивает ее использование. Поэтому в ближайшее время усилия лаборатории будут направлены на разработку автономных электронных астронавигационных систем с расширенным кругом решаемых задач и с повышенной точностью.

Литература

1. *Глебова Н.И.* отв. ред. Астрономический ежегодник на 2013 г. СПб.: Наука, 2012. 684 с.
2. *Лукашова М.В.* отв. ред. Морской астрономический ежегодник на 2012 г. СПб.: ГУНиО, 2011. 336 с.
3. *Свешников М.Л.* отв. ред. Морской астрономический альманах на 2013–2014 гг. СПб.: Наука, 2012. 392 с.
4. *Krasinsky G.A., Vasiljev M.V.* ERA-7. Knowledge Base and Programming System for Dynamical Astronomy. Manual. SPb: IAA RAS, 2001.
5. *Глебова Н.И., Лукашова М.В., Михеева В.Д., Нецветаева Г.А., Парийская Е.Ю., Свешников М.Л., Скрипниченко В.И.* Система PersAY (Персональный астрономический ежегодник). Версия 1.0. Сообщения ИПА РАН, СПб, 2010. № 185, 68 с.
6. *Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В., Малков А.А., Питьева Е.В., Румянцева Л.И., Свешников М.Л., Фурсенко М.А.* Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику». Труды ИПА РАН, 2004. Вып. 10, 488 с.
7. *В.Н. Костин, М.В. Лукашова, М.Л. Свешников* Морской астрономический ежегодник – настоящее и будущее. Записки по гидрографии. СПб: ГУНИО МО РФ, 2006. № 267, с. 21–25.

EPHEMERIS SOFTWARE SYSTEMS FOR ASTRONOMICAL YEARBOOKS

**Glebova N.I., Lukashova M.V., Netsvetaeva G.A., Parijskaja E.Ju.,
Sveshnikov M.L., Skripnichenko V.I.**

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

Two software systems for calculation ephemerides PersAY and “Shturman” have been developed in IAA of RAS.

PersAY system is the electronic version of “Astronomical yearbook”. PersAY is intended for the calculation of helio-, geo- and topocentric ephemerides of the Sun, the Moon, major planets and stars in various time scales. The system was constructed on the same ephemeris, theoretical and computing basis, as “The Astronomical yearbook”. It is possible to calculate on DE405/LE405 ephemerides in addition to EPM 2004 used in AY. The system allows the user to compute ephemerides in time span 2010–2015.

The interactive system “Shturman” enables the user to solve a problem of nautical astronomy from the list of examples biennial “Nautical astronomical almanac” such as the calculation of ephemerides of navigational bodies, compass correction and positions of ship from navigating bodies’ observations. The user, having input the initial data by means of Internet, receives the report of the decision in the form of Almanac examples in entirely accordant to the accuracy of this edition (0.1) that has educational significance.

НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ (JHK) НА ТЕЛЕСКОПЕ АЗТ-24 ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Горшанов Д.Л., Архаров А.А., Ларионов В.М., Ефимова Н.В.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

В 2007–2012 гг. на телескопе АЗТ-24, принадлежащем Пулковской обсерватории и установленном в центральных Апеннинах в Италии, проведены наблюдения 10 астероидов в полосах JHK. По наблюдениям определены показатели цвета J–H и H–K. Для трёх астероидов построены кривые блеска в указанных фотометрических полосах и кривые изменения показателей цвета. Выявлены изменения показателей цвета величиной около 0.05^m и более. Для всех астероидов получены астрометрические положения. Определено, что наилучшим опорным каталогом для астрометрической обработки наблюдений астероидов в полосах JHK при малом поле зрения является обзор 2MASS.

1. Введение

В 2007–2012 годах на телескопе АЗТ-24, оборудованном инфракрасной камерой SWIRCAM, проводились пробные наблюдения астероидов с целью выяснения возможности определения с помощью этого инструмента фотометрических характеристик малых тел Солнечной системы в инфракрасной области, построения их кривых блеска, а также попутного определения их астрометрических положений.

Российский телескоп АЗТ-24, созданный на ЛОМО и принадлежащий Пулковской обсерватории (ГАО РАН), установлен на наблюдательной станции в Кампо-Императоре (Италия) на высоте 2150 метров над уровнем моря [1]. Он имеет оптическую схему Риччи-Кретьена, диаметр зеркала 1.1 м, фокусное расстояние 7.9 м. Приёмником излучения служит инфракрасная камера «SWIRCAM» производства США с матричным детектором «PicNic», охлаждаемым жидким азотом до температуры около 75°K . Детектор имеет размер 256×256 пикселей. Поле зрения АЗТ-24 с этим приёмником составляет около $4'.4 \times 4'.4$. В камере установлены широкополосные светофильтры J, H, K, несколько узкополосных светофильтров и две гризмы для спектров низкого разрешения.

Всего наблюдалось 10 астероидов (см. Таблицу 1). Один из них, $5407 = 1992 \text{ AX}$, является астероидом, пересекающим орбиту Марса (почти сближающимся с Землёй: перигелийное расстояние — 1.33 а.е.); астероид (624) Нектор — известный представитель группы троянцев Юпитера; остальные принадлежат к главному поясу. При обработке кадров, полученных для построения кривой блеска астероида (762) Pulcova, было замечено, что на них присутствуют слабые изображения еще одного астероида — $14685 = 1999 \text{ XM172}$. Семь из десяти астероидов являются двойными — кроме (32) Ромона, (111) Ате и 14685.

Наблюдения проводились в трёх широких инфракрасных полосах J, H, K. Большая часть объектов наблюдалась в течение нескольких ночей по несколько точек за ночь. В 2010 и 2012 годах были проведены наблюдения кривых блеска трёх астероидов.

Большая часть астероидов главного пояса имела сравнительно высокий блеск: от 9^m до 13.5^m в полосе J (примерно 10^m – 15^m в полосе V) и сравнительно небольшое видимое движение: примерно $15''$ – $30''$ за час. Это позволяло накапливать сигнал от них в течение экспозиции, а форма их изображений на кадре была такой же, как и у окружающих звёзд (см. Рис. 1 а и с).

Астероид 5407 имел значительно меньший блеск: около 16.5^m в полосе V и, соответственно, около 15.5^m в полосе J . К тому же, он довольно быстро двигался в период наблюдений: порядка $110''$ за час. Это приводило к тому, что на кадре его изображение выглядело как след, распределенный по нескольким пикселям, имеющим очень небольшие отсчёты относительно отсчётов фона; причём они не увеличивались со временем экспозиции (в отличие от отсчётов пикселей в изображениях звёзд), а увеличивалась длина следа — ситуация обычная для наблюдений быстро движущихся астероидов (см. Рис. 1*b*). По этим двум причинам, результаты наблюдений этого астероида имеют весьма невысокую точность (и фотометрическую, и позиционную).

Астероид 14685, в силу своих малых размеров, выглядит на кадрах очень тусклым (около $17^m.5$ в фильтре J), на пределе видимости (см. Рис. 1*c*). Точность его измерений получилась, естественно, ещё хуже.

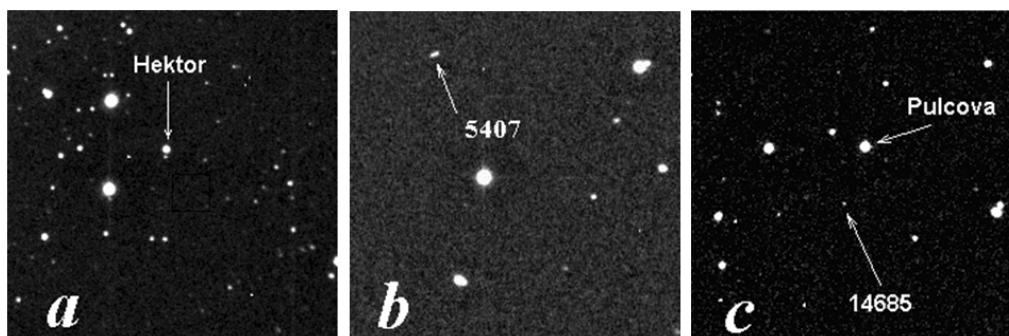


Рис. 1. Кадры с астероидами (указаны стрелками), полученные на телескопе АЗТ-24 в фильтре J : *a* — (624) Hektor, 13 ноября 2010 года; *b* — 5407, 23 июня 2007 года; *c* — (762) Pulcova и 14685, 4 ноября 2010 года.

2. Определение инфракрасных показателей цвета

Фотометрическая обработка полученных кадров производилась при помощи автоматической программы «Апекс-П», созданной в ГАО РАН [2]. В качестве опорного фотометрического каталога использовался инфракрасный обзор 2MASS.

В Таблице 1 приведены результаты определения показателей цвета наблюдавшихся астероидов. Значения, полученные из коротких серий кадров, и значения, полученные при построении кривых блеска по длинным сериям кадров (см. следующий пункт), приведены по отдельности.

В полосе K блеск в среднем определяется наименее уверенно из-за более нестабильного фона неба в этом спектральном диапазоне. Соответственно, показатель цвета $H-K$ также определяется с меньшей уверенностью.

Средняя точность отдельных определений блеска в полосах J , H , K составила 0.04^m (в лучших случаях достигая 0.01^m), а отдельных определений показателей цвета $J-H$ и $H-K$ — 0.06^m (лучшие случаи — 0.02^m). Средняя точность показателей цвета, усредненных по нескольким наблюдениям, — 0.04^m (0.01^m — 0.02^m в лучших случаях).

Плохую точность имеют фотометрические измерения астероида 5407 — в силу указанных в предыдущем пункте причин. Единственное определение его показателя цвета $H-K$ является очень неуверенным.

Для астероида 14865 из-за чрезвычайной тусклости его изображения удалось получить лишь грубую оценку показателя цвета $J-H$, несмотря на довольно длинный ряд измерений.

Для трёх из наблюдавшихся астероидов в литературе были найдены результаты определения показателей цвета $J-H$ и $H-K$, выполненные ранее другими авторами. Таблица 2 позволяет сравнить их с результатами, полученными в настоящей работе.

(Для большей наглядности из статьи [3] были взяты не только средние значения показателей цвета, но и их отдельные определения.) Результаты хорошо согласуются между собой.

Таблица 1. Определения показателей цвета астероидов в ближнем инфракрасном диапазоне. CI — средневзвешенное значение показателя цвета за период наблюдений, s — оценка его точности, Δ и N — диапазон и количество значений, использованных для его получения, N_n — количество ночей, в которые были получены значения показателя цвета. Звездочкой (*) отмечены строки, содержащие результаты для показателей цвета, полученные при построении кривых блеска по длинным сериям кадров; остальные результаты получены из коротких серий кадров.

Астероид	<i>J-H</i>					<i>H-K</i>				
	CI	s	Δ	N	N_n	CI	s	Δ	N	N_n
(32) Pomona	0.34	0.07	0.29 – 0.42	9	5	0.12	0.06	–0.03 – 0.16	10	5
(111) Ate	0.25	0.06	0.17 – 0.28	6	2	0.04	0.07	0.03 – 0.09	4	1
(121) Hermione	0.37	0.06	0.34 – 0.42	8	2	0.03	0.03	0.01 – 0.07	5	2
(130) Elektra	0.36	0.06	0.21 – 0.43	20	7	0.11	0.08	–0.08 – 0.16	16	6
(130) Elektra*						0.09	0.04	0.03 – 0.13	26	1
(379) Huenna	0.33	0.05	0.31 – 0.44	5	2	0.21	0.07	0.10 – 0.27	5	2
(624) Hektor	0.47	0.04	0.44 – 0.49	6	2	0.14	0.05	0.09 – 0.23	9	3
(624) Hektor*	0.47	0.03	0.40 – 0.50	31	1					
(702) Alauda	0.40	0.03	0.37 – 0.41	4	2	0.13	0.05	0.10 – 0.19	4	2
(762) Pulcova	0.38	0.05	0.37 – 0.40	7	2	0.19	0.03	0.11 – 0.22	10	3
(762) Pulcova*	0.35	0.02	0.32 – 0.38	41	1					
5407	0.50	0.09	0.35 – 0.63	3	3	0.51	0.10		1	1
14685*	0.90	0.30	0.47 – 1.61	32	1					

Таблица 2. Сравнение результатов фотометрии, полученных в настоящей работе, с данными из литературы для трёх астероидов. В столбце «Источник» для данных, найденных в литературе, цифрами в квадратных скобках дана ссылка, а для данных, полученных в настоящей работе и выделенных жирным шрифтом, указаны годы наблюдений.

	<i>J-H</i>	σ_{J-H}	<i>H-K</i>	σ_{H-K}	Источник
(624) Hektor					
1985-09-23	0.46	0.03	0.17	0.09	
1985-09-24	0.44	0.02	0.10	0.02	[1]
Среднее	0.45	0.02	0.11	0.02	
	0.45		0.14		[2]
	0.47	0.04	0.14	0.05	2008
	0.47	0.03			2010
(379) Huenna					
	0.39		0.08		[2]
	0.33	0.05	0.21	0.07	2008, 2012
(32) Pomona					
	0.37		0.08		[3]
	0.34	0.07	0.12	0.06	2007, 2008

3. Наблюдения кривых блеска и цвета

С целью построения кривых блеска и проверки изменений показателя цвета со временем были получены плотные ряды кадров для астероидов (624) Hektor и (762) Pulcova в ноябре 2010 г. и (130) Elektra в мае 2012 г. При наблюдении кривых блеска в течение нескольких часов снимались поочередно кадры в фильтрах *J* и *H* или *H* и *K*.

Фотометрическая обработка в этом случае выполнялась с помощью программы апертурной фотометрии, созданной на основе известного программного пакета для ПЗС-фотометрии «S-Extractor». Для каждого из астероидов подбирались две опорных звезды, имеющих наилучшую фотометрическую точность на кадрах. Благодаря тому, что наблюдения велись поочередно в двух фильтрах, появилась возможность проследить изменения показателя цвета астероида при вращении главного компонента — построить кривую цвета. На рисунках 2, 3, 4 для трёх астероидов приведены полученные кривые блеска (на верхних панелях) и кривые цвета (на нижних панелях с увеличенным масштабом по оси звёздных величин).

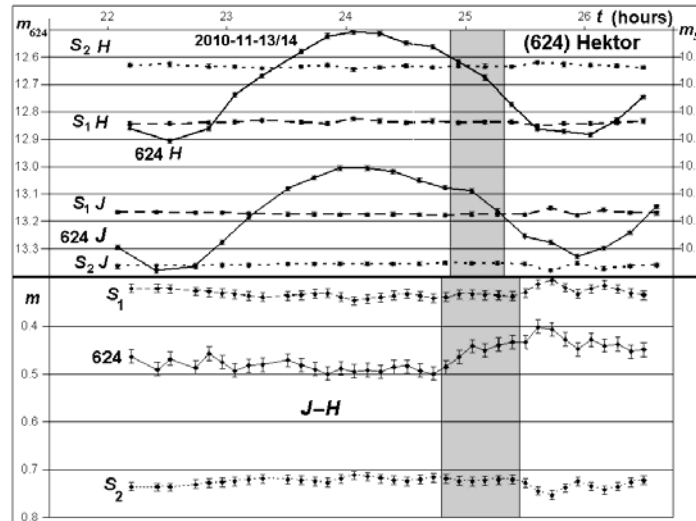


Рис. 2. Кривые блеска в полосах J и H и кривая показателя цвета $J-H$ астероида (624) Нектор. S_1 и S_2 — кривые опорных звёзд (для сравнения). Правая шкала ординат — звёздные величины опорных звёзд, левая — астероида. Серым цветом выделен диапазон времени, когда изображение астероида сливалось с изображением одной из слабых звёзд; в это время значения могут быть немного искажены.

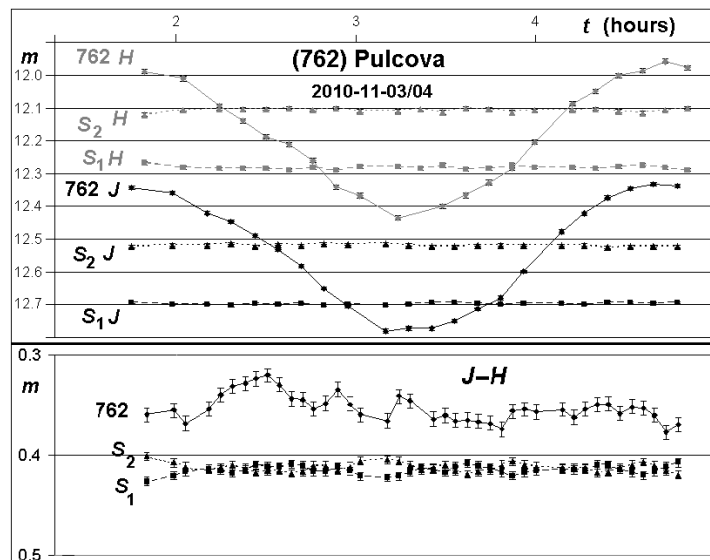


Рис. 3. Кривые блеска в полосах J и H и кривая показателя цвета $J-H$ астероида (762) Пулкова. S_1 и S_2 — кривые опорных звёзд (для сравнения).

Для всех астероидов длительность наблюдений кривой блеска составила более половины периода вращения главного компонента вокруг своей оси ((624) Нектор —

6.921 ч., (762) Pulcova — 5.839 ч., (130) Elektra — 5.225 ч.; см. <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>). Амплитуда изменений блеска у астероидов (624) Hektor и (762) Pulcova составила примерно $0.3^m - 0.4^m$, у (130) Elektra — около 0.2^m .

Заметно, что колебания показателя цвета $J-H$ астероидов значительно больше, чем у опорных звезд, и превышают оценки ошибок его определения (Рис. 3, 4). Максимальные изменения достигают почти 0.10^m у астероида (624) Hektor и около 0.05^m — у (762) Pulcova. Это может свидетельствовать о неоднородности цвета поверхности астероидов и, возможно, неоднородности минерального состава поверхности. Изменения цвета $H-K$ астероида (130) Elektra (Рис. 5) определяются менее надёжно в связи с меньшей точностью фотометрических измерений. Причинами этого являются меньшая точность фотометрии в полосе K , худшие погодные условия во время наблюдений и то, что имеющиеся на кадрах звёзды, используемые в качестве опорных, на $1.5^m - 2^m$ слабее объекта. В Таблице 3 приведены средние точности определения относительных колебаний блеска и показателей цвета астероидов.

Таблица 3. Средние точности определения относительных фотометрических характеристик астероидов при построении кривых блеска и цвета.

	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>J-H</i>	<i>H-K</i>
(624) Hektor	0.008	0.008		0.011	
(762) Pulcova	0.005	0.007		0.008	
(130) Elektra		0.012	0.028		0.030

Помимо кривой блеска астероида (130) Elektra, наблюденной 11 мая 2012 г., небольшие серии наблюдений в фильтре H были выполнены в две другие ночи этого же сезона. После приведения результатов наблюдений к единичным топоцентрическому и гелиоцентрическому расстояниям полученные значения были приведены к одной фазе с учётом известного периода в 5.225 часа — см. Рис. 5. Большая часть кривых хорошо совпадает, но несколько точек, наблюденных 10 мая 2012 г., сильно отклоняются, что может быть связано с недостаточно хорошим состоянием неба во время наблюдений.

4. Позиционные измерения

Полученные на АЗТ-24 кадры с астероидами были также обработаны с целью получения точных положений астероидов. Астрометрическая обработка осуществлялась с помощью программного пакета «Апекс-II» [2], выполняющего вычисления в автоматическом режиме. Центры изображений звезд определялись путем аппроксимации их профиля двумерной функцией Гаусса. Астрометрическая редукция кадров выполнялась методом восьми постоянных.

С учётом того, что наблюдения велись в ближнем инфракрасном диапазоне и поле зрения телескопа относительно небольшое, содержащее малое количество опорных звёзд, в качестве опорного каталога был выбран инфракрасный обзор 2MASS. Сравнение результатов обработки, выполненной с этим каталогом и с другими (оптическими) астрометрическими каталогами (USNO-B2.0 и UCAC-2) показало, что эти результаты имеют вполне удовлетворительную точность: $0.''2 - 0.''5$ для астероидов с блеском $9^m - 13^m$ в полосе J .

Часть лучших результатов наблюдений каждого из астероидов была послана в Центр малых планет (IAU Minor Planet Center — MPC) — по два-три наблюдения из каждой даты, в которую данный астероид наблюдался. Эти результаты доступны на сайте MPC (<http://www.minorplanetcenter.org>). Телескопу АЗТ-24 в MPC был присвоен кодовый номер обсерватории — C25.

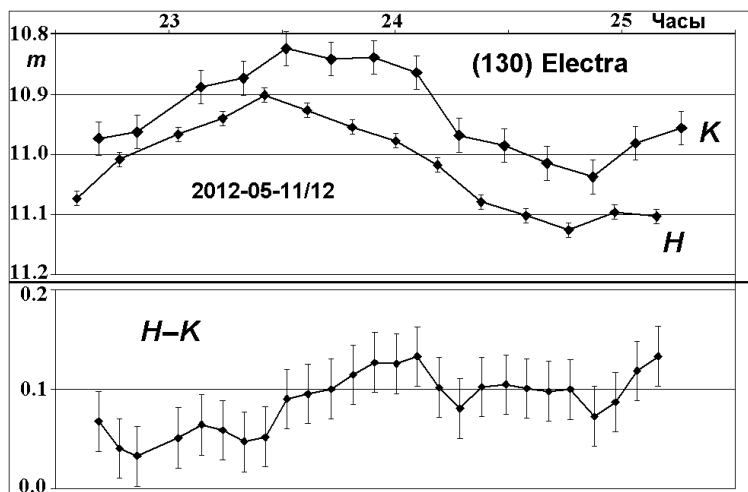


Рис. 4. Кривые блеска в полосах H и K и кривая показателя цвета $H-K$ астероида (130) Elektra.

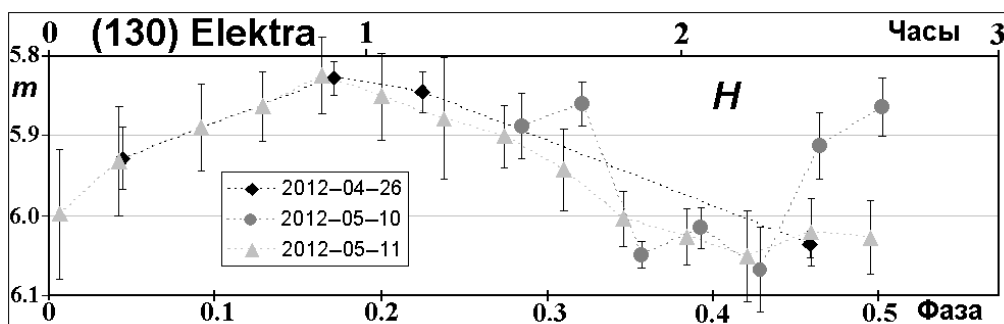


Рис. 5. Результаты трёх ночей наблюдения астероида (130) Elektra в фильтре H , приведённые к одной фазе.

Литература

1. Di Paola A. The IR facility of Campo Imperatore // Mem. S.A.It. 2003. Vol. 74. P. 193–196.
2. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верецагина И.А. Программные пакеты “Апекс-I” и “Апекс-II” для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 6.
3. Veeder G.J., Matson D.L., Kowal C. Infrared (JHK) photometry of asteroids. II. // Astron. J. 1983. V. 88. P. 1060–1063.
4. Smith D.W., Johnson P.E., Buckingham W.L., Shorthill R.W. JHK photometry of selected Trojan and Hilda asteroids // Icarus. 1992. V. 99. Issue 2. P. 485–488.
5. Hahn G., Lagerkvist C.-I. Physical studies of asteroids: XVII. JHK photometry of selected main-belt and near-Earth asteroids // Icarus. 1988. V. 74. Issue 3. P. 454–471.

OBSERVATIONS OF ASTEROIDS IN INFRARED (JHK) WITH AZT-24 PULKOVO OBSERVATORY TELESCOPE

Gorshanov D.L., Arkharov A.A., Larionov V.M., Efimova N.V.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

Infrared (JHK) observations of 10 asteroids were made with AZT-24 Pulkovo observatory telescope situated at central Apennines (Italy). J–H and H–K color indices are measured. Light curves in J, H, K bands and curves of color index changes are observed for 3 asteroids. The color index changes of more than 0.05^m are detected. Astrometric positions for all asteroids are measured. 2MASS is the best catalog for astrometric processing of JHK observations with small field of view.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОРБИТ КОМЕТ

Гусева И.С., Лих Ю.С.

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
Санкт-Петербург*

Происхождение и эволюция комет до настоящего времени является одной из самых интересных и обсуждаемых проблем. Многочисленные варианты моделирования приводят к самым разным результатам. Наше исследование представляет собой небольшой анализ орбит комет, в частности, пространственного распределения перигелиев орбит. Получены результаты, свидетельствующие о концентрации к плоскости Галактики точек перигелиев комет с долгопериодическими ($e > 0.9$), параболическими и гиперболическими орбитами.

Орбиты комет

В работе использованы данные Jet Propulsion Laboratory (JPL), каталог элементов орбит ко времени нашей работы содержал данные о 3 128 кометах. Из рассмотрения были исключены следующие объекты:

1. Небольшие по размеру кометы, наблюдаемые только космическими аппаратами (SOHO, Stereo, SMM, Solwind). Эти 1483 кометы (sungrazers) представляют собой особые объекты, в частности, кометы группы Кройца (Kreutz), Майера (Meyer), Марсдена (Marsden), Крахта (Kraicht). Исследованию этих комет и их происхождению от больших разрушившихся комет посвящено множество работ.

2. Группы комет, представляющих по сути один объект – кометы, распавшиеся на множество частей: 73P/ Schwassmann-Wachmann (66 объектов), C/1882 R1 (Great September comet - 4 объекта), D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9 – 21 объект). Из каждой группы оставлено по одному объекту как представителю исходного объекта.

3. «Очень старые кометы» (до 1760 г.), реконструкция орбит которых выполнена весьма приблизительно – 108 объектов.

После исключения указанных объектов из общего списка осталось 1449 комет, параметры орбит которых определены с разной точностью. Прежде всего, обращает на себя внимание значительная доля наблюдаемых комет с гиперболическими орбитами (эксцентриситет e больше 1). Поэтому для дальнейшего анализа весь каталог был разбит на 4 группы по параметру эксцентриситета орбит.

Таблица 1. Распределение комет по параметру эксцентриситета орбиты.

Эксцентр. орбиты, e	Количество комет	% к общему количест.	Примечание: (кометы, исключенные из списка для исследования)
$e < 0.9$	483	33.3	73P/ Schwassmann-Wachmann - 65 D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) - 20
$0.9 \leq e < 1$	453	31.3	C/1882 R1(Great Sept. comet) - 3
$e = 1$	249	17.2	Sungrazers (SOHO,SMM, SOLWIND, STEREO) - 1483
$e > 1$	264	18.2	

Сравнение наблюдательных данных с результатами моделирования

Представляет определенный интерес сравнение результатов модельных расчетов эволюции кометных орбит (Рис.1) с имеющимися данными по наблюдаемым кометам

(Рис.2). Наличие большого количества короткопериодических комет в пределах 10 ае не соответствует модельным расчетам для возраста Солнечной системы. Отличается и распределение комет по перигелийным расстояниям для долгопериодических комет (по модельным расчетам не должно быть долгопериодических в пределах орбиты Сатурна).

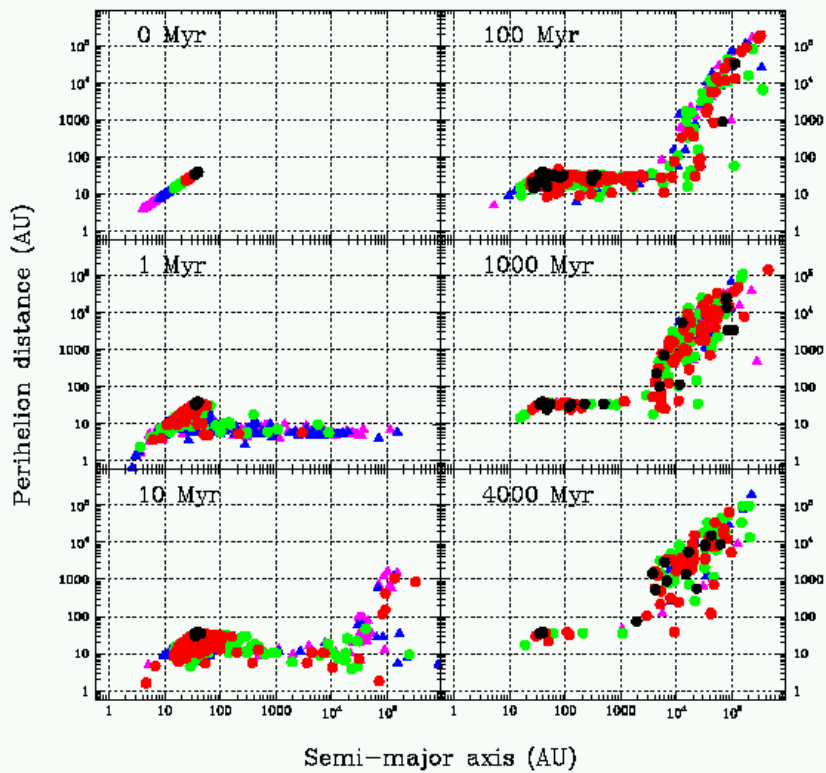


Рис. 1. Моделирование эволюции облака Оорта (Figure 22 из работы [1]).

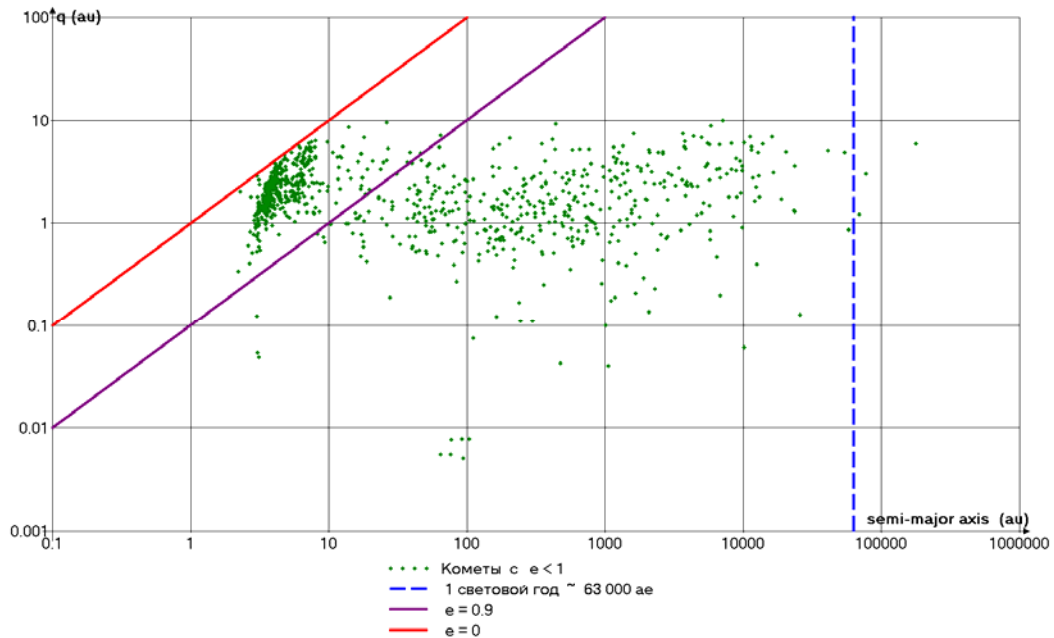


Рис. 2. Распределение комет с эллиптическими орбитами по параметрам большой полуоси и перигелийного расстояния.

Анализ пространственного распределения точек перигелия.

Определенный интерес представляет анализ орбит комет с целью выявления возможных «избранных» направлений. Рис. 3-6 представляют распределение точек перигелия в эклиптической и галактической системах координат.

а). Короткопериодические кометы с эксцентриситетами меньше 0.9

Результат ожидаемый – орбиты этих комет ориентированы в плоскости эклиптики.

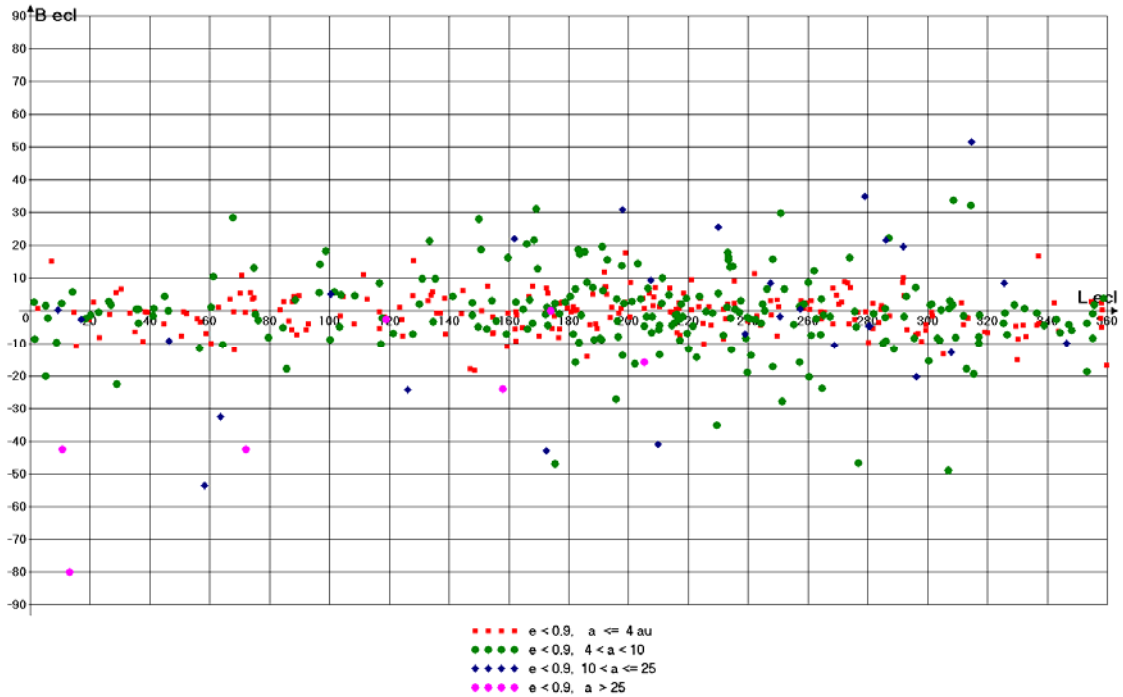


Рис. 3. Координаты перигелиев орбит с $e < 0.9$ в эклиптической системе координат.

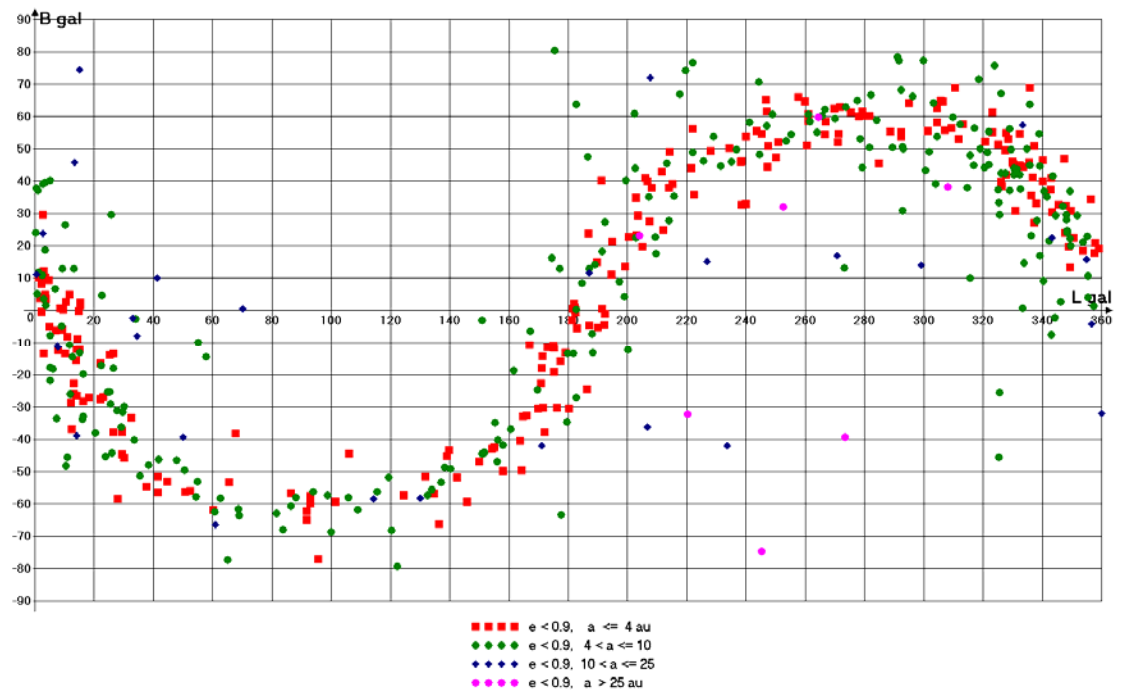


Рис. 4. Координаты перигелиев орбит с $e < 0.9$ в галактической системе координат.

б). Долгопериодические кометы с эксцентриситетами больше 0.9

Перигелии комет с $a > 50$ показывают существенно иное распределение (Рис. 5 и 6), причем в галактической системе координат очевидной становится концентрация точек перигелия к плоскости Галактики, демонстрируя влияние приливных сил Галактики.

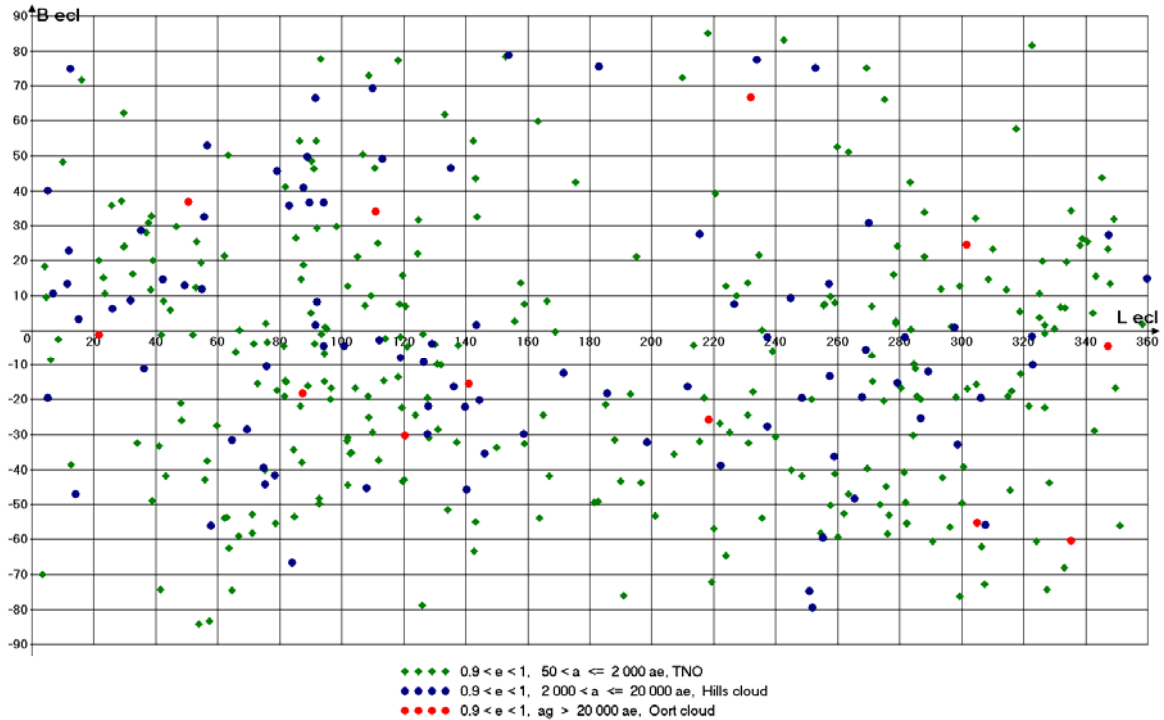


Рис. 5. Координаты перигелиев орбит с $0.9 < e < 1$ и $a > 50$ au в эклиптической системе координат

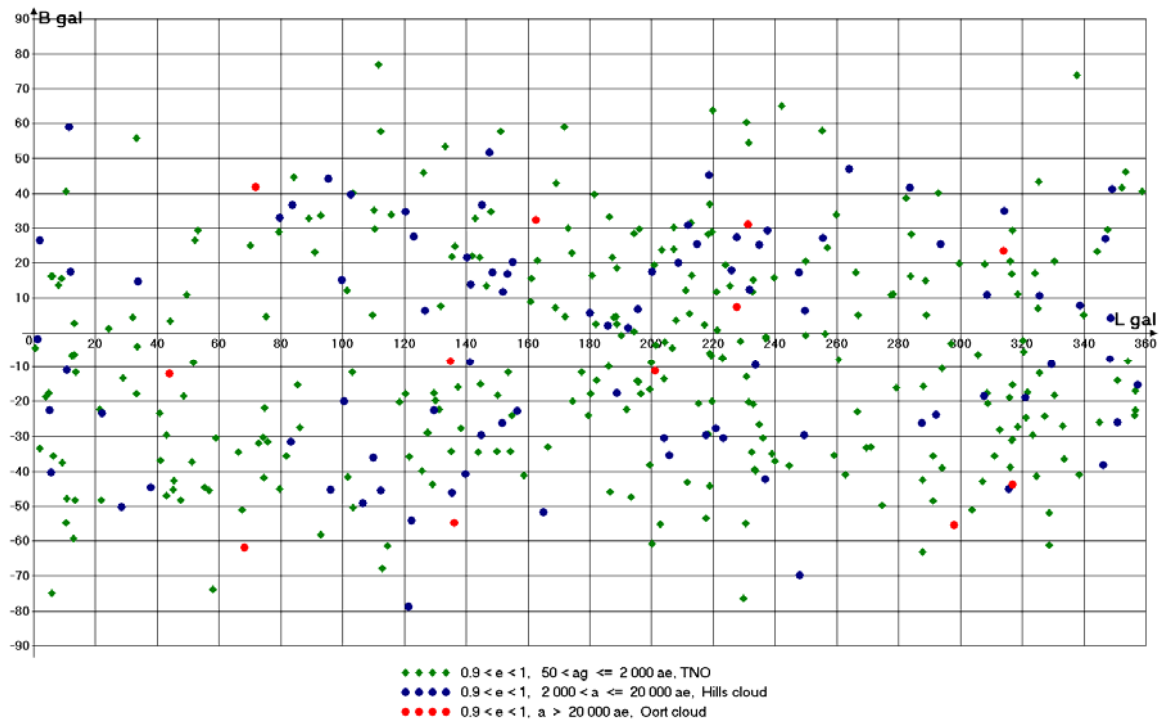


Рис. 6. Координаты перигелиев орбит с $0.9 < e < 1$ и $a > 50$ au в галактической системе координат

Для большей наглядности на следующем Рис. 7 представлена плотность распределения точек перигелия по галактической широте (количество комет в каждом 10-градусном широтном поясе, деленное на площадь пояса).

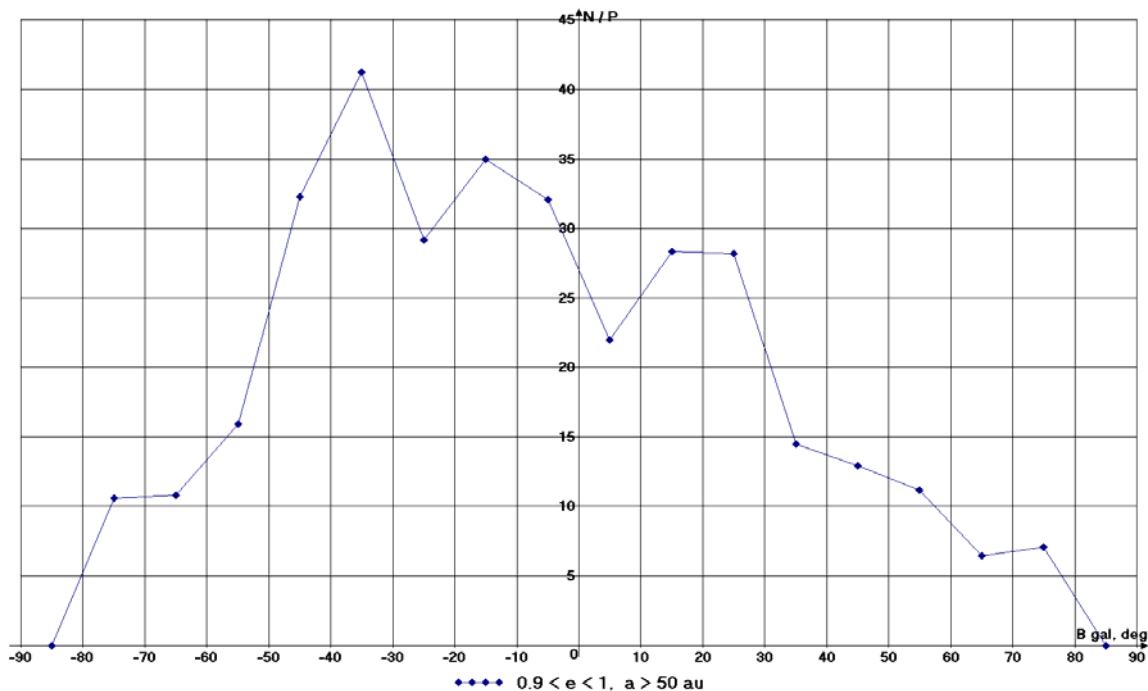


Рис. 7. Плотность распределения координат перигелиев орбит с $0.9 < e < 1$ и $a > 50$ au по галактической широте.

Кометы с параболическими и гиперболическими орбитами имеют очень схожие с предыдущими Рис. 5-7 распределения координат перигелиев (Рис. 8, 9). Некоторое уменьшение плотности точек вблизи плоскости Галактики может быть следствием наблюдательной селекции (трудно искать слабые объекты на фоне Млечного пути).

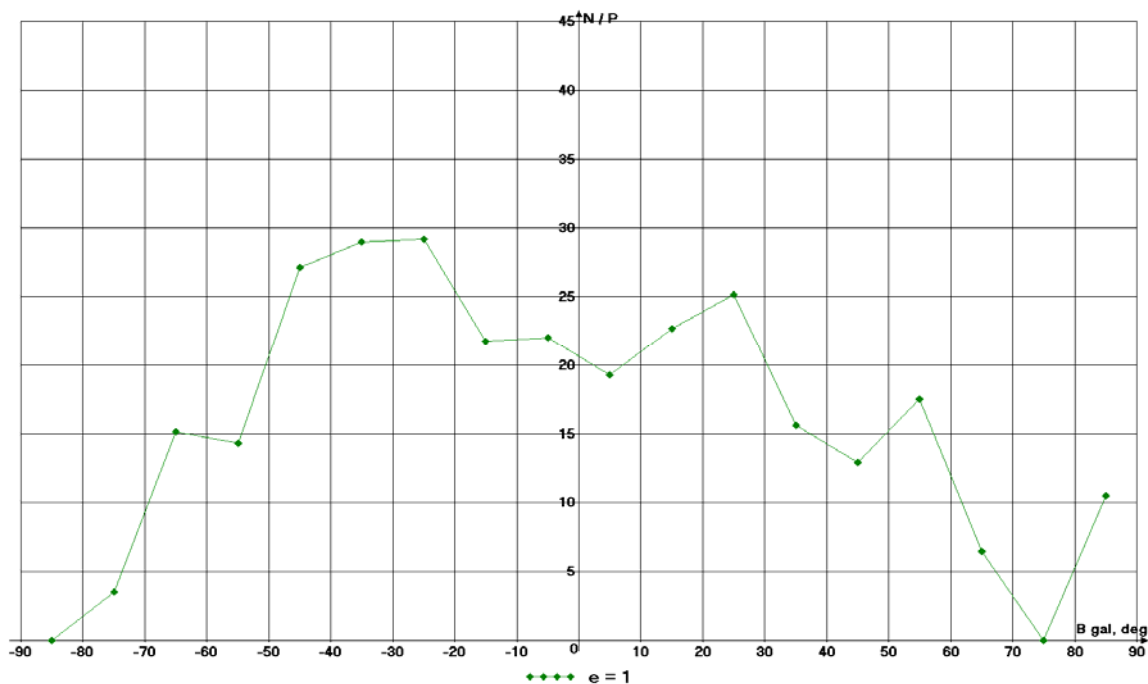


Рис. 8. Плотность распределения координат перигелиев орбит с $e = 1$ по галактической широте.

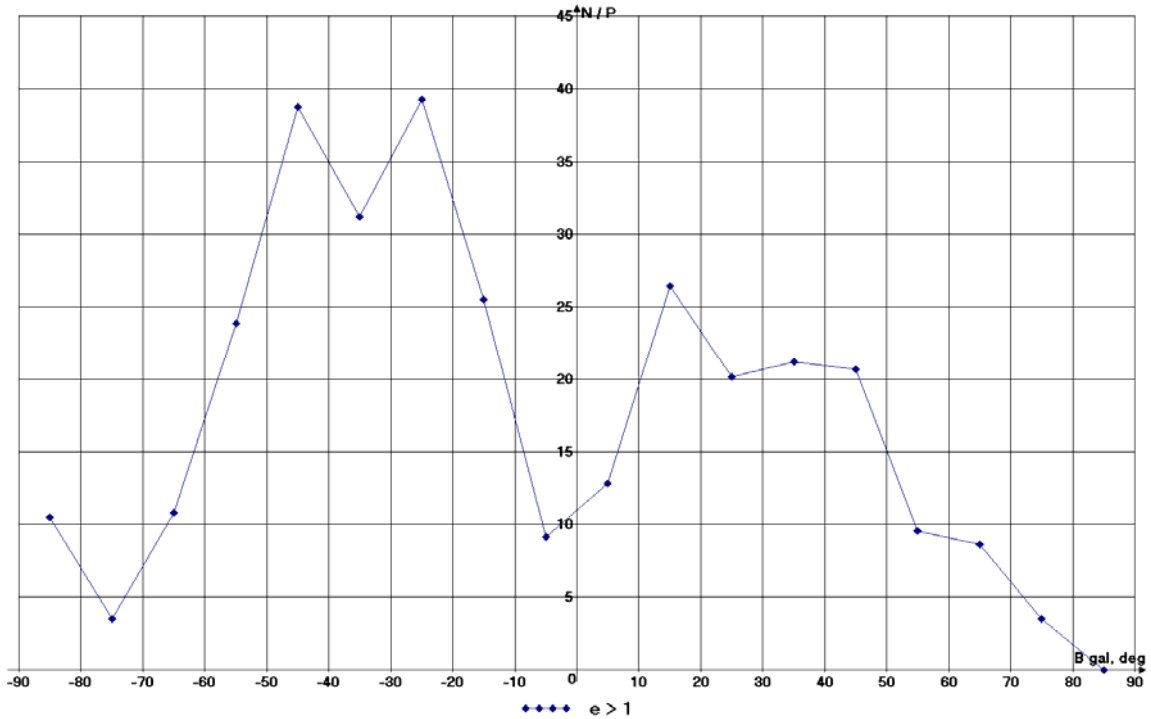


Рис. 9. Плотность распределения координат перигелиев орбит с $e > 1$ по галактической широте.

Вопросы вместо заключения:

Подтверждает ли статистика распределения эксцентриситетов кометных орбит результаты моделирования в [3], т.е. что 90% комет – «пришельцы» из других систем?

Не является ли наличие большого количества «пришельцев» ($e \geq 1$) свидетельством отсутствия внешнего облака Оорта, а $> 20\,000$ au?

Схожесть распределения по галактической широте перигелиев орбит комет с $e > 0.9$, $e = 1$ и $e > 1$, очевидное влияние Галактики и отсутствие видимой связи с эклиптической - не есть ли это подтверждение того, что эти объекты являются скорее «населением» межзвездной среды, чем остатками формирования Солнечной системы?

Литература

1. *Alessandro Morbidelli* (2005). "Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs". arXiv:astro-ph/0512256 [astro-ph].
2. *Dones, L.; Weissman, P.R.; Levison, H.F.; Duncan, M.J.* Oort Cloud Formation and Dynamics ASP Conference Proceedings, Vol. 323, 2004.
3. *Harold F. Levison, Martin J. Duncan, Ramon Brasser, David E. Kaufmann.* Capture of the Sun's Oort Cloud from Stars in Its Birth Cluster. - Science 9 July 2010: Vol. 329 no. 5988, pp. 187-190.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE COMETS ORBITS

Guseva I.S., Likh Yu.S.

Central Astronomical Observatory of the RAS (at Pulkovo)
St Petersburg, Russia

Origin and evolution of comets is one of the most interesting and discussed problems. Numerous simulations show the very different results. We present the small analysis of the comets orbits, in particular, the spatial distribution of the comets perihelia. The results reveal the concentration of the comets perihelia to the Galaxy plane for the comets with long period (and $e > 0.9$), parabolic and hyperbolic orbits.

КЛАССИФИКАЦИЯ СБЛИЖЕНИЙ МАЛЫХ ТЕЛ С ПЛАНЕТАМИ ПО ПЛАНЕТОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ И ГЛОБАЛЬНОМУ МИНИМУМУ

Емельяненко Н.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В первой части работы предложен кинематический подход для качественного анализа особенностей низкоскоростного сближения малого тела с планетой. Введено понятие точек низкоскоростного касания орбит малого тела и планеты. На его основе даны определения точки минимальной планетоцентрической скорости, низкоскоростного касательного участка на орбите малого тела, низкоскоростного и высокоскоростного сближений. Во второй части работы предложена классификация сближений малых тел с планетами по глобальному минимуму функции планетоцентрического расстояния. Классификация основывается на понятиях сферы тяготения и сферы Хилла планеты. Вводятся понятия области и длительности низкоскоростного и высокоскоростного сближений.

Введение

Сближения с планетами-гигантами – один из основных факторов изменения орбиты малого тела. Вне всякого сомнения, сближения приводят к наибольшим трансформациям элементов орбиты за короткий промежуток времени.

Главная проблема – нельзя предвидеть результат сближения: орбита малого тела может измениться до неузнаваемости с катастрофическим перебросом афелия от орбиты планеты до границ планетной области или практически не измениться при одних и тех же значениях минимального планетоцентрического расстояния. То есть предложенная в середине прошлого века Е.И. Казимирчак-Полонской классификация сближений по минимуму не достаточна. Очень тесное сближение с Юпитером и, тем более, с другой планетой – чрезвычайно редкое явление. Поэтому до настоящего времени нет научно обоснованной классификации сближений. Актуальная задача – поиск дополнительных параметров для уточнения классификации Казимирчак-Полонской.

В последней четверти 20-го века были открыты кометы с высоким значением постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Первые же исследования эволюции орбит этих комет показали, что они испытывают необычные сближения с планетой. Сближения были названы низкоскоростными из-за меньшей средней йовицентрической скорости кометы в области сближения. Но помимо низкоскоростных сближений, кометы с высоким значением постоянной Тиссерана испытывают и обычные сближения (их стали называть высокоскоростными). Итак, высокое значение постоянной Тиссерана относительно планеты не гарантирует малому телу только низкоскоростные сближения с планетой. Актуальная проблема – поиск четких научно обоснованных определений низкоскоростного и высокоскоростного сближений.

Основные задачи исследования

1. Ввести понятие точек низкоскоростного касания орбит малого тела и планеты, дать определения низкоскоростного и высокоскоростного сближений.
2. Предложить классификацию сближений малого тела с планетой по величине глобального минимума функции планетоцентрического расстояния, основанную на понятии сфер тяготения и Хилла планеты.

1. Классификация сближений малых тел с планетами по планетоцентрической скорости

Пусть \vec{V} и \vec{V}_P – векторы гелиоцентрических скоростей малого тела и планеты, \vec{v}_P – вектор планетоцентрической скорости малого тела; V, V_P, v_P – абсолютные величины векторов $\vec{V}, \vec{V}_P, \vec{v}_P$.

Для орбиты малого тела введем понятия точки низкоскоростного касания орбит тела и планеты, точек минимальной планетоцентрической скорости и низкоскоростного касательного участка.

Точки M и M_P назовем точками низкоскоростного касания орбит малого тела и планеты, если в момент времени t_M векторы гелиоцентрических скоростей тела и планеты равны:

$$\vec{V} = \vec{V}_P. \quad (1)$$

Выполнение равенства (1) приведет к тому, что в момент времени t_M малое тело будет иметь нулевую планетоцентрическую скорость:

$$\vec{v}_P = \mathbf{O}.$$

В наших исследованиях двух тысяч сближений наблюдаемых комет с Юпитером [1] частота такого события оказалась равной нулю. Так как планетоцентрическая скорость малого тела – непрерывная величина, можно говорить только о вероятности попадания величины планетоцентрической скорости на некоторый интервал $(0, 0+\varepsilon)$, где $\varepsilon > 0$.

Поэтому равенство (1) запишем в виде двух:

$$\vec{V} \parallel \vec{V}_P, \quad (2)$$

$$V = V_P. \quad (3)$$

Для фиктивных и наблюдаемых малых тел нельзя исключить низкоскоростное касание их орбит и орбиты планеты в пространстве. Но более вероятным является выполнение в некоторый момент времени t только одного из условий (2), (3). Точное выполнение одного из условий (2) \cup (3) и приблизительное выполнение другого в некоторый момент времени t приведет к тому, что в этот момент времени величина v_P будет иметь минимум.

Точки M_i на орбите малого тела, в которых имеет место условие (3), а условие (2) выполняется приблизительно (настолько, что позволяет величине v_P иметь минимум), назовем точками минимальной планетоцентрической скорости малого тела.

В дальнейшем изложении момент времени, соответствующий прохождению наблюдаемым или фиктивным малым телом точки низкоскоростного касания орбит (точки минимальной планетоцентрической скорости) будем называть моментом касания орбит малого тела и планеты и обозначать t_M .

Окрестность точки низкоскоростного касания орбит (точки минимальной планетоцентрической скорости) назовем низкоскоростным касательным участком орбиты малого тела [на нем приблизительно выполнены оба условия (2), (3), а величина v_P достигает одного или нескольких минимумов].

Сближение малого тела с планетой назовем низкоскоростным, если в области сближения имеется хотя бы один низкоскоростной касательный участок.

Сближение малого тела с планетой назовем высокоскоростным, если в области сближения нет ни одного низкоскоростного касательного участка.

2. Классификация сближений малых тел с планетами по глобальному минимуму функции планетоцентрического расстояния.

Очень важной характеристикой сближения является промежуток времени ΔT – длительность сближения. В 60–70 годы прошлого столетия накоплены знания о сближениях комет с Юпитером. Было известно только одно прохождение короткопериодической кометы через сферу действия Сатурна. Казимирчак-Полонская впервые предложила разделять сближения комет с Юпитером по минимальному расстоянию от планеты. За основу она взяла радиус сферы действия Юпитера $r_D^J = 0.322$ а.е. и ввела следующую классификацию сближений: тесные ($\rho \leq 0.33$ а.е.), умеренные ($0.33 < \rho \leq 1$ а.е.) и незначительные ($1 < \rho \leq 2$ а.е.) [2]. При таком делении она считала областью сближения сферу радиусом в 2 а.е. (2 а.е. $\approx 6 r_D^J$). В работе Казимирчак-Полонской [3] делается предположение о том, что другие планеты также являются мощными трансформаторами кометных орбит. Казимирчак-Полонская исследует сближения наблюдаемых и фиктивных комет с Сатурном и Нептуном в сферах радиусом в 2–3 а.е.

Классификация сближений комет с Юпитером, предложенная Казимирчак-Полонской, была априорной и не основывалась на численном анализе возмущений элементов орбиты в зависимости от планетоцентрического расстояния кометы. Беляев и др. [4] и Карузи и др. [5], не обосновывая своего выбора, также проводили исследования сближений короткопериодических комет с Юпитером в сфере радиусом в 2 а.е. Имеется немало работ, в которых изучается движение малых тел с планетами-гигантами в сфере радиусом в 1 а.е. В нашей работе [6] был проведен тщательный анализ длительности 34 сближений короткопериодических комет с Юпитером. Мы вычислили и сравнили изменения модуля постоянной энергии Δh за промежутки времени Δt_A – длительность пребывания кометы в сфере действия Юпитера (A), Δt_B – в сфере радиусом в 1 а.е. (B), Δt_C – в сфере радиусом в 2 а.е. (C) и Δt_D – за период обращения кометы вокруг Солнца, включающий сближение.

Проделанная работа показала, что для высокоскоростных сближений основное изменение параметра h происходит в сфере A (в среднем $\Delta h_A = 0.93 \Delta h_B$). За пределами сферы B изменение параметра h практически прекращается ($\Delta h_C \approx \Delta h_D$). Было предложено за длительность (или время) высокоскоростного сближения принимать временной промежуток Δt_B . Для низкоскоростных сближений изменение параметра h продолжалось за пределами сферы B (в среднем $\Delta h_B = 0.93 \Delta h_C$). Для этих сближений изменение параметра h в шаровом слое $1 \leq r \leq 2$ а.е. подобно его изменению в шаровом слое $0.33 \leq r \leq 1$ а.е. для высокоскоростных сближений. Поэтому за длительность (или время) низкоскоростного сближения принимается временной промежуток Δt_C . Для некоторых низкоскоростных сближений изменение параметра h продолжается за пределами сферы C. Как правило, такие сближения длятся дольше одного периода обращения кометы вокруг Солнца, а функция йовицентрического расстояния имеет дополнительные далекие минимумы. В этих случаях за длительность сближения принимается особый временной интервал, включающий все минимумы. Границы сближения устанавливаются в точках орбиты, начиная с которых изменение параметра h совпадает с его общими флуктуациями под действием планетных возмущений.

В последние десятилетия было открыто большое количество комет с очень тесными сближениями и весьма сложными преобразованиями как гелиоцентрических, так и йовицентрических орбит глубоко в сфере действия Юпитера. Мы провели исследование эволюции элементов орбит наблюдаемых комет семейства Юпитера с временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта (ВСЗ по Эверхарту, в дальнейшем изложении – просто ВСЗ) и временным гравитационным захватом с эллиптическими йовицен-

трическими элементами в сфере Хилла (ВГЗ по Хиллу, в дальнейшем изложении – просто ВГЗ). Анализ эволюции показал, что явление ВГЗ с физическими кратными минимумами имеет место только у комет с глобальным минимумом, не большим, чем 0.1 а.е. [1]. Тщательный анализ явления ВГЗ показал, что гравитационный захват кометы Юпитером происходит через коллинеарные центры либрации L_1 или L_2 . Для малого тела с высоким значением постоянной Тиссерана относительно планеты (например, $T_J > 3.04$) в их окрестности на поверхности нулевой скорости в задаче трех тел расположены «перемычки», в которые тело может попасть в сферу Хилла и испытать явление ВГЗ [7]. Поэтому более целесообразно при разделении сближений по величине глобального минимума функции планетоцентрического расстояния использовать не сферу действия, а сферу Хилла. С другой стороны, в наших работах [8, 9] было показано, что $r_K^J = 0.084$ а.е. – это сфера критического радиуса от Юпитера, в которой необходимо учитывать возмущения от несферичности фигуры Юпитера, а при исследовании достоверного сближения – возмущения от галилеевых спутников, как от отдельных гравитирующих тел (r_K^J приблизительно равняется половине сферы тяготения Юпитера r_G^J).

В настоящее время открыты малые тела, которые испытывают сближения с Сатурном, Землей, Нептуном, известны сближения с ВСЗ, ВГЗ и кратными минимумами функции планетоцентрического расстояния в сфере Хилла.

В связи с изложенным выше возникла необходимость пересмотреть определения понятий области, длительности и классификации сближений малого тела с планетой по глобальному минимуму функции планетоцентрического расстояния.

Распространим результаты, полученные при исследовании сближений комет с Юпитером, на сближения малых тел со всеми планетами в Солнечной системе.

Пусть ρ – глобальный минимум функции планетоцентрического расстояния малого тела, ρ_i – вторичные минимумы в низкоскоростных сближениях ($\rho < \rho_i$).

Сближение назовем сильным, если малое тело проникает в сферу радиусом $0.5 r_G^P$, окружающую планету:

$$\rho \leq 0.5 r_G^P, \quad (4)$$

где правый предел неравенства (4) равняется половине сферы тяготения планеты.

Сближение назовем тесным, если малое тело проходит за пределами этой сферы, но внутри сферы Хилла планеты:

$$0.5 r_G^P < \rho \leq r_H^P. \quad (5)$$

Сближение назовем умеренным, если малое тело проходит за пределами сферы Хилла, но не далее $3 r_H^P$:

$$r_H^P < \rho \leq 3 r_H^P. \quad (6)$$

Низкоскоростное сближение будем считать незначительным, если соблюдено неравенство:

$$3 r_H^P < \rho \leq 6 r_H^P. \quad (7)$$

Вторичные минимумы функции планетоцентрического расстояния малого тела в низкоскоростном сближении за пределами $6 r_H^P$ (если они будут зафиксированы) будем называть далекими.

Итак, если изучаются низкоскоростные сближения малого тела с планетой, за длительность сближения ΔT мы принимаем время пребывания малого тела в сфере радиусом в $6 r_H^P$, если изучаются высокоскоростные сближения малого тела с планетой,

за длительность сближения ΔT мы принимаем время пребывания малого тела в сфере радиусом в $3r_H^P$.

Воображаемую сферу радиусом R_h (R_l), внутри которой малое тело движется на промежутке времени ΔT , назовем областью высокоскоростного (низкоскоростного) сближения.

$$R_h = 3R_H^P, \quad (8)$$

$$R_l = 6R_H^P. \quad (9)$$

Таблица.

Радиусы сильных, тесных, умеренных и незначительных сближений малых тел с планетами.

<i>planet</i>	$0,5r_G$	r_H	$3r_H$	$6r_H$	R
1	2	3	4	5	6
<i>Mer</i>	$8 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$8,88 \cdot 10^{-3}$	
<i>V</i>	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$6,74 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-1}$	$0,40 \cdot 10^{-1}$	
<i>E</i>	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,010	0,030	0,060	0,1
<i>M</i>	$4,3 \cdot 10^{-4}$	0,007	0,022	0,043	
<i>J</i>	0,08	0,347	1,041	2,082	2
<i>Sat</i>	0,08	0,429	1,286	2,573	2-3
<i>U</i>	0,006	0,465	1,395	2,790	
<i>N</i>	0,108	0,770	2,311	4,622	2-3

Радиусы сильных, тесных, умеренных и незначительных сближений для планет приведены в таблице. В последнем (шестом) столбце таблицы для сравнения указаны радиусы сближений с планетами, традиционно используемые в современных исследованиях.

Момент входа в область сближения обозначим T_1 и назовем началом сближения, момент выхода малого тела из области сближения обозначим T_2 и назовем концом сближения ($T_1 < T_2$). Длительность сближения всегда определим по простой формуле:

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (10)$$

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. Емельяненко Н.Ю. Эволюция элементов орбит короткопериодических комет. – Челябинск. Издат. центр Южно-Уральского гос. ун-та. 2009. 112 с.
2. Казимирчак-Полонская Е.И. Обзор исследований тесных сближений комет с Юпитером (1770-1960)– Л.: Наука. Труды Инст. теор. астроном. АН СССР. – 1961. – Вып. 7. – С. 19–190.
3. Казимирчак-Полонская Е.И. О роли Нептуна в преобразованиях кометных орбит и о происхождении комет. Астрометрия и небесная механика. Проблемы исследования Вселенной. Вып. 7: сб. ст. – М.–Л. : Наука. – 1978. – С. 484–417.
4. Belyaev N.A., Kresak L., Pittich E.M., Pushkarev A.N. Catalogue of short-period comets. Bratislava: Astron Inst. Slovak. Academy of Sciences. – 1986. – 395 p.
5. Carusi A., Kresak L., Perozzi E., Valsecchi G.B. Long-term evolution of short-period comets. Rome. –1984. –184 p.

6. *Емельяненко, Н.Ю.* Динамика орбит комет при тесном сближении с Юпитером. Анализ длительности сближений. *Астрон. Вестн.* – 2003. – Т. 37. – № 2. – С. 153–160.
7. *Емельяненко Н.Ю.* Временный спутниковый захват комет Юпитером. *Астрон. вестн.* – 2012. – Т. 46. – № 3. – С. 195–208.
8. *Емельяненко Н.Ю.* Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. III. Анализ влияния несферичности фигуры Юпитера. *Астрон. Вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 5. – С. 30–34.
9. *Емельяненко Н.Ю.* Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. 3. Анализ влияния галилеевых спутников. *Астрон. Вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 6. – С. 84–89.

CLASSIFICATION OF THE APPROACHES OF SMALL BODY WITH PLANETS BY THE PLANETOCENTRIC VELOCITY AND THE GLOBAL MINIMA

Emel'yanenko N.Yu.

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

In the first section of the paper kinematics to quality analysis of the phenomenon of low velocity approach of small body with planets are proposed. The Notion of the low velocity tangency points on the orbit of small body and the planet are given. The Notion of minima planetocentric velocity, low and high velocity plots on the orbit of small body, low velocity and high velocity approach are given. In the second section of the paper the classification of approach of small bodies with planets on the global minima of planetocentric distance function are given. The classification on the notions of Hill sphere and action sphere are based. The Notion of the region and of the prolonge of low and high velocity approach is introduced.

ПОИСК ОБЛАСТИ ОРБИТ МАЛЫХ ТЕЛ С ОСОБЕННОСТЯМИ В СБЛИЖЕНИЯХ С ПЛАНЕТАМИ

Емельяненко Н.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе предложен геометрический метод выделения малых тел – кандидатов на низкоскоростные сближения с планетой. На плоскости (a, e) выделена область орбит, которые могут привести малое тело к сближению с особенностями.

Введение

Более 30 лет назад в эволюциях орбит комет семейства Юпитера были обнаружены сближения с планетой, сопровождающиеся особенностями. Сближения фиксировались только у комет, которые находились на орбитах с высоким значением постоянной Тиссерана. Значение постоянной Тиссерана стало критерием отбора малых тел – кандидатов на сближения с особенностями. Но первые же исследования эволюции орбит показали, что помимо низкоскоростных, те же самые кометы, как и многие другие объекты с более низким значением постоянной Тиссерана, испытывают и обычные сближения, которые позднее стали называть высокоскоростными.

Низкоскоростные сближения как следствие специфических размеров и формы орбиты малого тела

Основная задача исследования: определить на плоскости (a, e) область орбит, допускающих низкоскоростные сближения с планетами.

Пусть a, e, Q – большая полуось, эксцентриситет, афелийное расстояние эллиптической орбиты малого тела; r – абсолютная величина радиус-вектора \vec{r} . Элементы орбиты планеты маркируются нижним индексом P , например, a_P, \vec{V} и \vec{V}_P – векторы гелиоцентрических скоростей малого тела и планеты.

Обозначим искомую область ω_P . Решение получим в рамках парной задачи двух тел (Солнце – планета; Солнце – малое тело).

Пусть малое тело находится на эллиптической орбите с большой полуосью a , планета – на круговой орбите радиуса a_P . Допущение возможно, так как планеты находятся на орбитах с малым эксцентриситетом. Пусть орбиты малого тела и планеты расположены в одной плоскости (допущение оправдано для низкоскоростных сближений; в работе [1] показано, что подобные сближения происходят у малых тел, имеющих небольшой наклон к плоскости эклиптики).

Пусть точки M и M_P – это точки низкоскоростного касания орбит малого тела и планеты [2], то есть в момент времени t_M векторы гелиоцентрических скоростей тела и планеты равны:

$$\vec{V} \parallel \vec{V}_P, \quad (1)$$

$$V = V_P. \quad (2)$$

В работе [2] показано, что величина r для точек низкоскоростного касания M_i ($i = 1, 2$) на орбите малого тела находится по формуле:

$$r_M = \frac{2aa_p}{a + a_p} \quad (3)$$

Определим вертикальные границы области ω_p .

Для того чтобы точки M_i могли оказаться в области низкоскоростного сближения, как минимум, они должны быть расположены не далее, чем на расстоянии $6R_H^P$ от орбиты планеты по радиус-вектору малого тела [3], то есть орбиты малых тел должны удовлетворять условию:

$$\frac{a_p - 6R_H^P}{a_p + 6R_H^P} a_p \leq a \leq \frac{a_p + 6R_H^P}{a_p - 6R_H^P} a_p. \quad (4)$$

Предельные значения большой полуоси малого тела в неравенстве (4) задают вертикальные границы искомой области ω_p на плоскости (a, e) . Для всех планет они приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Planet	a_{ll}	a_{hl}	a_p	a_{hr}	a_{lr}
1	2	3	4	5	6
Mer	0.370	0.378	0.38710	0.396	0.405
V	0.647	0.684	0.72333	0.765	0.809
E	0.887	0.942	1.00000	1.062	1.128
M	1.439	1.481	1.52363	1.568	1.613
J	2.230	3.470	5.20441	7.807	12.144
Sat	5.527	7.315	9.58378	12.556	16.618
U	14.316	16.587	19.18722	22.196	25.716
N	22.010	25.729	30.02090	35.028	40.947

Примечание. Левые границы a_{ll} , a_{hl} и правые границы a_{hr} , a_{lr} для низкоскоростного и высокоскоростного сближений;

Определим нижнюю границу области ω_p .

Так как $q \leq r_M \leq Q$, орбиты ω_p малых тел, содержащие точки M_i , должны удовлетворять условию:

$$\frac{|a_p - a|}{a_p + a} \leq e < 1. \quad (5)$$

Условия (4), (5) задают на плоскости (a, e) некоторую конечную область Ω_p . Функция $e_1 = e_1(a)$, ограничивающая область Ω_p снизу, определена и непрерывна при условиях (4) и имеет единственный экстремум-минимум: $e_{\min}(a = a_p) = 0$. На рис. 1 изображена область Ω_J для Юпитера. График функции $e_1 = e_1(a)$ – это линия A_1JP_1 .

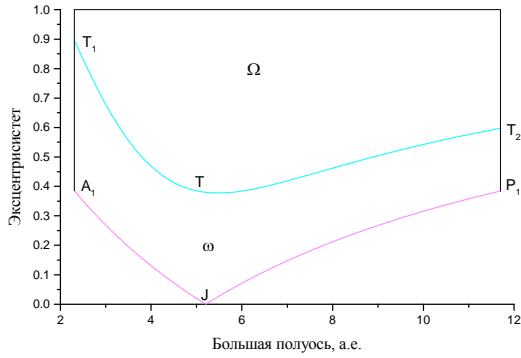


Рис. 1. Области орбит Ω_J, ω_J, T_J на плоскости (a, e) (для Юпитера).

Итак, условия (4), (5) задают на плоскости (a, e) область эллиптических орбит Ω_p , принадлежность к которой позволяет малому телу иметь на орбите точку, в которой выполнено условие (2), и эта точка удалена от орбиты планеты не более чем на $6R_H^P$ от орбиты планеты по радиус-вектору малого тела. Для того, чтобы эта точка стала точкой низкоскоростного касания орбит (точкой минимальной планетоцентрической скорости), в ней должно хотя бы приблизительно выполняться условие (1); и малое тело должно пройти ее, находясь в области сближения с планетой.

С одной стороны, векторное условие (1) может быть реализовано для любой точки орбиты малого тела, в том числе и в точках M_i , так как задача о построении касательной к окружности (\vec{V}_p), параллельной ее секущей (\vec{V}), всегда имеет решение. С другой стороны, аналитическое решение системы условий (1)–(4) невозможно. Остаются два пути: подбор решений и численное моделирование ситуации. Мы объединили обе возможности, подбирая модели с тривиальными решениями.

В рамках рассматриваемой задачи на орбите малого тела из области Ω_p всегда есть точки, в которых выполнено равенство (1). Это апсидальные точки (при условии, что в момент прохождения апсидальной точки малое тело и планета находятся на одном луче).

Определим верхнюю границу области ω_p .

Е. Эпик [4] первым обратил внимание на то, что комета с постоянной Тиссерана относительно Юпитера T_J , близкой к трем, будет иметь небольшую ювицентрическую скорость в области сближения с Юпитером.

Для планеты P величина T_p обычно вычисляется по формуле [5]:

$$T_p = \frac{a_p}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_p}(1-e^2)} \cos i. \quad (6)$$

Так как низкоскоростные сближения имеют наблюдаемые кометы с малым наклоном орбиты к плоскости эклиптики, в модельных сближениях допустимо принять $\cos i = 1$.

Как известно, орбиты всех планет эллиптически. Но наши вычисления величины T_J для Юпитера «относительно Юпитера» (то есть формальная подстановка в формулу (6) значений элементов орбиты $a=a_J, e=e_J (e_J \approx 0.05), a_J=q_J$

$\cup a_J=Q_J$) приводит к практически одинаковым значениям этого параметра в афелии и перигелии его орбиты:

$$T_J^Q = 2.999403, T_J^q = 2.99943. \quad (7)$$

Аналогичные результаты получаются для всех планет Солнечной системы.

Поэтому малое тело, у которого величина T_p близка к трем, может иметь небольшую планетоцентрическую скорость, на каком бы участке орбиты планеты не произошло сближение.

На протяжении последних трех десятков лет большинство исследователей традиционно используют условие:

$$T_J \geq 2.9 \quad (8)$$

для поиска объектов с низкоскоростными сближениями с Юпитером.

В последние годы это условие, записанное для произвольной планеты, применяют для поиска объектов с низкоскоростными сближениями с планетой.

В наших работах [1,2] исследованы эволюции и низкоскоростные сближения наблюдаемых комет, для которых выполнялось условие:

$$T_J \geq 2.85. \quad (9)$$

На рис. 2 показано распределение орбит этих комет на плоскости (a, e) в момент времени t_0 (эпоха оскуляции первого появления кометы).

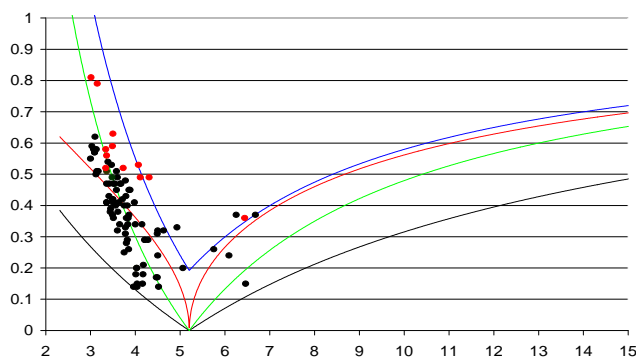


Рис. 2. Наблюдаемые кометы семейства Юпитера на плоскости (a, e) в момент времени t_0 .

Обозначим неизвестное нам значение постоянной Тиссерана для произвольной планеты T_p^{lim} и определим его.

Запишем постоянную Тиссерана малого тела относительно планеты P в виде неравенства:

$$\frac{a_p}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_p}(1-e^2)} \geq T_p^{\text{lim}}, \quad (10)$$

из которого определим эксцентриситет орбиты малого тела:

$$e \leq \sqrt{1 - \frac{a_p}{4a} \left(T_p^{\text{lim}} - \frac{a_p}{a} \right)^2}. \quad (11)$$

Функцию $e = e(a, a_p, T_p^{\text{lim}})$ (11) можно использовать в качестве верхней границы области ω_p , если каким-либо образом определить T_p^{lim} , позволяющее малому телу иметь низкоскоростные сближения с планетой P .

Мы не можем использовать значение $T_p^{\text{lim}} = 3$ (при $a = a_p, e = 0$) для всех планет, так как оно явно не удовлетворяет распределению комет семейства Юпитера, сближения которых имеют особенности (рис. 2).

Покажем, что условия (8), (9) дают много орбит, заведомо не приводящих к сближению с особенностями.

Обозначим область на плоскости (a, e) , удовлетворяющую условиям (8), (9), символом T_p (линии $T_p=2.85$ и $T_p=2.9$ близки друг к другу). Область орбит T_p находится между линией $T_1T_pT_2$ и осью абсцисс a (большая полуось); причем она не ограничена слева и справа по оси a . Как было показано выше, только на орбитах малых тел, удовлетворяющих условиям (4), (5), имеются точки низкоскоростного касания. То есть, области T_p принадлежит большое количество орбит, для которых низкоскоростное сближение невозможно.

Для определения T_p^{lim} воспользуемся моделью низкоскоростного сближения с тривиальным апсидальным решением системы условий (1), (4), (5):

$$e = \frac{|a_p - a|}{a} + \frac{6R_H^p}{a}. \quad (12)$$

Как следует из равенства (12) и рис. (2), у этой модели $Q = a_p + 6R_H^p$. Для нее только одна точка принадлежит области сближения: это точка $O(a_p, e_o)$. Определим e_o для планет и вычислим значения постоянной Тиссерана у орбиты малого тела, занимающей положение $O(a_p, e_o)$ на плоскости (a, e) .

И для орбит с перигелием, и для орбит с афелием в окрестности орбиты планеты выполнено равенство:

$$e_o = \frac{6R_H^p}{a_p}. \quad (13)$$

Для планет значения эксцентриситета и постоянной Тиссерана у орбиты малого тела, занимающей положение $O(a_p, e_o)$ на плоскости (a, e) , приведены во второй, третьей строках табл. 2. Анализ третьей строки табл. 2 показал, что для планет земной группы орбиты $O(a_p, e_o)$ практически совпадают с орбитой планеты. Для планет-гигантов наибольший эксцентриситет e_o – у Юпитера; его значение очень мало отличается от максимального эксцентриситета орбит, у которых возможен временный спутниковый захват в смысле Эверхарта [6]. Отметим, что в работе [6] поиск максимального эксцентриситета проводился другим способом, а именно, на основе численного интегрирования уравнений движения модельных комет. Предположим, что значения постоянной Тиссерана из табл. 2 могут быть использованы в качестве искомым значений T_p^{lim} .

Таблица 2.

Planet	Mer	V	E	M	J	Sat	U	N
e	0.023	0.056	0.06	0.029	0.4	0.268	0.145	0.154
T_p^{lim}	2.999	2.997	2.996	2.999	2.833	2.927	2.979	2.976

Если заменить в условии (9) знак неравенства на равенство, то функция $e = e(a, a_p, T_p^{\text{lim}})$ определена, непрерывна и при условии (4) имеет единственный экстремум-минимум. Для Юпитера $e_{\text{min}}(a_j = 5.51 \text{ а.е.}) = 0.397$. Нанесем на рис. 1 линию орбит $T_1T_J^{\text{lim}}T_2$ ($T_J^{\text{lim}} = 2.83$). Ограничим область Ω_J сверху линией $T_1T_J^{\text{lim}}T_2$. Часть области Ω_J $A_1T_1T_J^{\text{lim}}T_2P_1P$ обозначим ω_J . Эволюция орбит абсолютного большинства наблюдаемых комет семейства Юпитера, изученных нами, содержит сближения с осо-

бенностями на исследованном восьмисотлетнем промежутке времени, если орбита кометы принадлежит области ω_j (см. рис. 2).

Для произвольного малого тела ограничим область Ω_p сверху линией $T_p = T_p^{\text{lim}}$, то есть добавим к условиям (4), (5) условие:

$$T_p \geq T_p^{\text{lim}}. \quad (14)$$

Часть области Ω_p $A_1 T_1 T_p^{\text{lim}} T_2 P_1 P$ будет искомой областью ω_p .

Сравнение областей орбит T_p (условие 12) и ω_p (условия (4), (5), (14)) показывает преимущество области ω_p при поиске объектов с особенностями в сближениях с планетами, поэтому в дальнейшем изложении область ω_p будем называть областью орбит малых тел с особенностями в сближениях с планетой.

Заключение

В работе низкоскоростные сближения малого тела с планетой рассматриваются как следствие специфических размеров и формы орбиты малого тела. На плоскости (a, e) выделена область орбит, для которых возможны низкоскоростные сближения с планетами. Показано, что применяемый в последние 30 лет критерий отбора малых тел по постоянной Тиссерана является менее точным по сравнению с предложенным в этой работе.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. *Емельяненко Н.Ю.* Эволюция элементов орбит короткопериодических комет. – Челябинск. Издат. центр Южно-Уральского гос. ун-та. 2009. 112 с.
2. *Емельяненко Н.Ю.* Качественный анализ и модели низкоскоростных сближений комет с Юпитером. Челябинск. Издат. центр Южно-Уральского гос. ун-та. 2010. 165 с.
3. *Емельяненко Н.Ю.* Классификация сближений малых тел по глобальному минимуму функции планетоцентрического расстояния. Труды конференции «Пулково-2012» (в печати).
4. *Opik, E.J.* Interplanetary encounters: close range gravitational interactions. Elsevier, New York. – 1976.
5. *Carusi A., Kresakova M., Valsecchi G.B.* Perturbations by Jupiter of the Particles Ejected from Comet Lexell. *Astron. Astrophys.* – 1982. – No. 116. – P. 201–209.
6. *Емельяненко Н.Ю.* Временный спутниковый захват комет Юпитером. *Астрон. вестн.* – 2012. – Т. 46. – № 3. – С. 195–208.

SEARCH FOR THE REGION OF SMALL BODY ORBITS WITH SPECIFIC FEATURES AT THE APPROACH WITH A PLANET

Emel'yanenko N.Yu.

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

This paper proposes a geometrical method of selection of small body as a candidate to the low velocity approach with a planet. The region (a, e) of small body orbits with specific features during the approach is found.

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ТРЕХ ТЕЛ С ЦВЕТНЫМИ ПОЛЯМИ

Ершов В.Н.

Mullard Space Science Laboratory (University College London), Лондон, Великобритания

Рассмотрена задача трех тел при наличии трехполярных (цветных) полей. Показано, что, несмотря на нелинейный характер взаимодействия, при симметричных начальных условиях и в случае, когда все три компонента системы обладают равными массами и взаимодополняющими друг друга полярностями полей, эти компоненты движутся по финитным регулярным траекториям. Учет релятивистских поправок позволяет рассчитать максимально достижимые размеры системы. Данный расчет позволяет продвинуться в понимании проблемы происхождения видов элементарных частиц, наблюдаемых в природе, а также спектра их масс.

1. Введение

Задача трех тел (рис. 1) возникает во многих разделах физики. Кроме небесной механики, где решение данной задачи позволяет предсказать движение часто встречающихся конфигураций звезд, системы трех тел рассматриваются в молекулярной физике и физике элементарных частиц. В 1964 году М.Гелл-Манн и Г. Цвейг предположили, что класс элементарных частиц, называемых адронами, соответствует композитным системам из трех компонентов (которые Гелл-Манн назвал кварками). Такой подход оказался весьма плодотворным, так как с помощью его удалось объяснить свойства множества открытых к тому времени частиц и предсказать свойства еще не открытых частиц и резонансов.

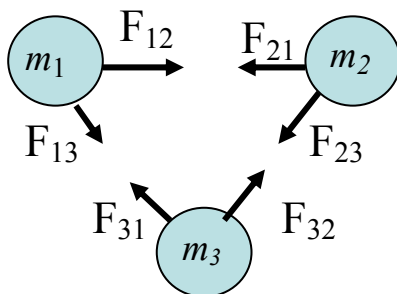


Рис. 1. Задача трех тел универсальна для небесной механики, молекулярной физики и физики элементарных частиц .

Подобно тому, как все многообразие химических элементов, классифицированных по своим свойствам в периодической таблице Менделеева, объясняется за счет внутренней структуры - различных комбинаций трех компонентов, протонов, нейтронов и электронов, наблюдаемое многообразие адронов и мезонов также удалось объяснить различными комбинациями кварков.

Таким образом, все многообразие «элементарных» частиц свелось к набору из 12 более простых по своим свойствам частиц, называемых фундаментальными фермионами, а также к набору из нескольких фундаментальных бозонов, рассматриваемых в качестве переносчиков взаимодействия между частицами. Фундаментальным бозоном электромагнитного взаимодействия является фотон. Считается также, что должен существовать фундаментальный бозон гравитационного взаимодействия. Об обнаруже-

нии частицы со свойствами, похожими на те, которыми должен обладать бозон Хиггса. было объявлено в 2012 году специалистами ЦЕРН.

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	174 MeV/c ²	4.7 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge Bosons

Рис. 2. Существует аналогия между периодической таблицей Менделеева и периодической таблицей фундаментальных фермионов и бозонов стандартной модели элементарных частиц. Периодичность свойств частиц, позволяющая классифицировать их в виде трех групп (поколений), показанных в данной таблице в виде трех столбцов, может объясняться внутренней структурой фундаментальных фермионов.

По своим свойствам фундаментальные фермионы классифицируются стандартной моделью элементарных частиц в виде трех групп (поколений), каждая из которых состоит из двух лептонов и двух кварков. Свойства лептонов и кварков повторяются от поколения к поколению, за исключением масс, которые увеличиваются с номером поколения. Все эти величины используются стандартной моделью в качестве ее входных параметров.

Наличие периодических свойств у фундаментальных фермионов предполагает существование их внутренней структуры – точно также, как и периодические свойства химических элементов, а также адронов, обусловлены наличием их внутренних структур. Стандартная модель, несмотря на невозможность каким-либо другим образом объяснить наличие у частиц свойств, полагает все фундаментальные фермионы и бозоны бесструктурными точечными объектами - просто потому, что экспериментальными методами никаких структур пока обнаружить не удастся. Но ведь наличие у частиц различных свойств, а также само по себе существование в природе некоего многообразия частиц, являются вопиющим наблюдательным фактом, от необходимости объяснения которого уйти невозможно.

В данной работе мы используем задачу трех тел в качестве отправного пункта для объяснения причин существования наблюдаемого в природе многообразия фундаментальных частиц, причем различные их свойства тогда могут объясняться за счет различий в их внутренней структуре. Попытки объяснить свойства кварков путем постулирования в виде композитных систем, состоящих из более «мелких» частиц (обычно называемых пред-кварками или преонами) предпринимались еще с 70-х годов прошлого века, но пока все эти попытки были неудачными. Подход, который мы изложим здесь, похоже является работоспособным.

2. Постановка задачи

Конечно, для работы с внутренними структурами частиц мы не можем использовать задачу трех тел в том виде, в каком она формулируется в классической небесной механике (рис.1) с притягивающими гравитационными силами F_{12} , F_{13} , F_{23} между тремя массами m_1 , m_2 и m_3 , так как, кроме масс, частицы обладают еще и зарядами, а сила гравитационного взаимодействия в 10^{39} раз слабее силы электромагнитного взаимодействия между зарядами. То есть во всех практических смыслах гравитационным взаимодействием в данной задаче можно пренебречь.

Тем не менее, для того, чтобы обеспечить притяжение между всеми тремя частицами, нам необходимо использовать некое притягивающее взаимодействие, сопоставимое по порядку величины с электромагнитным. Наиболее подходящим для задачи трех тел является трехполярное взаимодействие, введенное в обиход в 1964 году О.В. Гринбергом [1] для задания притягивающих сил между тремя кварками в композитных системах адронов. Три противоположные полярности этого взаимодействия обычно обозначаются тремя основными цветами (красным, зеленым и синим), так как знаки полярности «+» и «-» уже заняты для обозначения полярностей кулоновского взаимодействия. Поэтому часто поля, соответствующие трехполярному взаимодействию, называются «цветными полями», что удобно для изображения таких полей графически, но, конечно, на самом деле никакого отношения к реальным цветам эти поля не имеют

Другое используемое название для трехполярного взаимодействия – сильное, так как его величина примерно в 100 раз больше, чем у кулоновского. Каждая из частиц в нашей задаче трех тел имеет цветовой заряд, противоположный двум остальным частицам, поэтому силы между всеми частицами будут притягивающими (противоположные заряды притягиваются), что и требуется в соответствии с задачей трех тел, схематически показанной на рис.1. В отличие от кварков, базовые частицы в данной модели не имеют никаких других свойств, кроме свойства обладать электрическим и цветовым зарядами (кварки в композитной модели адронов имеют еще и другие свойства).

Для задания математической функциональной зависимости для трехполярного взаимодействия воспользуемся известным из наблюдений свойством сильного взаимодействия: а именно, на больших расстояниях от заряда оно остается примерно постоянным, но в непосредственной близости от заряда оно пренебрежимо мало (это свойство обычно обозначают как свойство «асимптотической свободы»). Наиболее простой математической функцией, удовлетворяющей данным свойствам является функция

$$C(r) = \exp(-1/r), \quad (1)$$

причем производная от этой функции

$$E(r) = \frac{1}{r^2} \exp(-1/r) \quad (2)$$

асимптотически ведет себя по закону обратных квадратов так как множитель $\exp(-1/r)$ при больших расстояниях r от центра заряда приближается к единице. Эта функция удобна для вычисления кулоновского поля вокруг базовых частиц (преонов) в данной модели.

3. Определение единиц длины, скорости и времени

В данной модели изначально система физических единиц никак не задана. То есть мы не знаем не только того, как соотносятся расстояния и скорости в нашей задаче трех тел с расстояниями и скоростями в небесной механике и экспериментальной физике, но и как вообще вести измерения и вычисления

К счастью, выбор цветного (трехполярного) и кулоновского взаимодействий в виде (1) и (2) дает нам естественную единицу длины, связанную с единственно возмож-

ным статическим состоянием равновесия системы (минимумом ее потенциала). При единичных коэффициентах перед переменными в формулах (1) и (2) минимум потенциала в системе трех одноименно заряженных частиц с разноименными цветовыми зарядами достигается при расстоянии между частицами $r_0=1$, что и является естественной единицей длины для данной системы.

Нам требуется еще задать единицы измерения скорости, времени и массы. Это достигается следующим образом. Мы определили базовую частицу в виде источника поля (E_c, H_c) , полностью аналогичного электромагнитному полю (E, H) , за исключением того, что оно включает в себя трехполярный компонент $E_c = (E, C)$, где поле C соответствует уравнению (1), а поле E – уравнению (2). Компоненты C_1, C_2 и C_3 , соответствующие трем частицам со взаимно-дополняющими цветовыми зарядами, полностью компенсируют друг друга, если все три частицы расположены в одной точке, так что $C_1(r)+C_2(r)+C_3(r) = 0$ для всего пространства. В этом случае можно вычислить импульс системы:

$$P = \frac{S}{c^2} = \frac{1}{4\pi c} [E_c \times H_c]$$

здесь S есть вектор Умова-Пойнтинга, а c – критическая скорость (скорость распространения взаимодействия). Используя этот импульс мы можем определить массу частиц (считая, что массы всех трех частиц равны друг другу). Если ось z направлена вдоль вектора скорости v , то

$$P = \frac{v}{4\pi c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \int_V ((E_c)_x^2 + (E_c)_y^2) dV,$$

где V – объем интегрирования (все пространство). В случае сферической симметрии $(E_c)_x^2 = (E_c)_y^2 = (E_c)_z^2 = \frac{1}{3} E_c^2$, сумма $(E_c)_x^2 + (E_c)_y^2 = \frac{2}{3} E_c^2$, а элемент объема равен $dV = 4\pi r^2 dr$, так что полный импульс системы будет равен

$$P = \frac{v}{4\pi c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \int_0^\infty \frac{2}{3} E_c^2 4\pi r^2 dr,$$

а масса частицы соответственно равна

$$m = \frac{2}{3c^2} \int_0^\infty E_c^2 r^2 dr.$$

Для единичного цветного заряда этот интеграл расходится, но для системы трех тел с полями, взаимно-компенсирующими друг друга, $C_1(r)+C_2(r)+C_3(r) = 0$ и интеграл становится сходящимся, что позволяет его вычислить:

$$\frac{2}{3c^2} \int_0^\infty (3E)^2 r^2 dr = \frac{6}{c^2} \int_0^\infty \frac{1}{r^2} \exp(-\frac{2}{r}) dr = \frac{3}{c^2}.$$

Тогда массу одной частицы можно определить как 1/3 от этого интеграла, т.е. получаем, что $m_0 = \frac{1}{c^2}$. Величину критической скорости удобно принять за единицу, $c=1$. Тогда единица измерения времени определяется как время, необходимое для прохождения единичного расстояния r_0 со скоростью $c=1$. Все остальные необходимые физические единицы определяются через эти три основные.

4. Движение компонентов системы

Теперь, когда заданы основные исходные данные, можно посмотреть, как будут двигаться частицы при различных начальных условиях. Если начальные условия симметричны (частицы расположены в углах равностороннего треугольника), а расстояние

между частицами равно равновесному (единице), то система будет находиться в состоянии покоя (равновесный радиус системы будет равен $0.577r_0$). Если радиус системы увеличить или уменьшить, то частицы начнут осциллировать вокруг этого равновесного состояния. Так, на рис. 3 показано движение зарядов при выборе значения начального радиуса равного $r = 0.1$. Максимальный радиус системы при этом достигает около $1.2 r_0$ (шаг сетки на Рис. 4 соответствует единице длины r_0).

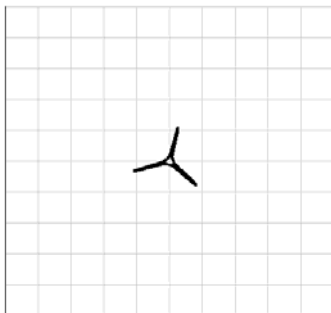


Рис. 3. Осцилляции трехполярных зарядов вокруг их равновесного состояния при выборе начального радиуса системы $r = 0.1$.

Ввиду того, что мы имеем дело с движущимися зарядами, скорости которых могут быть любыми, то при расчетах мы обязаны учитывать релятивистские эффекты. Основным релятивистским эффектом является возникающее магнитное поле (причем, как двухполярное, так и трехполярное) и соответствующие Лоренцовы силы, действующие на частицы. Мы должны также учитывать релятивистский фактор $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ для расчета Лоренцева сжатия электрических и хроматических полей в направлении движения частицы, а также для учета изменения сил хромозлектрического и хромоманнитного взаимодействий при различной ориентации векторов скоростей частиц относительно соответствующих полей. Скорости частиц могут меняться от 0 до 1 (максимальная единичная скорость соответствует критической скорости c). При этом, как выясняется, радус системы устанавливается в пределах от 1.2 до 2.5 r_0 , независимо от выбора начальных координат и скоростей частиц, что показано на рис.4.

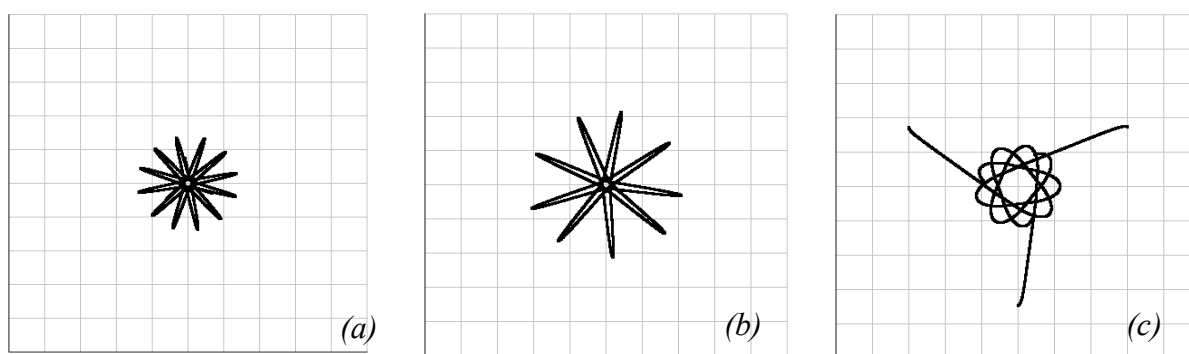


Рис. 4. Движение зарядов при различных значениях начального радиуса системы r и начальной тангенциальной скорости частиц v : (a) $r=0.1$, $v=0.6c$; (b) $r=0.1$, $v=0.9c$; (c) $r=3.0$, $v=0.2c$. В последнем случае траектории частиц изначально направлены к центру системы, а затем устанавливаются осцилляции частиц с максимальным удалением от центра около $r=1.3$

5. Заключение

Результатом данной работы является установление того факта, что движение частиц в системе трех тел с цветными полями является финитным, независимо от выбора

начальных условий. Установившийся радиус вращающейся системы варьируется в не-больших пределах и не превышает нескольких единиц длины (во внутренней системе единиц модели). Данный результат позволяет перейти к следующему этапу работы: расчету геометрических параметров, а также магнитного и углового моментов системы из 9 трехполярных зарядов. Безразмерное отношение механического момента к магнитному (гиромангнитное отношение) известно из наблюдений для различных фундаментальных фермионов. По своим свойствам система из 9 трехполярных зарядов воспроизводит электрон (более подробно см. [2]), так что сравнение вычисленного гиромангнитного отношения системы с известным из наблюдений аналогичным параметром для электрона позволит произвести экспериментальную проверку модели. Модель объясняет наблюдаемый в природе спектр элементарных частиц, распределение их масс, а также некоторые другие их свойства. Более подробно обоснование выбора данной модели изложено в работе [2].

Литература

1. *Greenberg O.W.* Spin and Unitary Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons, *Phys. Rev. Lett.*, 1964, V. 13, 598-602
2. *Yershov V.N.* A Cyclic Universe with Colour Fields, *Centr. Eur. J. of Phys.*, 2009, V. 7, 50-66.

DYNAMICS OF A THREE-BODY SYSTEM WITH COLOUR FIELDS

Yershov V.N.

Mullard Space Science Laboratory (University College London), London UK

Three-body problem of a system containing tripolar (colour) fields is discussed. It is shown that, despite of the nonlinear character of the tripolar interaction, the components of the system move along finite regular trajectories if the initial conditions are symmetrical and the masses and charges of all three particles are equal to each other, the colour-components of three fields being mutually complementary. Taking into account relativistic corrections results in determination of the maximal sizes of the system for different initial conditions. This calculation allows to advance in the understanding of the origin of elementary particle species observed in nature, as well as of their spectrum of masses.

РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ В АБАСТУМАНСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 1983-1994 гг.

Киселева Т.П.¹, Чантурия С.М.², Васильева Т.А.¹, Калининченко О.А.¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузии, Абастумани, Грузия

В работе представлены и обсуждаются результаты выполнения программы астрометрических наблюдений спутников планет Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна в Абастуманской астрофизической обсерватории Грузии в период 1983-1994 гг. Наблюдения в Абастуманской обсерватории выполнены на двойном астрографе Цейсса (ДАЦ: D/F = 400/3024 mm) и телескопе АЗТ-11 (F = 16 m). В результате обработки большого массива наблюдений получены точные координаты планет и их спутников в системе опорных звезд современных каталогов, а также относительные координаты спутников. Точность наблюдений в случайном отношении оценивается величинами 0.10"- 0.40" в зависимости от объектов и условий их наблюдений. Результаты наблюдений представлены в Пулковской базе данных по наблюдениям тел Солнечной системы, доступной в интернете по адресу www.puldb.ru. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-02-00675-а.

Введение

С 1983 по 1994 гг. в Абастуманской обсерватории Грузии проводилась совместная с Пулковской обсерваторией работа по позиционным фотографическим наблюдениям тел Солнечной системы. Цель работы заключалась в подготовке основы для небесно-механических исследований движений тел Солнечной системы. Работа производилась с использованием многолетнего опыта и методических разработок, принятых в Пулковской обсерватории для выполнения программы позиционных наблюдений тел Солнечной системы. Помимо фотографических наблюдений и их обработки совместная работа включала в себя также сравнение полученных результатов с современными теориями движений тел Солнечной системы. За период 1983-1994 гг. в Абастуманской обсерватории были выполнены фотографические наблюдения систем спутников Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна на двух телескопах: АЗТ-11 – спутников Марса во время великого противостояния 1988 г и на двойном астрографе Цейсса (ДАЦ) - всех остальных планет и их спутников. В данной работе подводятся итоги десятилетнего периода наблюдений и дается характеристика точности полученных результатов на основе сравнения с новейшими теориями движения спутников планет.

Наблюдения и редукция

Наблюдения выполнялись фотографическим методом с помощью телескопа АЗТ-11 (F = 16 m) и двойного астрографа Цейсса (ДАЦ, D/F = 400/3024 mm). Для ослабления блеска планет применялись напыленные хромовые фильтры различной плотности, изготовленные в Лаборатории оптики и точной механики Абастуманской обсерватории. Наблюдения производились двумя камерами телескопа ДАЦ одновременно. На каждой фотопластинке получали по несколько изображений системы спутников (2–5 изображений) с экспозициями от 1 до 9 минут в зависимости от яркости объектов.

Измерения производились на полуавтоматическом измерительном приборе Аско-рекорд. Редукция выполнялась методом шести постоянных, использовались опорные звезды каталогов РРМ, Тучо-1, Тучо-2. Для редукции наблюдений спутников Марса в 1988 г. использовался каталог опорных звезд по трассе Марса Х.И. Поттера. Всего за

период выполнения программы наблюдений получено свыше 700 пластинок с планетами и их спутниками с несколькими экспозициями на каждой пластинке, таким образом, получено свыше 3000 наблюдений систем спутников планет.

В результате обработки наблюдений получены звездные (в системе опорных звезд современных каталогов) координаты и относительные координаты планет Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и их спутников - взаимные относительные координаты вида "спутник минус спутник" и планетоцентрические координаты "спутник минус планета".

Наблюдения спутников Марса

В период великого противостояния Марса 1988 г. в рамках Всесоюзной программы "Фобос" на телескопе АЗТ-11 производились астрометрические наблюдения спутников Марса - Фобоса и Деймоса с целью наземного обеспечения этого космического проекта. При наблюдениях использовались хромовый светофильтр с пропусканием примерно в 1%, напыленный на желтый светофильтр ЖС-18, помещенный в кассете перед фотопластинкой. Применялись фотопластинки ORWO WP-1.

В задаче определения координат спутников с привязкой к центру планеты применялся метод "след-масштаб" [1], позволяющий определять относительные координаты без использования опорных звезд. При этом требуется знание масштаба телескопа с высокой относительной точностью ($\Delta M/M < 1 \cdot 10^{-3}$), ориентировка измерений производится по суточному следу планеты, спутника или звезды. В результате редукции методом "след-масштаб" были определены ареоцентрические и взаимные координаты Фобоса и Деймоса. Поскольку на пластинках имелись также и звезды, определены были также и экваториальные координаты спутников и Марса. В качестве опорного использовался каталог звезд по трассе Марса Х.И. Поттера, точность координат звезд в котором определена на уровне 0.2". Редукция выполнялась методом шести постоянных. Результаты сравнивались с теорией В.А. Шора [2] и с новыми, современными теориями V.L.1.0 и INPOP10 [3,4]. Полученные (О-С) дали возможность оценить внешнюю точность наблюдений. Средние значения (О-С) и среднеквадратические ошибки наблюдений ($\sigma_{\alpha \cos \delta}$, σ_{δ}) - дисперсии (О-С), вычисленные на основе сравнения с современными теориями, приведены в таблице.

В наблюдениях "спутник - Марс" учтены поправки за фотографический эффект фазы по геометрическому закону с поправкой, учитывающей специфику фотографических изображений по методу А.В. Девяткина [5-7]. Проверка результатов определения положений Марса путем сопоставления их с фазовыми углами показала отсутствие систематических ошибок зависящих от фазы.

Как показало сравнение наблюдений Марса и его спутников с новыми теориями, звездные координаты (прямое восхождение и склонение) определены с точностью 0.30" - 0.40". Относительные координаты спутников Марса "Фобос-Деймос" оказались более высокой точности: 0.15" - 0.16".

Полученные в Абастуманской обсерватории координаты спутников Марса в оперативном порядке передавались в центр сбора наблюдательных данных для эфемеридного обеспечения космического проекта «Фобос», выполнявшегося в 1988 г.

Результаты наблюдений галилеевых спутников Юпитера

Наблюдения системы галилеевых спутников Юпитера (1983-1994) производились с помощью двойного астрографа Цейса. В результате редукции были вычислены экваториальные (α , δ) геоцентрические координаты галилеевых спутников на эпоху экватора и равноденствия J2000.0. Были вычислены также относительные (взаимные) координаты как разности экваториальных координат ($\Delta \alpha \cos \delta$, $\Delta \delta$). Экваториальные координаты

ты Юпитера определялись по спутникам без измерения изображений планеты на фотографиях путем добавления к наблюдаемым экваториальным координатам галилеевых спутников теоретических иовицентрических координат спутников, вычисленных на основе теории движения спутников V2.0 [8]. Всего было получено таким образом 204 положения Юпитера. Определенные таким образом по спутникам координаты Юпитера сравнивались с теоретическими, вычисленными по теории INPOP10 с помощью средств программного комплекса MULTI-SAT [9]. Результаты сравнения приведены в таблице.

Данные таблицы представляют внешнюю точность наблюдений, отражающие как ошибки наблюдений, так и ошибки теории. Значения внутренних ошибок наблюдений, обусловленных ошибками измерений объектов на фотографиях и ошибками редукции, оказались равными $0.166''$, $0.168''$. Зная величины внутренних ошибок и внешних ошибок, приведенных в таблице ($0.186''$ и $0.181''$), можно оценить значения ошибок теории движения галилеевых спутников Юпитера величинами $0.084''$ и $0.067''$. Таким образом, положения галилеевых спутников, определенные в Абастуманской обсерватории с помощью телескопа ДАЦ обладают достаточно высокой точностью, на уровне современных определений положений спутников системы Юпитера.

Оценка влияния солнечной фазы в положениях спутников Юпитера показала, что величины поправок за фазу почти на порядок меньше ошибок наблюдений, т.е. в пределах точности наших наблюдений эти поправки можно не учитывать.

Наблюдения спутников Сатурна

Наблюдения спутников Сатурна производились с 1982 г. по 1994 г. двумя камерами астрографа одновременно.

В данной работе представлены результаты обработки наблюдений 1982-1984 гг. В качестве опорного каталога применялся каталог ФОКАТ-Ю, созданный в Пулковской обсерватории [10]. Астрометрическая редукция выполнялась методом шести постоянных по 8–10 опорным звездам на фотопластинках. В результате редукции определены звездные и относительные координаты спутников "спутник минус спутник", а также звездные координаты спутников Дионы, Реи, Тэфии, Титана, Япета. Координаты Сатурна определены без измерения изображений Сатурна на фотографиях по наблюдаемым экваториальным координатам спутников и их теоретическим хроноцентрическим координатам, вычисленным с помощью программного комплекса MULTI-SAT. Звездные координаты спутников и Сатурна определены по наблюдениям 1984 г (6 пластинок) с опорным каталогом АСТ.

Результаты сравнения с эфемеридами и оценки точности на основе этого сравнения приведены в таблице.

Наблюдения Урана, Нептуна и их спутников Титании, Оберона и Тритона

Наблюдения Урана и его спутников производились в 1987-1994 гг. на телескопе ДАЦ двумя камерами одновременно. На одной камере фотографировался Уран с экспозицией в 1 минуту через напыленный хромовый светофильтр, ослабляющий блеск Урана до 10 звездной величины - для определения его точных положений относительно опорных звезд. На другой камере одновременно фотографировались планета и спутники без фильтра с экспозицией 6–9 минут - для определения точных положений спутников. Таким образом, длительность каждой экспозиции на двух камерах была различной, но середины их совпадали, что обеспечивало одновременность полученных положений планеты – на одной камере и спутников – на другой. На каждой паре пластинок производились по три экспозиции планеты, спутников и опорных звезд. В результате применения такой методики наблюдений определялись положения планеты и спутников от-

носителем одних и тех же опорных звезд (PPM и Tycho-1), а также относительные положения "спутник минус планета и "спутник минус спутник".

При наблюдениях Нептуна светофильтры не применялись, Нептун и Тритон фотографировались отдельно с экспозициями в 1 минуту для Нептуна и 6-8 минут для Тритона на двух камерах одновременно. В результате редукиции получены звездные координаты Нептуна и Тритона относительно звезд каталога Tycho-1.

Выполнено сравнение наблюдений с эфемеридами - DE405, Gust86 [11] и теорией Якобсона [12]. В таблице приводятся результаты анализа точности наблюдений: средние разности (O-C) по прямому восхождению и склонению и среднеквадратичные ошибки одного наблюдения, среднего по двум пластинкам и нескольким экспозициям ($\sigma_{\alpha \cos \delta}$, σ_{δ}). В последней строке таблицы приводятся результаты определения положений контрольных звезд, наблюдавшихся в целях контроля астрометрической редукиции на телескопе ДАЦ. Данные этой строки показывают достаточно высокую точность определения положений контрольных звезд.

Систематические расхождения наблюдений и теории, проявившиеся в (O-C) Урана, Нептуна и их спутников в экваториальных координатах, а также в планетоцентрических координатах спутников Урана, указывают на неточность теорий движения планет. В то же время относительные взаимные положения двух спутников Урана показывают хорошее согласие с эфемеридой, что свидетельствует о более высокой точности эфемерид спутников по сравнению с эфемеридой Урана.

Таблица. Оценка точности звездных положений планет и их спутников. Средние (O-C) и среднеквадратические ошибки наблюдений.

Объекты	(O-C) $_{\alpha \cos \delta}$ arcsec	(O-C) $_{\delta}$ arcsec	$\sigma_{\alpha \cos \delta}$ arcsec	σ_{δ} arcsec	Число наблюдений
Марс	0.180	-0.100	± 0.400	± 0.300	20
Фобос	0.220	-0.100	0.460	0.280	27
Деймос	0.360	-0.030	0.260	0.300	14
Юпитер	-0.057	0.011	0.174	0.154	204
Спутники 1-4	-0.046	-0.024	0.186	0.181	256
Сатурн	-0.100	0.008	0.142	0.137	36
Спутники 3-6,8	-0.002	-0.034	0.171	0.178	60
Уран	0.035	-0.176	0.200	0.245	105
Спутники 3-4	0.184	-0.207	0.330	0.350	104
Нептун	-0.030	0.266	0.110	0.199	65
Тритон	-0.090	-0.200	0.320	0.290	28
Контрольные звезды	-0.060	-0.070	0.120	0.140	105

Заключение

Наблюдательный материал по спутникам планет, полученный в Абастуманской обсерватории, может быть использован для уточнения существующих теорий движения тел Солнечной системы. Списки точных положений планет и спутников опубликованы в работах [13–19]. Кроме того, результаты наблюдений представлены в Пулковской базе данных по наблюдениям тел Солнечной системы [20], доступной в Интернете по адресу <http://www.puldb.ru>.

Литература

1. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. 1989. М. Наука. 260 с.
2. Шор В.А. Уточнение орбит Фобоса и Деймоса по наземным и космическим наблюдениям. // Письма в Астрон. Журнал. 1988. т.14. № 12. С. 1123-1130.

3. *Lainey V., Dehant V., Patzold M.* First numerical ephemerides of the Martian moons. // *A. & A.* 2007. v.465. P.1075-1084.
4. *Fienga A., Manche H., Laskar J., Gastineau M.* INPOP6: a new numerical planetary ephemeris. // *Astron. & Astrophys.* 2008. v. 477. P. 315-327.
5. *Бронникова Н.М., Киселев А.А.* Фотографические наблюдения Венеры в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе. // *Известия ГАО в Пулкове.* 1973. № 191. С. 148-163.
6. *Девяткин А.В.* К вопросу об учете фазы при фотоэлектрических и фотографических наблюдениях. // *Известия ГАО в Пулкове.* 1985. № 203. С. 54-57.
7. *Девяткин А.В.* К вопросу об учете фазы при фотоэлектрических и фотографических наблюдениях. // *Известия ГАО в Пулкове.* 1985. № 203. С. 54-57.
8. *Lainey V., Vienne A., Duriez L.* New accurate ephemerides for the Galilean Satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. // *Astron. & Astrophys.* 2004. v. 20. P. 1171-1183.
9. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural ephemerides facility MULTI-SAT // *Astron. & Astrophys.* 2008. v.487. P. 759-765.
10. *Быстров Н.Ф., Положенцев Д.Д., Поттер Х.И., и др.* О каталоге ФОКАТ // *Астрономический журнал.* 1989. т. 66. N 2. С. 425-428.
11. *Laskar J., Jacobson R.A.* GUST-86 – Analytical ephemeris of the Uranian satellites. // *Astronomy & Astrophysics.* 1987. V.188. P.212-224.
12. *Jacobson R.A.* The orbits of the Neptunian satellites and the orientation of the pole of Neptune. // *Astronomical Journal.* 2009. V.137. P.4322-4329.
13. *Калиниченко О.А., Киселева Т.П., Салуквадзе Г.Н., Чантурия С.М.* О фотографических позиционных наблюдениях спутников Марса в Абастумани во время великого противостояния 1988 г. // *Бюлл. АБАО.* 1990. № 68. С. 99-110.
14. *Киселева Т.П., Чантурия С.М., Лепешенкова С.А., Лапина Е.В., Сулейманова С.Л., Толбин С.В.* Фотографические позиционные наблюдения Юпитера, Сатурна и их спутников в Абастумани в 1983-1984 гг. // *Бюлл. АБАО.* 1987. № 62. С. 117-130.
15. *Киселева Т.П., Чантурия С.М.* Фотографические позиционные наблюдения Фобоса в Абастумани в 1986 г. // *Бюлл. АБАО.* 1988. № 63. С. 31-34.
16. *Киселева Т.П., Чантурия С.М.* Определение положений спутников Сатурна – Дионы, Реи, Титана, Гипериона и Япета по наблюдениям в Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузии. // *Известия ГАО в Пулкове.* 2001. № 214. С. 356-360.
17. *Киселева Т.П., Чантурия С.М., Васильева Т.А., Калиниченко О.А.* Оценка точности наблюдений галилеевых спутников Юпитера, выполненных в Абастуманской астрофизической обсерватории АН республики Грузия. // *Астрономический вестник.* 2012. v.46, № 5, С. 418-420.
18. *Чантурия С.М., Киселева Т.П., Емельянов Н.В.* Фотографические позиционные наблюдения Урана и его спутников – Титании и Оберона в Абастумани в 1987-1994 гг. // *Известия ГАО в Пулкове.* 2002. № 216. С. 349-362.
19. *Чантурия С.М., Киселева Т.П.* Фотографические позиционные наблюдения Нептуна и Тритона в Абастумани в 1985-1993 гг. // *Изв. ГАО в Пулкове.* 2006. № 218. С. 188-192.
20. *Киселева Т.П., Хруцкая Е.В.* Астрометрические наблюдения тел Солнечной системы в Пулкове с 1898 по 2005 г. База данных результатов наблюдений. // *Астрономический вестник.* 2007. т.41. № 1. С.77-85.

**THE RESULTS OF ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF PLANETARY SATELLITES IN
ABASTUMANI ASTROPHYSICAL OBSERVATORY IN 1983-1994**

Kiseleva T.P.¹, Chanturiya S.M.², Vasilieva T.A.¹, Kalinichenko O.A.¹

¹*The Main (Pulkovo) astronomical Observatory of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*The Abastumani astrophysical Observatory of the Academy of Sciences of the Republic Georgia,
Abastumani*

The results of carrying out of the programme of astrometric observations of the satellites of planets Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune in Abastumani astrophysical observatory of Georgia in the period 1983 - 1994 are presented and discussed. The observations were carried out with the Zeiss Double Astrograph (ZDA: D/F = 400/3000 mm) and the telescope AZT-11 (F = 16 m). The accurate equatorial and relative coordinates of the planets and their satellites have been determined by the reductions of large massif of observations in a system of modern catalogues. The results were compared with a modern theories of motions of planets and satellites by the help of programme resource MULTI-SAT. The results of comparing allowed to estimate the accuracy of observations and modern theories. The accuracy of observations in accidental respect is about 0.10" - 0.40" in depending of objects and conditions of observations. The systematic discrepancy of the results of observations of Uranus, Neptune and satellites Titania and Oberon with their theories of motions were discovered. The results of observations are presented in Pulkovo database availabl to Internet with address: www.puldb.ru.

The work was supported by RFBR, grant № 12-02-00675-a.

ЭФЕМЕРИДЫ ГЛАВНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ В ПРИЛОЖЕНИИ К АСТРОНОМИЧЕСКОМУ ЕЖЕГОДНИКУ

Космодамианский Г.А., Порошина А.Л., Замарашкина М.Д.
Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены эфемеридные таблицы спутников Марса (Фобос, Деймос), Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), Сатурна (Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет) и Урана (Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон, Миранда), вычисленные на основе численных теорий их движения, построенных в ИПА РАН.

1. Введение

Астрономический ежегодник – периодическое научное издание, в котором публикуются эфемериды Солнца, Луны, планет и звёзд, а также приводятся сведения о различных астрономических явлениях – затмениях, покрытиях, планетных конфигурациях, восходах и заходах Солнца и Луны и т.д. В 1970-х – 1980-х гг. в качестве приложения к Астрономическому ежегоднику издавались эфемериды галилеевых спутников Юпитера.

В связи с тем, что в 2006 г. Астрономический ежегодник полностью перешёл на отечественные эфемериды EPM2004, было принято решение о создании в ИПА РАН численных теории движения естественных спутников планет. В 2007 г. была возобновлена работа по созданию эфемерид спутников планет.

Вычисления проведены в рамках программного пакета ЭРА (Эфемеридные Расчёты в Астрономии) [1], разработанного в ИПА РАН. ЭРА представляет собой проблемно-ориентированную программную систему, предназначенную для решения задач, связанных с моделированием любого типа наблюдений (таких как определение положений небесных тел на небесной сфере и обработка наблюдений различных астрономических явлений), а также с построением динамических моделей небесных тел.

Эфемериды всех спутников вычислены на основе теорий движения, разработанных в ИПА РАН [2, 3, 4]. Все представленные в данной статье таблицы доступны на сайте ИПА РАН по ссылке <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/rusipa.htm> в разделе «Астрономам-любителям».

2. Эфемериды спутников Марса

В таблицах эфемерид для Фобоса и Деймоса представлены моменты по всемирному времени наибольших восточных элонгаций этих спутников. Рис. 1 представляет образец таблицы для Деймоса. В таблице с точностью до доли часа даны моменты всех явлений в течение года, разделённые по месяцам.

3. Эфемериды галилеевых спутников Юпитера

На рис. 2 представлен оригинал-макет страницы раздела «Астрономического ежегодника», посвящённого галилеевым спутникам Юпитера. На странице приведены: таблица явлений в системе галилеевых спутников, графики, представляющие приближённые конфигурации спутников и таблица, представляющая обстоятельства видимости затмений спутников Юпитером для дат, близких к середине месяца.

Для галилеевых спутников введены обозначения: I – Ио, II – Европа, III – Ганимед, IV – Каллисто. В таблице явлений введены обозначения: НЗ – начало затмения спутника, КЗ – конец затмения спутника, НП – начало покрытия спутника, КП – конец покрытия спутника, ВТ – вхождение тени спутника на диск Юпитера, СТ – схождение

тени спутника с диска Юпитера, НС – начало прохождения спутника по диску Юпитера, КС – конец прохождения спутника по диску Юпитера.

СПУТНИКИ МАРСА 2012
МОМЕНТЫ НАИБОЛЬШЕЙ ВОСТОЧНОЙ ЭЛОНГАЦИИ ПО ВСЕМИРНОМУ ВРЕМЕНИ

Деймос

Янв.		Фев.		Мар.		Апр.		Май		Июн.		Июл.		Авг.		Сен.		Окт.		Ноя.		Дек.			
д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч	д	ч
0	07.1	2	03.1	2	03.2	1	09.4	1	16.7	1	00.7	1	09.3	2	00.4	1	09.2	1	18.1	1	03.0	1	11.9		
1	13.4	3	09.3	3	09.4	2	15.7	2	23.0	2	07.1	2	15.6	3	06.8	2	15.6	3	00.5	2	09.3	2	18.2		
2	19.8	4	15.6	4	15.7	3	22.0	4	05.3	3	13.4	3	22.0	4	13.1	3	22.0	4	06.8	3	15.7	4	00.6		
4	02.1	5	21.9	5	21.9	5	04.3	5	11.7	4	19.8	5	04.4	5	19.5	5	04.3	5	13.2	4	22.1	5	07.0		
5	08.4	7	04.2	7	04.2	6	10.6	6	18.0	6	02.1	6	10.7	7	01.9	6	10.7	6	19.6	6	04.4	6	13.4		
6	14.7	8	10.4	8	10.4	7	16.9	8	00.3	7	08.5	7	17.1	8	08.2	7	17.1	8	01.9	7	10.8	7	19.8		
7	21.0	9	16.7	9	16.7	8	23.1	9	06.6	8	14.8	8	23.4	9	14.6	8	23.4	9	08.3	8	17.1	9	02.1		
9	03.4	10	23.0	10	22.9	10	05.5	10	13.0	9	21.2	10	05.8	10	21.0	10	05.8	10	14.7	9	23.5	10	08.5		
10	09.7	12	05.3	12	05.2	11	11.8	11	19.3	11	03.5	11	12.2	12	03.3	11	12.2	11	21.0	11	05.9	11	14.9		
11	16.0	13	11.5	13	11.4	12	18.0	13	01.6	12	09.9	12	18.5	13	09.7	12	18.6	13	03.4	12	12.3	12	21.3		
12	22.3	14	17.8	14	17.7	14	00.3	14	08.0	13	16.2	14	00.9	14	16.1	14	00.9	14	09.8	13	18.6	14	03.6		
14	04.6	16	00.1	15	23.9	15	06.6	15	14.3	14	22.6	15	07.3	15	22.4	15	07.3	15	16.1	15	01.0	15	10.0		
15	10.9	17	06.3	17	06.2	16	12.9	16	20.6	16	05.0	16	13.6	17	04.8	16	13.7	16	22.5	16	07.4	16	16.4		
16	17.2	18	12.6	18	12.5	17	19.2	18	03.0	17	11.3	17	20.0	18	11.2	17	20.0	18	04.9	17	13.8	17	22.8		
17	23.5	19	18.9	19	18.7	19	01.6	19	09.3	18	17.7	19	02.4	19	17.5	19	02.4	19	11.3	18	20.1	19	05.1		
19	05.8	21	01.1	21	01.0	20	07.9	20	15.6	20	00.0	20	08.7	20	23.9	20	08.8	20	17.6	20	02.5	20	11.5		
20	12.1	22	07.4	22	07.3	21	14.2	21	22.0	21	06.4	21	15.1	22	06.3	21	15.1	22	00.0	21	08.9	21	17.9		
21	18.4	23	13.6	23	13.5	22	20.5	23	04.3	22	12.7	22	21.4	23	12.7	22	21.5	23	06.3	22	15.3	23	00.3		
23	00.7	24	19.9	24	19.8	24	02.8	24	10.7	23	19.1	24	03.8	24	19.0	24	03.9	24	12.7	23	21.6	24	06.6		
24	07.0	26	02.1	26	02.1	25	09.1	25	17.0	25	01.4	25	10.2	26	01.4	25	10.2	25	19.1	25	04.0	25	13.0		
25	13.3	27	08.4	27	08.3	26	15.4	26	23.4	26	07.8	26	16.6	27	07.8	26	16.6	27	01.4	26	10.4	26	19.4		
26	19.6	28	14.7	28	14.6	27	21.7	28	05.7	27	14.2	27	22.9	28	14.1	27	23.0	28	07.8	27	16.8	28	01.8		
28	01.9	29	20.9	29	20.9	29	04.0	29	12.0	28	20.5	29	05.3	29	20.5	29	05.3	29	14.2	28	23.1	29	08.2		
29	08.2			31	03.2	30	10.4	30	18.4	30	02.9	30	11.7	31	02.9	30	11.7	30	20.6	30	05.5	30	14.6		
30	14.5											31	18.0									31	20.9		
31	20.8																								

Рис. 1.

Реальные явления в системе галилеевых спутников происходят не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. В таблице для НЗ, НП, ВТ, НС приведён конечный момент явления, когда диск или тень спутников полностью погружаются в тень или заходят на диск Юпитера. Для СТ, КС приведён момент начала схода тени или диска спутников с диска Юпитера. Для КЗ, КП приведены моменты начала выхода спутника из тени или появления из-за диска Юпитера.

На графиках центральная полоса представляет диск Юпитера, горизонтальные линии отмечают начало календарных суток, т.е. соответствуют 0^h 00^m всемирного времени. Положение спутников относительно диска Юпитера определяется синусоидальными кривыми. Горизонтальная шкала в верхней и нижней части графиков приводится в минутах дуги.

В таблице видимости обстоятельств затмения спутников Юпитером, расположенной внизу страницы, буквами «н» и «к» обозначены соответственно точки входа спутника в тень Юпитера (начало затмения) и выхода спутника из тени (конец затмения). Также в таблице приводятся координаты этих точек, выраженные в единицах экваториального радиуса Юпитера и отнесённые к системе координат ху, ось абсцисс которой параллельна экватору Юпитера и направлена к востоку, ось ординат направлена в северный полюс Юпитера. Индекс «1» соответствует началу, а индекс «2» – концу затмения.

3. Эфемериды главных спутников Сатурна

Эфемериды восьми главных спутников Сатурна представлены тремя типами таблиц. Первый тип представляет моменты по всемирному времени наибольших восточных элонгаций, происходящих в течение года, для Мимаса, Энцелада, Тэфии, Дионы и Реи. Эти таблицы аналогичны таблице для Деймоса, представленной на рис. 1. Во втором типе таблиц для Титана, Гипериона и Япета приводятся моменты элонгаций спутников и их соединений с Сатурном, происходящих в течение года. Моменты времени даны по всемирному времени с точностью до доли часа. Пример эфемерид для Титана

представлен на рис. 3. Эфемериды для Гипериона и Япета выглядят аналогичным образом.

10

ГАЛИЛЕЕВЫ СПУТНИКИ ЮПИТЕРА 2012

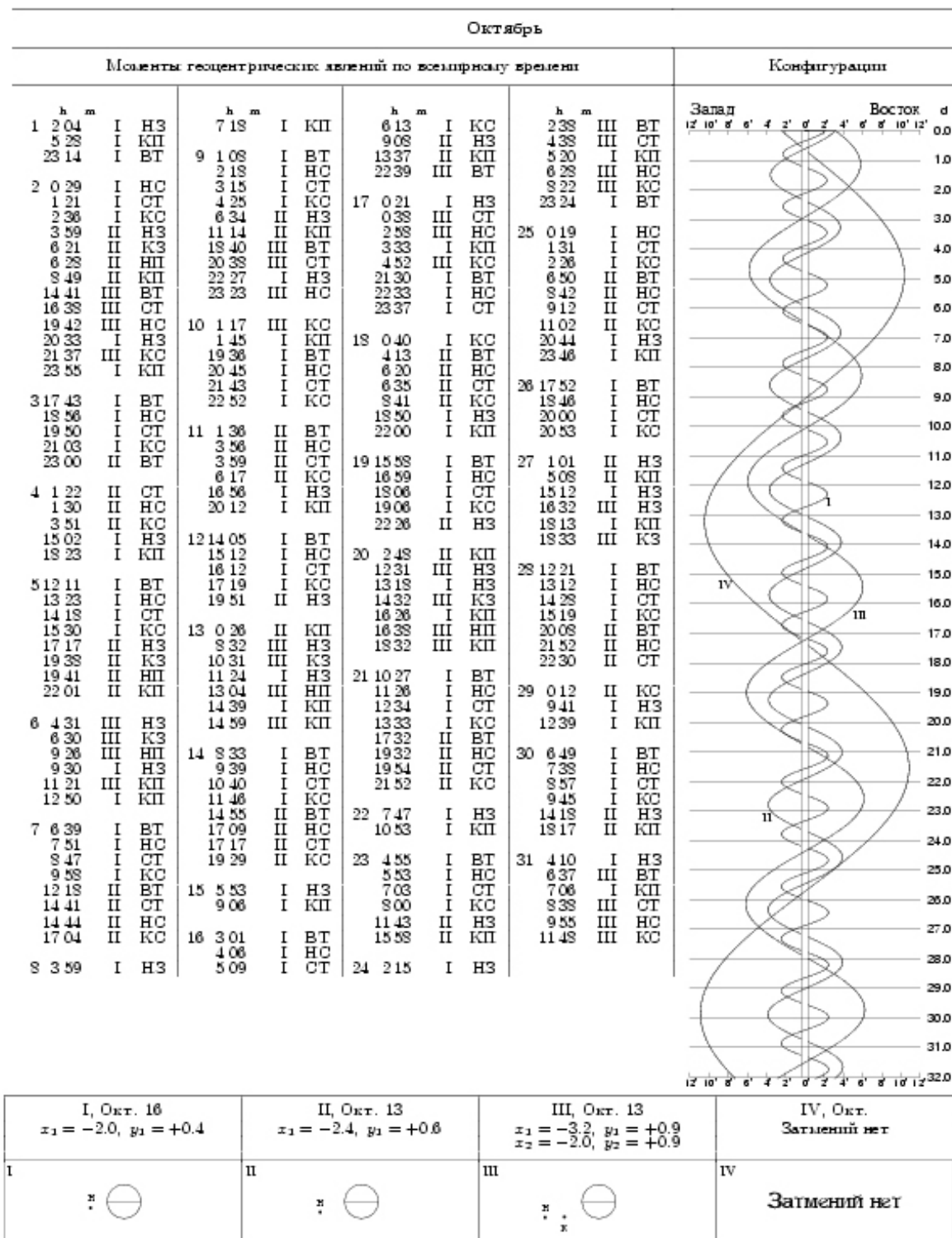


Рис. 2.

СПУТНИКИ САТУРНА 2012
МОМЕНТЫ СОЕДИНЕНИЙ И ЭЛОНГАЦИЙ ПО ВСЕМИРНОМУ ВРЕМЕНИ

Титан

Восточная Элонгация		Нижнее Соединение		Западная Элонгация		Верхнее Соединение	
д	ч	д	ч	д	ч	д	ч
				Янв.	2 13.9	Янв.	6 17.3
	10 15.8	Янв.	14 11.8		18 13.4		22 16.8
	26 15.3		30 10.8	Фев.	3 12.5	Фев.	7 15.6
Фев.	11 13.9	Фев.	15 09.6		19 11.0		23 14.2
	27 12.5	Мар.	2 07.9	Мар.	6 09.1	Мар.	10 12.0
Мар.	14 10.1		18 05.8		22 06.7		26 09.8
	30 07.7	Апр.	3 03.4	Апр.	7 04.3	Апр.	11 07.2
Апр.	15 05.3		19 00.9		23 01.4		27 04.5
Май	1 02.9	Май	4 22.6	Май	8 23.0	Май	13 02.1
	17 00.5		20 20.1		24 20.6		29 00.0
Июнь	1 22.1	Июнь	5 18.2	Июнь	9 18.7	Июнь	13 22.1
	17 20.6		21 16.8		25 17.3		29 20.6
Июль	3 19.2	Июль	7 15.6	Июль	11 15.8	Июль	15 19.7
	19 18.2		23 14.6		27 15.3		31 19.2
Авг.	4 17.8	Авг.	8 14.4	Авг.	12 14.9	Авг.	16 18.9
	20 17.8		24 14.2		28 15.3		Сен. 1 19.2
Сен.	5 17.8	Сен.	9 14.4	Сен.	13 15.8	Сен.	17 19.7
	21 18.2		25 14.6		29 16.3		Окт. 3 20.1
Окт.	7 18.7	Окт.	11 15.1	Окт.	15 16.8	Окт.	19 21.1
	23 19.7		27 15.8		31 17.8		Ноя. 4 21.8
Ноя.	8 20.1	Ноя.	12 16.3	Ноя.	16 18.7		20 22.6
	24 21.1		28 17.0	Дек.	2 19.2	Дек.	6 23.0
Дек.	10 21.6	Дек.	14 17.3		18 19.7		22 23.5
	26 21.6		30 17.5				

Рис. 3.

Третий тип эфемерид представляет собой дифференциальные координаты Гипериона и Япета относительно Сатурна, вычисленные с постоянным шагом в двое суток. В таблице даны дата и значения дифференциальных координат спутника. Разность прямых восхождений дана в секундах времени, разность склонений в секундах дуги. Пример эфемерид для Гипериона представлен на рис. 4.

4. Спутники Урана

В эфемеридах пяти спутников Урана даны моменты по всемирному времени наибольших северных элонгаций, происходящих в течение года. Оформление таблиц аналогично оформлению таблиц для спутников Марса, пример которой представлен на рис. 1.

СПУТНИКИ САТУРНА 2012
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ ГИПЕРИОНА ДЛЯ 0 ЧАСОВ ВСЕМИРНОГО ВРЕМЕНИ

Дата	dA	dD	Дата	dA	dD	Дата	dA	dD			
	с	,		с	,		с	,			
Янв.	-1	+ 2	- 0.9	Май	2	+ 15	- 0.4	Сен.	3	+ 11	+ 0.5
	1	- 5	- 0.8		4	+ 9	- 0.7		5	+ 14	+ 0.2
	3	- 11	- 0.4		6	+ 0	- 0.9		7	+ 13	- 0.2
	5	- 12	+ 0.1		8	- 7	- 0.7		9	+ 9	- 0.6
	7	- 8	+ 0.6		10	- 13	- 0.3		11	+ 2	- 0.8
	9	- 1	+ 0.8		12	- 13	+ 0.2		13	- 5	- 0.7
	11	+ 6	+ 0.8		14	- 7	+ 0.6		15	- 10	- 0.4
	13	+ 12	+ 0.5		16	+ 1	+ 0.8		17	- 11	+ 0.1
	15	+ 15	+ 0.0		18	+ 9	+ 0.7		19	- 7	+ 0.6
	17	+ 13	- 0.4		20	+ 15	+ 0.4		21	- 0	+ 0.8
	19	+ 7	- 0.8		22	+ 16	- 0.0		23	+ 6	+ 0.8
	21	+ 0	- 0.9		24	+ 13	- 0.5		25	+ 11	+ 0.5
	23	- 7	- 0.7		26	+ 6	- 0.8		27	+ 14	+ 0.1
	25	- 12	- 0.3		28	- 2	- 0.8		29	+ 12	- 0.4
	27	- 12	+ 0.3		30	- 10	- 0.6	Окт.	1	+ 7	- 0.7
	29	- 6	+ 0.7	Июнь	1	- 13	- 0.2		3	+ 0	- 0.8
	31	+ 1	+ 0.9		3	- 11	+ 0.3		5	- 6	- 0.7
Фев.	2	+ 9	+ 0.7		5	- 4	+ 0.7		7	- 11	- 0.3
	4	+ 14	+ 0.3		7	+ 4	+ 0.8		9	- 10	+ 0.3
	6	+ 15	- 0.2		9	+ 11	+ 0.6		11	- 6	+ 0.7
	8	+ 12	- 0.6		11	+ 15	+ 0.2		13	+ 1	+ 0.9
	10	+ 5	- 0.9		13	+ 15	- 0.2		15	+ 8	+ 0.7
	12	- 3	- 0.9		15	+ 11	- 0.6		17	+ 12	+ 0.4
	14	- 10	- 0.6		17	+ 3	- 0.8		19	+ 13	- 0.1
	16	- 13	- 0.1		19	- 4	- 0.7		21	+ 11	- 0.5
	18	- 11	+ 0.5		21	- 11	- 0.5		23	+ 6	- 0.8
	20	- 3	+ 0.9		23	- 13	+ 0.0		25	- 1	- 0.9
	22	+ 5	+ 0.9		25	- 9	+ 0.5		27	- 8	- 0.6
	24	+ 12	+ 0.6		27	- 1	+ 0.7		29	- 11	- 0.1
	26	+ 16	+ 0.2		29	+ 6	+ 0.7		31	- 10	+ 0.4
	28	+ 15	- 0.3	Июль	1	+ 13	+ 0.5	Ноя.	2	- 4	+ 0.8
Мар.	1	+ 10	- 0.8		3	+ 15	+ 0.1		4	+ 2	+ 0.9
	3	+ 2	- 1.0		5	+ 14	- 0.3		6	+ 9	+ 0.7
	5	- 6	- 0.8		7	+ 8	- 0.6		8	+ 13	+ 0.3
	7	- 12	- 0.4		9	+ 0	- 0.8		10	+ 13	- 0.2
	9	- 13	+ 0.2		11	- 7	- 0.7		12	+ 10	- 0.6
	11	- 8	+ 0.7		13	- 12	- 0.3		14	+ 4	- 0.9
	13	- 0	+ 0.9		15	- 12	+ 0.2		16	- 3	- 0.9
	15	+ 8	+ 0.8		17	- 7	+ 0.6		18	- 9	- 0.5
	17	+ 14	+ 0.5		19	+ 1	+ 0.8		20	- 11	+ 0.1
	19	+ 16	- 0.0		21	+ 8	+ 0.7		22	- 9	+ 0.6
	21	+ 14	- 0.5		23	+ 13	+ 0.4		24	- 2	+ 0.9
	23	+ 7	- 0.9		25	+ 15	- 0.0		26	+ 4	+ 0.9
	25	- 1	- 0.9		27	+ 12	- 0.4		28	+ 10	+ 0.6
	27	- 9	- 0.7		29	+ 6	- 0.7		30	+ 13	+ 0.2
	29	- 14	- 0.2		31	- 1	- 0.8	Дек.	2	+ 13	- 0.3
	31	- 12	+ 0.4	Авг.	2	- 8	- 0.6		4	+ 9	- 0.8
Апр.	2	- 5	+ 0.8		4	- 12	- 0.2		6	+ 2	- 1.0
	4	+ 3	+ 0.9		6	- 10	+ 0.3		8	- 5	- 0.8
	6	+ 11	+ 0.7		8	- 4	+ 0.7		10	- 10	- 0.4
	8	+ 16	+ 0.3		10	+ 3	+ 0.8		12	- 11	+ 0.3
	10	+ 16	- 0.2		12	+ 10	+ 0.6		14	- 7	+ 0.8
	12	+ 12	- 0.6		14	+ 14	+ 0.3		16	- 0	+ 1.0
	14	+ 4	- 0.9		16	+ 14	- 0.1		18	+ 6	+ 0.9
	16	- 4	- 0.9		18	+ 10	- 0.5		20	+ 12	+ 0.6
	18	- 12	- 0.5		20	+ 4	- 0.7		22	+ 14	+ 0.0
	20	- 14	+ 0.0		22	- 3	- 0.7		24	+ 13	- 0.5
	22	- 10	+ 0.5		24	- 9	- 0.5		26	+ 7	- 0.9
	24	- 2	+ 0.8		26	- 12	- 0.0		28	+ 0	- 1.0
	26	+ 6	+ 0.8		28	- 9	+ 0.4		30	- 7	- 0.8
	28	+ 13	+ 0.5		30	- 2	+ 0.7		32	- 12	- 0.2
	30	+ 16	+ 0.1	Сен.	1	+ 4	+ 0.8				

Рис. 4.

Литература

1. *Krasinsky G.A., Vasilyev M.V.* ERA: Knowledge Base for Ephemeris and Dynamical Astronomy. Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies. Proceedings of IAU Coll. 165. 1997, 239–244.
2. *Poroshina A., Zamarashkina M., Kosmodamianskiy G.*, Construction of the numerical motion theories for the main satellites of Mars, Jupiter, Saturn and Uranus in IAA RAS. Труды ИПА РАН № 26. 2012, 74-79.
3. *Порошина А.Л., Космодамианский Г.А.*, Построение численных теорий движения основных спутников планет в системе ЭРА, см. наст. сборник.
4. *G. Kosmodamiansiy, A. Poroshina, M. Zamarashkina.* Numerical theories of the main satellites of planets. Труды международной астрономической конференции ASTROKAZAN-2011. Kazan, 2011, 263-265.

EPHEMERIDES OF THE MAIN SATELLITES OF PLANETS AS SUPPLEMENT TO THE ASTRONOMICAL YEARBOOK

Kosmdamianskiy G.A., Poroshina A.L., Zamarashkina M.D.
Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

This paper presents the ephemerides of satellites of Mars (Phobos, Deimos), galilean satellites of Jupiter (Io, Europa, Ganymede, Callisto), main satellites of Saturn (Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rea, Titan, Hyperion, Iapetus) and five satellites of Uranus (Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda). Ephemerides are calculated on basis of numerical motion theories of this satellites developed in IAA RAS. All ephemerides are given at <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/rusipa.htm>.

КАТАЛОГ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ НУМЕРОВАННЫХ АСТЕРОИДОВ ИПА РАН

Кочетова О.М., Кузнецов В.Б., Медведев Ю.Д., Шор В.А.

ИПА РАН, Санкт-Петербург, Россия

В статье излагаются результаты уточнения орбит 322 611 нумерованных малых планет на основе каталога наблюдений Центра малых планет и результаты сравнения уточненных орбит с орбитами из каталога орбит Центра. Приводятся статистические данные о точности наблюдений малых планет в разные эпохи, точности наблюдений на некоторых обсерваториях и точности наблюдений в зависимости от геоцентрического расстояния.

Задача независимого определения орбит всех тел из наблюдений становится особенно актуальной в связи с астероидно-кометной опасностью и планами создания российского регионального информационно-вычислительного центра по этой опасности. С учетом указанных обстоятельств, было решено подготовить том «Эфемериды малых планет» (ЭМП) на 2013 г. [1] на основе систем элементов, вычисленных в ИПА по наблюдениям, включенным в каталог наблюдений Центра малых планет (Minor Planet Center (MPC)).

Была подготовлена программа уточнения орбит, адаптированная для использования на вычислительной станции Sun. С помощью этой программы уточнены орбиты 322 611 нумерованных малых планет по состоянию на март 2012 года.

Для улучшения был использован каталог оптических наблюдений астероидов, содержащий свыше 79 000 000 наблюдений. Из их числа для процедуры улучшения были отобраны только те наблюдения, чья точность по всем трём данным t , α , и δ является стандартной (0.00001 сут, 0.01^s и $0.1''$).

Для отобранных наблюдений была использована следующая весовая матрица: до 1901 г. — $1/16$; с 1901г. по 1950 г. — $1/9$; с 1951г. по 1995 г. — $1/4$; с 1996 г. — 1 .

В качестве динамической модели Солнечной системы была принята эфемерида DE405, причём Земля и Луна рассматривались отдельно.

На первом этапе производилось улучшение элементов орбит Цереры, Паллады и Весты с учётом возмущений от больших планет, Луны, Плутона и их самих. После улучшения орбит Цереры, Паллады и Весты по элементам их орбит была вычислена эфемерида, которая совместно с DE405 использовалась для учёта возмущений остальных малых планет.

Результаты этого улучшения были сопоставлены с результатами уточнения орбит, выполненными в Центре малых планет. При этом сравнении следовало учитывать то, что наше уточнение было выполнено на основе каталога наблюдений по его состоянию на март 2012 г., в то время как орбиты Центра были исправлены в разные годы. Поэтому для объективности сравнения из всей совокупности орбит астероидов были отобраны 242 тысячи орбит, улучшение которых стартовало в ИПА и в Центре малых планет на основе одного и того же массива наблюдений. Другими словами, если после исправления орбиты некоторой планеты в Центре малых планет в каталог наблюдений были добавлены ее новые наблюдения, то такая планета не включалась в сравнение.

Итак, из сравниваемых 242 000 орбит, для которых процесс улучшения стартовал с использования одного и того же набора наблюдений, почти в 212 000 случаев число наблюдений, реально использованных при уточнении орбит в ИПА, оказалось больше, по сравнению с 5600 случаев, когда число использованных наблюдений оказалось больше в Центре малых планет. Примерно в 25 000 случаях число использованных наблюдений оказалось равным. При этом 5000 орбит ИПА были найдены по наблюдени-

ям, покрывающим более длинную дугу орбиты (в результате использования более ранних наблюдений). Распределение средних ошибок, с которыми найдены орбиты в двух учреждениях, показано на рис. 1.

В обоих распределениях максимум имеет место в интервале $0.5'' - 0.6''$, но при этом в распределении орбит Центра наблюдается более быстрый спад как в сторону меньших, так и в сторону больших значений средней ошибки представления наблюдений σ . В сравниваемых наборах не было обнаружено ошибочно определенных орбит. Различие в элементах в худшем случае достигает 1-2 единицы предпоследнего удерживаемого при печати ежегодника «Эфемериды малых планет» десятичного знака.

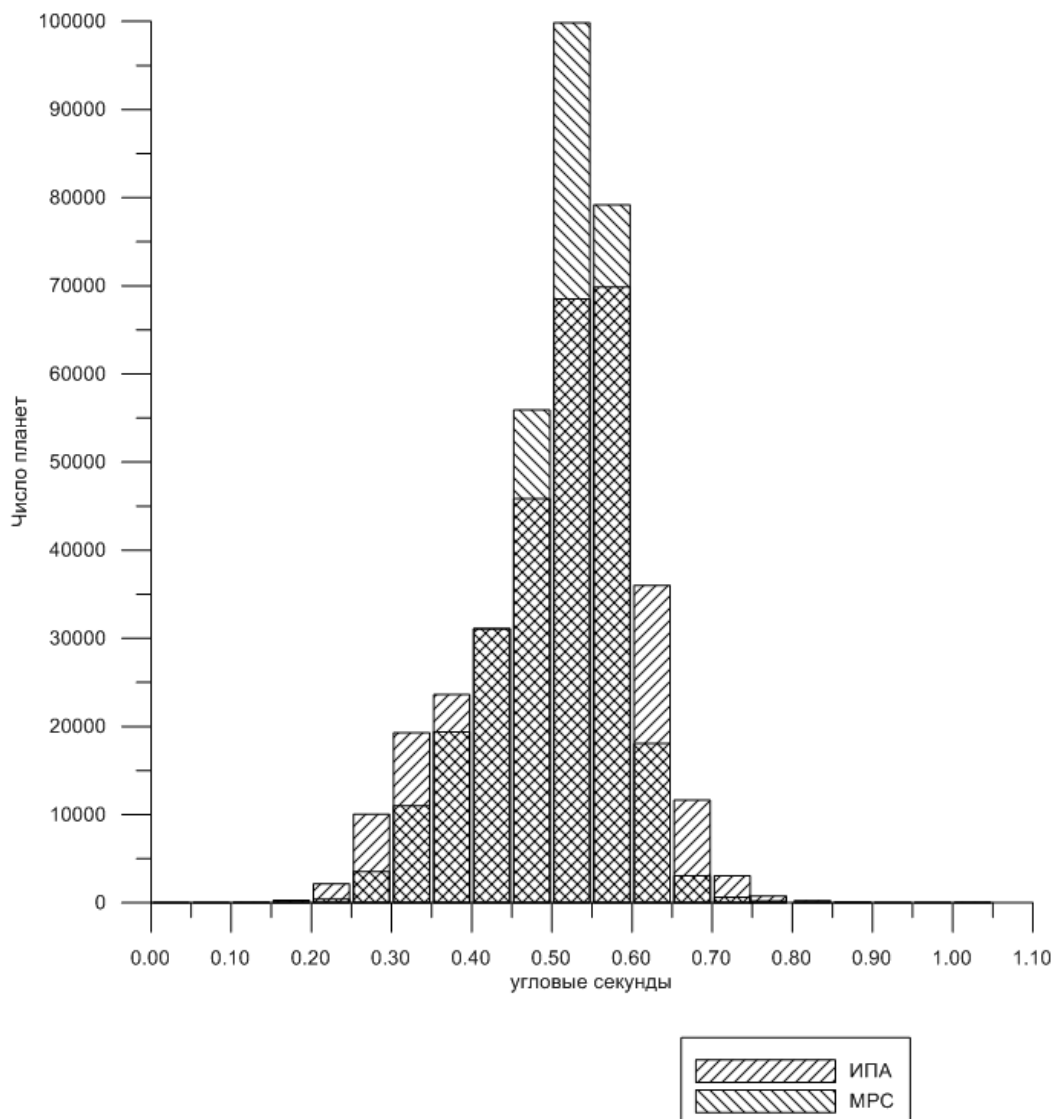


Рис. 1. Число малых планет, имеющих среднюю ошибку представления наблюдений в заданном интервале. По горизонтальной оси указана величина средней ошибки, выраженная в секундах дуги. Распределения орбит, вычисленных в ИПА, и орбит, вычисленных в МРС, показаны различной штриховкой.

Вычисление орбит нумерованных малых планет позволило проанализировать количество и качество позиционных наблюдений, полученных на различных обсерваториях. Данные анализа для нескольких обсерваторий представлены в табл. 1. Здесь в 1-ой колонке приводится код обсерватории, во 2-ой – число наблюдений, в 3-ей среднеквадратическая ошибка наблюдений σ , в 4-ой – интервал наблюдений. Данные табл. 1

показывают, что наибольшую активность в наблюдениях астероидов проявила обсерватория с кодом 1696 - Mt. Lemmon Survey, Steward Observatory of the University of Arizona, имеющая полностью автоматический 1.5 метровый телескоп. В последнее время все большую роль играет обсерватория 1551 – Pan-STARRS 1, Haleakala, University of Hawaii, где вошел в строй и активно используется один из четырех запланированных 1.8 метровых телескопов проекта Pan-STARRS . Наилучшую точность наблюдений показывает обсерватория 645 – Apache Point-Sloan Digital Sky Survey, New Mexico State University, имеющая 3.5 метровый телескоп. В период с 2004 по 2008 достаточно активно вела наблюдения обсерватория 644 – Palomar Mountain/NEAT, использующая 1.2 метровый телескоп.

Таблица 1. Количество и качество наблюдений нумерованных астероидов на некоторых обсерваториях.

Код обсерватории	Число наблюдений	σ	Интервал наблюдений
1696	4 501 654	0.330"	2002 – 2008
1696	3 979 071	0.306	2008 – 2012
1551	1 958 548	0.206	2008 – 2012
644	1 490 213	0.281	2004 – 2008
645	190 156	0.178	2000 – 2004
645	163 944	0.148	2002 – 2008

Выполнены также различные статистические оценки значений «О – С» (разностей между наблюдаемыми и вычисленными положениями). В частности, были получены значения оценок точности наблюдений нумерованных малых планет для различных периодов времени. Было использовано общепринятое деление периодов: 1) 1801 – 1900 гг. – до фотографическая эпоха наблюдений, 2) 1901 – 1950 гг. – фотографическая эпоха, 3) 1951 – 1995 гг. – повышение точности звездных каталогов, 4) 1996 – по настоящее время – эпоха ПЗС наблюдений и новых звездных каталогов. Оценки точности позиционных наблюдений нумерованных астероидов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка точности наблюдений нумерованных астероидов по интервалам времени.

Интервал	σ	Вес	Число наблюдений
1801 – 1900	2.87"	1/23	10 702
1901 – 1950	2.71	1/20	64 298
1951 – 1995	1.21	1/4	1 203 460
1996 – по н/вр.	0.60	1	77 638 032

В этой таблице для заданных интервалов времени приведены значения среднеквадратической ошибки наблюдений, вес, соответствующий этой ошибке, а также число наблюдений, которое было использовано при получении вышеперечисленных данных. Вес, соответствующий ошибке 0.60", принят равным единице.

Среднестатистические значения ошибок на разных временных интервалах показывают, что априорная весовая матрица, использованная в нашей работе, может быть улучшена в результате назначения весов наблюдениям, выполненным на двух ранних интервалах, в соответствии с данными табл. 2. Это может привести к некоторому уточнению орбит тел, открытых до 1951 г., правда, не очень значительному.

В табл. 3 приводятся среднеквадратические значения «О–С» в зависимости от геоцентрического расстояния ρ . Таблица охватывает данные только для современных наблюдений, произведенных с 1996 г. по настоящее время. Приведены значения сред-

неквадратических ошибок наблюдений в зависимости от геоцентрических расстояний до астероидов в моменты наблюдений. Значения указаны для четырех интервалов: от 0 до 0.05 а.е., от 0.05 до 0.5 а.е., от 0.5 до 1 а.е. и свыше 1 а.е..

Таблица 3. Точность позиционных наблюдений в зависимости от геоцентрических расстояний.

Расстояние в а.е.	σ	Число наблюдений
$\rho < 0.05$	0.62"	5 849
$0.05 < \rho < 0.5$	0.53	201 326
$0.5 < \rho < 1.0$	0.57	3 123 875
$\rho > 1.0$	0.60	74 306 984

Данные табл. 3 свидетельствуют об отсутствии четко выраженной зависимости точности позиционных наблюдений от геоцентрического расстояния, хотя некоторое увеличение ошибки при наблюдениях на малых геоцентрических расстояниях, которые часто выполняются на сравнительно небольших элонгациях от Солнца, вероятно, является следствием этого обстоятельства.

В заключение, отметим два момента:

1) В настоящее время орбиты всех нумерованных малых планет исправляются ежемесячно для поддержки службы “Ежемесячного обновления «Эфемерид малых планет»”, которая действует в ИПА на протяжении многих лет.

2) Результаты исправления свыше 300 000 орбит астероидов на основе почти 80 000 000 наблюдений содержат богатейший статистический материал, который еще ждет своей обработки. В данной статье использована лишь его часть, лежащая на поверхности.

Литература

1. Эфемериды малых планет на 2013 год. Гл. ред. Шор В.А., СПб, 2012, 19 с.

IAA CATALOGUE OF ORBIT ELEMENTS OF NUMBERED ASTEROIDS

Kochetova O.M., Kuznetsov V.B., Medvedev Yu.D., Shor V.A.

IAA of RAS, St. Petersburg, Russia

The results of orbit improvement of 322 611 numbered minor planets from observations available in the catalogue of observations of the Minor Planet Center are described. Comparison of improved orbits with orbits in the catalogue of orbits of the Minor Planet Center is discussed. Statistical data on precision of minor planet observations during various epochs, on precision of observations at some observatories, as well as data on precision of observations as a function of geocentric distance are given.

ДВИЖЕНИЕ АСТЕРОИДОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Выполнено определение трансверсальной составляющей A_2 дополнительного ускорения совместно с уточнением параметров орбиты для всех астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и мелких астероидов главного пояса (АГП) с большим интервалом наблюдений. Анализ значений A_2 показал, что для АСЗ их распределение лучше согласуется с проявлениями эффекта Ярковского (избыток отрицательных значений A_2 и статистическая зависимость этой величины от диаметров тел), чем для АГП. Одной из причин этого может быть гравитационное воздействие на исследуемые АГП ряда других астероидов главного пояса, массы которых к тому же известны недостаточно точно. Другой причиной может быть большая, чем для АСЗ, зависимость точности орбит АГП от ошибок наблюдений, особенно до 1940-1950 гг., так как для АСЗ таких наблюдений гораздо меньше, чем для АГП. На примерах показано, как можно совместно определить массу возмущающего астероида и параметр A_2 возмущаемого астероида. Выполнен учет систематических ошибок каталогов для наблюдений астероидов после середины 2001 г. и показано, какой вклад это вносит в определяемые параметры.

1. Введение

Накопленные к настоящему времени продолжительные ряды наблюдений астероидов, повышение точности оптических наблюдений этих тел, рост числа радарных наблюдений позволяют ставить задачу выявления в движении астероидов малых дополнительных ускорений, в том числе тех, которые можно интерпретировать как проявление эффекта Ярковского, способного оказывать ощутимое влияние на движение относительно малых тел. Эффект Ярковского [1, 2] возникает из-за переизлучения солнечной радиации телом, движущимся по орбите и вращающимся вокруг некоторой оси. Различают суточную составляющую эффекта, возникающую из-за вращения тела вокруг оси, не лежащей в плоскости орбиты, и сезонную составляющую, возникающую вследствие разницы температур летнего и зимнего полушарий при движении тела вокруг Солнца. Влияние эффекта Ярковского (ЭЯ) на орбитальное движение тела мало. При прочих равных условиях оно тем больше, чем меньше масса тела. На тела размером свыше десятков километров влияние эффекта пренебрежимо мало. Наиболее заметным является влияние ЭЯ на большую полуось орбиты, имеющее вековой характер.

Точное влияние ЭЯ на движение большинства астероидов вычислить в настоящее время практически невозможно из-за незнания всех или части параметров, от которых он зависит (положение оси вращения и скорость вращения, теплопроводность поверхностных слоев, объемная плотность вещества и т.д.). Однако можно попытаться определить величину дополнительного ускорения и, исключив другие составляющие или оценив их влияние, выделить ЭЯ.

Все наши решения получены в результате численного интегрирования релятивистских уравнений движения астероида и сравнения вычисляемых положений с оптическими и радарными наблюдениями. В процессе интегрирования учитывались возмущения от всех больших планет по эфемериде DE405, возмущения от Цереры, Паллады и Весты. Учет возмущений от Земли и Луны выполнялся отдельно. Кроме того, учитывались возмущения от сжатия Земли и Солнца, возмущения от светового давления. При сравнении с наблюдениями вносились поправки за эффект искривления лучей света в поле тяготения Солнца. Рассмотрена зависимость полученных значений от весов наблюдений и принятой модели движения.

2. Определение дополнительного ускорения в движении астероидов

В настоящей работе было выполнено определение трансверсальной составляющей A_2 дополнительного ускорения совместно с уточнением параметров орбиты для всех астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и для мелких астероидов главного пояса (АГП) с диаметром не более 40 км и с большим интервалом наблюдений. A_2 определялась в орбитальной системе координат в предположении, что негравитационное ускорение зависит от гелиоцентрического расстояния r как $1/r^2$.

Только около 10% астероидов в обеих группах имеют небольшие ошибки A_2 , позволяющие считать найденные значения ускорения достаточно надежными. Для АСЗ это 154 астероида, для АГП – 730. Для этих астероидов рассмотрены зависимости значений A_2 от их ошибок и от соответствующих диаметров тел. Для АСЗ 1) проявляется статистическая зависимость абсолютной величины A_2 от диаметра; 2) имеется некоторый избыток отрицательных значений A_2 : такие значения имеют 84 из 154 астероидов (рис. 1). Гистограмма (рис. 2) показывает, что большинство значений A_2 не превышает по абсолютной величине $(3 - 4) \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², что близко к теоретическим оценкам этой величины ЭЯ. Это говорит о том, что в значительной степени полученные для этих астероидов значения A_2 могут вызываться ЭЯ.

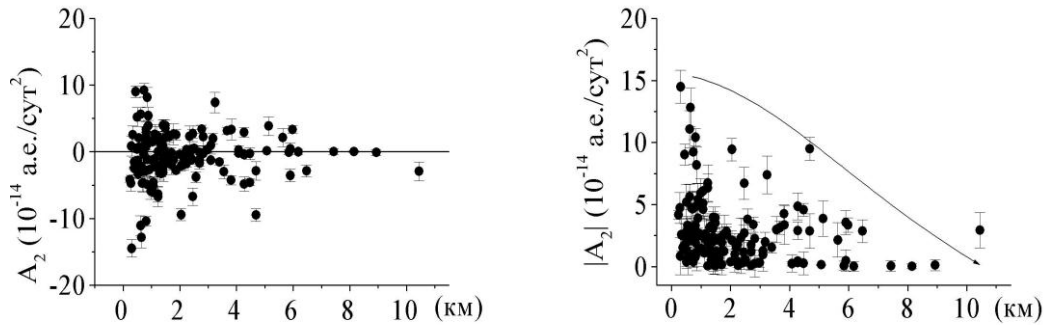


Рис. 1. Зависимость A_2 (слева) и $|A_2|$ (справа) от диаметров АСЗ.

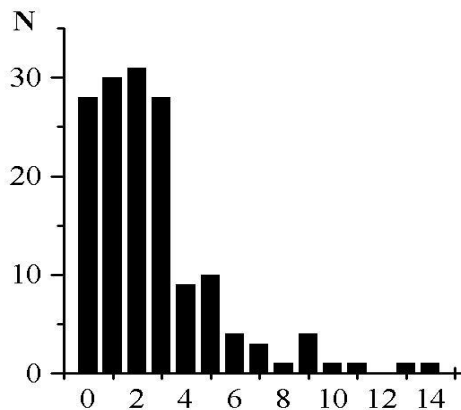


Рис. 2. Гистограмма распределения абсолютных значений A_2 , 10^{-14} а.е./сут², для АСЗ.

Однако для указанных выше АГП подобный вывод не столь очевиден, как показывают графики на рис. 3 для двух предельных значений ошибок A_2 . Видно, что зависимость значений A_2 от диаметров астероидов выражена слабее, чем такая зависимость для АСЗ (рис. 1), диапазон значений больше и достигает максимума около значения диаметров 10 км. Возможно, что полученные значения дополнительного ускорения яв-

ляются суммой нескольких ускорений (особенно, для АГП), включая и ЭЯ. Рассмотрим причины, которые могут проявляться в ускорениях такого порядка.

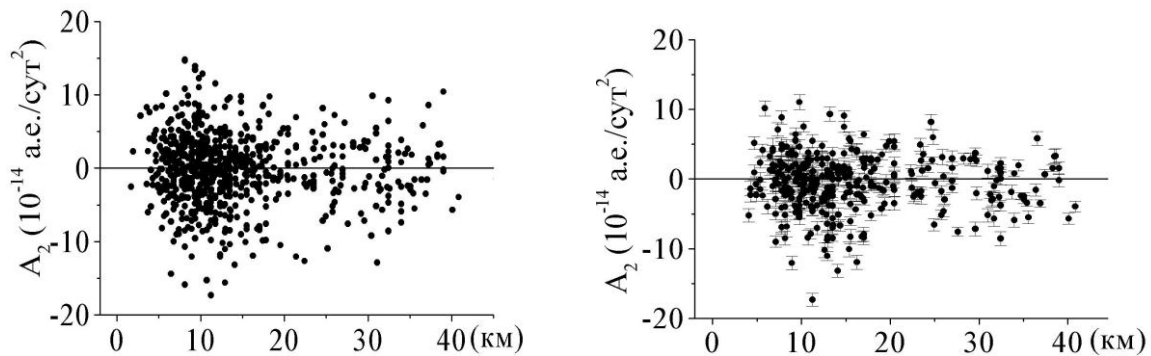


Рис. 3. Зависимость A_2 от диаметров астероидов для двух рядов АГП с разными предельными значениями ошибок A_2 : слева – ошибка $A_2 < 1.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², справа – $< 1.0 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут².

Это могут быть **гравитационные возмущения от других астероидов**. Сравнение результатов определения A_2 было выполнено при учете возмущений от Цереры, Паллады и Весты (Модель–3), 300 астероидов (Модель–300) и 680 астероидов (Модель–680). Оказалось, что для ряда исследуемых астероидов это влияние может быть того же порядка, что и полученные значения A_2 , а именно: $|\Delta A_2| > 0.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² для 16% АСЗ и 56% АГП. Большая зависимость АГП от принятой модели понятна, т.к. сближения между астероидами в Главном поясе происходят чаще, чем между АСЗ и астероидами Главного пояса. В табл. 1 приводятся данные для некоторых АСЗ, для которых $|\Delta A_2| > 2.0 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², и номера тех возмущающих астероидов (последний столбец), которые ‘обеспечивают’ эти изменения.

Таблица 1. Наибольшие изменения значений $|A_2|$ при переходе от Модели–3 к Модели–680 для рассмотренных АСЗ (в единицах 10^{-14} а.е./сут²).

АСЗ (номер)	A_2		ΔA_2 М–680 – М–3	Возмущающие астероиды (номер)
	Модель–680	Модель–3		
1474	-2.93 ± 1.41	-5.15 ± 1.41	2.22	7
2061	-1.26 ± 1.43	-7.43 ± 1.43	6.17	10
4486	-1.18 ± 1.46	1.78 ± 1.46	-2.96	85, 144, 259, 849
17274	-0.68 ± 0.99	-4.32 ± 1.17	3.64	702
283457	0.37 ± 0.37	-5.33 ± 0.37	5.70	212, 139

Таблица 2. Уточнение массы астероида 10 и параметра A_2 для астероида 2061.

Возмущаемые астероиды	m_{10} ($10^{-11} M_{\text{Sun}}$)	A_2 (10^{-14} а.е./сут ²) для астероида 2061	Кэф.корр. m_{10} и A_2
2061	3.931 ± 1.310	-0.538 ± 2.886	0.87
2061, 357	3.901 ± 0.437	-0.299 ± 1.434	0.58
2061, 357, 465	3.976 ± 0.333	-0.444 ± 1.277	0.50
2061, 357, 3946	4.061 ± 0.127	0.147 ± 1.273	0.18
2061, 357, 465, 829, 1780, 1825, 3946	4.033 ± 0.113	-0.199 ± 1.167	0.18

Следовательно, при наличии тесных сближений возникает необходимость совместного определения поправки к массе возмущающего астероида и значения A_2 . В табл. 2 приводится пример такого уточнения массы астероида 10 и параметра A_2 для астероида 2061. При использовании только наблюдений астероида 2061 корреляция между определяемыми параметрами значительна. Увеличивая число возмущаемых астероидов, можно существенно уменьшить ошибки определяемых параметров.

Эффект дополнительного ускорения может вызываться также **систематическими и/или случайными ошибками наблюдений**. Для АГП это более вероятно, чем для АСЗ, так как для них есть значительное число наблюдений до 1950 г. Для 730 АГП рассмотрены три схемы назначения весов. На рис. 4 представлены гистограммы распределения значений A_2 . Слева – все наблюдения считаются равноточными. В центре - если год наблюдения <1900), наблюдению назначался вес, равный 1/9; если год <1950, вес = 1/4; если год ≥ 1950 , вес = 1. Справа - если год наблюдения <1901, наблюдению назначался вес, равный 1/16; если год <1951, вес = 1/9; если год <1996, вес = 1/4; если год ≥ 1996 , вес = 1. Гистограммы показывают уменьшение амплитуды значений A_2 , при переходе от схемы весов - 1 к схеме весов - 3. Остается предположить, что слабо выраженная зависимость величины A_2 от диаметров астероидов и смещение максимума значений A_2 (по сравнению с АСЗ) объясняется, в значительной степени, ошибками наблюдений.

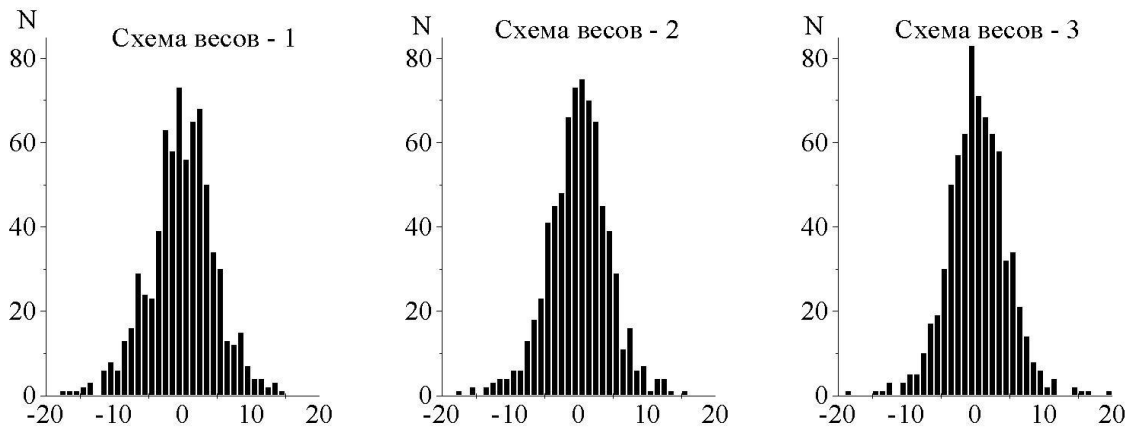


Рис. 4. Гистограммы распределения значений A_2 , 10^{-14} а.е./сут², для 730 АГП при трех схемах назначения весов оптическим наблюдениям.

Учет влияния **систематических ошибок звездных каталогов** стал возможным для наблюдений астероидов, выполненных после середины 2001 г., т.к. с этого времени оптические наблюдения астероидов стали сопровождаться информацией о каталоге, в системе которого они выполнены. В работе [3] приводятся результаты сравнения современных звездных каталогов и дается алгоритм учета их систематических ошибок, который и использовался нами.

На примере АСЗ нами показано, как учет систематических ошибок звездных каталогов влияет на получаемые значения, A_2^S , и их ошибки, $\sigma(A_2^S)$. Результаты сравнения решений без учета этих систематических ошибок и с их учетом показаны на гистограммах (рис. 5). Слева приводятся изменения абсолютной величины A_2 , т.е. $|\Delta A_2| = |A_2| - |A_2^S|$. Справа приводятся изменения ошибок A_2 , т.е. $\Delta\sigma = \sigma(A_2) - \sigma(A_2^S)$. Анализ этих гистограмм показывает, что в результате учета ошибок каталогов происходит уменьшение ошибок определения A_2 практически для всей выборки. Что касается самой величины A_2 , то гистограмма почти симметрична относительно нуля. Для большинства

рассмотренных астероидов изменения самой величины A_2 незначительны. Однако для нескольких имеет тот же порядок, что и само дополнительное ускорение.

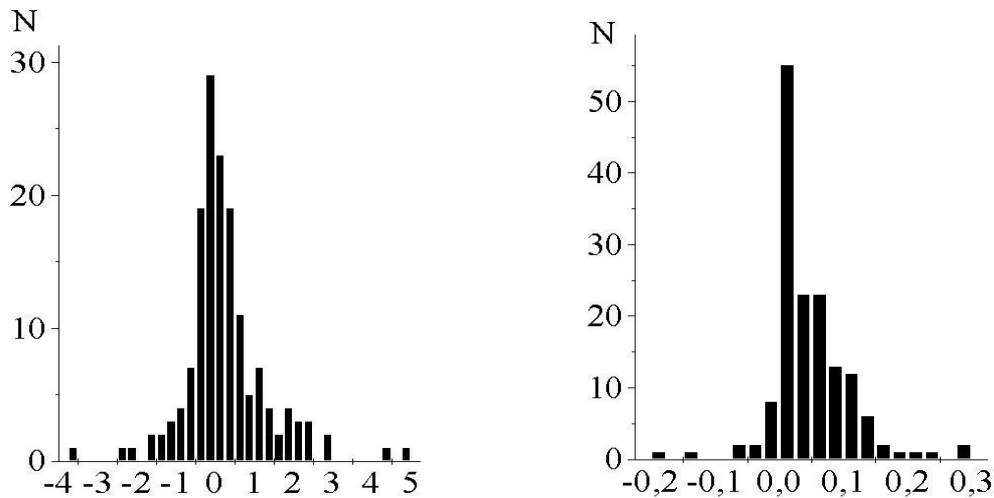


Рис. 5. Гистограммы изменения $|\Delta A_2| = |A_2| - |A_2^S|$ (слева) и ошибок определения A_2 , $\Delta\sigma = \sigma(A_2) - \sigma(A_2^S)$, (справа) в результате учета систематических ошибок звездных каталогов в наблюдениях АСЗ, 10^{-14} а.е./сут².

3. Основные полученные результаты

1. Для ряда астероидов, как АСЗ (~150), так и АГП (~700), получены значения дополнительного трансверсального ускорения A_2 с ошибкой порядка $1.0-1.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Использовались оптические и радарные наблюдения.

2. Для АСЗ достаточно четко проявляется статистическая зависимость абсолютной величины A_2 от диаметров астероидов, что позволяет предполагать, что, в основном, обнаруженное дополнительное ускорение вызывается эффектом Ярковского.

3. Для АГП такая зависимость проявляется гораздо слабее. Показано, что в значительной степени это может быть вызвано случайными и систематическими ошибками наблюдений до 1940-1950 гг., влияние которых на определяемые значения A_2 может быть того же порядка, что и сам ЭЯ. Отсюда следует важность выбора соответствующей системы весов наблюдений.

4. Показано, что влияние тесных сближений с другими, возмущающими, астероидами может проявляться в изменениях орбиты того же порядка малости, что и предполагаемый ЭЯ. В таких случаях необходимо совместное определение поправки к возмущающей массе (если она известна недостаточно точно) и значения дополнительного ускорения. Как правило, эти две величины коррелируют значительно. Увеличением числа возмущаемых астероидов можно получить достаточно надежное решение относительно значений возмущающей массы и параметра A_2 исследуемого астероида.

5. Учет систематических ошибок звездных каталогов для наблюдений с середины 2001 г. также в ряде случаев приводит к изменениям величины A_2 на несколько единиц 10^{-14} а.е./сут². Для большинства рассмотренных астероидов учет этих ошибок приводит к уменьшению ошибок определения A_2 .

Таким образом, влияние на движение астероидов различных возмущающих факторов (сближений с массивными телами, эффекта Ярковского), а также ошибок наблюдений, связанных, в частности, с ошибками звездных каталогов, могут проявляться в

величинах одного порядка малости. Разделение этих эффектов требует индивидуальной исследовательской работы.

Исследование выполнено при поддержке Программы Президиума РАН “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”, раздел “Малые тела Солнечной системы”.

Литература

1. *Vokrouhlicky D., Milani A., and Chesley S.R.* Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: Mathematical formulation and examples. *Icarus*, 2000, V.148, 118-138.
2. *Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Rubincam D.P., et al.* The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids. In *Asteroids III* / Eds: Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., and Binzel R.P. Univ. Arizona Press, 2003, 395-408.
3. *Chesley, S.R., Baer, J., Monet, D.G.* Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. *Icarus*, 2010, V. 210, 158–181.

MOTION ASTEROIDS ACCOUNTING YARKOVSKY EFFECT

Kochetova O.M., Chernetenko Yu.A., Shor V.A.

Institute of Applied Astronomy of RAS, Saint Petersburg, Russia

Transversal components of additional acceleration, A_2 , were determined for a number of the near-Earth asteroids (NEA) and the main belt asteroids (MBA) having long intervals of observations. Only asteroids with photometric values of diameters less than 40 km were included into consideration. We used both optical and radar observations of asteroids. In both groups (NEA and MBA) values of A_2 have been found with small errors for only about 10% of asteroids. We consider these last as reliable ones. Analysis of A_2 shows that distribution of A_2 values for NEA better corresponds to manifestation of the Yarkovsky effect than that of MBA. It manifests itself in statistical dependence on asteroid diameters and in excess of negative values of A_2 . For MBA these manifestations are insignificant ones. One of the reasons of this can be the gravitational influence of other main belt asteroids with badly known masses on asteroids under consideration. We showed how correction to unknown mass and value of A_2 can be simultaneously determined. Other reason can be errors of optical observations, especially those made before 1940–1950. Old observations have greater importance for orbit determination of MBA than for NEA. We have used several manners of weighting the observations and obtained results confirm this supposition. Optical observations after the middle of 2001 were corrected for systematical errors of star catalogues. These corrections result in decreasing errors of A_2 .

О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТРАННЫХ АТТРАКТОРОВ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКЕ МАЛЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Мельников А.В.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Проведено исследование условий возникновения странных аттракторов во вращательной динамике малых спутников планет при достижении окрестности сепаратрисы синхронного резонанса в ходе приливной эволюции вращательного движения. Посредством вычисления характеристических показателей Ляпунова найдены области значений параметров задачи, где существует странный аттрактор. Рассмотрена возможность возникновения странных аттракторов во вращательной динамике реальных малых спутников планет.

Введение

Исследования [1, 2] динамики плоского поступательно-вращательного движения спутника под действием гравитационного приливного момента показали, что при определенных значениях параметров системы на сечениях фазового пространства относительного движения появляется структура характерная для странного аттрактора [3, 4]. Напомним, что аттрактор возникает в диссипативной системе при уменьшении ее фазового объема, приводящего к тому, что все траектории системы притягиваются к поверхности меньшей размерности, чем у исходного фазового пространства. Эта поверхность называется аттрактором. На странном (хаотическом) аттракторе близкие траектории фазового пространства расходятся экспоненциально, т.е. движение является хаотическим, хотя траектории при этом ограничены.

Ранее было установлено [5–7], что наиболее вероятной конфигурацией в конце хода приливной эволюции вращательного движения спутников планет является синхронное (с движением по орбите) вращение, при котором ось вращения спутника ортогональна плоскости орбиты (плоское вращение). В настоящей работе рассмотрена возможность возникновения странных аттракторов во вращательной динамике малых (средний радиус фигуры менее 300 км) спутников планет при достижении окрестности сепаратрисы синхронного резонанса в ходе приливной эволюции вращательного движения.

Уравнение движения

Далее предполагаем, что спутник движется по невозмущенной эллиптической орбите вокруг планеты, являющейся неподвижной гравитирующей точкой. Спутник имеет форму трехосного эллипсоида с главными центральными моментами инерции $A < B < C$. Система координат является инерционной, она определена исходно в перигецентре орбиты — наибольшая ось фигуры спутника направлена по радиус-вектору планета — спутник. Вращение спутника происходит вокруг оси ортогональной плоскости орбиты, совпадающей с осью, соответствующей максимальному моменту инерции. Ориентация спутника определяется углом θ — углом между мгновенным радиус-вектором орбиты и осью, соответствующей наименьшему главному центральному моменту инерции спутника (см. рис. 1).

Уравнение плоского (в плоскости орбиты) движения спутника относительно центра масс с учетом приливного взаимодействия имеет вид [2]

$$(1 + e \cos f) \frac{d^2 \theta}{df^2} + [\beta(1 + e \cos f)^5 - 2e \sin f] \frac{d\theta}{df} + \omega_0^2 \sin \theta \cos \theta = 2e \sin f, \quad (1)$$

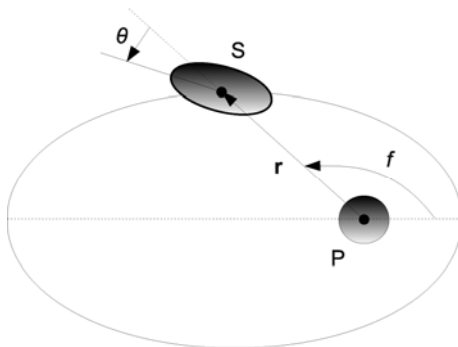


Рис. 1. S — спутник, P — планета, f — истинная аномалия.

где e — эксцентриситет орбиты спутника, f — истинная аномалия, $\omega_0 = \sqrt{3(B-A)/C}$ — параметр, характеризующий динамическую асимметрию фигуры спутника, $\beta \geq 0$ — параметр, характеризующий приливной гравитационный момент, действующий на спутник.

Сечения Пуанкаре и показатели Ляпунова

Важным инструментом для изучения свойств динамических систем является метод сечений Пуанкаре (сечений фазового пространства). Сечение фазового пространства представляет собой отображение Пуанкаре; итерации этого отображения образуют дискретную динамическую систему, свойства которой тесно связаны с исходной динамической системой с непрерывным временем [3]. Именно посредством построения и анализа сечений фазового пространства в работах [1,2] были обнаружены странные аттракторы в рассматриваемой нами задаче.

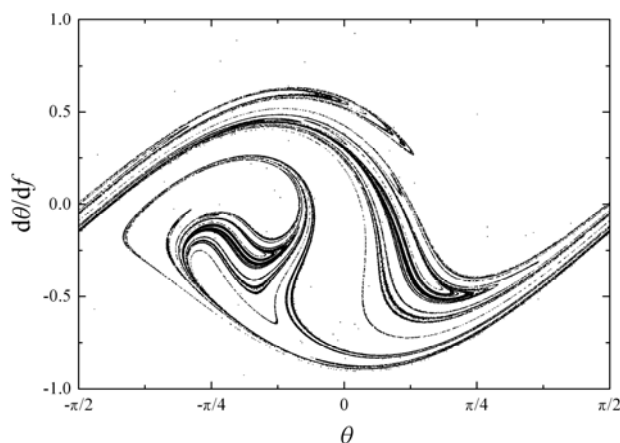


Рис. 2. Сечение фазового пространства ($f = 0 \bmod 2\pi$) относительного движения для $e = 0.2$, $\omega_0 = 1.0$, $\beta = 0.05$.

На рис. 2 показано определенное в перигентре орбиты ($f = 0 \bmod 2\pi$) сечение фазового пространства относительного движения для случая $e = 0.2$, $\omega_0 = 1.0$ и $\beta = 0.05$. Для указанных выше значений параметров на сечении присутствует структура, вид которой характерен для странного аттрактора.

Другим важным инструментом для изучения динамических систем являются характеристические показатели Ляпунова (ХПЛ) (см., например, [3, 4]). Величина обрат-

ная максимальному ХПЛ (МХПЛ) — ляпуновское время представляет собой характерное время предсказуемой динамики. Положительная величина МХПЛ указывает на хаотический характер движения. В рассматриваемой задаче есть два ХПЛ — L_1 и L_2 . Так как движение на странном аттракторе является хаотическим, МХПЛ у траектории фазового пространства, соответствующей странному аттрактору, должен быть положительным.

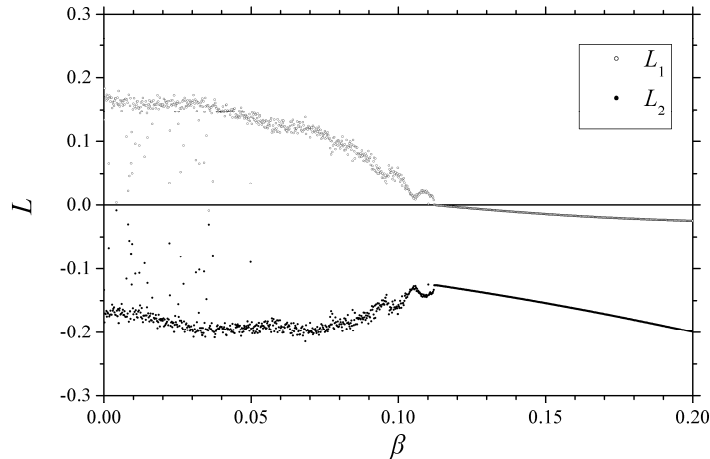


Рис. 3. Зависимости ХПЛ от параметра β для $e = 0.2$, $\omega_0 = 1.0$.

На рис. 3 представлены зависимости L_1 и L_2 от величины параметра β для спутника с $e = 0.2$ и $\omega_0 = 1.0$. Из рис. 3 видно, что странный аттрактор может существовать лишь при $\beta < 0.11$, где МХПЛ (L_1) является положительным.

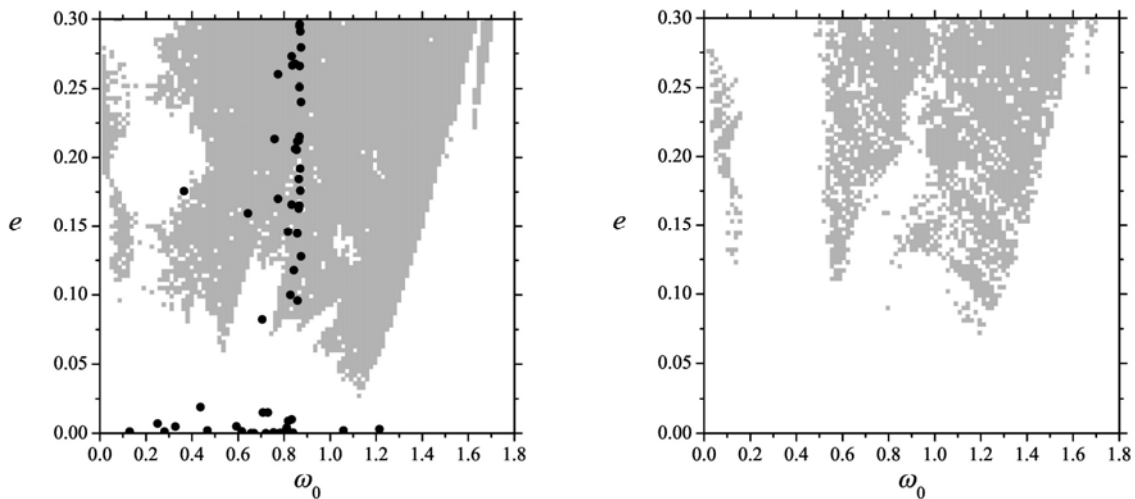


Рис. 4. Величина МХПЛ для: $\beta = 0.001$ (слева) и $\beta = 0.01$ (справа). Белый цвет соответствует отрицательным значениям МХПЛ, серый — положительным значениям МХПЛ. На левом рисунке черными точками указано местоположение ряда известных естественных спутников планет.

Аттракторы в динамике естественных спутников

На рис. 4 на плоскости « $\omega_0 — e$ » для двух различных значений β представлены распределения вычисленных величин МХПЛ. Из рис. 4 видно, что площадь областей, где МХПЛ больше нуля, т.е. движение является хаотическим и в фазовом пространстве возможно существование странного аттрактора, сокращается с увеличением β . Возможные кандидаты среди реальных естественных спутников на наличие в фазовом пространстве странного аттрактора должны иметь значения e и ω_0 , принадлежащие одной из этих областей. На правой панели рис. 4 на основе данных из [8] отмечено местоположение на плоскости « $\omega_0 — e$ » ряда известных спутников планет. Для реальных спутников $\beta \in [10^{-9}, 10^{-4}]$, поэтому нельзя исключать возможность того, что в ходе приливной эволюции вращательного движения для некоторых спутников в фазовом пространстве может существовать странный аттрактор.

Выводы

Итак, проведенное исследование указало на возможность существования странного аттрактора в фазовом пространстве вращательного движения у реальных малых спутников планет в ходе приливной эволюции вращательного движения при достижении окрестности сепаратрисы синхронного резонанса.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 10-02-00383-а) и программой Президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики».

Литература

1. Khan A., Sharma R., Saha L.M. Chaotic Motion of an Ellipsoidal Satellite. I. // *Astron. J.* 1998. V. 116. N 4. P. 2058–2066.
2. Белецкий В.В. Регулярные и хаотические движения твердых тел. М.-Ижевск: ИКМ. 2007. 132 с.
3. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир. 1984. 528 с.
4. Лоскутов А.Ю. Очарование хаоса // *Успехи физических наук.* 2010. Т. 180. № 12. С. 1305–1329.
5. Goldreich P., Peale S. Spin-orbit coupling in the Solar system // *Astron. J.* 1966. V. 71. N 6. P. 425–438.
6. Peale S.J. Generalized Cassini's laws // *Astrophys. J.* 1969. V. 74. P. 483–489.
7. Peale S.J. Rotation histories of the natural satellites. // *Planetary Satellites / Burns J.A. (Ed.).* 1977. Univ. of Arizona Press, Tucson. P. 87–111.
8. Melnikov A.V., Shevchenko I.I. The rotation states predominant among the planetary satellites // *Icarus.* 2010. V. 209. N 2. P. 786–794.

ON THE POSSIBILITY OF EXISTENCE OF STRANGE ATTRACTORS IN THE ROTATIONAL DYNAMICS OF MINOR PLANETARY SATELLITES

Melnikov A.V.

Pulkovo observatory of RAS

We accomplished an investigation of the conditions for emergence of strange attractors in the rotational dynamics of minor planetary satellites, when the vicinity of the separatrix of synchronous resonance is achieved in the tidal evolution of rotational motion. Through the computation of Lyapunov exponents, we found the regions of parameter values of the problem where a strange attractor exists. The possibility of strange attractors in the rotational dynamics of real minor planetary satellites was considered.

ФРАКТАЛЬНАЯ ДИНАМИКА МАЛЫХ ТЕЛ И КРИТЕРИИ СВЯЗАННОСТИ ТРАЕКТОРИЙ

Мышев А.В.

*Национальный исследовательский ядерный университет –
Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, Обнинск, Россия*

В работе представлены результаты исследования динамической эволюции малых тел на траекториях типа размытых фракталов и рассматриваются новые технологии моделирования в условиях модельной замкнутости, ограничений, обмена и неопределенности для задач прогноза, анализа, классификации, динамической таксономии и др. В этом случае пространственно–временная геометрия моделируемых траекторий, описываемая в среде вычислений на классах 4–мерного многообразия “пространство–время”, в среде восприятия информационных технологий обработки и анализа отражается на клеточных топологиях кеплеровского фазового пространства в виде топологического комплекса. Сформулированы основные критерии и характеристики регулярной и нерегулярной структуры пространственно–временной геометрии потока моделируемых траекторий динамической эволюции, исходя из определения таких сущностей и понятий, как неопределенность, детерминированность, ограничения, предсказуемость, фрактальность.

1. Введение

Исследование динамической эволюции малых тел на основе технологий компьютерного моделирования всегда приходится проводить в условиях модельной замкнутости и ограничений среды вычислений, обмена энергией и информацией. Разработанный автором метод моделирования динамической эволюции малых тел в обозначенных условиях позволяет описать и представить ее не в виде классических траекторий, а в виде комплекса на клеточной топологии размытого четырехмерного многообразия “пространство–время” [1, 2], который является топологическим изображением размытого фрактального образа траекторий малого тела в пространстве возможных состояний. В этом случае модель системы гравитирующих тел представляет собой синтез четырех взаимосвязанных и взаимообусловленных моделей: абстрактная модель (теоретико-множественное описание задачи), информационная (компьютерная) модель (информационное описание), топологическая модель (геометрическое описание), конкретная модель (физическое представление) [3]. Абстрактная модель исходной задачи в среде вычислений компьютерной модели определяется в виде квантовой дискретной информационной динамической системы, для которой характерны динамические, информационные, математические и метрологические аспекты. *В математическом аспекте* такая система означает следующее. Она определена на квантовом дискретном информационном пространстве, элементом которого является информационный квант. В этом пространстве он является информационным атрибутом, посредством которого локализуется пространственно–временная область точки наблюдаемой или моделируемой траектории на символично–числовой шкале [2–5]. *Динамические аспекты таких систем*, так или иначе, связаны с наличием таких квантовых атрибутов в динамических системах, как квантование по времени (физическому и информационному) и пространству (реальному и виртуальному) и т.д. *В информационном аспекте* эволюция объектов таких систем описывается не на принципах динамики классической небесной механики, а на принципах совместного воздействия на объекты квантовой дискретной системы сил и информации в условиях неопределенности и сильного отклонения от динамического и информационного равновесия [1,4]. *Метрологические аспекты таких систем* обусловлены наличием следующих факторов: 1) измеряемые или вычисляемые величины тра-

екторий таких объектов имеют системы координат информационной привязки, чего в настоящее время не имеет ни одна реальная система измерений или наблюдений, а также информационная среда компьютеринга; 2) наличие моделей технологий метрологической проверки и поверки измеряемых или вычисляемых информационных объектов в условиях замкнутости и ограничений, обмена и неопределенности.

Основные критерии и характеристики регулярной и нерегулярной пространственно-временной эволюции обозначенных систем определяются, исходя из содержания и смысла таких сущностей и понятий, как неопределенность, детерминированность, ограничения, предсказуемость. *Детерминированность* динамической эволюции в этом случае определяется геометрией и структурой топологического комплекса, т.е. если ему соответствует единственная диаграмма, которая представляет собой простой ориентированный по времени граф. *Ограничения* определяют и задают размеры клеток на конечных топологиях 4-мерного многообразия “пространство–время”. *Предсказуемость* определяется как модельный процесс. Характеристикой такого процесса, которая связывает динамический и информационный аспект образа пространственно–временной геометрии размытой динамики на топологическом комплексе, является мера расхождения между двумя простыми графами (*критерий связанности детерминированной траектории малого тела в пространстве возможных ее состояний*) [4].

2. Компьютерные исследования фрактальной динамики малых тел: результаты, анализ, интерпретация

Для модельных имитационных исследований в качестве объекта компьютерного моделирования фрактальной динамики малых тел в условиях ограничений, обмена и информационной неопределенности рассматривалась размытая задача N – гравитирующих тел. Были проведены вычислительные эксперименты для ограниченной задачи 4-х и 6-ти тел в рамках модели Солнечной системы по геометрической схеме: Солнце – планеты – малое тело. Исследовалась фрактальная динамика малого тела, а в качестве факторов неопределенности выступали информационная неопределенность начальных условий и параметров задачи, а также виртуальная среда моделирования.

Уравнения динамики для моделируемой точечной задачи N – гравитирующих тел определяются как размытые дифференциальные уравнения и в скалярной форме для каждой координаты имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = \dot{x}_i \\ \frac{d\dot{x}_i}{dt} = -k^2(m_0 + m_i) \frac{x_i}{r_i^3} + k^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N m_j \left[\frac{x_j - x_i}{r_{ij}^3} - \frac{x_j}{r_j^3} \right] \end{cases} \quad (1)$$

Здесь r_i – расстояние i -го тела до начала координат, r_{ij} – взаимное расстояние между i -м и j -м телами. x_i – координаты радиус векторов тел; \dot{x}_i – координаты векторов скоростей тел; m_i – масса i -го тела. Фазовые координаты и время определены на размытых подмножествах. В задаче (1) в качестве размытых параметров выступают массы m_i системы N -тел [4].

Формализация алгоритмов информационной модели задачи (1) для исследования эволюции короткопериодических объектов Солнечной системы в технологиях компьютерного моделирования осуществлена на основе схем дискретной аппроксимации системы уравнений (1), определенных на квантовых дискретных информационных пространствах. А эволюционный оператор дискретных моделей в вычислительных технологиях задается в виде синтеза двух операторов: 1) оператора взаимодействия символ-

ных цепочек вычислительных технологий с информационной средой моделирования; 2) оператора проектирования “модельных” точек моделируемых траекторий в узлы базовых координатных перспективных сеток [1,4], на которых определяется искомая траектория динамической эволюции моделируемого малого тела.

Проиллюстрируем результаты имитационного моделирования размытой динамики малых тел на примере компьютеринга эволюции кометы Швассмана-Вахмана 1 для задачи 4-ти тел (Солнце, Юпитер, Сатурн, малое тело). Начальные условия для кеплеровских элементов орбиты кометы на момент времени 08.02.1660 приведены в табл. 1. Положения планет также “приведены” численным интегрированием на этот момент времени. В качестве фактора неопределенности начальных условий выбрана истинная аномалия ν кометы, а в качестве фактора информационного неопределенности ограниченность разрядной сетки ячеек памяти и процессора.

Компьютерное моделирование динамической эволюции кометы проведено для интервала времени ~ 400 лет (146000 суток). На рис. 1,2,3 отражена графическая визуализация образов возможных решений задачи (1) в пространстве оскулирующих кеплеровских элементов (a, e, i) кометы для размытой фрактальной динамики в виде трехмерной графики (вид слева) и плоских проекций – пифограмм (вид справа) образа на проективные плоскости POx , POt , xOt , где x – символическое обозначение элемента (a, e, i) кеплеровской орбиты. Пифограммы, являясь элементами визуальных технологий отражения информации, с одной стороны, выполняют функции научной визуализации в технологиях анализа результатов моделирования, а с другой – когнитивные функции компьютерного моделирования.

В табл. 2 приведены численные значения параметров квантования по осям проективной плоскости кеплеровских элементов орбиты для рассматриваемых случаев с шагом дискретизации по времени $\delta t = 100$ суток. Здесь δt – шкала дискретизации по времени, $[T_{\min}, T_{\max}]$ – интервал времени, на котором моделируется эволюция, S_{\min}, S_{\max} – минимальное и максимальное значения изменения элемента; δS – уровень квантования элемента.

В качестве технологий визуализации результатов решений и анализа использовались трехмерная компьютерная графика и когнитивная компьютерная топография трехмерных образов решений для оскулирующих кеплеровских координат потока траекторий кометы. Приведенная на рис. 1,2,3 графическая визуализация результатов моделирования динамической эволюции кометы Швассмана-Вахмана 1 в пространстве оскулирующих элементов (a, e, i) потока размытых кеплеровских орбит достаточно хорошо отражает тип динамики, обусловленный как тесными сближениями с планетами-гигантами (обмен энергией и информацией), так и ограничениями модели и информационной неопределенностью начальных условий. Проекция образов элементов потока кеплеровских орбит кометы (рис.1,2,3 – вид справа) на плоскость xOt показывают, что эволюция кометы проявляет локальную регулярную и размытую динамику, для которой характерны как фазовые переходы, обусловленные неоднократными захватами Юпитером и Сатурном, так и устойчивые движения. Проекция образов элементов на

Таблица 1. Значения кеплеровских элементов орбиты кометы Швассмана-Вахмана 1 на начальный момент времени.

Элемент	Значение
a_0 , а.е.	7.0696
e_0	0.181
i_0 , °	10.1
ω_0 , °	191.8
Ω_0 , °	356.4

Таблица 2. Предельные значения и уровни квантования по осям проективной плоскости элементов кеплеровской орбиты кометы Швассмана-Вахмана 1.

	Tmin,сут.	Tmax,сут.	δt , сут.	Smin	Smax	δS
<i>a</i>	0	146000	100	0	15	0.1
<i>e</i>	0	146000	100	0	1	0.01
<i>i</i>	0	146000	100	0	360	1

плоскости POx , POt иллюстрируют характер эволюционного процесса, а их анализ позволил определить глобальную динамику такого процесса, как размытую фрактальную динамику двух типов – перколирующего фрактала и фрактального агрегата. На рис. 4,5 (вид слева) показаны графики связанных по времени изменений элементов кеплеровских орбит (a, e, i) (фрактальная D_0 и информационная I связанность). Графики кривых этих изменений для указанных элементов расходятся, тем самым, указывая на то, что компьютерный мониторинг динамической эволюции кометы в рамках модели и технологий моделирования выходит за пределы возможностей контроля и управления.

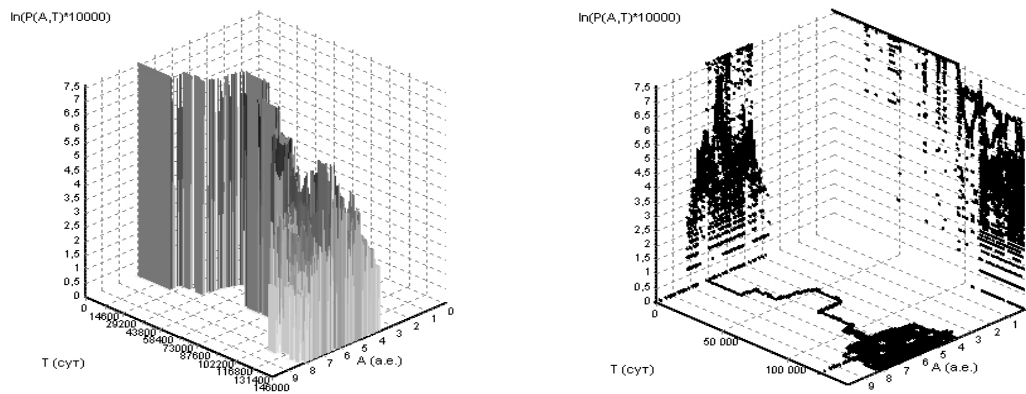


Рис. 1. Вид слева – размытый трехмерный образ изменения большой полуоси, вид справа – проекции образа на координатные плоскости, интервальная неопределенность для истинной аномалии $v \in (79.67^0 \pm 0.001^0)$.

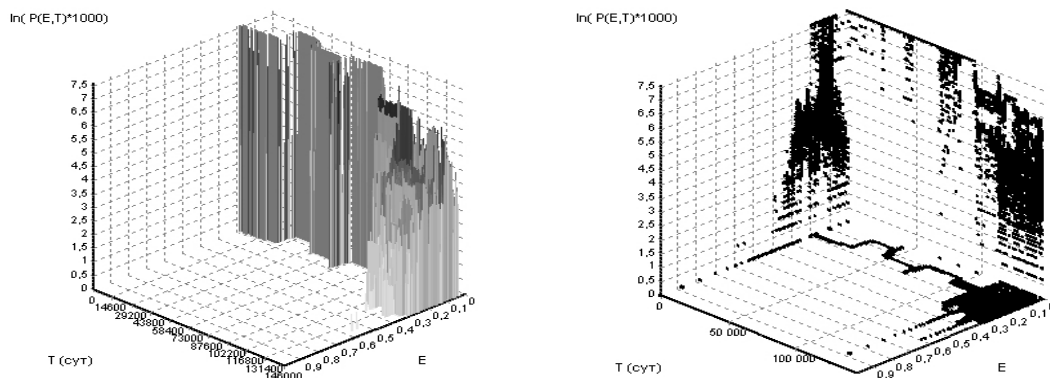


Рис. 2. Вид слева – размытый трехмерный образ эксцентриситета, вид справа – проекции образа на координатные плоскости, интервальная неопределенность для истинной аномалии $v \in (79.67^0 \pm 0.001^0)$.

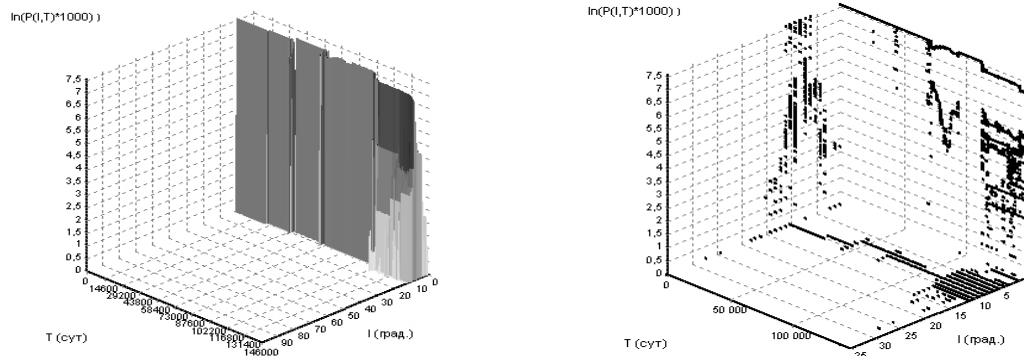


Рис. 3. Вид слева – размытый трехмерный образ угла наклона, вид справа – проекции образа на координатные плоскости, интервальная неопределенность для истинной аномалии $v \in (79.67^0 \pm 0.001^0)$.

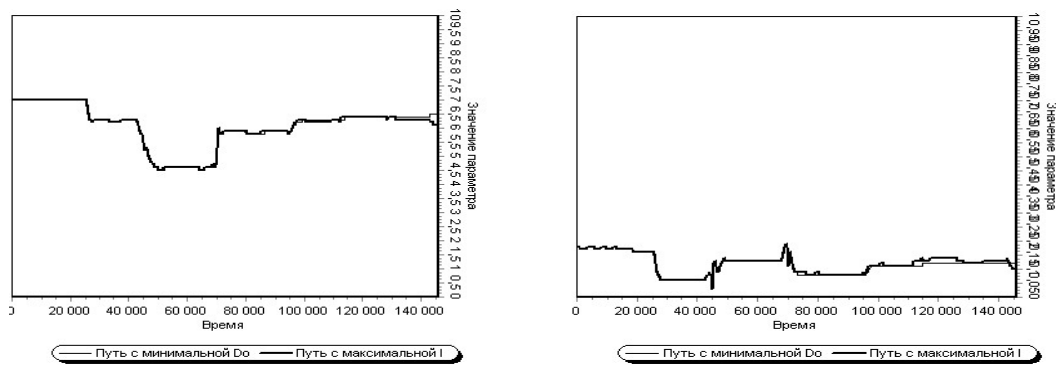


Рис. 4. Связанные по времени решения: вид слева – изменения большой полуоси кометы; вид справа – изменения эксцентриситета.

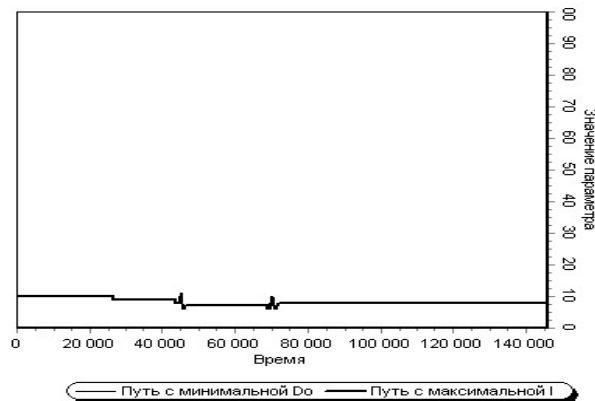


Рис. 5. Связанные по времени решения изменения угла наклона.

3. Краткий анализ и некоторые выводы

Результаты компьютерного моделирования динамической эволюции короткопериодических комет и их анализ в условиях ограничений и неопределенности для задачи (1) позволили, с одной стороны, определить закономерности следующего характера: их динамика при определенных локальных пространственно–временных условиях и ограничениях может проявлять регулярный и нерегулярный характер в общей картине глобальной эволюции, а это означает то, что в пространственно–временной геометрии потока возможных траекторий комет существуют такие локальные “лакуны–ловушки”,

попадая в которые комета теряется в паутине траекторий пространства возможных состояний и граница горизонта прогноза ее эволюции резко обрывается. А с другой – позволили получить также ряд уникальных результатов и выводов. Во-первых, пространственно-временная картина динамических процессов их эволюции при тесных сближениях имеет иную природу и структуру потока траекторий, формируемую механизмами захвата и обмена (энергией и информацией), нежели та, которую можно описать в рамках теорий движения классической небесной механики. Здесь мы сталкиваемся с такими механизмами динамических процессов эволюции малых тел, как перемежаемость в размытой случайной среде и неусредненное описание размытых стохастических процессов. Во-вторых, динамическая эволюция комет и других малых тел в таких условиях проявляет закономерности самосогласованного стремления потока их траекторий в пространстве возможных состояний к критическим режимам (размытой фрактальной динамике) и сингулярным фазовым переходам (захват, обмен и выброс), топология которых описывается как структура перколирующего фрактала и фрактального агрегата, образуя мультифрактал – образ их глобальной динамической эволюции.

Литература

1. *Мышев А.В.* Метод виртуальной перспективы в моделировании размытых задач // Информационные технологии и вычислительные системы, 2011, №3, с.64–78.
2. *Мышев А.В.* Технологии моделирования и структурный анализ динамики малых тел космического пространства и их классификация в условиях многофакторной неопределенности // «Околоземная астрономия – 2003»: сборник научных трудов международной конференции, Терскол, 8–13 сентября 2003 г., т.1. – СПб, ВВС, 2003, с. 160–170.
3. *Мышев А.В.* Информационные технологии моделирования и системный анализ размытой динамики малых тел космического пространства // «Околоземная астрономия – 2003»: сборник научных трудов международной конференции, Терскол, 8–13 сентября 2003 г., т.2. – СПб, ВВС, 2003, с. 49–52.
4. *Мышев А.В.* Компьютинг и моделирование размытой задачи Коши методом виртуальной перспективы // Программные продукты и системы, 2012, №3, с. 217–224.
5. *Мышев А.В.* Порядок, хаос и фракталы в небесно–механических системах // Известия РАН, серия физическая, 1998, т.62, вып. 9, с. 1907–1913.

FRACTAL DYNAMIC OF SMALL BODIES AND TESTS OF ASSOCIATED SOLUTIONS

Myshev A.V.

*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering
of the National Research Nuclear University "MPhI", Obninsk, Russia*

The paper presents the results of a study of the dynamic evolution of small bodies in the trajectories of type fuzzy fractals and consider new technologies in simulation modeling of closure, restrictions, exchange and uncertainty for the prediction problem, analysis, classification, dynamic taxonomy, etc. In this case, the space-time geometry is modeled trajectories described in the computing environment for classes of 4-dimensional manifolds "space-time", in the medium of perception of information technology processing and analysis is reflected in the cell topologies Keplerian phase space in the form of a topological complex. The basic criteria and characteristics of regular and irregular structure of space-time geometry of the flow of the simulated trajectories of the dynamical evolution, based on the definition of such entities and concepts as uncertainty, deterministic, limitations, predictability, fractal.

ТЕОРИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ПОТОКОВ ДАННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Мышев А.В., Галалаев И.В.

Национальный исследовательский ядерный университет – Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, Обнинск, Россия

Рассматривается новый подход разработки и реализации моделей алгоритмов и процедур информационных технологий для обработки и анализа больших потоков данных астрономических наблюдений на основе методов теории фрактальных размерностей. Потоки данных астрономических наблюдений для элементов кеплеровских орбит представляют собой неструктурированные, несвязанные и несодержательные потоки информации. Математический и логический формализм подхода позволяет строить процедуры когнитивных технологий раскодирования информации и алгоритмические схемы типичные методам data mining, скрытой в потоках данных с целью выявления новых закономерностей и знаний. В рамках методологии формализма поток данных элементов кеплеровских орбит для различных классов малых тел космического пространства определяется как логическая структура в виде односвязанного списка данных, элементом которого является набор данных об орбите тела.

1. Введение

Решение многих проблем космогонии малых тел, АКО, космического мусора и других астрономических задач так или иначе связаны с разработкой и реализацией интеллектуальных информационных технологий обработки и анализа больших потоков данных и интерпретацией получаемых результатов и выводов с целью получения новых знаний, фактов, обнаружения и описания новых закономерностей. Для построения математических и логических схем алгоритмов и процедур обозначенных технологий в настоящее время широко используются статистические и вероятностные подходы обработки и анализа данных наблюдений или измерений. Особенности применения обозначенных подходов в технологиях обработки и анализа потоков данных астрономических наблюдений заключаются в том, что они дают только усредненные оценки и усредненное описание пространства возможных состояний исследуемого объекта. В этом случае не учитываются как свойства регулярности и нерегулярности структуры пространства состояний, так и динамическая и информационная связанность. Такой подход не позволяет более полно раскодировать информацию, которая скрыта в потоках данных астрономических наблюдений. В этом случае получается неполная и деформированная содержательно–смысловая информационная картина объекта исследования, что не позволяет, с одной стороны, дать более полное математическое и логическое описание пространства возможных состояний наблюдаемых объектов на траекториях их эволюции в условиях замкнутости, ограничений, обмена и неопределенности. А с другой дать математическое описание и отражение распределения наблюдаемых объектов в реальном трехмерном пространстве как в локальные моменты времени, так и в эволюционном развитии.

Для преодоления обозначенных трудностей авторами работы предложены новые подходы и методы разработки когнитивных информационных технологий обработки и анализа потоков данных астрономических наблюдений и результатов моделирования, которые позволяют их отразить, описать и интерпретировать как генетическую информацию, которая является носителем доминантных и рецессивных признаков. Эти признаки определены как доминирующие для технологий раскодирования информации, содержащейся в данных наблюдений и результатах моделирования. Такой подход ма-

тематического описания и представления, логической структуризации и организации потоков данных наблюдений и результатов моделирования позволяет выявить скрытые закономерности, которые в рамках традиционных методов анализа получить невозможно.

Логические схемы алгоритмов и процедур технологий обработки, анализа и классификации потоков данных построены на основе теории фрактальных размерностей пространственных и временных структур, алгоритмическая и содержательная сущность которых заключается в следующем. Во-первых, обработка потока данных состоит в том, чтобы определить: образует ли он фрактальную структуру? Если да, то определить центры фрактальной связанности потока данных и получить оценки индекса информационной связанности. Во-вторых, алгоритмы и процедуры технологий анализа и классификации обработанного потока позволяют выделить монофрактальные структуры, если поток образует мультифрактал, и классифицировать их по признаку принадлежности к классам перколирующего фрактала или фрактального агрегата, а также оценить меру расхождения между геометрическими и информационными фрактальными размерностями, как индикатора единства количественных и качественных характеристик потока.

2. Основные понятия и определения

В качестве критерия близости двух орбит вводится количественная оценка фрактальной меры на множестве по-парных расстояний между соответствующими парами точек орбит. Такая оценка фрактальной меры является критерием связанности двух орбит, посредством которого отражается степень их геометрической и информационной близости. Основная посылка и смысл введенной сущности объясняется и поясняется следующей логической схемой и алгоритмом. Во-первых, на орбитах определяются реперные (или опорные) точки, в качестве которых могут выступать перигелий или афелий орбиты. Во-вторых, относительно реперных точек выбирается N_0 дискретных точек с шагом дискретизации по истинной аномалии $\Delta v = \frac{360^\circ}{N_0}$, где значение N_0 опре-

деляется из следующих условий: 1) статистической значимости и репрезентативности выборки; 2) уровня надежности оценки фрактальной меры. В-третьих, на каждом i -ом шаге дискретизации по Δv вычисляется расстояние r_i между соответствующими точками на орбитах. В-четвертых, после завершения предыдущего шага по всем дискретным точкам орбит определяются r_{min} и r_{max} , вычисляется $\Delta = |r_{max} - r_{min}|$, который разбивается на K подинтервалов. В-пятых, для заданного уровня геометрической близости двух орбит $r_{дов}$ (радиус сферы доверительности) вычисляется оценка уровня доверительности $p_{дов}$, который отражает долю точек $r_i \in \Delta$, для которых справедливо условие: $r_i \leq r_{дов}$. Оценка $p_{дов}$ является критерием и количественной мерой фрактальной природы близости двух орбит, т.е. для заданного $r_{дов}$ и с каким значением $p_{дов}$ можно считать связанными две орбиты.

Для получения количественной оценки фрактальной меры на K подинтервалах множества точек $r_i \in \Delta$, учитывающей одновременно емкостные и информационные размерности фрактала, используется универсальная формула, которая была получена Мышевым А.В. [1] и определяется следующим выражением

$$d_b = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{B(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^K p_i \log \sum_{j=1}^K (1 - \rho_{ij}) p_j}{\log \varepsilon}, \quad (1)$$

где p_i – вероятность попадания значения r_i в i -ый подинтервал $\Delta = |r_{min} - r_{max}|$; ε – длина подинтервала для заданного разбиения интервала; ρ_{ij} – рандомизированная мет-

рика между центрами j -го и i -ого подинтервалов; $B(\varepsilon)$ – B -энтропия. Рандомизированная метрика ρ_{ij} определяется по следующей формуле

$$\rho_{ij} = \frac{|r_i - r_j|}{|r|}, \quad (2)$$

где $|r_i - r_j|$ – это расстояние (геометрическое или информационное) между i -ым и j -ым подинтервалами; $|r|$ – длина интервала Δ .

Для получения оценки аналогичной формуле (1), но учитывающей свойства фрактальной геометрии множества точек $r_i \in \Delta$ использовалась известная формула [2]

$$d_f = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon}, \quad (3)$$

где $N(\varepsilon)$ – число покрытий множества точек $r_i \in \Delta$; ε – радиус сферы покрытия. Емкостная фрактальная размерность d_f вводится и определяется как оценка меры нерегулярности топологической и геометрической структуры множества точек r_i .

Формулы (1) и (3) использовались для получения оценок критериев связанности двух орбит, которые описывают и отражают степень пространственной близости двух орбит в определенной пространственной окрестности $r_{дов}$ с заданным уровнем достоверности $p_{дов}$.

Логическая схема получения оценок фрактальной меры связанности потока орбит относительно оптимальной опорной орбиты и нахождение такой орбиты в потоке выражается в виде следующего алгоритма. Первый шаг – произвольно выбирается первая фиксированная орбита потока O_j ($j=1 \div L$, где L – количество орбит потока) и вычисляются попарные индексы связанностей I_k между ней и всеми другими орбитами O_k ($k=1 \div L$, $j \neq k$, k – переменный индекс) потока по формулам (1), (2). Результат этого шага – множество индексов связанностей $K_j = \{I_k\}$ для всех орбит потока относительно выбранной опорной орбиты O_j . На этом шаге также определяются индексы связанностей I_m , которые вычисляются по формуле (3) и отражают свойства фрактальной геометрии близости двух орбит, образуя множество $G_j = \{I_m\}$. На втором шаге вычисляется коэффициент связанности потока орбит $\{O_k\}$ относительно опорной орбиты O_j по формуле (1), т.е. вычисляется фрактальная размерность R_j множества K_j . Процедуры первого и второго шага выполняются для всего множества орбит $\{O_j\}$, где j индекс опорной орбиты. На последнем шаге алгоритма получаем множество $S_{орб} = \{R_j\}$, элементы которого показывают насколько та или иная орбита может быть «центром» потока орбит, относительно которого наиболее плотно и компактно группируются орбиты. Условие выбора такого «центра» потока орбит определяется следующим выражением

$$R_j \rightarrow \min_j \quad (4)$$

Основная посылка и смысл обозначенной логической схемы в информационных технологиях обработки и анализа состоит в том, чтобы дать математическое и логическое описание пространства возможных состояний наблюдаемых малых тел с учетом геометрических, динамических и информационных аспектов их эволюции.

Для представления расположения тел в моменты их наблюдений и дальнейшей эволюции разработана математико-логическая схема перехода от орбитального описания положений тел к их геометрическому расположению в реальном пространстве, которая реализована в виде следующей процедуры. Во-первых, локализуется область пространства (куб или прямоугольный параллелепипед), в котором находятся наблюдаемые объекты–тела. Во-вторых, выделяется элементарный объем разбиения этой области, т.е. область разбиения представляется в виде трёхмерной решётки, узел которой является идентификатором элементарного объема. В-третьих, решается задача таксо-

номии и классификации пространственного распределения малых тел на узлах трёхмерной решётки. Задача заключается в следующем: образует ли распределение тел в этом объёме регулярную либо нерегулярную пространственную структуру? Для этого использовался аппарат теории фрактальных размерностей и фрактальной геометрии [1–4]. Решением задачи является выделение объема, определение пространственной геометрии и распределения тел на узлах решётки, т. е. являются ли соответствующие подмножества узлов решётки фрактальными объектами или регулярными? В-третьих, решалась задача пространственной кластеризации наблюдаемых объектов на узлах решетки: выделения фрактальных кластеров – перколяционный фрактал или фрактальный агрегат.

3. Некоторые иллюстрации результатов обработки и анализа данных наблюдений

Для обработки и анализа данные астрономических наблюдений для малых тел солнечной системы были сгруппированы, исходя из опыта предыдущих исследований [5–7]. В табл. 1 показана классификация малых тел по группам, исходя из ограничений на значения элементов их кеплеровских орбит.

Таблица 1. Классификация малых тел по элементам кеплеровских орбит

<i>Группа 1</i>	<i>Главный пояс астероидов: $e < 1/3$; $i < 20^\circ$; $2.1 < a < 3.5$ а. е.</i>
<i>Группа 2</i>	<i>Короткопериодические кометы и метеорные тела (включая астероиды группы Аполлона – Амура): $1/3 < e < 0.95$; $i < 30^\circ$; $a < 15$ а. е.</i>
<i>Группа 3</i>	<i>Долгопериодические кометы и метеорные тела: $e > 0.95$; i – случайное; $a > 15$ а. е.</i>
<i>Группа 4</i>	<i>Троянцы (захваченные Юпитером и колеблющиеся относительно его передней и задней лагранжевых точек либрации): $a \approx 5.2$ а. е.</i>
<i>Группа 5</i>	<i>Астероиды группы Гильды: $e \approx 0.2$; $i \approx 10^\circ$; $a \approx 3.95$ а. е.</i>
<i>Группа 6</i>	<i>Астероиды группы Венгрии: $e \approx 0.1$; $i \approx 25^\circ$; $a \approx 1.9$ а. е.</i>
<i>Группа 7</i>	<i>Малые тела, орбиты которых пересекают орбиту Земли в окрестности радиуса сферы ее влияния.</i>

Иллюстрация и отражение результатов обработки и анализа потока астрономических данных на примере объектов–тел группы 7 в виде фрагмента приведены в табл. 2. В столбцах 2,3,4 приведены фрагменты (подмножества) для множеств G_j и K_j ($j=2$) и соответствующие их элементам значения B – энтропии. Значения элементов этих множеств вычислялись относительно второй орбиты. Как видно из табл.2 значения всех элементов множества G_j больше единицы (условие геометрической регулярности – это равенство всех элементов единице), отражая тем самым фрактальные свойства пространственной структуры потока орбит группы 7. Логические аналогии для элементов множества K_j (условие однородности геометрии потока – это равенство всех элементов нулю) указывают на то, что “дырявая” пространственная геометрия потока траекторий обладает неоднородной плотностью. На основе элементов пятого столбца была определена орбита, которая является “центром притяжения” потока, т.е. относительно ее наиболее плотно сгруппированы орбиты тел группы. Элементы этой орбиты на момент наблюдений имеют следующие значения: $a = 2.211545$ а.е. , $i = 7.50626^0$, $e = 0.5894668$, $\omega = 123.26392^0$, $\Omega = 313.24332^0$. Этот этап обработки и анализа данных в логической цепочке информационных технологий позволяет получить оценки количественной меры фрактальной природы и фрактальной геометрии потока орбит рассматриваемой группы тел, а также определить центр потока.

Вторым этапом в логической цепочке информационных технологий обработки и анализа является пространственное представление и описание распределения малых

тел исследуемой группы в локальной области гелиоцентрической прямоугольной системы координат. Проиллюстрируем результаты, получаемые на этом этапе, на примере объектов–тел группы 1. Разбиение объема, в котором локализованы тела на момент наблюдения, определяется ограниченной трехмерной решеткой Z^3 следующего масштаба: по оси X – 15 узлов, по оси Y – 14 узлов, по оси Z – 12 узлов. Процедура пространственной кластеризации на решетке Z^3 позволила получить следующие результаты. Во-первых, было выделено 31 кластер: один кластер типа перколяционного фрактала и тридцать типа фрактального агрегата. Размер перколяционного фрактала составлял 473 узла, а размеры фрактальных агрегатов варьировались от одного до нескольких узлов. Во-вторых, перколяция обнаружена в плоскости XOY . В-третьих, степень заполнения узлов решетки Z^3 составляла в пределах двадцати одного процента: в окрестности восемнадцати процентов занимает перколяционный фрактал, а остальные фрактальные агрегаты. Аналогичные расчеты для тел группы 7 с теми же размерами решетки Z^3 показали следующие результаты: не было обнаружено ни одного перколяционного фрактала, а только кластеры типа фрактального агрегата в количестве 31 (размеры от 1 до 9 узлов), т.е. объекты этой группы не образуют компактные пространственно-протяженные образования.

Процессы перколяции малых тел на узлах решетки Z^3 достаточно полно отражают и описывают пространственную и эволюционную связанность этих объектов на их орбитах. Эти процессы наиболее характерны для объектов группы 7 указывая на то, что пространственно-временная геометрия этих объектов в пространстве возможных состояний имеет фрактальную природу тем самым, определяя тип их фрактальной динамики. Для этого типа динамики характерна наиболее нерегулярная пространственно-временная фрактальная геометрия. Такой геометрией с небольшими пространственно-временными масштабами обладают малые тела типа метеорных тел и ряда других. Фрактальная агрегация в пространстве возможных состояний наиболее ярко проявляется в других группах малых тел. Такие фрактальные структуры отражают другой тип фрактальной динамики, проявляемой в различных пространственно-временных масштабах фрактальной геометрии по-разному: при больших – это более регулярный, а при меньших – менее регулярный тип динамики.

Таблица 2. Значения для элементов множеств G_j и K_j ($j=2$) и соответствующие этим элементам значения B – энтропии.

Номер орбиты	B -энтропия	Элементы множества G_j	Элементы множества K_j	Элементы множества S_{orb}
1.	0.47507310	1.2494696	0.20632162	0.026309688
2.	0	1	0	0.036631284
3.	0.43012814	1.2460074	0.18680227	0.033831022
4.	0.48075796	1.2096293	0.20879053	0.025871072
5.	0.50522353	1.1657263	0.21941579	0.028186163
6.	0.40580407	1.2416164	0.17623847	0.036397821
7.	0.49851024	1.1521853	0.21650024	0.026056471
8.	0.45286850	1.2466675	0.19667829	0.022999356
9.	0.44742281	1.1198819	0.19431325	0.030783722
10.	0.48236628	1.2204674	0.20948901	0.026293156
11.	0.48084950	1.2688664	0.20883028	0.022580209
12.	0.50089544	1.2177231	0.21753612	0.031327647

4. Некоторые выводы и обобщения

Результаты обработки и анализа данных наблюдений для групп малых тел, обозначенных выше, позволяют сделать ряд выводов и обобщений следующего характера.

Во-первых, разрабатываемый подход обработки и анализа больших потоков астрономических данных на основе когнитивных технологий раскодирования сокрытой в них информации является перспективной и уникальной парадигмой в области разработки информационных технологий нового поколения для широкого класса задач современной астрономии. Во-вторых, потоки данных астрономических наблюдений можно обрабатывать, используя различные процессы и методы теории фракталов и генетических данных как для получения совокупностей и популяций выборочных данных, так и для их анализа. Эти методы и процессы отражают и определяют особенности получаемых оценок фрактальных мер и размерностей, а также область применения выводов, которые можно сделать на основе этих данных. В этом случае используются два типа выборочности – генетическая и статистическая. Статистическая выборочность связана с определением пространственных масштабов решетки Z^3 , а генетическая – с распределением информации и объектов на узлах этой решетки.

Литература

1. *Мышев А.В.* Метрологическая теория динамики взаимодействующих объектов в информационном поле нейросети и нейрона // Информационные технологии, 2012, №4, с.52–63.
2. *Павлов А.Н., Анищенко В.С.* Мультифрактальный анализ сложных сигналов // УФН, 2007, т.177, №8, с.859-876.
3. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
4. *Мун Ф.* Хаотические колебания. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
5. *Альвен Х., Аррениус Г.* Эволюция Солнечной системы. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
6. *Куликова Н.В., Мышев А.В., Пивненко Е.А.* Космогония малых тел. – М.: Космоинформ, 1993. – 180с.
7. *Емельяненко В.В., Нароенков С.А., Шустов Б.М.* Распределение околоземных объектов. – Астрономический вестник, 2011, т.45, №6, с.512–517.

THEORY FRACTAL DIMENSION IN INFORMATION TECHNOLOGIES PROCESSING AND ANALYZING OF LARGE STREAM OF ASTRONOMICAL OBSERVATIONS DATA

Myshev A.V., Talalaev I.V.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Research Nuclear University "MPhI", Obninsk, Russia

A new approach of development and implementation of models algorithms and procedures of information technology for the processing and analyzing large stream of astronomical data are considered. The foundations of the methods based on the theory fractal dimension. Data flows for elements Keplerian orbits are unstructured, unrelated, spurious and information flows. Mathematical and logical formalism approach allows to build cognitive procedure decodes the information technology and algorithmic schemes. These schemes are typical methods of data mining. They can detect emerging patterns and knowledge hidden in data streams. The flow of data elements Keplerian orbits for various classes of small bodies in space is defined as a logical structure in the form connecting list of data element is a of set data about the orbit's body.

СИСТЕМА ЭРА: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Павлов Д.А., Скрипниченко В.И., Фишков А.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт прикладной астрономии РАН», Санкт-Петербург, Россия*

В последние годы в системе ЭРА реализован ряд новых возможностей, существенно расширяющих границы её применения. Так, в дополнение к собственным фундаментальным эфемеридам ИПА РАН реализована возможность использования зарубежных эфемерид (JPL DE, IMCCE INPOP) внутри системы ЭРА. Кроме этого, внешним пользователям обеспечен автономный (вне системы ЭРА) доступ к отечественной численной эфемериде ЕРМ. За счет использования аппаратно реализованной на процессорах Intel десятибайтной арифметики вещественных чисел удалось существенно повысить точность встроенного в систему интегратора.

В настоящее время разрабатывается новая версия системы ЭРА, работающая под управлением ОС Windows и Linux и реализуемая на новой кодовой и технологической базе.

1. Введение

Система ЭРА (Эфемеридные расчёты в астрономии) используется в Институте прикладной астрономии РАН для построения высокоточных численных теорий движения планет Солнечной системы и их естественных спутников, а также для эфемеридных вычислений, обеспечивающих выпуск печатных и электронных версий Астрономического ежегодника и навигационных изданий. Система предоставляет возможность наглядно и компактно описывать алгоритмы решения задач эфемеридной астрономии на высокоуровневом предметно-ориентированном языке.

2. Принцип работы системы ЭРА

Рассмотрим следующую эфемеридную задачу. Имеется последовательность некоторых однородных наблюдений Марса (который определяется переменной **object**), заданных в шкале времени **TDT** (переменная **Time_Scale**). Каждое такое наблюдение определяется тройкой величин – моментом наблюдения и парой координат, обозначенных соответственно как **date**, **ox**, **oy**. Для каждого из этих наблюдений надо определить теоретические значения **C**, а также **O-C**. Обозначим их соответственно: **cx**, **cy**, **o_cx**, **o_cy**.

При реализации данной задачи на традиционном языке программирования требуется сделать следующее:

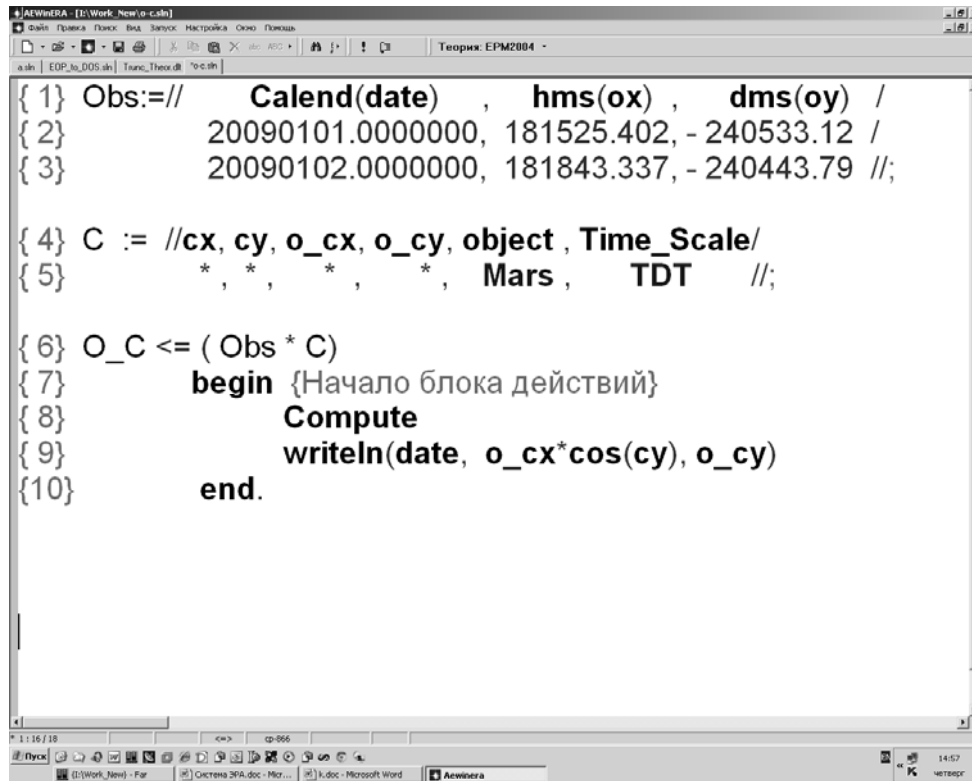
- 1 Явно изобразить в программе имеющиеся наблюдения или позаботиться об извлечении требуемого набора наблюдений из базы данных.
- 2 Написать традиционный цикл по перебору этих наблюдений.
- 3 В тело цикла вставить обращения к одной или нескольким процедурам, вычисляющим значения требуемых величин, позаботившись о передаче этим процедурам необходимых параметров.
- 4 Сохранить результат в виде, удобном для дальнейшего использования.

На языке СЛОН (входном языке системы ЭРА) [1, 2, 3] решение этой задачи выражается тройкой нижеследующих табличных операторов (рис. 1).

Первый оператор (три первых строки программы) - это собственно таблица (Obs) наблюдений с именами столбцов и указанием для каждого столбца, в какой системе измерения заданы приведённые значения. Второй оператор (четвертая и пятая строки программы) создаёт вспомогательную однострочную таблицу с именем **C**, состоящую из шести столбцов (символ «*» в этом операторе отмечает те переменные, значения ко-

торых надо будет вычислить). Наконец, при выполнении последнего оператора (оставшиеся строки программы) система:

- 1 Создаёт новую таблицу **O_C**, расширяя исходную таблицу наблюдений (а значит и постановку задачи) дополнительными столбцами (переменными) и соответствующими их значениями в клеточках строк (символ * в этом операторе означает операцию умножения таблиц).



```
{ 1} Obs:=//      Calend(date) ,      hms(ox) ,      dms(oy) /
{ 2}              20090101.0000000, 181525.402, - 240533.12 /
{ 3}              20090102.0000000, 181843.337, - 240443.79 //;

{ 4} C := //cx, cy, o_cx, o_cy, object, Time_Scale/
{ 5}      * , * , * , * , Mars , TDT //;

{ 6} O_C <= ( Obs * C)
{ 7}      begin {Начало блока действий}
{ 8}          Compute
{ 9}          writeln(date, o_cx*cos(cy), o_cy)
{10}      end.
```

Рис. 1. Пример программы на входном языке системы ЭРА.

- 2 Последовательно просматривает все строки расширенной таблицы наблюдений и к каждой строке применяет последовательность традиционных операторов, указанных в так называемом блоке действий, т.е. операторов, расположенных между словами **begin** и **end**. При этом, в частности, действие **compute** произведёт необходимые вычисления и заполнит клетки таблицы для вычисляемых переменных.

3. Отличие языка СЛОН от традиционных языков

Ниже перечислены привлекательные особенности изложенной записи решения задачи в системе ЭРА по сравнению с описанием той же задачи на традиционном языке программирования:

- 1 Средства доступа к объектам (таблицам) базы данных встроены в язык. В программе с таблицами и с переменными в столбцах можно манипулировать прямо по именам, как и с традиционными переменными в языках программирования. Не надо заботиться ни о чтении, ни о сохранении таблиц, это делает система.
- 2 Таблицы с повторяющимися или регулярно меняющимся в строках данными можно изображать компактно, применяя табличные операции к соответствующим «коротким» таблицам.
- 3 В тексте программы достаточно лишь обозначить обрабатываемую структуру данных (таблицу) и справа от этого обозначения указать те процедуры (действ-

- вия), которые надо применить к каждой строке таблицы. Никаких циклов по перебору строк таблицы писать не надо. Система интерпретирует табличный оператор как цикл, в котором таблица – заголовок цикла, текущая строка таблицы – текущее значение параметра цикла, а тело цикла представлено блоком действий.
4. Основной процедуре **compute** (редукция наблюдений, вычисление значений **C** и **O-C**) не надо явно передавать никаких параметров. Неявным её параметром являются поля (значения в клетках) текущей строки таблицы.
 5. Результат работы программы автоматически сохраняется в архиве системы в виде таблицы (в нашем примере: **O_C**). Эта таблица может непосредственно использоваться в качестве операнда в этой же, или других программах. В системе имеются средства графической интерпретации данных, хранящихся в таблицах. Таблицы можно также просматривать и редактировать в специальном редакторе, варьируя системы единиц и форматы изображения значений величин, заполняющих клеточки таблиц. Вот как, например, выглядит (рис. 2) в табличном редакторе фрагмент таблицы **O_C**, полученной в результате исполнения вышеприведённой программы.

	1	2	3
	CALEND (DATE)	HMS (O_CX)	DMS (O_CY)
1	20090101.00000000	0.005	-0.001
2	20090102.00000000	0.005	-0.002

Рис. 2. Таблица **O-C** — результат исполнения программы.

6. Общеупотребительные в эфемеридной астрономии переменные, их значения, процедуры и функции достаточно полно представлены в системе. Все они предопределены, т.е. имеют фиксированные имена и могут сразу употребляться в программе без каких-либо декларативных вхождений. Система обеспечивает возможность выполнения всех этапов цикла работ эфемеридной астрономии, начиная с редукции наблюдений и заканчивая улучшением параметров модели и созданием на этой основе уточнённых численных теорий движения небесных тел.

Перечисленные свойства системы ЭРА обеспечили долговременный срок её успешного использования. Система ЭРА служит инструментальным средством создания и постоянного развития отечественных высокоточных эфемерид планет и Луны (ЕРМ) [4,5]. Система регулярно применяется при подготовке отечественных эфемеридных изданий таких, как «Астрономический ежегодник», «Морской астрономический ежегодник», «Морской альманах» [6]. Система ЭРА является также базовым вычислителем «Персонального Астрономического Ежегодника» [7] и интерактивной системы удаленного доступа для морской астронавигации «ШТУРМАН» [8].

4. Развитие системы ЭРА

Комплекс ЭРА и, в первую очередь, его предметно-функциональное наполнение постоянно развиваются. Эволюционирует также и системная составляющая комплекса. Среди последних значительных усовершенствований системы ЭРА можно назвать следующие:

- 1 Создание системы Дельта – спутника комплекса ЭРА [9,10]. Эта разработка обеспечивает удобное совместное использование в одной программе выразительных средств специализированного предметно-ориентированного входного языка системы ЭРА и общеупотребительных возможностей универсального языка программирования Паскаль.
- 2 Реализацию в системе унифицированного доступа к различным версиям национальных фундаментальных эфемерид (отечественных, американских и французских).
- 3 Перевод интегратора системы на десятибайтную арифметику вещественных чисел, благодаря чему удалось повысить точность численного интегрирования на длительных интервалах времени на два-три порядка. Указанное повышение точности наглядно демонстрируется на рисунках 3-6, изображающих погрешности при интегрировании в двух направлениях (от 1985 г. к 2199, затем обратно к 1985).

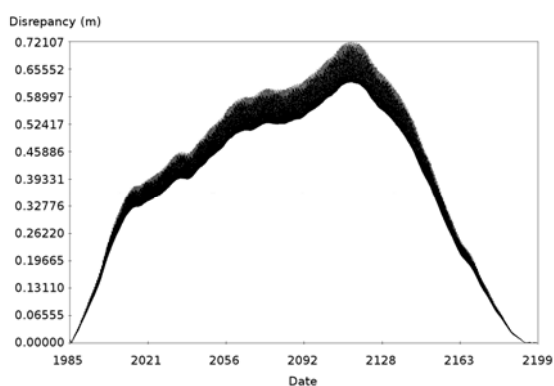


Рис. 3. Потери округления при интегрировании вперёд-назад (Луна, 64-битная точность).

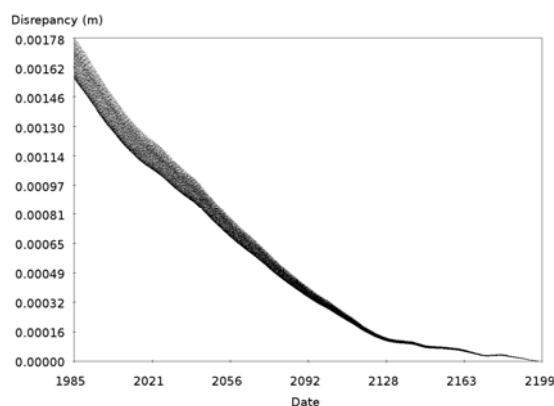


Рис. 4. Потери округления при интегрировании вперёд-назад (Луна, 80-битная точность).

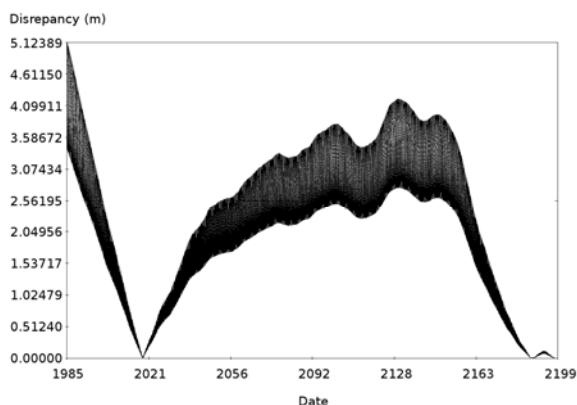


Рис. 5. Потери округления при интегрировании вперёд-назад (Меркурий, точность 64 бит).

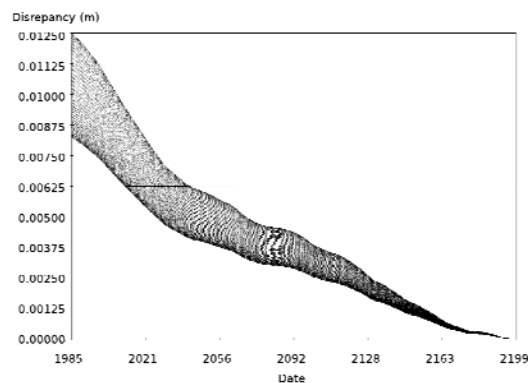


Рис. 6. Потери округления при интегрировании вперёд-назад (Меркурий, точность 80 бит).

4. Кардинальное обновление системы ЭРА

В настоящее время разрабатывается новая (восьмая) версия системы ЭРА, отличающаяся следующими свойствами:

- ЭРА 8 переписана «с нуля» на языках С (для интенсивных вычислений, связанных с численным интегрированием орбит) и Racket (для парсинга и компиляции СЛОН-

программ). Racket имеет средство генерации парсеров на основе Yacc, а также продвинутую систему метапрограммирования, позволяющую работать с языками, сделанными в Racket (в данном случае СЛОН) в самой среде Racket.

- ЭРА 8 является кросс-платформенной и работает на Linux и Windows, 32- и 64-битных версиях.
- ЭРА 8 имеет продвинутые средства диагностики и отладки программ на языке СЛОН, в основном благодаря тому, что программы на языке СЛОН сделаны «родными» для среды Racket.
- ЭРА 8 будет поставляться с детальным математическим описанием всех поддерживаемых операций.
- ЭРА 8 использует для хранения и доступа к эфемеридам форматы файлов PCK и SPK, разработанные в JPL. Благодаря усилиям специальной международной рабочей группы, эти форматы будут приняты как стандартные во всех основных институтах, выпускающих эфемериды (EPM в ИПА РАН, IMCCE INPOP, JPL DE).

Литература

1. *Krasinsky G. A., Novikov F. A., Skripnichenko V. I.* Problem Oriented Language for Ephemeris Astronomy and its Realization in System ERA. // *Cel. Mech.*, 1989. Vol. 45, P. 219–229.
2. *Новиков Ф. А.* Архитектура системы “ЭРА” — табличный подход к обработке данных // Препринт ИПА АН СССР, №16 — Ленинград 1990 г. — 32 с.
3. *Krasinsky G. A., Vasilyev M. V.* ERA: Knowledge base for ephemeris and dynamical astronomy // *Proc. of IAU Coll.165.* – Poland, 1996. – P. 239.
4. *Путьева Е. В.* Высокоточные эфемериды планет — EPM и определение некоторых астрономических постоянных // *Астрон. Вестн.*, 2005. Т. 39 №3. С. 202-213.
5. *Путьева Е. В.* Национальные высокоточные эфемериды планет и Луны — EPM // *Труды ИПА РАН*, 2007, Вып. 17, СПб: «Наука». С. 42-59.
6. *N. I. Glebova, G. A. Kosmodamianskiy, M. V. Lukashova, et al.* Russian astronomical yearbooks in editions and program systems // *IAU XXVIIth General Assembly, Rio de Janeiro, Brazil. August 03-14, 2009. Abstract book*, P.278 (JD06-p:24, Poster).
7. *Глебова Н. И., Лукашова М. В., Михеева В. Д., Нецветова Г. А., Парийская Е. Ю., Свешников М. Л., Скрипниченко В. И.* Программная система PersAY — «Персональный астрономический ежегодник». // *Труды ИПА РАН*, Вып. 17. — СПб.:Наука, 2007. сс. 223-228.
8. <http://shturman.ipa.nw.ru/>
9. *Михеева В. Д., Скрипниченко В. И.* Расширение языка Object Pascal (Delphi) таблично-ориентированными средствами решения задач эфемеридной астрономии // *Сообщения ИПА РАН*, №168, СПб, 2006. — 20 с.
10. *Михеева В. Д., Новиков Ф. А., Скрипниченко В. И.* Дельта — язык и система программирования для решения прикладных задач с табличными данными // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, № 4, том 2, 2007 — сс. 57-60.

THE ERA SYSTEM: CURRENT STATE AND FUTURE EVOLUTION

Pavlov D.A., Skripnichenko V.I., Fishkov A.A.

Institute of Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, Russia

In the course of last years, a number of actions has been undertaken to make the ERA system usable in more areas. Particularly, in addition to IAA's, fundamental ephemeris of the Solar system bodies from other institutions (JPL, IMCCE) now can be accessed from within ERA. Moreover, external users now have the possibility to access IAA's EPM ephemeris autonomously, i.e. without using the ERA system itself. Switching to native 80-bit floating point operations, available on Intel processors, has substantially improved the precision of the numerical integrator.

Currently, the new version of the ERA system is being developed. It works under both Windows and Linux, and is based on completely new source code and technology. It has also advanced

diagnostics and debugging facilities, and is delivered with detailed mathematical description of the algorithms that are implemented in it. It also makes use of the DAF-based formats (SPK, PCK) for accessing foreign ephemeris data and storing its own ephemeris.

НАХОЖДЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТРАЕКТОРИЙ ВОЗМОЖНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДА АПОФИС С ЗЕМЛЕЙ

Петров Н.А., Васильев А.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет,
Санкт-Петербург, Россия*

Нахождение траекторий возможных соударений астероидов с Землей — важнейшая задача в комплексной проблеме астероидно-кометной безопасности. Особую трудность представляют возможные соударения, связанные с резонансными возвратами, из-за потери точности.

В результате исследований, ведущихся на кафедре небесной механики СПбГУ более 5 лет, разработана методика поиска опасных траекторий. Уравнения движения астероида численно интегрируются методом Эверхарта с использованием численной эфемериды DE405. Начальные данные варьируются в 1-мерном многообразии вместо 6-мерного. Для борьбы с потерей точности после тесных сближений параметры опасных орбит вычисляются в базовом году. В окрестности начальных данных, приводящих к соударениям в 2036 году, найдено 67 опасных траекторий. В окрестности номинальной орбиты, где есть тесное сближение с Землей в 2051 году (около 8500 км), найдено и исследовано 24 опасные траектории. Достоверность результатов и структурная устойчивость множества орбит подтверждены, в частности, сравнением с результатами НАСА.

Настоящая работа - продолжение этих исследований. Возможных орбит соударений очень много, их структура сложна, поэтому мы используем более мощные вычислительные ресурсы, в этом специфика настоящей работы. При переходе на компьютерный кластер СПбГУ модифицирована основная программа с целью распараллеливания вычислений. Усовершенствована и автоматизирована методика обработки огромного материала численного интегрирования. В результате найдено около 200 ранее неизвестных возможных траекторий соударений с Землей астероида Апофис в текущем столетии и изучены их свойства.

Цель работы: поиск и исследование возможных соударений астероидов с Землей. Для любого возможного соударения возможны также тесные сближения, в том числе с переходом на резонансные орбиты, с последующими сближениями (резонансными возвратами) и соударениями. С учетом катастрофических последствий соударений задачу поиска нужно решать в полном объеме и заблаговременно. Особую трудность представляют возможные соударения, связанные с резонансными возвратами, из-за потери точности. Для борьбы с потерей точности после тесного сближения в 2029 году параметры опасных орбит вычислялись в базовом году.

Настоящая работа - продолжение исследований возможных соударений с Землей астероида Апофиса, проводимых на кафедре небесной механики СПбГУ [2, 3]. В этих работах получено и исследовано несколько десятков возможных соударений в текущем столетии. Показана устойчивость основных характеристик соударений по отношению к малым возмущениям модели движения. Сравнение с аналогичными результатами НАСА [5,6] показывает хорошее согласие. В работе [4] исследуются неопределенности в движении Апофиса, связанные с эффектом Ярковского. Показано, что соударение в 2036 году имеет совсем малую вероятность.

Возможных орбит соударений очень много, их структура сложна, поэтому мы использовали более мощные вычислительные ресурсы, модифицированы методы поиска и программы распараллеливания вычислений, в этом специфика настоящей работы. В результате найдено 198 ранее неизвестных возможных траекторий соударений с Землей астероида Апофис в текущем столетии и изучены их некоторые свойства [1].

Для опасных траекторий основные параметры, которые мы находили и исследовали, были следующие: момент самого тесного сближения с Землей, расстояние до центра Земли в этот момент, значение варьируемого аргумента и ширина щели начальных данных, приводящих к соударению. В качестве варьируемого 1-мерного множества начальных данных была выбрана прямоугольная координата x . Шаг варьирования по аргументу x в разные периоды исследований выбирался разным. В первые годы исследований до перехода на компьютерный кластер СПбГУ была проделана попытка просканировать с шагом 10^{-15} а.е. всю область начальных данных, приводящих к соударению в 2036 году, а также некоторую ее окрестность для поиска опасных орбит, что привело к результатам, описанным выше.

После перехода на компьютерный кластер наши вычислительные возможности существенно возросли. Но если бы мы захотели с шагом 10^{-15} а.е. по координате x отсканировать всю область начальных данных для астероида Апофис, указанную НАСА, то пришлось бы проинтегрировать около 10^8 точек на интервале времени с 2006 по 2100 год, что привело бы к необходимости обработки около $1,5 \times 10^9$ сближений Апофиса с Землей на расстоянии менее 0,25 а.е. Этот огромный материал невозможно было бы обработать даже с помощью кластера в разумные сроки.

Поэтому вначале небольшая область начальных данных интегрировалась с шагом 10^{-14} а.е. и найденные сближения с Землей обрабатывались, а затем вся область была проинтегрирована с шагом 10^{-13} а.е. по x . При обработке и исследовании сближений астероида с Землей у нас возникло понятие «цепочки». «Цепочка» - это ряд сближений астероида с Землей в заданном году в зависимости от начального аргумента, среди которых есть минимальное. Сближения в «цепочке» связаны между собой некоторым условием. Чтобы выяснить, есть ли в этой «цепочке» сближения, приводящие к соударению с Землей, нужно, как отмечалось выше, перейти к базовому году, а точнее моменту времени. Таким моментом времени был выбран $T = 2035$ май 01,0 TDB, $JD = 2464448,5$ TDB. Априори известно, что тесные сближения и соударения с Землей астероида Апофис происходят в окрестности 13 апреля. Поэтому все найденные численным интегрированием сближения были распределены по годам и месячным интервалам, а затем в первую очередь изучались апрельские сближения. При переходе в базовый год, варьируя координату x , можно построить новую «цепочку», в которой есть минимальное расстояние. Если это расстояние окажется меньше радиуса Земли, то нам удалось найти орбиту соударения и таким образом пополнить каталог опасных орбит.

Построение «цепочек» само по себе пока некоторое искусство. При таком большом шаге сканирования начальной области как 10^{-13} а.е. по x некоторые «цепочки» называются очень малочисленными и даже сужаются до одной точки, но, тем не менее, при переходе к базовому году иногда приводят к орбите соударения.

Для дальнейшего исследования был подготовлен каталог опасных орбит, в который вошли часть уже известных и найденные недавно новые. В нем оказалось 249 орбит. Для удобства исследования и отображения содержания каталога орбит введем новый аргумент – относительную координату орбиты Δx , которая равна разности координаты x орбиты и координаты x номинальной орбиты, умноженной на 10^9 . На рис. 1 показано распределение опасных орбит по годам сближений астероида Апофис с Землей в зависимости от аргумента Δx .

Как уже видно на рис. 1 множество опасных орбит распадается на 9 узких семейств по аргументу Δx . Пронумеруем эти семейства и проведем их анализ, а также сделаем для них некоторые вычисления.

На рис. 2 показано распределение опасных орбит по минимальному расстоянию во время сближения астероида Апофис с Землей в зависимости от аргумента Δx .

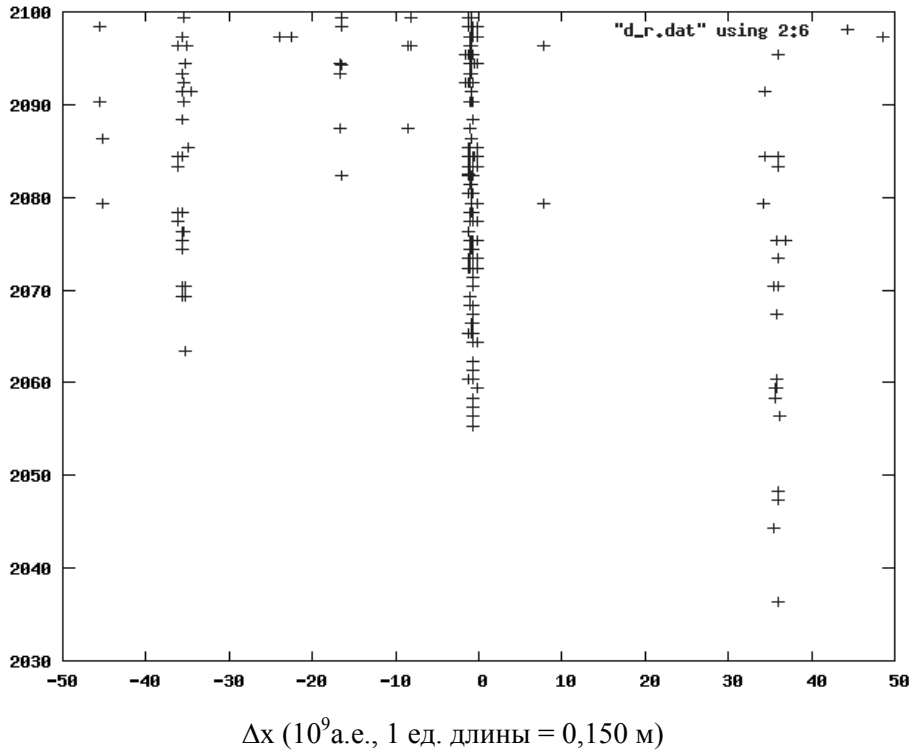


Рис. 1. Распределение опасных орбит по годам сближений астероида Апофис с Землей в зависимости от аргумента Δx . По оси ординат отложено время в годах.

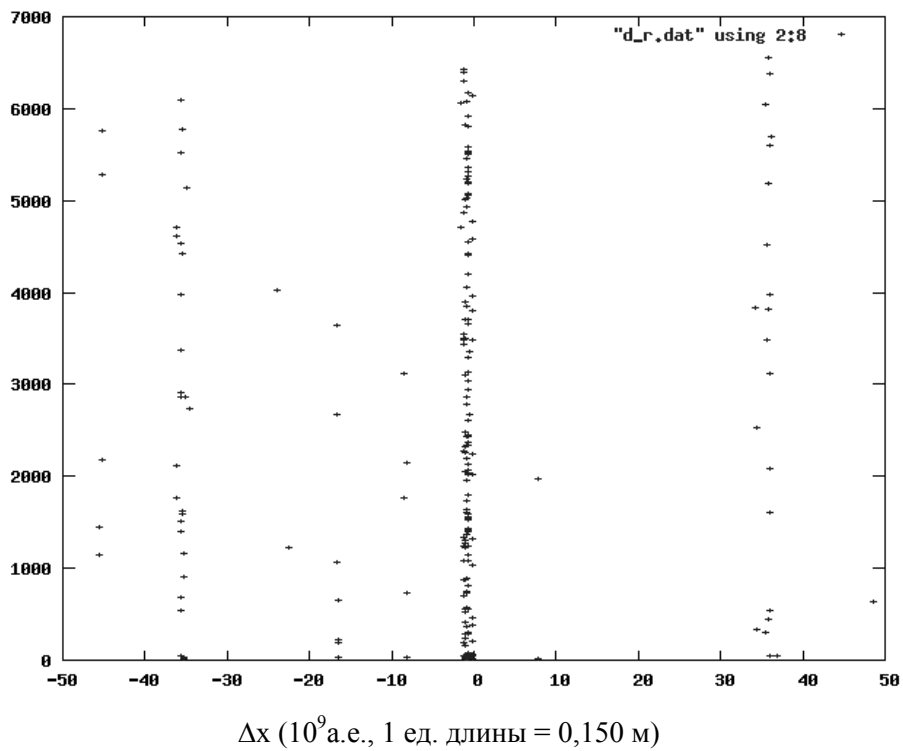


Рис. 2. Распределение опасных орбит по минимальному расстоянию во время сближения астероида Апофис с Землей в зависимости от аргумента Δx . По оси ординат отложено минимальное расстояние в км во время сближения.

На рис. 3 показано распределение опасных орбит по размеру щели начальных данных, которые приводят к столкновению астероида с Землей, в зависимости от аргумента Δx .

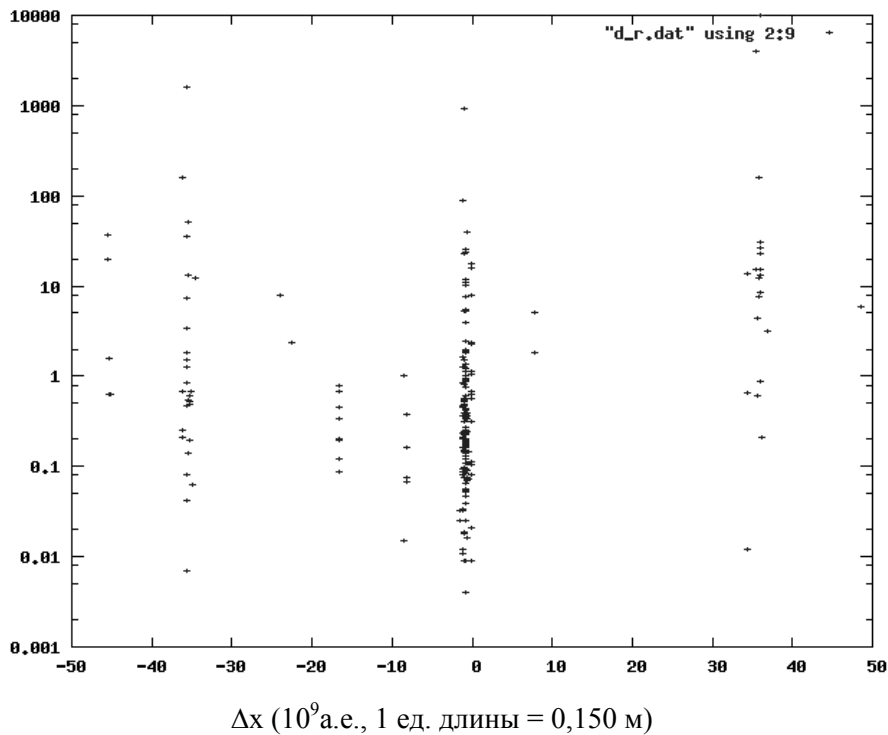


Рис. 3. Распределение опасных орбит по размеру щели начальных данных в зависимости от аргумента Δx . По оси ординат отложена величина δx – размер щели в метрах.

Таблица 1. Численность семейств опасных орбит и их расположение в области начальных данных.

Номер семейства	Число членов семейства	Среднее значение Δx семейства
1	5	-46,0
2	28	-35,5
3	2	-23,7
4	8	-16,6
5	6	-8,3
6	176	-0,5
7	2	7,8
8	21	35,6
9	1	48,6

Как видно из табл. 1, наиболее многочисленными являются семейства с номерами 2 и 6. Семейство с номером 2 находится в окрестности начальных данных, приводящих к соударениям в 2036 году, и содержит только 28 опасных орбит. В работах [2, 3] приведены 67 опасных траекторий в окрестности этого семейства. Такое различие в численности орбит вызвано тем, что шаг сканирования был взят большой - 10^{-13} а.е. по x , в каталог пока включены не все орбиты, а методика поиска и выявления опасных орбит еще не совершенна. В дальнейшем планируется исправить это несоответствие.

Другое семейство с номером 6 очень богатое по сравнению с остальными находится в тесной близости от номинальной орбиты и в окрестности начальных данных,

приводящих к тесному сближению с Землей в 2051 году (около 8500 км). Это сближение в свою очередь вызывает сильное рассеяние орбит и как следствие приводит к многочисленным опасным сближениям в последующие годы, что и видно в структуре этого семейства.

Более подробное исследование других семейств в будущем позволит выявить первоначальные тесные сближения, приводящие к рассеянию и как результат возникновению этих семейств.

Таблица 2. Распределение опасных орбит по размерам щели в заданных диапазонах.

Номер диапазона	Диапазон по δx (м)	Число орбит в диапазоне
1	$> 10^4$	1
2	$10^3 < \delta x \leq 10^4$	2
3	$10^2 < \delta x \leq 10^3$	4
4	$10^1 < \delta x \leq 10^2$	32
5	$10^0 < \delta x \leq 10^1$	48
6	$10^{-1} < \delta x \leq 10^0$	113
7	$10^{-2} < \delta x \leq 10^{-1}$	41
8	$10^{-3} < \delta x \leq 10^{-2}$	8

Как видно из табл. 2, распределение опасных орбит по размерам щели имеет вполне предсказуемое поведение – растет число орбит с уменьшением диапазона по δx . Однако, две последние строчки табл. 2 показывают, что имеет место селекция, обусловленная трудностями поиска и выявления орбит с очень узкими щелями по аналогии с проблемами в звездной астрономии, а также несовершенством этой методики. В дальнейшем также планируется устранять эти недостатки.

При вычислении полной вероятности столкновения астероида с Землей основной вклад в нее вносят опасные орбиты, расположенные вблизи номинала, а также орбиты с наибольшими размерами щелей. Как видно из данных каталога и представленных рисунков и таблиц, самую большую ширину щели имеет орбита соударения в 2036 году (1 мая 2035 года $\delta x = 1880$ км), но удаленность от номинала заметно уменьшает ее вклад в суммарную вероятность. С другой стороны самая опасная орбита в семействе с номером 2 вблизи номинала имеет ширину щели 1 мая 2035 года $\delta x = 909$ м и дает хороший вклад в полную вероятность. В будущем при пополнении каталога опасных орбит астероида Апофис и уточнении параметров этих орбит возможно более аккуратное вычисление полной вероятности его столкновения с Землей. При этом надо помнить, что новые оптические наблюдения астероида, которые уже активно ведутся с 2011 года и будут продолжаться в 2013, а особенно радарные, постепенно будут сужать трубку начальных данных.

В заключении можно отметить основные результаты и направления будущей работы. Каждое тесное сближение астероида с планетой порождает вторичные сближения (резонансные возвраты), включая соударения. Получается множество с очень сложной структурой фрактального типа, оно заслуживает более подробного исследования.

Обнаружено около 300 орбит соударений при использовании компьютерного кластера СПбГУ (ранее было известно менее 100 орбит соударений), для большинства из них вычислены наиболее важные параметры.

В дальнейшем планируется совершенствование методики поиска и выделения опасных орбит, вычисление их параметров и автоматизация всех вычислений. При разработке методов предотвращения соударений следует учитывать сложную структуру их множества, связанную с резонансными возвратами.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным исследованиям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

Литература

1. *Петров Н.А., Васильев А.А.* Использование компьютерного кластера СПбГУ для выделения траекторий возможных столкновений астероидов с Землей // «Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы». Научная конференция. Сборник резюме докладов. ГАИШ, МГУ, Москва, 28.05-01.06 2012 г., Изд. ГАИШ, МГУ, 2012. - 87с., с. 57.
2. *Соколов Л.Л. и др.* Траектории возможных соударений астероида Апофис. // Вестник СибГАУ, 2011, вып. 6 (39), с. 39-43, изд. СибГАУ, Красноярск, (по материалам Международной научной конференции «Околосемная астрономия – 2011», Красноярск, 5-12 сентября 2011 г.)
3. *Соколов Л.Л. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 311-320.
4. *Шор В.А. и др.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 131-142.
5. *Yeomans D.K. et al.* Deflecting a hazardous near-Earth object 1 // IAA Planetary Defense Conf.: "Protecting Earth from Asteroids", April 27-30, 2009, Granada, Spain.
6. *Chesley S.R.* Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect // IAA Planetary Defense Conf. May 9-12, 2011, Bucharest, Romania. 19 p.

PROBABLE COLLISION TRAJECTORIES OF ASTEROID “APOPHIS” AND THE EARTH: DETECTION TRAJECTORIES AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Petrov N.A., Vasiliev A.A.

*St. Petersburg State University, the Faculty of Mathematics and Mechanics,
St. Petersburg, Russian Federation*

Detection of probable collision trajectories of asteroids with the Earth is the most important task in the complex problem of the asteroid-comet hazard. Because of accuracy loss computations especial difficulty made by probable collisions at resonant returns.

As the result of investigations done by Celestial Mechanics board of St. Petersburg State University during last 5 years we had developed the method for the detection of hazard trajectories. We used DE405 ephemeris and the Everhart's method for the numerical integration of the asteroid movement equation while initial data is varied in only 1 instead of 6 dimensions. To defeat the loss of accuracy provided by close approaches we calculate the parameters of hazard orbits in the selected base year. The analysis of initial data shows that there are 67 trajectories of collisions in 2036. In the vicinity of nominal orbit there are another 24 trajectories showing close approach in 2051 (about 8500 km from the center of the Earth). The reliability of results and the structure stability of orbits are confirmed by comparisons with similar results from another groups, particularly, with NASA results.

The presented work is a continuation of investigations. There are many of probable collision trajectories and they have complex structure, so we need to use more computational power. As the solution we had rewritten and dramatically upgrade our computation program to make it useful for the parallel computation technology of St. Petersburg State University high-performance multiprocessor cluster. Obtained result analysis let us detect and investigate properties of more than 200 early unknown probable collision trajectories of Apophis and the Earth during the current century XXI.

ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Питьев Н.П., Питьева Е.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия*

В современных космологических теориях предполагается, что основная часть средней плотности Вселенной приходится на темную энергию и на темную материю. Не смотря на предполагаемое отсутствие или очень слабое взаимодействие темной материи с обычным веществом, она должна обладать гравитационными свойствами. На основе новой версии планетных эфемерид EPM2011 и обработки около 678 тысяч позиционных наблюдений планет и космических аппаратов были выполнены оценки возможного дополнительного гравитационного влияния темной материи на движение тел в Солнечной системе. Найдено, что уровень плотности ρ_{dm} темной материи, если она имеется, существенно ниже достигнутой современной точности определения таких параметров. На расстоянии орбиты Сатурна плотность ρ_{dm} должна быть ниже, чем $1.1 \cdot 10^{-20}$ г/см³, а масса темной материи в сфере внутри орбиты Сатурна даже с учетом ее возможной концентрации к центру должна быть меньше чем $7.9 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$.

1. Введение

В современных космологических теориях предполагается, что основная часть (порядка 73%) средней плотности Вселенной приходится на темную энергию, около 4% на барионную материю и 23% на так называемую темную материю [13]. Считается, что природа темной материи не барионная, частицы ее не взаимодействуют с обычным веществом через электромагнитные силы и не несут никакого электрического заряда. Кандидатами невидимой материи предлагаются различные гипотетические частицы [7]. Если гипотеза о частицах темной материи верна, то наша Галактика, как и другие, погружена в гало из таких частиц темной материи, и эти частицы, обладающие исключительной проникающей способностью, должны быть везде, включая Солнечную систему и Землю. Даже при отсутствии или очень слабом взаимодействии темной материи с обычным веществом, она должна обладать гравитационными свойствами, и ее наличие в Солнечной системе может проявиться через ее гравитационное влияние на движение тел Солнечной системы. Попытки обнаружить влияние возможной невидимой материи на движение тел в Солнечной системе уже делались ([5, 6, 8, 11, 12, 15, 16, 18] и др.). В данной работе проверка присутствия темной материи была проведена на основе планетных эфемерид EPM2011 [3] с использованием около 678 тысяч наблюдений планет и космических аппаратов, среди которых основную часть составляли высокоточные радиотехнические измерения.

2. Влияние на движение тел

Дополнительное гравитационное влияние будет зависеть от плотности темной материи, от ее распределения в пространстве и др. Обычно принимают [5, 6, 8, 9, 11], что темная материя распределена в Солнечной системе сферически симметрично относительно Солнца. Тогда можно считать, что любая планета на расстоянии r от Солнца испытывает кроме уже учитываемых ускорений от Солнца, планет, астероидов, транснептуновых объектов еще дополнительное ускорение от невидимой материи:

$$(d^2\mathbf{r}/dt^2)_{dm} = -GM(r)_{dm} \cdot \mathbf{r} / r^3, \quad (1)$$

где $M(r)_{dm}$ – масса дополнительной материи, заключенной в сфере радиуса r вокруг Солнца. Тестирование на наличие дополнительной гравитирующей среды можно проводить либо по поиску дополнительного ускорения, как делалось [5, 16], либо по дополнительному смещению перигелия из-за наличия непрерывной тяготеющей среды [9, 11].

Первый способ, по существу, определяет, есть ли еще дополнительная масса до расстояния r помимо учтенных масс Солнца, планет и астероидов. Если предполагать, что в Солнечной системе имеется протяженная сферически-симметричная тяготеющая среда, то при нахождении по наблюдательным данным отдельно для каждой планеты поправки к центральной притягивающей массе (или поправки к гелиоцентрической гравитационной постоянной GM_{Sun}), мы бы получили увеличивающееся значение ее в соответствии с величиной дополнительной массы внутри сферы со средним радиусом орбиты планеты.

Второй способ связан с тем, что при появлении дополнительной тяготеющей среды траектория в отличие от чисто ньютоновского случая задачи двух тел становится не замкнутой, и положения перицентров и апоцентров будут смещаться от оборота к обороту. Если для единичной массы обозначить через $U(r)$, E и J значения гравитационного потенциала, интегралов энергии и площадей, то уравнения движения по радиусу r и по азимутальной координате θ запишутся [2] соответственно

$$dr/dt = \{ 2[E+U(r)] - (J/r)^2 \}^{1/2}, \quad (2)$$

$$d\theta/dr = J/r^2 / \{ 2[E+U(r)] - (J/r)^2 \}^{1/2}. \quad (3)$$

В ньютоновской задаче двух тел колебательные периоды по радиусу r (от перицентра к апоцентру и обратно) и азимуту θ вокруг центра совпадают, и положения перицентров и апоцентров от оборота к обороту не смещаются. Наличие дополнительной гравитирующей среды приводит к более короткому радиальному периоду и к отрицательному дрейфу положений перицентра и апоцентра (в противоположную движению планеты сторону). Смещение перигелия при однородно распределенной материи ($\rho_{dm} = const$) зависит от полуоси a и от эксцентриситета e орбиты [11]:

$$\Delta\theta_0 = -4\pi^2 \rho_{dm} \cdot a^3 (1-e^2)^{1/2} / M_{Sun}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta_0$ – смещение перигелия за одно полное радиальное колебание.

3. Полученные результаты

В работе для проверки наличия дополнительной тяготеющей среды были применены оба подхода. Чаще оценки плотности и массы темной материи приводятся в предположении, что она меняется очень медленно или постоянна внутри Солнечной системы, то есть в предположении однородного распределения темной материи. В ряде работ [10, 14, 17] предполагается концентрация темного вещества к центру и даже захват и прямое падение его на Солнце. Последние предположения следует делать с осторожностью. В работе [4] было найдено, что гелиоцентрическая гравитационная постоянная GM_{Sun} убывает, и поэтому имеется сильное ограничение на количество возможного падающего темного вещества на Солнце. Также серьезное ограничение на возможное наличие темного вещества внутри Солнца (не более 2-5% от массы Солнца) получено в работе [1], в которой тщательно анализируются физические характеристики Солнца.

Для нахождения поправки ΔM_0 к притягивающей центральной массе в зависимости от расстояния последовательно проводилась обработка наблюдений каждой планеты, и искалась поправка к значению GM_{Sun} . Поскольку ожидаемая плотность темной материи мала, то желательно использовать данные более удаленных планет, имеющих высокоточные наблюдения, чтобы включить в рассмотрение больший объем влияющей темной материи. Если при оценке изменения центральной притягивающей массы ΔM_0

важен интегральный эффект всей дополнительной массы в объеме до орбиты планеты, то для дополнительного изменения положения перигелия $\Delta\pi$ важен локальный эффект отличия гравитационного притяжения в окрестности планетной орбиты из-за наличия дополнительной гравитирующей среды. Исследование дополнительного смещения перигелия планет проводилось с учетом всех других известных эффектов, влияющих на смещение перигелия. Если действительно есть еще дополнительная протяженная масса, то должен происходить отрицательный дрейф перигелия и афелия от оборота к обороту в соответствии с формулой (4). Поскольку нарастание смещения положения перигелия накапливается, то этот критерий может быть достаточно чувствительным для проверки присутствия дополнительной материи.

В табл. 1 и 2 приведены поправки к смещениям перигелиев и к центральной массе, найденные из обработки наблюдений планет и космических аппаратов. Для контроля полученных значений и их погрешностей, проверки их устойчивости и уменьшения влияния возможных корреляций были рассмотрены различные варианты с разным числом одновременно определяемых параметров. Это дает возможность получить более достоверные величины погрешностей (σ_i), которые лучше соответствуют действительной точности найденных результатов, и поэтому в табл. 1, 2 приведенные погрешности превышают формальные, как правило, в несколько раз.

Таблица 1. Дополнительные смещения перигелиев из наблюдений планет и космических аппаратов, mas = 0".001.

Планеты	$\Delta\pi$ mas/yr	$ \sigma_{\Delta\pi} / \Delta\pi $
Меркурий	-0.020 ± 0.030	1.5
Венера	0.026 ± 0.016	0.62
Земля	0.0019 ± 0.0019	1.0
Марс	-0.00020 ± 0.00037	1.9
Юпитер	0.587 ± 0.283	0.48
Сатурн	-0.0032 ± 0.0047	1.5

Таблица 2. Поправки к центральной притягивающей массе.

Планеты	$\Delta M_{Sun} [\cdot 10^{10} M_{Sun}]$	$ \sigma_{\Delta M_{Sun}} / \Delta M_{Sun} $
Меркурий	-0.5 ± 117.7	235.4
Венера	-0.67 ± 5.86	8.7
Марс	0.20 ± 2.65	13.3
Юпитер	0.4 ± 1671.4	4178.5
Сатурн	-0.27 ± 15.16	56.1

Найденные значения в обеих табл. 1 и табл. 2, как правило, перекрываются их погрешностями (σ), указывая, что уровень плотности темной материи ρ_{dm} , если она имеется, мал и существенно ниже достигнутой современной точности определения таких параметров. Получившиеся разные знаки для самих значений $\Delta\pi$ и ΔM_{Sun} у разных планет также указывают на малость искомых эффектов.

Относительная погрешность определения поправки к центральной массе (3-я колонка табл. 2) оказалась существенно больше аналогичной величины для дополнительного смещения перигелиев (3-я колонка табл. 1), и в разы или даже на порядки превышает сами значения поправок к центральной массе. Следует иметь ввиду, что на интегральную оценку массы темной материи в сферически симметричном объеме относительно Солнца большую роль играет точность учета и знания всех масс тел, попадающих в этот объем. Основную роль в неопределенности играют неполнота и неточность

знания масс астероидов. Более точные результаты получены для оценок смещений перигелиев (табл. 1), которые позволяют дать оценку локальной плотности темной материи на среднем орбитальном расстоянии планеты. Здесь погрешность сравнима со значениями самих величин, и поэтому для ограничивающих оценок были использованы данные из табл. 1.

Хотя для части планет имеется отрицательное вековое смещение перигелия, но для всех планет погрешность сравнима или заметно превышает абсолютные величины полученных смещений перигелиев (табл. 1). Поэтому следует ориентироваться на значения самих погрешностей, которые можно рассматривать как ограничение сверху для значений возможного дополнительного векового движения перигелиев и, таким образом, используя выражение (4), дать оценку сверху для плотности распределенной материи. Полученные оценки ρ_{dm} приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценки плотности из данных для $\sigma_{\Delta\pi}$.

Планеты	$\sigma_{\Delta\pi}$ ["/yr]	ρ_{dm} [г/см ³]
Меркурий	0.000030	$< 9.3 \cdot 10^{-18}$
Венера	0.000016	$< 1.9 \cdot 10^{-18}$
Земля	0.00000190	$< 1.4 \cdot 10^{-19}$
Марс	0.00000037	$< 1.40 \cdot 10^{-20}$
Юпитер	0.000283	$< 1.7 \cdot 10^{-18}$
Сатурн	0.0000047	$< 1.1 \cdot 10^{-20}$

4. Оценки массы темной материи

Самые сильные ограничения на плотность дают оценки по данным для Земли, Марса и Сатурна (табл. 3). У Сатурна в связи с прибытием к нему аппарата Cassini появился высокоточный ряд наблюдений с 2004 г. Для Марса имеется большой и длительный по времени массив наблюдений, связанных с космическими аппаратами на его поверхности и около него. Поскольку наблюдения выполняются с Земли, то уточнение орбиты Земли опирается на все наблюдения и включает большой массив измерений разной точности.

Чаще для оценок принимают однородное распределение невидимой среды, и тогда плотность ее определяется по планетам с наиболее точно оцениваемыми смещениями перигелия и наиболее удаленных от Солнца. При предположении об однородном распределении ρ_{dm} в Солнечной системе наиболее сильная ограничивающая оценка получается из данных для Сатурна: $\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20}$ г/см³. Тогда внутри сферического объема с размерами орбиты Сатурна масса

$$M_{dm} < 7.1 \cdot 10^{-11} M_{Sun}. \quad (5)$$

Эта оценка темной массы меньше погрешности определения полной массы главного астероидного пояса, которая составляет в настоящее время $2.1 \cdot 10^{-10} M_{Sun}$ (3σ) [3].

Можно также рассмотреть вариант, когда непрерывная тяготеющая среда имеет концентрацию к центру Солнечной системы. Исследования при предположении наличия хода плотности к центру уже делались, например, в работе [8]. В качестве модели распределения ρ_{dm} нами было взято выражение с экспоненциальной зависимостью от расстояния r :

$$\rho_{dm} = \rho_0 \cdot e^{-sr}, \quad (6)$$

где ρ_0 – центральная плотность, s – положительный параметр, характеризующий экспоненциальное падение плотности к периферии. Значение $s=0$ соответствует случаю однородной плотности. Выражение (6) везде конечно и не имеет особенностей в центре и на периферии. Гравитационный потенциал, создаваемый сферически распределенной материей с плотностью (6), равен

$$U(r) = (4\pi G \rho_0 / r) \cdot [2 - e^{-sr}(sr+2)]/s^3. \quad (7)$$

Масса внутри сферы радиуса r для среды с плотностью (6) равна

$$M_{dm} = 4\pi \rho_0 \cdot [2/s^3 - e^{-sr}(r^2/s + 2r/s^2 + 2/s^3)]. \quad (8)$$

Выражение (8) не имеет особенностей при $s \rightarrow 0$ и переходит в выражение для однородного шара.

Значения в табл. 3 можно рассматривать как ограничивающие оценки плотности ρ_{dm} на различных расстояниях. На сравнительно малом интервале изменения радиальных расстояний, вызванного эксцентricностью орбиты планеты, плотность темной материи можно приближенно считать постоянной. Поэтому с достаточной точностью можно использовать формулу (4) и рассматривать результаты в табл. 3 как локальную оценку ρ_{dm} сверху в окрестности орбиты планеты. Учет массы темной материи M_{dm} между Солнцем и орбитой планеты практически не влияет на результат и дает поправки в общую притягивающую центральную массу в десятом-одиннадцатом знаке, которая определяется массой Солнца.

Оценка массы темной материи до орбиты Сатурна с использованием хода плотности ρ_{dm} (6) найдена из оценивания масс на двух последовательных интервалах: от Сатурна до Марса и от Марса до Солнца. Для этого были использованы наиболее надежные данные в табл. 3 для Сатурна ($\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3$), Марса ($\rho_{dm} < 1.4 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3$) и Земли ($\rho_{dm} < 1.4 \cdot 10^{-19} \text{ г/см}^3$).

Между Марсом и Сатурном по данным для Марса и Сатурна получился очень пологий ход плотности (6) с $\rho_0 = 1.47 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3$ и $s = 0.0299 \text{ ае}^{-1}$ и массой в объеме между орбитами Марса и Сатурна $M_{dm} < 7.33 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$. На интервале Марс – Солнце полученный ход плотности (6) по данным для Земли и Марса дает крутой подъем к Солнцу с параметрами $\rho_0 = 1.17 \cdot 10^{-17} \text{ г/см}^3$ и $s = 4.42 \text{ ае}^{-1}$. Масса (8) между Солнцем и орбитой Марса оказалась $M_{dm} < 0.55 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$.

Включая оба интервала, верхняя граница для общей массы темной материи до орбиты Сатурна с учетом ее возможной концентрации к центру получилась $M_{dm} < 7.88 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$, то есть тоже меньше погрешности определения полной массы астероидного пояса.

5. Заключение

Тестирование на наличие темной материи в Солнечной системе было проведено на основе планетных эфемерид ЕРМ2011. Полученные результаты показывают, что масса и уровень плотности темной материи, если она имеется, существенно ниже современной погрешности определения таких параметров. Найдено, что на расстоянии орбиты Сатурна плотность должна быть ниже, чем $\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3$, а масса темной материи в сфере внутри орбиты Сатурна даже с учетом ее возможной концентрации к центру должна быть меньше чем $M_{dm} < 7.9 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$.

Литература

1. Кардашев Н.С., Тутуков А.В., Федорова А.В. Ограничение на массу «скрытого» вещества в Солнце, следующее из модели современного Солнца и его предшествующей эволюции. *Астрономический журнал*, 2005, т. 82, № 2, 157-167.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т. I. Механика (М.: Физматлит, 2004), 224 с.
3. Питьева Е.В. Высокоточные планетные эфемериды ИПА РАН «ЕРМ» (их модель, точность, параметры) – основа для астронавигации и научных исследований. См. наст. сборник.
4. Питьева Е.В., Питьев Н.П. Оценки изменений массы Солнца и гравитационной постоянной по современным наблюдениям планет и космических аппаратов. *Астрономический вестник*, 2012, т. 46, № 1, 81-90.

5. *Anderson J.D., Lau E.L., Taylor A.H., Dicus D.A. et al.* Bounds on dark matter in solar orbit. *Astrophysical Journal*, 1989, Part 1, V. 342, 539-544.
6. *Anderson J.D., Lau E.L., Krisher T.P., Dicus, D.A. et al.* Improved Bounds on Nonluminous Matter in Solar Orbit. *Astrophysical Journal*, 1995, V. 448, 885-892.
7. *Bertone G., Hooper D., Silk J.* Particle dark matter: evidence, candidates and constraints. *Physics Reports*, 2005, 405 (5–6): 279-390.
8. *Frère J.-M., Ling F.-S., Vertongen G.* Bound on the Dark Matter Density in the Solar System from Planetary Motions. *Phys. Rev.*, 2008, D77, 083005.
9. *Gron O., Soleng H.H.* Experimental Limits on the Density of Dark Matter in the Solar System. *Astrophys. J.*, 1996, V. 456, 445-448.
10. *Iorio L.* Effect of sun and planet-bound dark matter on planet and satellite dynamics in the solar system. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2010, Issue 05, 018.
11. *Khriplovich I.B., Pitjeva E.V.* Upper limits on density of dark matter in Solar system. *Int. J. Mod. Phys. D*, 2006, 15(4), 615-618.
12. *Khriplovich I.B.* Density of dark matter in Solar system and perihelion precession of planets *Int. J. Mod. Phys.*, 2007, D16, 1475-1478.
13. *Kowalski M., Rubin D., Aldering G., et al.*, Improved cosmological constraints from new, old, and combined supernova data sets. *ApJ*, 2008, V. 686, 749-778.
14. *Lundberg J., Edsjo J.*, Weakly interacting massive particle diffusion in the solar system including solar depletion and its effect on Earth capture rates. *Phys. Rev.D*, 2004, 69, 123505.
15. *Nordtvedt K.L.* Cosmic acceleration of Earth and the Moon by dark matter. *Astrophysical Journal*, 1994, Part 1, V. 437, No. 1, 529-531.
16. *Nordtvedt K.L., Mueller J., Soffel M.* Cosmic acceleration of the Earth and Moon by dark matter. *Astron. Astrophys.*, 1995, 293L, L73-L74.
17. *Peter A.* Dark matter in the Solar System. I. The distribution function of WIMPs at the Earth from solar capture. *PhRvD*, 2009, V. 79(10), 103531
18. *Sereno M., Jetzer Ph.* Dark matter versus modifications of the gravitational inverse-square law. Results from planetary motion in the solar system. *MNRAS*, 2006, V. 371, 626-632.

LIMITING ESTIMATES FOR DARK MATTER IN THE SOLAR SYSTEM

Pitjev N.P., Pitjeva E.V.

*Petersburg State University, St.Petersburg, Russia
Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia*

It is proposed in the modern cosmological theories that the bulk of the average density of the universe falls on dark energy and dark matter. Despite the assumed lack of or very weak interaction of dark matter with ordinary matter, dark matter must have gravitational properties. The estimates of possible additional gravitational influence of dark matter on the motion of objects in the solar system were obtained on the basis of the new version of the planetary ephemerides PM2011 and processing about 678,000 positional observations of planets and spacecraft. It has been found that the density level of dark matter ρ_{dm} , if this were so, is much lower than the current achieved uncertainty of these estimated parameters. At the distance of Saturn's orbit the density ρ_{dm} should be lower than $1.1 \cdot 10^{-20}$ g/cm³, and the mass of the dark matter in the area inside the orbit of Saturn should be less than $7.9 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$, even taking into account its possible concentration to the center.

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ ЭФЕМЕРИДЫ ИПА РАН «ЕРМ» (ИХ МОДЕЛЬ, ТОЧНОСТЬ, ПАРАМЕТРЫ) — ОСНОВА ДЛЯ АСТРОНАВИГАЦИИ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Питьева Е.В.

Институт Прикладной Астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Эфемериды EPM2011 включают обновленную динамическую модель, новые значения параметров и расширенную базу данных 1913-2011 гг., содержащую около 68000 позиционных данных разных типов. Динамическая модель включает взаимные возмущения больших планет, Солнца, Луны, 301 большого астероида и 21 крупнейших транснептуновых объектов, а также возмущения от остальных астероидов главного пояса и других ТНО, находящихся на среднем расстоянии 43 ае. EPM эфемериды построены численным интегрированием уравнений движения небесных тел в пост-ньютоновской аппроксимации N-тел метрики в барицентрической системе координат для TDB шкалы времен на 400-летнем интервале 1800-2200 гг. Эфемериды EPM используются для астронавигации и для разнообразных исследований. Эфемериды EPM вместе с соответствующими разностями TT-TDB доступны через FTP: <ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM/>.

1. Введение

До 60-х годов прошлого века классические аналитические теории движения планет Леверье, Хилла, Ньюкома, Клеменса постоянно развивались и улучшались в соответствии с развитием астрономической практики. Космические эксперименты, проводимые в дальнем космосе, а также введение в практику новых наблюдательных методов (локация планет и Луны, траекторные измерения и т.д.) потребовали создания планетных эфемерид гораздо более точных, чем классические эфемериды. С другой стороны, именно эти современные наблюдения обеспечили возможность создания эфемерид следующего поколения. Задача построения высокоточных эфемерид в настоящее время решается численным интегрированием уравнений движения планет и Луны.

Для обеспечения космических полетов в конце 1960-х численные теории начали создаваться несколькими группами в США и России. Наибольшее распространение получили эфемериды DE (Development Ephemeris), построенные в Лаборатории Реактивного Движения (JPL). В России высокоточные численные эфемериды планет были созданы в результате исследований, проводившихся в Институте прикладной математики, в Центре управления полетами и ЦНИИмаш и в Институте теоретической астрономии. На основе всех этих работ в России была создана единая релятивистская теория движения планет, которая была использована для космической программы СССР в дальнем космосе. Эта работа продолжалась в Институте прикладной астрономии РАН, где построена серия эфемерид EPM (Ephemerides of Planets and the Moon).

Эфемериды DE и EPM постоянно развиваются, с 2006 г. к ним присоединилась и численная французская (IMCCE) теория INPOP. Эти эфемериды являются наиболее завершенными к настоящему времени и имеют одинаковую точность.

2. Динамическая модель движения планет эфемерид EPM

Построение высокоточных эфемерид планет, соответствующих метровой точности современных наблюдений и необходимых для обеспечения космических экспериментов, требует создания адекватной математической и динамической модели движения планет на основе общей теории относительности (ОТО) с учетом всех значимых возмущающих факторов.

Движение барицентра системы Земля–Луна заметно возмущается самой Луной. Современные численные теории строятся совместным численным интегрированием уравнений движения всех планет, Луны и физической лунной либрации. Построение и уточнение по лунным лазерным наблюдениям (LLR) теории орбитального движения и вращения Луны выполнялась в ИПА под руководством Г.А. Красинского.

Солнечное сжатие вызывает вековые изменения элементов планет, за исключением больших полуосей и эксцентриситетов, и должно быть учтено в модели движения планет. В последнее время динамическое сжатия Солнца определяется в процессе обработки высокоточных радарных наблюдений при построении планетных эфемерид.

Серьезная проблема в построении современных высокоточных эфемерид планет возникает в связи с необходимостью учета возмущений, вызываемых астероидами. В настоящее время в эфемеридах принимаются во внимание возмущения около 300 крупнейших астероидов. Прямые динамические оценки масс астероидов могут быть получены по их возмущениям других небесных тел. Этим методом были определены значения масс нескольких десятков астероидов, массы остальных вычислялись по известным диаметрам и оцениваемым из наблюдений плотностям трех таксономических типов (C, S, M), на которые были разделены эти астероиды согласно их спектральным классам.

Кроме достаточно крупных астероидов тысячи небольших астероидов оказывают существенное суммарное влияние на орбиты внутренних планет. Их возмущения моделировались вычислением дополнительных возмущений от массивного кольца в плоскости эклиптики с однородным распределением массы и с двумя оцениваемыми параметрами: масса (M_r) и радиус (R_r).

Обнаруженные в последнее время сотни транснептуновых объектов (ТНО) также влияют на движение планет, особенно внешних. Обновленная динамическая модель эфемерид EPM включает Эрис (планету — карлик, обнаруженную в 2003 г. и превосходящую Плутон по массе) и другие 20 крупнейших ТНО в совместное интегрирование. Возмущения остальных ТНО моделировались однородным кольцом ТНО, расположенным в плоскости эклиптики с радиусом, равным 43 ае, и оцениваемой массой.

Таким образом, динамическая модель планетной части эфемерид EPM2011 учитывает помимо взаимных возмущений больших планет и Луны ряд других эффектов, вносящих заметный вклад при обработке современных высокоточных наблюдений:

- возмущения от 301 наиболее значительных малых планет;
- возмущения от остальных малых планет главного пояса астероидов, моделируемого однородным кольцом;
- возмущение от 21 наиболее массивного ТНО;
- возмущения от остальных ТНО, моделируемых однородным кольцом со средним радиусом 43 ае (астрономических единиц);
- возмущения от сжатия Солнца;
- релятивистские возмущения от Солнца, Луны, планет и пяти крупнейших астероидов.

Все современные высокоточные эфемериды основаны на релятивистских уравнениях движения небесных тел, радио и световых лучей и релятивистских шкалах времени. Основным общим свойством эфемерид серий DE, EPM и INPOP является совместное численное интегрирование уравнений движения 9 больших планет, Солнца, Луны и лунной физической либрации, выполненное в постньютоновском приближении для ОТО ($\beta = \gamma = 1$). Различные версии эфемерид отличаются: моделированием лунной либрации; системами отсчета, в которых строятся эфемериды; принятым значением сжатия Солнца и других постоянных; моделированием возмущений астероидов; различными наборами наблюдений и оцениваемых параметров. Основное отличие последних версий EPM эфемерид (начиная с EPM2008) от эфемерид DE и INPOP — учет воз-

мущений ТНО, присутствующих в Солнечной системе. Включение в совместное интегрирование любых дополнительных объектов вызывает смещение барицентра Солнечной системы. Поэтому для сравнения эфемерид ЕРМ с DE и INPOP необходимо брать относительные координаты объектов (гелиоцентрические, геоцентрические и т.д.), но не барицентрические. Так как любые наблюдения — относительные (обычно выполняются с Земли), то на представлении наблюдений смещение барицентра не влияет.

Интегрирование в барицентрической системе координат на эпоху J2000.0 выполнялось методом Эверхарта на интервале 400 лет (1800–2200 гг.) лунно-планетным интегратором программного пакета ЭРА-7 (Красинский и Васильев).

3. Наблюдательные данные

Наблюдения, использованные для уточнения эфемерид ЕРМ2011, включали 677670 позиционных измерений разного типа 1913–2011 гг. от классических меридианных до современных радиотехнических наблюдений планет и КА (1 mas = 0."001). Радиотехническими наблюдениями обеспечены, в основном, планеты земной группы. Для внешних планет, по-прежнему, необходимы оптические наблюдения. Использованы также позиционные наблюдения спутников внешних планет, которые точнее наблюдений самих планет и свободны от эффектов фазы.

Астрометрические наблюдения планет и КА

Оптические наблюдения внешних планет и их спутников 1913–2011, 57560

USNO Pulkovo Nikolaev Tokyo Bordeaux LaPalma Flagstaff TMO	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
}	прохождения	1913–1994	1" → 0"5
	ф-э прохождения	1963–1998	0"8 → 0"25
	фотографические	1913–1998	1" → 0"2
	ПЗС	1995–2011	0"2 → 0"05

Радарные наблюдения Меркурия, Венеры, Марса, 58112

Millstone Haystack Arecibo Goldstone Crimea	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
}	ranging	1961–1997	100 км → 150 м

Радиотехнические данные КА, 1971–2010, 561998

Mariner – 9 Pioneer10, 11 Voyager Phobos Ulysses Magellan Galileo Viking – 1, 2 Pathfinder MGS Odyssey MRO Cassini VEX Messenger MEX	Венера Юпитер Юпитер Марс Юпитер Венера Юпитер Марс Марс Марс Марс Марс Сатурн Венера Мерк. Марс	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
}		ranging	1971–2010	6 км → 1 м
		dif.range	1976–1997	1.3 → 0.1 мм/с
		rad.velos.	1992–1994	0.1 → 0.002 мм/с
		flybys	1973–2009	400 mas → 0.4 mas
		ΔVLBI	1990–2010	12 mas → 0.2 mas

Обработка наблюдений была проведена с учетом всех необходимых редуций [4]. Для перехода от времени наблюдений (UTC) к барицентрическому динамическому времени (TDB) эфемерид были найдены разности между земным временем TT и TDB численным интегрированием, используя соответствующие эфемериды и формулы С. А. Клионера

4. Параметры ЕРМ2011, ориентация и точность эфемерид ЕРМ

В процессе улучшения планетной части эфемерид ЕРМ2011 определялось около 270 параметров. Кроме уточнения элементов орбит планет и 18 спутников внешних планет, определялись также параметры топографии и вращения Марса, координаты

трех ПА на Марсе, массы 21 астероида и общие массы астероидов главного пояса и ТНО, квадрупольный момент Солнца (J_2) и параметры солнечной короны, величина астрономической единицы (ае) или гелиоцентрической гравитационной постоянной (GM_{\odot}), три угла ориентации эфемерид относительно ICRF и другие параметры.

В настоящее время ориентация планетных эфемерид относительно международной системы отсчета ICRF осуществляется по РСДВ наблюдениям КА около планет на фоне квазаров, координаты которых даны в системе ICRF. Точность таких наблюдений улучшилась до десятых долей mas для Марса и Сатурна в 2001–2010 гг., что позволило значительно уточнить ориентацию эфемерид EPM2011. Остаточные невязки РСДВ наблюдений разных КА около Марса и Cassini около Сатурна показаны на рис. 1. Углы поворота между эфемеридами EPM и системой ICRF и их ошибки (в mas) получены по 213 РСДВ наблюдениям (1989-2010 гг.):

$$\varepsilon_x = -0.000 \pm 0.042, \quad \varepsilon_y = -0.025 \pm 0.048, \quad \varepsilon_z = 0.004 \pm 0.028.$$

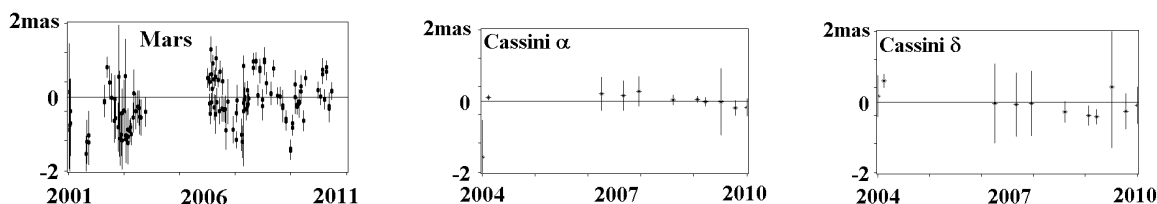


Рис. 1. Остаточные невязки РСДВ данных разных КА около планет.

Уточнение ориентации EPM эфемерид дало возможность достигнуть точности гелиоцентрических координат Земли (X, Y, Z) на столетнем интервале 1950–2050 гг. не хуже 250 м, что важно для изучения пульсаров и экзопланет.

О точности построенных эфемерид можно судить, во-первых, из представления наблюдений, т.е. из сравнения вычисленных значений наблюдений (C) со значениями самих наблюдений (O). Остаточные невязки времен запаздывания КА Odyssey, MRO, MEX, VEX показаны на рис. 2. Среднеквадратичные ошибки представления наблюдений времен запаздывания (WRMS) составляют для КА Odyssey – 1.1 м, MRO – 2.5 м, MEX – 2.0 м, VEX – 2.9 м. Средние значения и среднеквадратичные ошибки представления наблюдений даны в работе [4], и они не превосходят априорных ошибок этих наблюдений. Во-вторых, о точности эфемерид можно судить из сравнения с другими эфемеридами, построенными независимыми исследователями. Сравнение эфемерид EPM2011 и DE424, выполненное на столетнем интервале [4] для геоцентрических расстояний, прямых восхождений и склонений показывает их хорошее согласие, точность планетной части эфемерид EPM2011 не ниже точности других современных эфемерид.

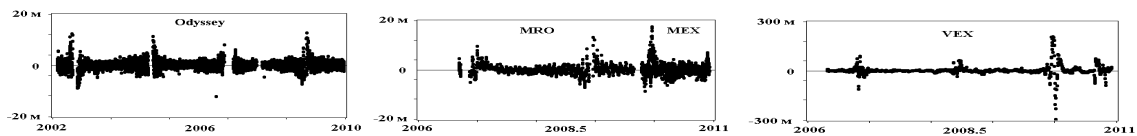


Рис. 2. Остаточные невязки времен запаздывания КА Odyssey, MRO, MEX, VEX в метрах.

Приведем значения некоторых полученных параметров. Массы трех крупнейших астероидов: $M_{Ceres}/M_{\odot} = 4.722(8) \cdot 10^{-10}$, $M_{Pallas}/M_{\odot} = 1.047(9) \cdot 10^{-10}$, $M_{Vesta}/M_{\odot} = 1.297(5) \cdot 10^{-10}$; отношение масс Земли и Луны: $M_{Earth}/M_{Moon} = 81.30056763 \pm 0.00000005$; величина Астрономической Единицы в метрах: $ae = (149597870695.93 \pm 0.12)$ м.

Параметры, характеризующие астероидное кольцо малых астероидов, его масса и радиус: $M_r = (1.06 \pm 1.12) \cdot 10^{-10} M_{\odot}$, $R_r = (3.57 \pm 0.26)$ ае. Общая масса астероидов главного пояса, представленная суммой масс 301 крупнейших астероидов и астероидного кольца: $M_{belt} = (12.3 \pm 2.1) \cdot 10^{-10} M_{\odot}$. Масса кольца ТНО, найденная из обработки наблюдений:

$M_{\text{TNOring}} = (501 \pm 249) \cdot 10^{-10} M_{\odot}$, общая масса всех ТНО, включающая массу Плутона, 21 крупнейший ТНО и кольцо ТНО, равна: $M_{\text{TNO}} = 790 \cdot 10^{-10} M_{\odot}$.

5. Использование ЕРМ эфемерид для астронавигации и научных исследований

Эфемериды больших планет, Солнца и Луны обеспечивают многообразные практические применения. В частности, они являются одним из важных элементов навигационных систем наземного, морского или космического базирования. Институт прикладной астрономии РАН с 2006 г. при выпуске Астрономического Ежегодника, а также навигационных эфемерид Морского Астрономического Ежегодника и Морского Астрономического Альманаха использует собственные эфемериды ЕРМ. Кроме того, планируется использование этих эфемерид в программах ГЛОНАСС и ЛУНА-РЕСУРС.

Эфемериды ЕРМ являются основой для проведения разнообразных научных исследований.

В течение 6 лет (1976-1982 гг.) в Калифорнии, Мадриде и Канберре наблюдался ПА Viking-1,2, и течение 3-х месяцев 1997 г. были выполнены наблюдения ПА Pathfinder. При построении эфемерид ЕРМ эти уникальные наблюдения позволили определить координаты трех посадочных аппаратов и с высокой точностью уточнить все параметры вращения Марса (прецессия, нутация и сезонные члены вращения, обусловленные таянием и конденсацией углекислоты в полярных шапках), а также полярный момент инерции, соответствующий скорости прецессии Марса [2], что важно для изучения и понимания геофизики Марса.

Астероиды и ТНО существенно влияют движение планет, поэтому по радиотехническим наблюдениям были уточнены массы 21 астероида, а также суммарные характеристики — общая масса главного пояса астероидов и общая масса ТНО [5]. Знание таких характеристик важно для более точного описания сил, действующих в Солнечной системе, и для понимания общей динамики Солнечной системы, а также процессов, связанных с ее формированием.

Прохождение фотонов и движение планет в гравитационном поле Солнца позволяют рассматривать Солнечную систему как лабораторию для тестирования теорий гравитации. Современные радарные наблюдения планет и КА обеспечивают возможность проверки релятивистских эффектов, оценки значений гелиоцентрической гравитационной постоянной GM_{\odot} (массы Солнца) и ее возможного изменения, а также оценки сжатия Солнца. Результаты определения дополнительного движения перигелиев планет, ППН параметров (β , γ), квадрупольного момента Солнца и изменения GM_{\odot} , полученных в более ранних работах [6], а также для последней версии ЕРМ2011: $\beta-1 = -0.00002 \pm 0.00003$, $\gamma-1 = +0.00004 \pm 0.00006$, $J_2 = (2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-7}$ показывают уменьшение неопределенности при определении этих параметров на порядок и больше. С уменьшением неопределенностей происходит сужение интервалов возможных значений релятивистских параметров, накладывая все более существенные ограничения для альтернативных ОТО теорий гравитации.

Впервые из обработки позиционных наблюдений разных типов, в основном радиотехнических, планет и космических аппаратов было получено значение изменения гелиоцентрической гравитационной постоянной: $\dot{GM}_{\odot}/GM_{\odot} = (-5.0 \pm 4.1) \cdot 10^{-14}$ в год (3σ). Из полученного изменения GM_{\odot} и с учетом максимальных пределов возможного изменения массы Солнца M_{\odot} найдены более жесткие ограничения на изменение гравитационной постоянной: с вероятностью 95% годовое значение попадает в интервал $-4.2 \cdot 10^{-14} < \dot{G}/G < +7.5 \cdot 10^{-14}$. Найденное изменение GM_{\odot} видимо, связано именно с изменением массы M_{\odot} , а не с изменением G , и отражает баланс между теряемой через излучение и солнечный ветер массой и падающим на Солнце материалом [3].

Кроме того, поиск и оценка возможного гравитационного влияния темной материи в Солнечной системе на движение планет были выполнены на основе планетной

теории EPM2011 по дополнительному движению перигелиев планет. Найдено, что уровень плотности ρ_{dm} темной материи, если она имеется, существенно ниже достигнутой современной точности определения таких параметров. На расстоянии орбиты Сатурна плотность ρ_{dm} должна быть ниже, чем $1.1 \cdot 10^{-20}$ г/см³, а масса темной материи в сфере внутри орбиты Сатурна, даже с учетом ее возможной концентрации к центру, должна быть меньше чем $7.9 \cdot 10^{-11} M_{Sun}$ [1].

6. Заключение

В ИПА РАН создана серия высокоточных эфемерид планет и Луны EPM, адекватная современным наблюдениям и по точности соответствующая известных эфемерид DE/LE (JPL). Использование более корректной динамической модели движения планет и большого количества дополнительных высокоточных наблюдений позволяет считать эфемериды последних версий эфемерид EPM2004–EPM2011 более точными, чем DE405, которые считаются международным стандартом. Построенные EPM эфемериды используются для решения фундаментальной и прикладных задач, лежат в основе национального Астрономического Ежегодника и необходимы для выполнения федеральной целевой программы ГЛОНАСС и космических экспериментов в Солнечной системе.

Литература

1. *Путьев Н.П., Путьева Е.В.* Ограничивающие оценки для темной материи в солнечной системе. См. наст. сборник.
2. *Путьева Е.В.* Изучение динамики Марса из анализа наблюдений посадочных аппаратов Viking и Pathfinder. Труды ИПА РАН, 1999, N 4, 22-35.
3. *Путьева Е.В. Путьев Н.П.* Оценки изменений массы Солнца и гравитационной постоянной по современным наблюдениям планет и космических аппаратов. Астрон. вестник, 2012, 46, N 1, 81-90.
4. *Путьева Е.В.* EPM2011— обновленные планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований. Астрон. вестник, 2013, в печати.
5. *Pitjeva E.V.* Influence of asteroids and trans-neptunian objects on motion of major planets and masses of the asteroid main belt and TNO ring. Proc. International conference “Asteroid-comet hazard-2009” (eds. Finkelstein A., Huebner W., Shor V.), St. Petersburg: Nauka, 2010a, 237-241.
6. *Pitjeva E.V.* EPM ephemerides and relativity. IAU Symp. 165 (eds. Klioner S. A., Seidelmann P.K., Soffel M.), Cambridge: University Press, 2010b, 170-178.

HIGH-PRECISION PLANETARY EPHEMERIDES «EPM» OF IAA RAS (THEIR MODEL, ACCURACY, PARAMETERS) IS BASIS FOR ASTRONAVIGATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Pitjeva E.V.

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

The last version of EPM ephemerides, EPM2011, includes the updated dynamical model, the new values of parameters and the expanded database 1913-2011 containing about 680000 position observations of different types. The dynamical model of EPM2011 includes mutual perturbations from the major planets, the Sun, the Moon, the 301 most massive asteroids, and the 21 largest trans-neptunian objects (TNO), perturbations from the other asteroids of the main belt and other TNO at the 43 au distance. The numerical integration of the equations of motion of the celestial bodies has been performed in the Parameterized Post-Newtonian N-body metric in the barycentric coordinate system for General Relativity in the TDB time scale over a 400-year interval (1800–2200). The EPM ephemerides are used for astronavigation: they are the basis for calculating data published in Astronomical Yearbook of IAA RAS, and they are necessary for space experiments in deep space and near the Earth and for various investigations. The EPM ephemerides with corresponding differences of TT-TDB are available via FTP ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM/.

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ТЕОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ В СИСТЕМЕ ЭРА

Порошина А.Л., Космодамианский Г.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены численные теории движения основных спутников Юпитера (*Io, Europa, Ganymede, Callisto*), Сатурна (*Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus, Phoebe*), Урана (*Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda*) и Нептуна (*Triton, Nereid*) построенные на интервале 1960-2020 гг. в рамках программного пакета ЭРА (Эфемеридные Расчеты в Астрономии). Модели движения спутников учитывают несферичность центральной планеты (J_2, J_4 для Сатурна, Урана и Нептуна и J_2, J_4, J_6 для Юпитера), взаимные возмущения спутников и возмущения от Солнца и больших планет. В работе представлены остаточные невязки, среднеквадратические ошибки наблюдений и графики сравнения построенных теорий с результатами других авторов. Кроме того, в работе представлены оценки некоторых гравитационных параметров спутниковых систем.

1. Введение

Институт Прикладной Астрономии РАН давно и успешно занимается разработкой эфемерид многих объектов солнечной системы. В последнее время в институте началась работа по разработке эфемерид некоторых естественных спутников планет, с целью включения этих объектов в приложения к Астрономическому Ежегоднику, а так же с целью уточнения орбит планет и самих спутников. Эта работа ведется в рамках программного пакета ЭРА (Эфемеридные Расчеты в Астрономии) [1]. Система ЭРА позволяет использовать как уже готовые эфемериды планет DE, INPOP, EPM и аналитические теории движения спутников, так и самостоятельно строить численные теории небесных тел.

2. Численная модель

Рис. 1 представляет стандартную схему построения численных теорий движения спутников в системе ЭРА. В начале, необходимо построить динамическую модель движения спутника с учетом всех возмущений, собрать наблюдения спутников и выбрать начальные параметры системы. Затем проводится численное интегрирование методом Эверхарта 19-го порядка. В результате интегрирования получают коэффициенты разложения координат и скоростей в ряды по полиномам Чебышева. Значения параметров улучшаются методом наименьших квадратов (WLSM), затем полученные поправки прибавляются к начальным значениям, и процесс продолжается до тех пор, пока разница между двумя последовательными итерациями не станет пренебрежимо мала.

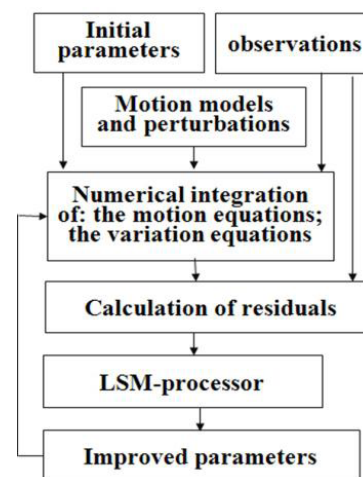


Рис. 1.

Модель движения спутников учитывает несферичность центральной планеты (J_2, J_4 для системы Сатурна, Урана и Нептуна, и J_6 для системы Юпитера), учитываются взаимные влияния спутников, возмущения от солнца и больших планет.

Расчеты проводились с использованием как отечественных эфемерид EPM2008 [2], так и DE405, однако для удобства сравнения с другими авторами приводятся результаты, полученные с использованием DE405.

Начальные координаты и скорости были получены из аналитической теории J.H. Lieske [3] для системы Юпитера, из полуаналитической теории TASS [4] для системы Сатурна и численных теорий JPL для систем Урана и Нептуна. Гравитационные параметры спутниковых систем, такие как гравитационные массы и зональные гармоники, были взяты с официальной интернет-страницы JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>).

А координаты северного полюса центральной планеты взяты в соответствии с последним отчетом рабочей группы по геодезии и картографии [5].

3. Наблюдения

Для уточнения параметров движения спутников в данной работе нами использовались, главным образом, CCD и фотографические наблюдения, которые проводились на обсерваториях, представленных в табл. 1, где указаны период и в скобках общее количество наблюдений по каждой системе спутников.

Таблица 1.

Обсерватория	Jupiter system	Saturn system	Uranus system	Neptune system
Flagstaff	1998-2011 (2212)	1998-2010 (3411)	1998-2010 (930)	1975-1986, 1998-2010 (1367)
Table Mountain Observatory	-	2002-2009 (559)	1999-2009 (282)	2001-2010 (200)
Itajuba, Brazil	1995 (364)	1982-1999 (8878)	1982-2004 (10548)	1989-2002 (1656)
La Palma, Karlsberg	1986-1997 (658)	1987-1997 (718)	-	-
Bordeaux	-	1966-2007 (1591)	-	-
Pulkovo	1974-2005 (1765)	1973-2008 (5938)	-	-
Majdanak	-	1990 (230)	1990 (51)	1990 (5)
Abastumany	-	-	1987-1994 (200)	1986-1993 (54)
Kiev	-	1980-1984 (996)	-	-
Nicolaev	1962-1998 (1311)	1973-1997 (632)	-	-
HST	1994-1997 (47)	-	-	-
Tokyo	-	1970-1972 (581)	-	-
Yunnan	-	1996-2006 (3067)	-	-
Bucharest	-	1995 (2536)	-	-
PHESAT95	-	1995-1996 (64)	-	-
Minor planet Center	-	-	-	2001-2011 (266)
Sheshan	-	-	-	1996-2006 (943)
Peking	-	-	-	2006-2007 (112)

Всего нами было использовано 53683 астрометрических наблюдения различного типа. Статистические данные по базе наблюдений спутников приведены в табл. 2, которая условно разделена на графы по различным типам наблюдений (абсолютные позиционные наблюдения, наблюдения спутника относительно планеты или спутника относительно спутника и взаимные явления – затмения и покрытия). В этой таблице для каждого спутника дан общий период используемых наблюдений и их общее количество, а также среднеквадратические ошибки наблюдений (rms), которые приводятся по прямому восхождению и склонению для каждого типа наблюдений соответственно. Выделенные значения, полученные для взаимных явлений спутников Сатурна [6], не участвовали в улучшении, т.е. эти значения получены после первой итерации используя текущие теории.

Следует отметить, что наблюдения, которые использовались для 9-го спутника Сатурна, Фебы, покрывают период с 1904 по 2011 год. Таким образом, теория для этого спутника была построена на интервале 1904-2020 гг, однако, она не учитывает влияния никаких спутников, кроме Титана. В ближайшее время планируется включить Фебу в интегрирование совместно со всеми остальными спутниками Сатурна.

Таблица 2.

Центральная планета	Спутник	Период наблюдений	Количество наблюдений	RMS различных типов наблюдений в угловых секундах							
				Абсолютные позиционные		Дифференциальные				Взаимные явления	
				$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)	Планета - спутник		Спутник - спутник		$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)
$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)	$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)	$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)	$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)	$\Delta\alpha\cos\delta$ (arcs)	$\Delta\delta$ (arcs)		
Jupiter	Io	1962-2009	1277	0.18	0.15	0.23	0.10	0.43	0.12	-	-
	Europa	1962-2009	1434	0.30	0.17	0.32	0.14	0.39	0.16	-	-
	Ganymede	1962-2009	1734	0.17	0.16	0.17	0.15	0.26	0.14	-	-
	Callisto	1962-2009	1912	0.13	0.14	0.12	0.17	0.22	0.15	-	-
Saturn	Mimas	1973-2010	1169	0.22	0.25	0.17	0.12	0.11	0.10	0.09	0.17
	Enceladus	1966-2010	2755	0.40	0.35	0.07	0.05	0.10	0.10	0.16	0.12
	Tethys	1966-2010	5372	0.26	0.22	0.07	0.03	0.10	0.10	0.05	0.07
	Dione	1966-2010	5028	0.21	0.20	0.06	0.04	0.08	0.07	0.07	0.04
	Rhea	1966-2010	3953	0.16	0.15	0.06	0.04	0.11	0.11	0.05	0.06
	Titan	1966-2010	3916	0.18	0.17	0.07	0.06	0.10	0.10	0.05	0.06
	Hyperion	1966-2010	1767	0.55	0.35	2.69	1.99	0.24	0.14	-	-
	Iapetus	1966-2010	3361	0.17	0.17	0.18	0.32	0.12	0.12	-	-
	Phebe	1904-2011	3574	0.25	0.20	-	-	-	-	-	-
Uranus	Ariel	1983-2009	1967	0.17	0.18	-	-	0.09	0.08	-	-
	Umbriel	1983-2009	2712	0.15	0.14	0.13	0.13	0.11	0.09	-	-
	Titania	1983-2010	3320	0.17	0.17	0.13	0.12	0.13	0.11	-	-
	Oberon	1983-2010	2543	0.18	0.16	0.13	0.12	0.16	0.26	-	-
	Miranda	1989-2009	1486	0.20	0.16	-	-	0.09	0.082	-	-
Neptune	Triton	1989-2009	3515	0.19	0.16	-	-	0.09	0.08	-	-
	Nereid	1975-2010	788	0.11	0.10	0.10	0.13	-	-	-	-

4. Оценки точности

Для оценки точности построенных теорий, они сравнивались как с наблюдениями, так и с результатами других авторов. На рис. 2-12 приведены несколько графиков, которые показывают остаточные невязки наблюдений (серые точки) и сравнение теорий (черные линии). Теории движения спутников Юпитера сравнивались с теориями V. Lainey, спутников Сатурна – с полуаналитической теорией TASS1.7, спутников Урана и Нептуна – с численными теориями JPL. Сравнение показало, что в целом результаты согласуются, причём, чем больше точных наблюдений использовано для улучшения теории, тем больше она согласуется с результатами других авторов. Значительные отклонения имеются лишь у нескольких спутников, что связано с недостатком точных наблюдений этих объектов, в силу природных особенностей их строения и движения.

Используя построенные теории спутников, мы оценили некоторые гравитационные параметры систем Юпитера, Сатурна и Урана (табл. 3). Параметры для системы Нептуна имеют между собой 100% корреляции, т.о. по имеющемуся набору наблюдений невозможно дать никаких оценок для масс и координат полюса планеты. Что касается J_2 Нептуна, то величина поправки для него была меньше ошибки, что говорит о том, что построенные теории полностью согласуются с принятым значением параметра. Начальные значения параметров, взятые с интернет страницы JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>), имеют очень высокую точность, поскольку получены из космических наблюдений. Табл. 3 показывает значения гравитационных параметров с их формальными ошибками, а также результаты полученные другими авторами: V. Lainey [8] для галилеевых спутников, A. Vienne and L. Duriez [4] для спутников Сатурна и N. Emelyanov [9] для спутников Урана.

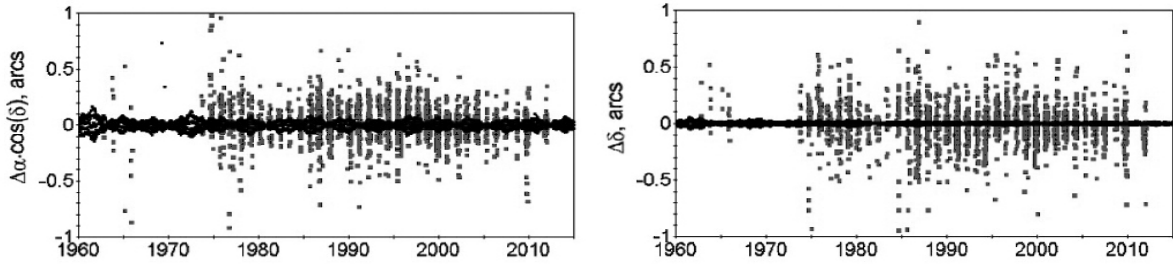


Рис. 2. Каллисто.

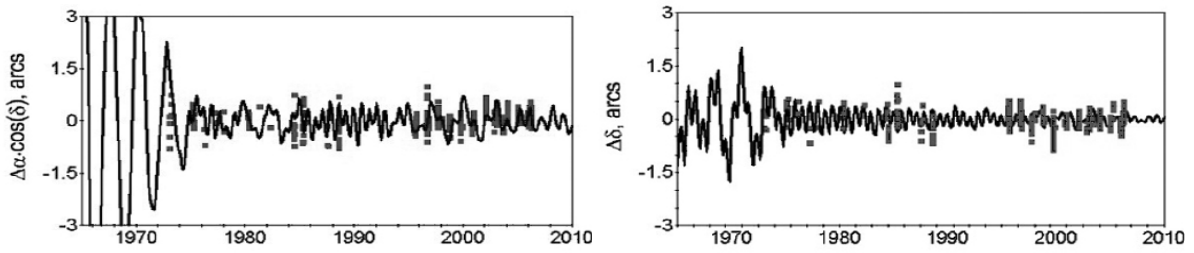


Рис. 3. Мимас.

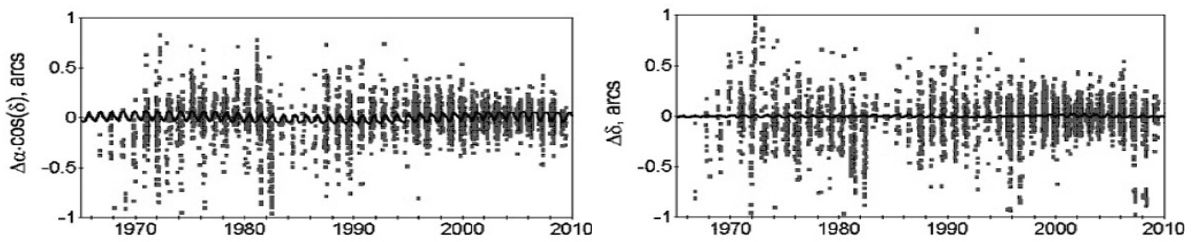


Рис. 4. Титан.

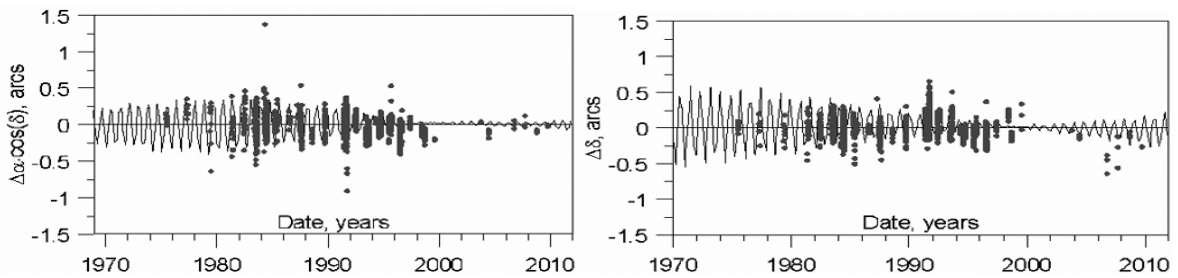


Рис. 5. Ариэль.

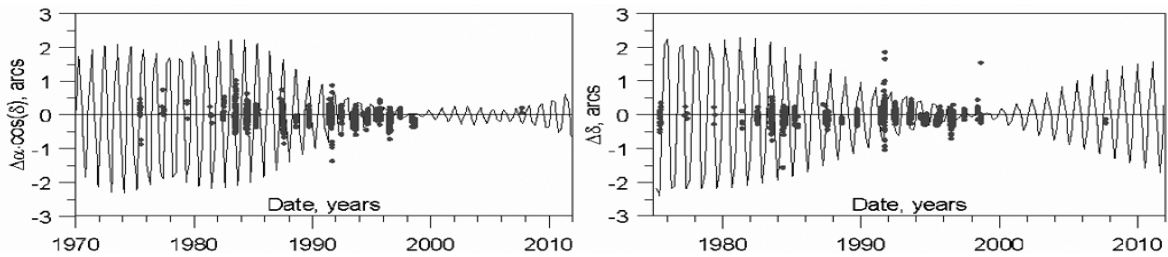


Рис. 6. Миранда.

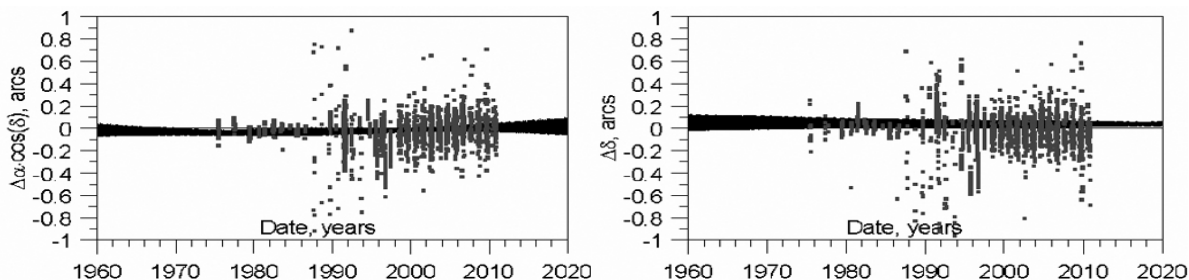


Рис. 7. Тритон.

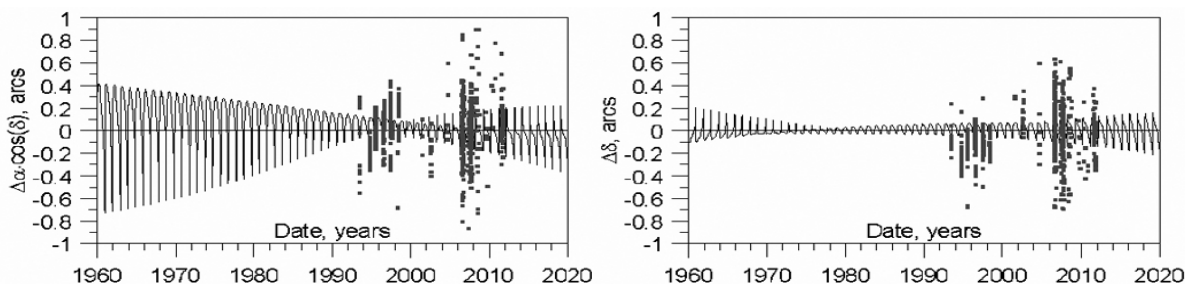


Рис. 8. Нептун.

Таблица 3.

	Параметры	Полученные значения	Начальные значения	Значения, полученные другими авторами	
Юпитер	$Gm_J, km^3/s^2$	126686520 ± 2	126686535 ± 2	126686539.8	[8]
	$J_2 \cdot 10^{-6}$	14713 ± 1	14696.43 ± 0.21	14781	
	$Gm_1, km^3/s^2$	5961 ± 1.0	5959.916 ± 0.012	5961.0	
	$Gm_2, km^3/s^2$	3193 ± 3.3	3202.739 ± 0.009	3201.0	
	$Gm_3, km^3/s^2$	9898 ± 2.4	9887.834 ± 0.017	9887.8	
	$Gm_4, km^3/s^2$	7198 ± 2.0	7179.289 ± 0.013	7179.2	
	α_p (deg)	268.058 ± 0.004	268.0566 ± 0.0002	-	
	δ_p (deg)	64.499 ± 0.002	64.4953 ± 0.0001	-	
Сатурн	$Gm_S, km^3/s^2$	37931206 ± 1	37931208 ± 1	37948198.5 ± 0.1	[4]
	$J_2 \cdot 10^{-6}$	16291 ± 1	16290.71 ± 0.27	16285 ± 5	
	$Gm_1, km^3/s^2$	2.95 ± 0.15	2.5026 ± 0.0006	2.4 ± 0.1	
	$Gm_2, km^3/s^2$	2.7 ± 1.2	7.2027 ± 0.0125	2.6 ± 0.8	
	$Gm_3, km^3/s^2$	43.7 ± 1	41.2067 ± 0.038	40.2 ± 0.5	
	$Gm_4, km^3/s^2$	73.2 ± 0.15	73.1146 ± 0.0015	74.5 ± 0.8	
	$Gm_5, km^3/s^2$	151 ± 3.5	153.9426 ± 0.0037	163.9 ± 14.4	
	$Gm_6, km^3/s^2$	8981.3 ± 0.3	$8978.1382 \pm .002$	8931.5 ± 6.8	
	$Gm_7, km^3/s^2$	0.23 ± 0.19	0.3727 ± 0.0012	-	
$Gm_8, km^3/s^2$	218 ± 62	120.5038 ± 0.008	118 ± 87		
Уран	$J_2 \cdot 10^{-6}$	3353.84 ± 1.3	3341.29 ± 0.72	3346.0	[9]

4. Заключение

В настоящей работе построены численные теории для основных спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна на интервале с 1960 по 2020 годы, и проведено сравнение результатов как с наблюдениями, так и с результатами других авторов. Сравнение показало, что в целом результаты согласуются.

В заключение отметим, что теории спутников больших планет уже используются для вычисления эфемерид этих спутников и доступны для пользователей на сайте ИПА РАН (<http://www.ipa.nw.ru/PAGE/rusipa.htm>).

Работа выполнена при поддержке гранта Программы 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Литература

1. *Krasinsky G.A., Vasilyev M.V.* ERA: Knowledge Base for Ephemeris and Dynamical Astronomy. Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies. Proceedings of IAU Coll. 165. 1997, 239–244.
2. *Pitjeva E.V.* Ephemerides EPM2008: the updated model, constants, data. Proceedings of the "Journées 2008 Systemes de reference spatio-temporels", M. Soffel and N. Capitaine (eds.), Lohrmann-Observatorium and Observatoire de Paris. 2009, 57-60.
3. *Lieske J.H.* Galilean satellite ephemerides E5. A&A. Suppl. Ser. 1998, V. 129, 205–217.
4. *Vienne A., Duriez L.* TASS1.6: Ephemerides of the major Saturnian satellites. A&A. 1995, V. 297, 588–605.
5. *B.A. Archinal, M.F. A'Hearn, E. Bowell et al.* Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009. Celest. Mech. Dyn. Astr. 2011, V. 109, 101-135.
6. *Thuillot W., Arlot J.-E., Ruatti C., et al.* The PHESAT95 catalogue of observations of the mutual events of the Saturnian satellites. A&A. 2001, V. 371, No 1, 343–349.
7. *Jacobson, R.A.* The Gravity Field of the Uranian System and the Orbits of the Uranian Satellites and Rings. BAAS. 2007, V. 39, 453.
8. *Lainey V., Duriez L., Vienne A.* New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. A&A. 2004, V. 420, 1171–1183.
9. *Emel'yanov N.V., Kanter A.A.* Orbits of new outer planetary satellites based on observations. Solar System Research. 2005, V. 39, Issue 2, 112–123.

CONSTRUCTION OF THE NUMERICAL THEORIES OF THE MAIN SATELLITES OF PLANETS USING ERA-SYSTEM

Poroshina A.L., Kosmdamianskiy G.A.

Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

This work presents the motion theories of the main satellites of Jupiter (Io, Europa, Ganymede, Callisto), Saturn (Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus, Phebe), Uranus (Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda) and Neptune (Triton, Nereid) as constructed by numerical integration within the framework of the program package ERA (Ephemeris Research in Astronomy). The dynamical models include the mutual perturbations of the satellites, disturbances of the Sun, major planets and nonsphericity of the central planet (J_2 , J_4 for all planets and J_6 for Jupiter). The initial values of the coordinates and velocities were improved using the astrometric observations of different types. In addition, several improved parameters (the planet mass, J_2 , pole coordinates and masses of the satellites) were obtained for some satellite systems. The residuals, rms and comparison of our results with those obtained by other authors are given.

ПЗС-НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ

Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты астрометрических наблюдений спутников Сатурна и Урана на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове в 2011-2012 гг. С сентября 2011 г. по май 2012 г. было получено 7900 ПЗС-кадров с изображениями главных спутников Урана и Сатурна, пригодными для измерений. Определены экваториальные координаты в системе J2000 2-го, 3-го и 4-го спутников Урана и с 2-го по 8-й спутников Сатурна. Точность определения координат в среднем составила 0.040 по прямому восхождению и 0.050 в склонении. Выполнено сравнение наблюденных и теоретических положений спутников. Эфемериды получены с помощью вебсервера «Эфемериды естественных спутников планет MULTI-SAT IMCCE - ГАИШ МГУ», разработанном Н.В. Емельяновым.

Работа выполнена при поддержке Программы №22 Президиума РАН.

Введение

Для уточнения теорий движения естественных спутников планет важно как можно дольше накапливать их точные положения. В Пулкове на 26"-рефракторе ПЗС-наблюдения спутников больших планет производятся с августа 1995 г. До 2007 г. наблюдения выполнялись с помощью ПЗС-камеры ST-6 с полем зрения 3'x3', определялись взаимные расстояния между парами близких спутников [1]. В сентябре 2007 г. начались наблюдения на ПЗС-камере FLI Pro Line 09000 с полем зрения 12'x12', что позволило получать экваториальные координаты спутников с использованием опорного каталога.

По астрометрическим наблюдениям, выполненным в 2011–2012 гг., определены топоцентрические экваториальные координаты в системе J2000.0 четырех спутников Урана и со 2-го по 8-й спутников Сатурна. При определении координат учитывалась дифференциальная рефракция. Точность определения координат была оценена по дисперсии разностей «О-С» и в среднем составила 0.040 по прямому восхождению и 0.047 в склонении для спутников Сатурна и 0.031 и 0.049 соответственно для спутников Урана. Теоретические положения спутников были получены на вебсервере «Эфемериды естественных спутников планет MULTI-SAT IMCCE - ГАИШ МГУ» [2].

Наблюдения, измерения и редукция

Пулковский 26-дюймовый рефрактор обладает следующими техническими характеристиками: диаметр объектива – 65 см; фокусное расстояние 10413 мм, масштаб в фокальной плоскости 19.80"/мм. ПЗС-матрица камеры FLI Pro Line 09000 состоит из 3056x3056 пикселей, каждый элемент имеет размер 12 мкм или, в угловой мере, 0".24. Поле зрения ПЗС-камеры составляет 12'x12'. Наблюдения Урана проводятся с августа по начало января. В 2011 г. в течение 22 ночей было получено 880 ПЗС кадров с изображениями спутников Урана. Сатурн и его главные спутники доступны для наблюдений в Пулкове с января по май, в 2012 г. было получено более 7000 кадров за 26 наблюдательных ночей. Для Урана за одну ночь снималась серия из 40 кадров с экспозициями 10 секунд, для Сатурна получали серию в 270 кадров с экспозициями по 1.5 секунды. ПЗС-кадры, полученные в одну ночь, делились на 5 серий изображений, по 8 для Урана и по 50 для Сатурна. Кадры каждой серии складывались и измерялись, для каждого результирующего изображения вычислялся соответствующий ему момент с

учетом времени экспозиции. Таким образом, для каждой наблюдательной ночи получалось по 5 положений для каждого спутника, доступного для измерений и соответствующих им моментов, из которых вычислялись нормальные места и средние моменты после исключения явно ошибочных положений с разницей «О-С» более 0".5 (кроме Гипериона). Поскольку длительность ПЗС-наблюдений в одну ночь не превышала 7 минут можно считать видимое движение спутников прямолинейным во время съемки. Индивидуальные положения и моменты использовались для оценки внешней точности наблюдений. Количество наблюдательных ночей и полученных положений спутников показано в Таблице 1.

Таблица 1. Количество индивидуальных положений спутников.

Объект	Число положений	Число ночей
Энцелад (S2)	5	1
Тефия (S3)	45	9
Диона (S4)	80	16
Рея (S5)	93	19
Титан (S6)	114	23
Гиперион (S7)	76	16
Япет (S8)	39	8
Ариэль (U1)	15	3
Умбриэль (U2)	38	8
Титания (U3)	80	16
Оберон (U4)	90	18

Измерения ПЗС-изображений были выполнены при помощи программного пакета IZMCCD, разработанного И.С. Измайловым [3,4]. Программное обеспечение позволяет учесть засветку кадра от яркой планеты и измерить положения спутников, близких к изображению планеты. Ореол аппроксимируется квадратичным многочленом, и, далее, из всех элементов изображения спутника, производится вычитание значения многочлена на этом элементе. На Рис.1 показано изображение Урана и спутников до и после вычитания ореола.

Центры изображений спутников и опорных звезд определяются при помощи профиля, задаваемого функцией Лоренца [5].

$$I(x, y) = \frac{C}{(1 + Ar)^a} + D$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (1 + B)(y - y_0)^2 + E(x - x_0)(y - y_0)$$

где $I(x, y)$ - отсчет яркости на элементе с координатами x, y ; x_0, y_0 - координаты центра изображения; a, A, B, C, D, E - параметры модели.

Координаты центров изображений вычисляются решением избыточной системы уравнений нелинейным методом наименьших квадратов. Так определяются измеренные координаты спутников и опорных звезд в системе ПЗС-кадра. Далее выполняется стандартная астрометрическая редукция по методу Тернера (метод шести постоянных). В качестве опорного каталога был взят UCAC2 [6], обладающий достаточной звездной плотностью. Предельная звездная величина звезд фона составила 19m. На снимках отождествлялось от 5 до 15 звезд и звезды с невязками условных уравнений не превосходящими 0".119 использовались в редукции. Среднеквадратические ошибки определения координат спутников составили в среднем 0".066 и 0".055 по тангенциальным координатам X и Y соответственно.

В наблюдаемые положения не вводились поправки за аберрацию, суточный параллакс и время прохождения света между спутниками, учитывался только эффект рефракции.

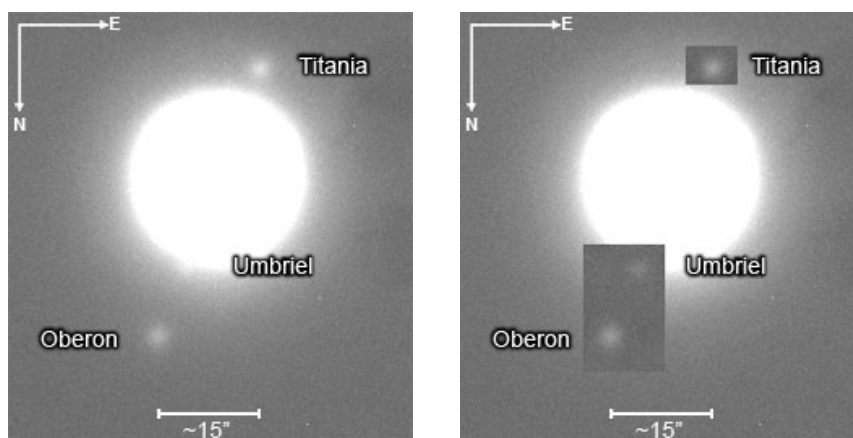


Рис. 1. Фрагмент ПЗС-кадра до и после вычитания ореола.

Оценка точности и сравнение с теорией

Вычисленные положения спутников были сравнены с их теоретическими значениями согласно теории TASS 1.6 для спутников Сатурна и теории GUST 06 (уточненная GUST 86) для спутников Урана, а также планетной теории INPOP10 [7,8,9]. Эфемериды спутников были обеспечены веб-сервером “Natural Satellites Ephemeride Server MULTI-SAT” [2]. Внешняя точность астрометрических положений была оценена по дисперсии разностей «О-С». Внешняя точность зависит от искажений, вносимых атмосферой, и от характеристик телескопа и приемника излучения. Средние значения разностей «О-С», ошибки среднего (ϵ_α , ϵ_δ) и среднеквадратические ошибки (σ_α , σ_δ) приведены в Таблице 2 для спутников Сатурна со 2-го по 8-й, в секундах дуги, и в Таблице 3 для четырех спутников Урана. На Рис. 2–4 показаны разности «О-С» индивидуальных положений спутников в прямом восхождении ($\Delta\alpha \cdot \cos\delta$) и склонении ($\Delta\delta$).

Таблица 2. Средние разности «О-С» для спутников Сатурна, средние ошибки нормальных мест (ϵ_α , ϵ_δ) и средние ошибки одного положения (σ_α , σ_δ), arcsec.

Объект	$(O-C)_{\alpha \cdot \cos\delta}$	$(O-C)_\delta$	ϵ_α	ϵ_δ	σ_α	σ_δ
Энцелад (S2)	-0.003	0.013	0.028	0.038	0.055	0.081
Тефия (S3)	-0.007	0.011	0.020	0.025	0.043	0.057
Диона (S4)	-0.006	0.022	0.020	0.024	0.043	0.056
Рея (S5)	-0.007	0.024	0.018	0.022	0.039	0.047
Титан (S6)	-0.010	-0.036	0.025	0.023	0.053	0.049
Гиперион (S7)	-0.057	-0.112	0.027	0.038	0.056	0.073
Япет (S8)	0.071	-0.007	0.020	0.022	0.040	0.045

Таблица 3. Средние разности «О-С» для спутников Урана, средние ошибки нормальных мест (ϵ_α , ϵ_δ) и средние ошибки одного положения (σ_α , σ_δ), arcsec.

Объект	$(O-C)_{\alpha \cdot \cos\delta}$	$(O-C)_\delta$	ϵ_α	ϵ_δ	σ_α	σ_δ
Ариэль (U1)	-0.228	0.107	0.022	0.052	0.049	0.117
Умбриэль (U2)	-0.181	-0.266	0.026	0.035	0.050	0.064
Титания (U3)	-0.133	-0.120	0.011	0.019	0.024	0.043
Оберон (U4)	-0.202	-0.073	0.010	0.012	0.023	0.027

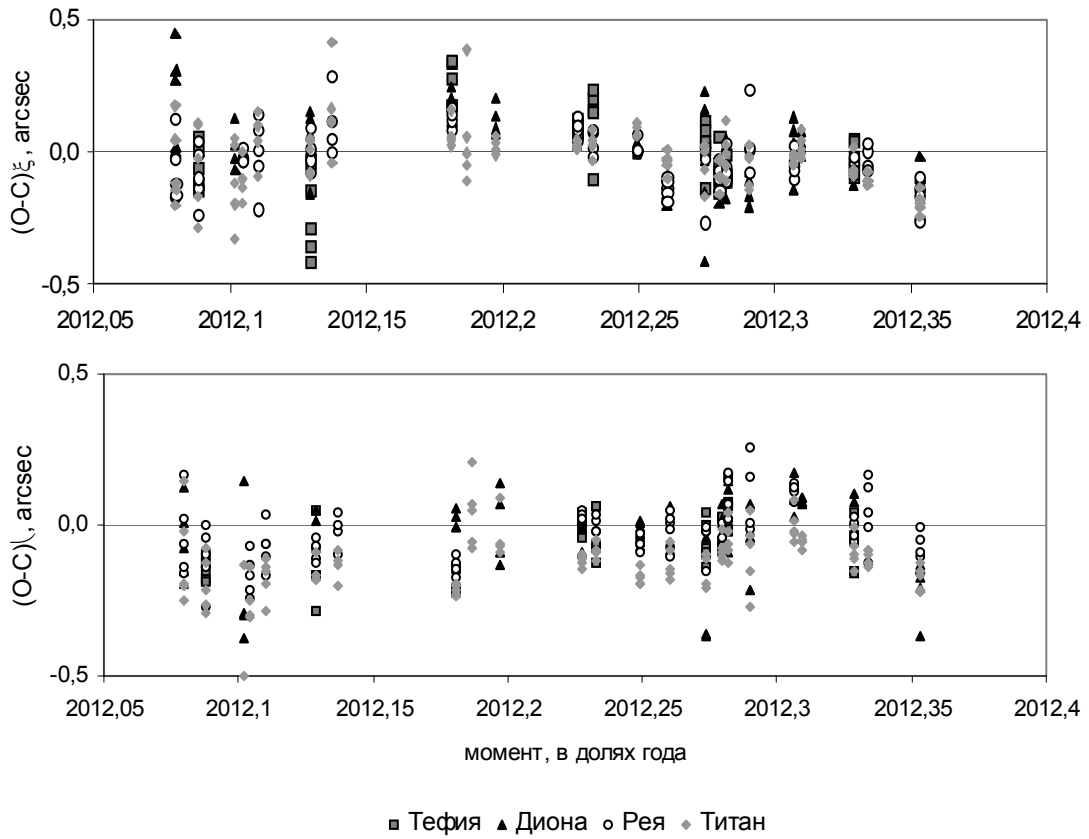


Рис. 2. Разности «О-С» для спутников Сатурна по прямому восхождению и склонению.

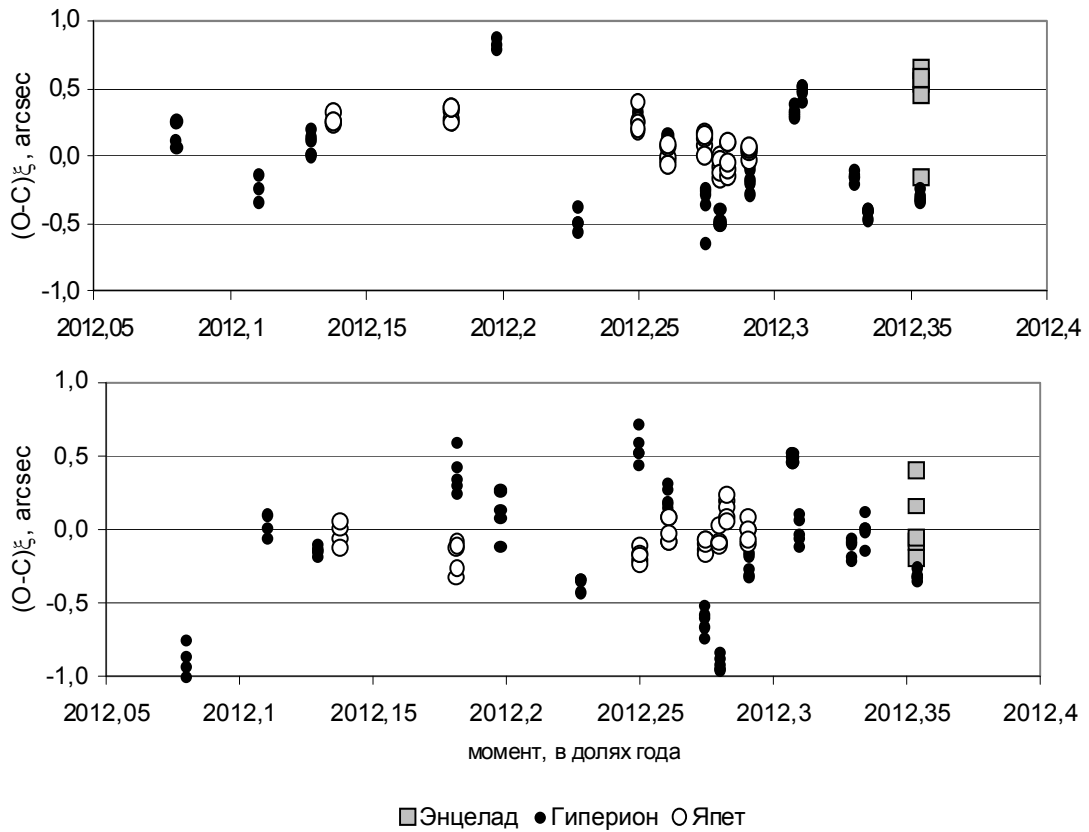


Рис. 3. Разности «О-С» для спутников Сатурна по прямому восхождению и склонению.

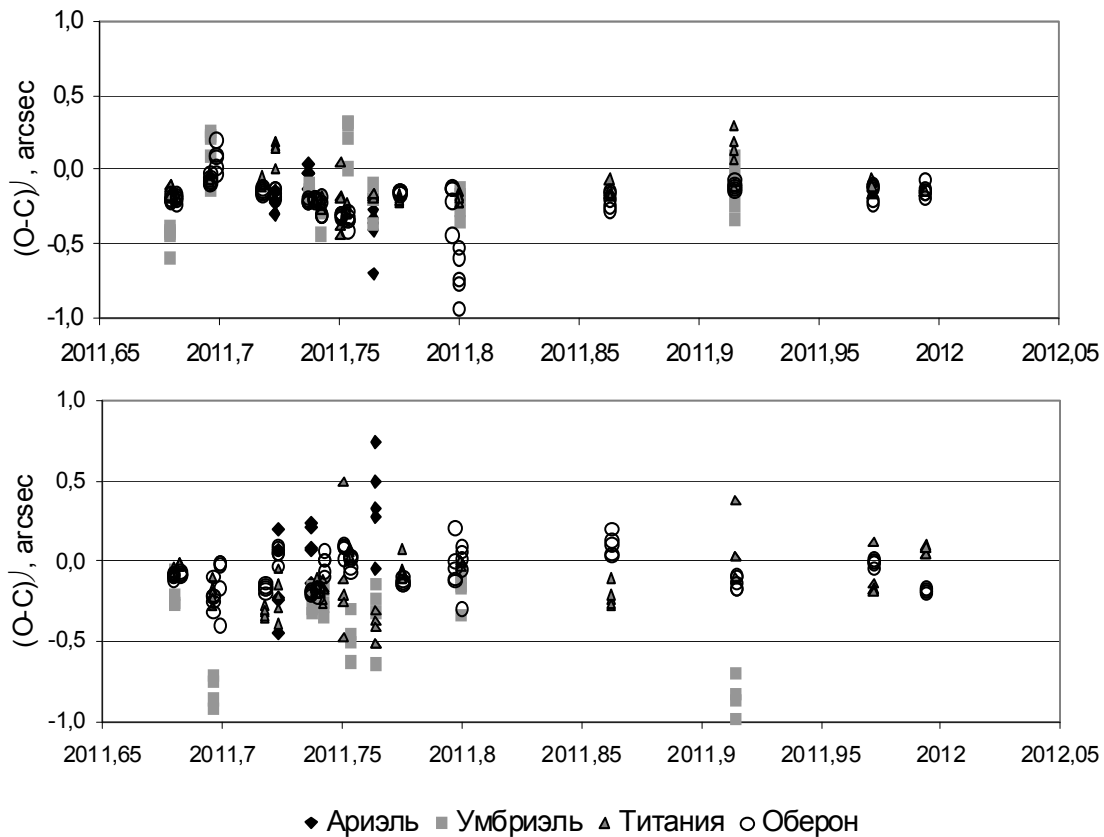


Рис. 4. Разности «О-С» для спутников Урана по прямому восхождению и склонению.

Результаты наблюдений

Результаты наблюдений, топосентрические экваториальные координаты спутников Сатурна и Урана в системе J2000.0, доступны в электронном виде по адресу <http://izmccd.puldb.ru/obs2011-2012> (файлы saturn01.txt и uranus01.txt).

Представлены следующие данные:

- номер спутника (S2 – Энцелад, S3 – Тефия, S4 – Диона, S5 – Рея, S6 – Титан, S7 – Гиперион, S8 – Япет, U1 – Ариэль, U2 – Умбриэль, U3 – Титания, U4 – Оберон);
- момент наблюдения UTC в формате год-месяц-день;
- прямое восхождение, J2000.0;
- склонение, J2000.0;
- разность «О-С» по прямому восхождению ($\Delta\alpha \cdot \cos \delta$), в секундах дуги,
- разность «О-С» по склонению, в секундах дуги;
- ошибки среднего значения «О-С» по прямому восхождению и склонению, в секундах дуги;
- среднеквадратические ошибки одной разности «О-С» по прямому восхождению и склонению, в секундах дуги.

Также были вычислены взаимные расстояния между спутниками $\Delta\alpha \cdot \cos \delta$ и $\Delta\delta$, результаты находятся по адресу: <http://izmccd.puldb.ru/obs2011-2012> (файлы saturn02.txt и uranus02.txt).

Таблицы содержат:

- номера спутников в паре;
- момент наблюдения UTC в формате год-месяц-день;
- проекцию видимой дуги между спутниками на небесную параллель $\Delta\alpha \cdot \cos \delta$, в секундах дуги;

- проекцию видимой дуги между спутниками на небесный меридиан $\Delta\delta$, в секундах дуги;
- разность О-С по прямому восхождению, в секундах дуги,
- разность О-С по склонению, в секундах дуги,
- ошибки среднего по прямому восхождению и склонению, в секундах дуги,
- среднеквадратические ошибки одного положения по прямому восхождению и склонению, в секундах дуги.

Заключение

На 26"-рефракторе в Пулковке в 2011-2012 гг. проведены позиционные наблюдения спутников Урана и Сатурна. Методом Тернера получены экваториальные координаты спутников в системе J2000.0. Проведено сравнение полученных положений с теориями движения. Для Гипериона и Япета разности наблюдаемых и теоретических положений превышают ошибки определения координат, что говорит о необходимости уточнения теорий их движения. Положения 1-4 спутников Урана показывают значительное расхождение с теорией, на порядок превышающее ошибки вычисленных координат. Для создания более точных теорий движения спутников необходимо продолжение позиционных наблюдений. Результаты наблюдений доступны в электронном виде, а так же размещены в Пулковской базе данных www.puldb.ru.

Работа поддержана Программой №22 Президиума РАН.

Литература

1. *Киселева Т.П., Измайлов И.С.* «Результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке» // Изв. ГАО № 214, с. 333-343 (2000).
2. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT. // *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 487. P. 759–765.
3. *Измайлов И.С.* Izmccd - программный пакет для астрометрической обработки числовых изображений небесных объектов // <http://izmccd.puldb.ru/izmccdрус>, (2005).
4. *Izmailov, I.S.; Khovricheva, M.L.; Khovrichev, M.Yu. et al.* Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory, *Astronomy Letters*, Volume 36, Issue 5, pp.349-354.
5. *Franz O.G.* Observational Procedures for Visual Double-Star Work // *J. R. Astr. Soc. Can.*, 67, 81, 1973.
6. *Zacharias, N.; Urban, S. E.; Zacharias, M. I. et al.* The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *A.J.*, V. 127, pp. 3043-3059, 2004.
7. *A. Vienne, L. Duriez.* TASS1.6: Ephemerides of the major Saturnian satellites // *A&A*, v.297, p.588 (1995).
8. *Laskar J., Jacobson R.A.* GUST86 - An analytical ephemeris of the Uranian satellites. // *A&A.*, v. 188, p. 212-224 (1987).
9. *Fienga A., Manche H., Kuchynka P., Laskar J., Gastineau M.* Planetary and Lunar ephemerides, INPOP10A 2010, eprint arXiv:1011.4419.

CCD OBSERVATIONS OF THE MAJOR PLANET SATELLITES WITH 26-INCH REFRACTOR AT PULKOVO

Roschina E.A., Izmailov I.S., Kiseleva T.P.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS, Saint Petersburg, Russia

The results of astrometric observations of satellites of Saturn and Uranus are presented. Positions were derived from more than 7900 CCD frames taken with 26-inch refractor from September 2011 to May 2012. Astrometric reduction algorithm is based on Turner's method with using UCAC2 catalog as reference one. Accuracy estimation gives error of mean position as 0.04 in right ascending and 0.05 in declination, in arcsec. Observed positions were compared with theoretical ones from TASS 1.6 and GUST06. Ephemerides were provided with “The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT” developed by N. V. Emel'yanov. Also we present mutual visual distances between satellites. The Basis Research Program 22 of the Presidium of RAS supported this work.

ПЛУТОН – ВСЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПУЛКОВО ЗА 1930–1996 гг.

Рыльков В.П.

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, корп.1
E-Mail: vrylk1145@yandex.ru*

В системе ICRF (J2000) вычислено более 330 положений Плутона, полученных фотографическим путем за период с 1930 года до 1996 год на трех телескопах и обработанных в Пулковке. Основной ряд наблюдений из 240 пластинок, выполнен на Нормальном астрографе (33/346) ГАО с момента открытия планеты до перехода ее в южное полушарие. Для подтверждения обнаруженного в значениях (O-C) тренда при сравнении положений Плутона с теоретической эфемеридой DE200 были организованы и проведены позиционные наблюдения планеты еще на двух телескопах. В течение 6 лет с 1991 на телескопе Шмидта (80/120/240) в Балдоне (Латвия) получили 53 фотопластинки с Плутоном, которые были измерены в Пулковке, обработано 74 положения Плутона. Несколько пластинок с изображением планеты были получены на широкоугольном астрографе Цейс-400 (40/200) Казанской обсерватории Энгельгардта, расположенном рядом с 6-метровым БТА. Всего с Цейса-400 обработано 17 фотопластинок: девять пластинок 1994 года, 6 пластинок 1985 года и по одной 1988 и 1991 года.

В работе представлен каталог положений Плутона, вычисленных заново с использованием в качестве единого опорного космического каталога UCAC3.

1. Введение

В 1994 г в Пулковке на Нормальном астрографе (НА, 33/346) были прекращены позиционные фотографические наблюдения Плутона, продолжавшиеся почти 65 лет с момента открытия планеты до перехода ее в южное полушарие. Невозможность длительного фотографирования на больших зенитных расстояниях, экспозиции при которых превысили часовые интервалы для регистрации предельно достижимой для Нормального астрографа звездной величины Плутона, прервали почти 60-летний (с перерывом на период 1942-1948 – по причине войны и периода восстановления обсерватории) ряд однородных наблюдений планеты. Всего с НА в Пулковке было получено более 240 пластинок с изображением Плутона, значительная часть в последние 90-е годы, когда было обнаружено значительное расхождение теории и результатов наблюдений.

Для подтверждения обнаруженного тренда при сравнении положений Плутона с теоретической эфемеридой JPL DE200 были организованы и проведены позиционные наблюдения планеты еще на двух телескопах. За 6 лет с 1991 по 1996 гг. на телескопе системы Шмидта (80/120/240) в Балдоне (Латвия) по нашей просьбе получили 53 фотопластинки с Плутоном, которые были переданы и полностью обработаны в Пулковке. Несколько пластинок с изображением планеты были получены автором в 1994 г на широкоугольном астрографе Цейс-400 (40/200) Казанской обсерватории им. Энгельгардта, расположенном недалеко от БТА на горе Пастухова. Всего с Цейса-400 обработано 17 фотопластинок: девять пластинок 1994 года (семь получены автором), кроме того в Пулковке были переданы для обработки пластинки 1985 года (6 изображений) и по одному снимку планеты в 1988 и 1991 году.

В работе представлен каталог всех положений Плутона, перевычисленных заново с использованием в качестве единого опорного каталога UCAC3 в системе ICRF J2000.0. Однородный ряд из 331 положения Плутона за 1930–1996 гг. с трех телескопов необходимо включить в базу данных по планетам и использовать для улучшения его теории движения. Дополнительно даны 54 положения по дифракционным спутникам.

2. Наблюдения с Нормальным астрографом

Фотографические позиционные наблюдения Плутона в Пулково на нормальном астрографе были начаты С.К.Костинским с момента его открытия в марте 1930 г. и первые фотопластинки были получены им уже 16 и 17 марта. До 1935 г. он систематически каждый год фотографировал планету, а с 1938 г. наблюдения проводили А.Н. Дейч и В.В. Лавдовский. После войны на восстановленном телескопе ежегодные фотографические наблюдения Плутона возобновлены с 1949 г. и продолжались до 1994 г. всеми астрономами-наблюдателями Нормального Астрографа. Программа наблюдений была прекращена, поскольку Плутон, двигаясь по своей орбите, перешел в движении по небесной сфере в южное полушарие. В 1995 году его склонение составляло уже $-6^{\circ}30'$ и это был предел наших возможностей по наблюдениям планеты из-за большого зенитного расстояния ($>66^{\circ}$) и предельной для наблюдений яркости, $\sim 16-17^m$. По продолжительности эта программа самая длительная за всю историю нормального астрографа, она составляла более 65 лет систематических наблюдений планеты и охватывала практически четверть периода обращения Плутона вокруг Солнца.

Все наблюдения проводились каждый год весной, вблизи оппозиции планеты. За период наблюдений в 1-2 месяца фотографировали обычно 3-5 пластинок, в последнее десятилетие в связи с исследованием блеска Плутона и изучением тренда в (О-С) по RA получали от 7 до 12 пластинок [1-3]. За 65 лет накоплен большой наблюдательный материал, большое число фотопластинок отдельными периодами были измерены, обработаны в разных фундаментальных системах и опубликованы, подробная библиография в [1]. Точность определения положений по пластинкам нормального астрографа (поле $2 \times 2^{\circ}$) достаточно высокая: от $0.21''$ до $0.33''$ по прямому восхождению (RA) и от $0.16''$ до $0.34''$ по склонению (DE). В разное время сравнение положений делалось с разными эфемеридами, поэтому все координаты Плутона, полученные до 1986 г., были переведены на единую фундаментальную систему FK5 (средний экватор и равноденствие J2000), объединены с результатами последних наблюдений и для всего ряда вычислены разности (О-С) относительно численной эфемериды JPL DE200.

Этот сводный ряд был исследован и выявлены следующие присущие ему особенности: ряд имел сильный возрастающий тренд в разностях (О-С) по RA, который в 1994 году достиг значений более $2.5''$, методами гармонического анализа в разностях (О-С) по DE выявлена значимая ($>95\%$) гармоника с периодом 13.4 г. и амплитудой $0.21''$ [4]. Эти особенности потребовали дополнительных исследований и переработки всего ряда для повышения точности результатов.

С целью переобработки в будущем положений Плутона по слабым опорным звездам новых создаваемых высокоточных каталогов в ГАО РАН был начат сбор данных по измерениям пластинок с Плутоном. Выяснилось, что для большинства пластинок в прошлые годы редукации координат проводились с минимумом опорных звезд (до 4-7), что недостаточно для высокоточной привязки координат для поля пластинки НА. Кроме того, для положений 1965-1986 гг. измерения были утеряны. В июле 1994 г. из Абастумани (Грузия) в ГАО были возвращены пластинки нормального астрографа, полученные в период 1930-1954 гг. Были измерены две системы опорных звезд: первичная, состоящая из довольно ярких звезд до 12^m (15-26 звезд) и вторичная система из 20-30 звезд $11-15^m$ в радиусе до $30'$ от Плутона. Огромный объем измерений всех пластинок выполнен сотрудниками ГАО: Е.Н. Титовой, А.А. Дементьевой, Н.В. Нарижной, В.П. Рыльковым. Переизмерение всех пластинок было выполнено в рамках работы по гранту РФФИ (93-02-3045). Нужно дополнительно отметить, что положения Плутона 1954-1968 и частично в 90-е годы были получены по дифракционным спутникам опорных звезд. По этой причине измерения в 90-е годы выполнялись с большим числом

звезд до 25-30 и для большинства пластинок с измерениями не только дифракционных спутников, но и центральных изображений слабых звезд.

Были просмотрены практически все имеющиеся в наличии фотопластинки с Плутоном и проведено измерение тех, которые были пропущены или не могли быть измерены на старых приборах. Измерены довольно темные пластинки 1985 г., поэтому ряд результатов не имеет пропусков с 1949 г. В табл.1 приведено число пластинок каждого года наблюдений, обработанных ранее (Nп) и полученные после переизмерений (Nр).

Таблица 1. Статистика пластинок с Плутоном пулковского нормального астрографа за 1930-1994 гг., обработанных до 1995 г. и после (до<1996<после).
Знак “+” перед пластинками, полученными с дифракционной решеткой.

Год	<1995<		Год	<1995<		д.р.	Год	<1995<		Год	<1995<		д.р.
	Nп	Nр		Nп	Nр			Npd	Nп		Nр	Nп	
1930	4	7	1954	3	3	+3	1969	4	4	1984	4	9	-
1931	2	2	1955	3	3	+3	1970	4	4	1985	-	3	-
1932	5	5	1956	3	3	+3	1971	5	6	1986	8	9	-
1933	2	2	1957	3	4	+4	1972	4	4	1987	6	6	-
1934	3	3	1958	3	3	+3	1973	4	4	1988	3	3	-
1935	3	4	1959	3	3	+4	1974	2	3	1989	10	10	-
1938	3	3	1960	3	3	+3	1975	4	4	1990	13	13	+3
1939	3	3	1961	3	3	+3	1976	4	5	1991	9	9	+2
1940	3	3	1962	3	3	+3	1977	3	3	1992	5	6	-
1941	2	2	1963	3	3	+3	1978	3	3	1993	5	7	+1
1949	3	3	1964	4	5	+5	1979	2	3	1994	4	5	+4
1950	3	3	1965	3	4	+4	1980	4	4	-	-	-	-
1951	4	4	1966	3	3	-	1981	4	4	-	-	-	-
1952	3	4	1967	3	4	+1	1982	2	4	-	-	-	-
1953	3	3	1968	3	3	+2	1983	4	6	-	-	-	-

Обработано до 1994 г. - 212 пластинок, в 1995-2010 гг. - 240 пластинок.

Окончательно полный ряд включает измерения 240 пластинок с Плутоном. В этот ряд вошли результаты, где отклонения в RA и DE от средних значений для года до 1", т.к. после открытия Харона, с угловым радиусом орбиты порядка 0.9" (для R=39.5 а.е.) эти расхождения вполне могут быть объяснены смещением фотометрического центра системы Плутон-Харон из-за быстрого вращения Харона вокруг планеты за 6.39 земных суток. В последние полтора десятилетия Плутон находился на расстоянии в 29 а.е., что соответствует угловому диаметру орбиты Харона в 2.4" и, учитывая величину диаметра спутника в 0.5D Плутона, расхождения в 1-1.5" для разделенных несколькими сутками наблюдений вполне могут быть вызваны указанной причиной. Дополнительно в таблице координат Плутона параллельно основным, с индексом «S» приведены результаты, полученные по дифракционным спутникам опорных звезд.

3. Наблюдения на телескопе Шмидта в Балдоне

С целью подтверждения большой величины (O-C)_RA, достигшей в 1990 г. значений более 1.5", по просьбе астрономов Пулкова в Латвии А.К. Алкснисом были организованы фотографические позиционные наблюдения Плутона на телескопе системы Шмидта (ТШ, 80/120/240) в Балдоне, которые проводились в течение шести лет, с 1991 по 1996 гг. обычно в апреле-мае. Все пластинки передавались в Пулково.

Методика наблюдений, измерений и обработки пластинок описана в работе [2]. За 1991-1996 гг. короткими сериями получены 53 пластинки с 74 изображениями Плу-

тона: снимались по одному и по два изображения на пластинке. Использовались эмульсии типа ORWO Zu-21 с фильтром GG13 (реализуется фотометрическая полоса В системы UBV), время одной экспозиции 7-9 минут. Изображения звезд и Плутона на пластинках хорошие, иногда второе изображение несколько слабее. На всех пластинках Плутон отождествляется и измеряется уверенно. Редукция астрометрических координат для пластинок телескопа Шмидта проводилась с учетом кубической дисторсии, компенсирующей остаточные aberrации и кривизну поля для выпрямляемой после экспозиции пластинки. Для учета особенностей позиционных наблюдений с телескопом Шмидта автором была выполнена работа по учету дисторсии и кривизны поля [5]. Измеренные координаты x, y исправлялись за дисторсию по следующим формулам:

$$x_0 = (x - x_c) - C_{ds} (x - x_c) r^2,$$

$$y_0 = (y - y_c) - C_{ds} (y - y_c) r^2, \text{ где } r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2,$$

где x_c, y_c - координаты центра поля, C_{ds} - коэффициент радиальной кубической дисторсии равный $-5,5 \times 10^{-8} \text{ мм}^{-2}$. Вычисления координат выполнены с помощью программного комплекса, разработанного автором и, реализующего при учете дисторсии по приведенным формулам метод восьми постоянных для связи измеренных (x, y) и тангенциальных координат (X, Y) по линейной зависимости с учетом нелинейных членов, компенсирующих неточное знание положения оптического центра пластинки:

$$X - x = a_1 * x + b_1 * y + c_1 + p * x * x + q * x * y,$$

$$Y - y = a_2 * x + b_2 * y + c_2 + p * x * y + q * y * y.$$

В табл.2. приведены для шести лет наблюдений на двух инструментах (для сравнения результатов ТШ в Балдоне и НА в Пулкове): количество фотопластинок (пл), число изображений Плутона для Шмидта (PL), число использованных при редукции опорных звезд (Зв) и средние ошибки редукции S_x и S_y (ошибки единицы веса), которые статистически включают в себя атмосферную и инструментальную ошибки, ошибки измерений и каталожные ошибки опорных звезд. Даны значения (О-С) относительно DE200.

Таблица 2. Точность положений Плутона 1991-1996 гг. по пластинкам телескопа системы Шмидта в сравнении с результатами по нормальному астрографу.

Год набл.	Телескоп системы Шмидта (Балдоне)							Нормальный Астрограф ГАО						
	N		N*	ош. ед.веса		О-С		N		N*	ош.ед.веса		О-С	
	пл	PL	Зв.	S_x "	S_y "	RA"	DE"	пл	Зв	S_x "	S_y "	RA"	DE"	
1991	8	14	14	0.315	0.328	2.19	-0.02	9	10	0.438	0.426	1.75	-0.18	
1992	10	15	15	0.230	0.275	2.51	-0.06	5	10	0.440	0.512	2.34	-0.03	
1993	7	13	21	0.301	0.337	2.18	-0.42	7	11	0.340	0.386	2.12	-0.26	
1994	7	13	14	0.327	0.280	2.31	-0.74	4	7	0.216	0.242	2.82	-0.65	
1995	12	12	19	0.302	0.324	2.81	-0.55	-	-	-	-	-	-	
1996	7	7	15	0.260	0.286	2.44	-0.74	-	-	-	-	-	-	

Средние значения ошибок единицы веса S_x, S_y по годам варьируются при вычислении астрометрических координат от 0.23" до 0.33" по обеим координатам и находятся на уровне аналогичных ошибок астрометрических инструментов.

Достаточно большие разности (О-С) относительно DE200 возможно происходят от влияния быстрого вращения его спутника - Харона, который имел угловой радиус орбиты для наблюдений 1991-1996 гг. около 1.2", диаметр орбиты: 2.4". Учитывая, что диаметр самого Харона около половины диаметра Плутона, разбросы в положениях

Плутона порядка 0.6-1.0" вполне могут быть из-за регистрируемых фотопластинкой смещений фотометрического центра системы Плутон-Харон.

Из этого следует, что для более точного сравнения наблюдаемых положений Плутона с его эфемеридой необходимо разработать формулы вычисления поправок за изменение положения фотоцентра в зависимости от периодических вращений компонентов системы. Это позволит редуцировать наблюдаемые положения к центру масс системы Плутон-Харон и уменьшить ошибки в позиционных наблюдениях.

Суущественно, что положения Плутона в RA превышают эфемеридные в JPL DE200 на величину $2.59 \pm 0.39''$ и $2.31 \pm 0.08''$, а по склонению становятся ниже эфемеридных, до $0.56 \pm 0.24''$ и $0.74 \pm 0.07''$, соответственно по пластинкам НА и телескопа Шмидта 1994 г.

4. Наблюдения с Телескопом Цейс-400

В июле 1994 года были проведены пробные позиционные фотографические наблюдения Плутона на Зеленчукской станции Казанской астрономической обсерватории им. В.А. Энгельгардта с телескопом Цейс-400. Астрограф, установленный вблизи БТА (САО РАН) на высоте 2040 м, широта $43^{\circ}39'$, имеет четырехлинзовый объектив $D=400$ мм с фокусным расстоянием $F=2000$ мм и позволяет снимать на фотопластинки практически любого размера до 30×30 см. Однако, уже на краях поля пластинки 16×16 см (около $4 \times 4^{\circ}$) ощущается кома, поэтому пластинки большого размера используются только для специальных задач. Поле телескопа имеет заметную кубическую дисторсию; исследованиями определен ее коэффициент $C_{ds} = -5.02 \times 10^{-8} \text{ мм}^{-2}$.

Пластинки 1994 г. получены В.П. Рыльковым (ГАО) и В.Н. Киткиным (АОЭ). В фототеке телескопа оказалось несколько пластинок с Плутоном, снятых В.Н. Киткиным в 1985-1991 гг., которые были переданы в Пулково для обработки. При экспозициях от 15 до 25 минут на пластинки ORWO ZU-21 изображения звезд и Плутона в центре поля получаются достаточно хорошего качества и хорошо измеряемые.

Получено 17 положений Плутона 1985-1994 гг. Методика обработки – принятая в Пулкове для пластинок широкоугольных астрографов, как для ТШмидта в Балдоне [2]. 15-25 опорных звезд выбирались из опорного каталога. Для уравнения связи измеренных и тангенциальных координат при редукации использовался метод восьми постоянных с предварительным учетом радиальной кубической дисторсии в измерениях координат. Ошибки редукации S_x, S_y находятся в пределах 0.27 :- $0.30''$, что даже меньше таких же значений при вычислении положений по пластинкам нормального астрографа и телескопа Шмидта (табл. 3). Эти ошибки для поля Цейс400, вполне отражают точность опорного каталога и измеренных положений звезд на пластинке. Внешние ошибки вычисленных положений Плутона (О-С) найдены относительно эфемериды JPL DE200 для однородного сравнения с результатами с других телескопов.

Таблица 3. Характеристики точности фотографических положений Плутона по наблюдениям с астрографом Цейс-400 Зеленчукской станции АОЭ и с НА ГАО.

Дата	Телескоп Цейс-400 АОЭ						Нормальный Астрограф ГАО					
	N	N*	ош. ед. веса		O – C		N	N*	ош. ед. веса		O - C	
год	пл.	зв.	S_x''	S_y''	RA-s	DE"	пл.	зв.	S_x''	S_y''	RA-s	DE"
1985	6	13	0.27	0.30	0.082	-0.33	3	15	0.35	0.41	0.055	-0.47
1988	1	14	0.29	0.30	0.118	-0.59	3	6	0.50	0.18	0.089	-0.02
1991	1	16	0.29	0.28	0.139	-0.47	7	10	0.44	0.43	0.117	-0.18
1994	9	12	0.28	0.30	0.191	-0.57	4	14	0.22	0.24	0.188	-0.65

Анализ приведенных в табл.3 результатов показывает, что разности (O-C) в RA возрастают от значений 0.082 в 1985 г. до 0.191 в 1994 г.; разности (O-C) в DE в основном отрицательны. Отметим факт, что разброс значений в RA и в DE примерно одинаков и составляет около 0.8" для 6 положений 1985 г. и около 1.2" для 9 положений 1994 г. Вряд ли причина в рефракции, зенитные расстояния при наблюдениях на Цейссе изменились за это время всего на 10 градусов, от 40° в 1985 г. до 50° в 1994 г.

Отметим, что средние (O-C) в RA по обоим телескопам достаточно близки, особенно в 90-е годы, однако в DE за 1988 и 1991 значения сильно разнятся. Результат в RA практически повторяет значение (O-C) полученное в 91-м году на телескопе Шмидта [2].

Следует отметить, что средняя разность (O-C) в RA по наблюдениям на Цейсс-400 в 1994 г. достигла $2.85 \pm 0.14''$, что даже больше того же значения для НА. В склонении среднее (O-C) равно $-0.57 \pm 0.13''$. Координаты Плутона с астрографа Цейсс-400 за 1985-1994 гг. по значениям (O-C) относительно DE200 подтвердили наличие положительно-го тренда в RA, обнаруженного ранее по наблюдениям на нормальном астрографе.

5. Заключение

Представлен каталог 331 положений Плутона в едином опорном каталоге UCAC3 ICRF J2000, полученные фотографическим путем на трех телескопах: пулковском Нормальном астрографе, латвийском телескопе системы Шмидта и Казанском телескопе Цейсс-400. Дополнительно даны 54 положения Плутона с НА, вычисленные по дифракционным спутникам опорных звезд.

Каталог содержит следующие данные: номер пластинки, юлианскую дату и всемирное время фотографирования, расстояние до планеты на момент наблюдения, экваториальные геоцентрические координаты Плутона, тип телескопа, на котором выполнено наблюдение и символный код или фамилия наблюдателя.

Литература

1. В.П. Рыльков, Плутон: положения 1930-1994 гг., новые элементы орбиты и анализ разностей (O-C), 1996, Известия ГАО в Пулкове, № 210, стр.52-67.
2. V.P. Ryl'kov, A.A. Dement'eva, A.K. Alksnis, J.I. Straume, Photographic observations of Pluto 1991-1994 with the Baldone Schmidt telescope, 1996, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 118, 105-110
3. Л.С. Королева, Н.М. Бронникова, Т.А. Васильева, В.П. Рыльков, Фотографические положения Плутона за 1971-1986 г. по наблюдениям на нормальном астрографе в Пулкове, 1989, Известия ГАО в Пулкове, 206, с.28-30.
4. V.P. Ryl'kov, V.V. Vityazev, A.A. Dement'eva, 1993, Pluto: Analysis of Photographic Positions Obtained with Pulkovo Normal Astrograph in 1930-1992, Astron. and Astrophys. Trans., 1995, v.6, pp.265-281
5. В.П. Рыльков, Определение коэффициента радиальной дисторсии для телескопа системы Шмидта в Балдоне, 1993, Кинематика Физика Небесных Тел (КФНТ), 6, № 4, с.86-94

PLUTO: THE POSITIONS OF PLUTO, OBTAINED AT PULKOVO FOR 1930-1996

Ryl'kov V.P.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

The observational program for Pluto, started in March 1930, is finished at Pulkovo because of the Pluto's movement to southern hemisphere. The series of 231 coordinates 1930-1994 obtained with Pulkovo Normal Astrograph are presented as catalogue of Pluto positions. The results of 94 observations of Pluto with Baldone Schmidt telescope and Kazan telescope Zeiss-400 AOE are presented. All results are given in united reference system of catalogue UCAC3 ICRF.

НОВЫЕ СЕМЕЙСТВА АСТЕРОИДОВ (522) HELGA и (1390) ABASTUMANI

Смирнов С.С.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

smi@gao.spb.ru

*Посвящается памяти
О.А. Мельникова и Р.И. Киладзе*

С помощью программного пакета ЭПОС по авторской методике преобразования орбитальных элементов обнаружены и исследованы кластеры астероидов в окрестности соизмеримостей со средним движением Юпитера 12 : 7 и 13 : 7. К первому из них кроме крупного астероида (522) Helga отнесено еще 16 объектов. Второе семейство возглавляет (1390) Abastumani. Среди 9 его членов выделяются две пары астероидов с исключительно близкими по величине и характеру эволюции элементами орбит.

В 1980-х годах были известны лишь самые крупные объекты внешней части Главного пояса астероидов, объединявшиеся в группу Кибелы. К 2012 г. здесь уже известно более 3000 астероидов. Среди них нам ранее удалось уточнить состав семейства (87) Sylvia и выделить целый ряд новых динамических кластеров Sylvia-Outsiders, (909) Ulla, (3092) Herodotus [1].

В данной работе рассматривались объекты в окрестности соизмеримостей со средним движением Юпитера 12 : 7 и 13 : 7.

Семейство (522) Helga

Вблизи резонанса 12 : 7 почти целое столетие был известен единственный астероид Helga. Выделим на первом этапе астероиды, соседствующие с Хельгой в области фазового пространства элементов орбит по среднему движению 500 - 525" в сутки и по наклонению 0 - 10°. При этом с помощью специального блока программного пакета ЭПОС перейдем от наклона к эклиптике к наклону к плоскости симметрии орбит для данной зоны. В данном случае это соответствует повороту на Эйлеровы углы 100° и 1.18°.

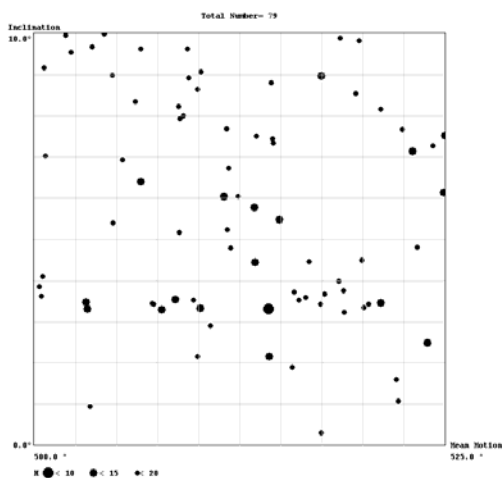


Рис. 1. Распределение известных астероидов в фазовой плоскости элементов орбит **большая полуось а – собственный наклон I.**

В этой области при выделении групп астероидов определяющим оказывается близость наклонов орбит к некоторой усредненной плоскости, которая повернута к эклип-

тике именно на искомые Эйлеровы углы. Такие значения наклонов можно трактовать как квазисобственные наклоны орбит.

На рис. 1 показано распределение всех известных на 20 сентября 2012 г. астероидов в фазовой плоскости *большая полуось a – собственный наклон I*.

Из 79 астероидов в интервале *a (500 - 525")*, *I (0 - 10°)* для дальнейшего анализа были выделены 19 астероидов с наклоном от 3 до 4°. Рассмотрение эксцентриситетов их орбит позволило исключить астероиды со значительными отклонениями *E* или *I* от средних. В табл. 1 отброшенные объекты внесены курсивом.

Таблица 1. Состав семейства Helga.

<i>Name</i>	<i>Inc</i>	<i>Ecc</i>	<i>q</i>	<i>a</i>	<i>H</i>
Helga	3.309	0.03346	3.34834	3.62367	8.90
Witsen	3.347	0.05112	3.59034	3.64285	12.30
Tigris	3.337	0.02092	3.56361	3.67339	11.90
2000 SS57	3.327	0.04382	3.32260	3.65525	14.40
2001 XT141	3.550	0.03957	3.33301	3.64602	15.30
2000 BY12	3.543	0.03880	3.30632	3.62285	15.70
2009 QA13	3.469	0.04104	3.47114	3.65713	15.50
2008 RH108	3.383	0.05683	3.27315	3.59718	15.70
2008 EU158	3.663	0.04942	3.28424	3.61527	15.80
2010 VJ93	3.749	0.05441	3.33527	3.60234	15.80
2002 MD7	3.478	0.05017	3.30349	3.59326	14.90
2009 WQ35	3.590	0.05261	3.57752	3.64948	15.40
2003 SP333	3.437	0.03106	3.35477	3.61061	16.73
2004 RQ350	3.462	0.05950	3.28398	3.64901	17.02
2007 TL24	3.620	0.05159	3.25213	3.61417	15.94
2009 SW46	3.749	0.04059	3.30174	3.61585	15.87
2011 AW10	3.217	0.05013	3.46213	3.60193	15.81
<i>2009 UN13</i>	<i>3.881</i>	<i>0.03464</i>	<i>3.56507</i>	<i>3.68998</i>	<i>15.75</i>
<i>2011 WD22</i>	<i>3.451</i>	<i>0.08270</i>	<i>3.16176</i>	<i>3.59928</i>	<i>15.99</i>

На фазовой плоскости эксцентриситет *E* – наклон *I* четко выделяется плотный кластер астероидов, в который вошли крупные объекты (522) Helga, поперечник которой оценивается в 100 км, (10653) Witsen – 13,8 км и (13096) Tigris – 16,6 км (рис. 2).

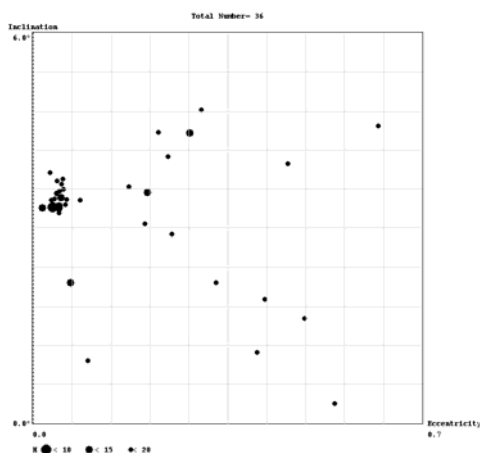


Рис. 2. Семейство Helga (сгущение из 20 точек слева) на фазовой плоскости квазисобственных элементов *E – I*. Всего в интервалах *E* (0 – 0,7) и *I* (0 - 6°) из выборки по *n* (500 -525") попало 36 астероидов.

Далее был рассмотрен характер динамической эволюции элементов орбит в обнаруженном семействе на интервале 6000 лет. Хотя полный период вариации эксцентри-

ситета и угловых элементов несколько длиннее этого промежутка времени, это не мешает уверенно проследить перекрытие диапазона изменений на графиках, построенных для разных членов семейства (рис. 3 и 4).

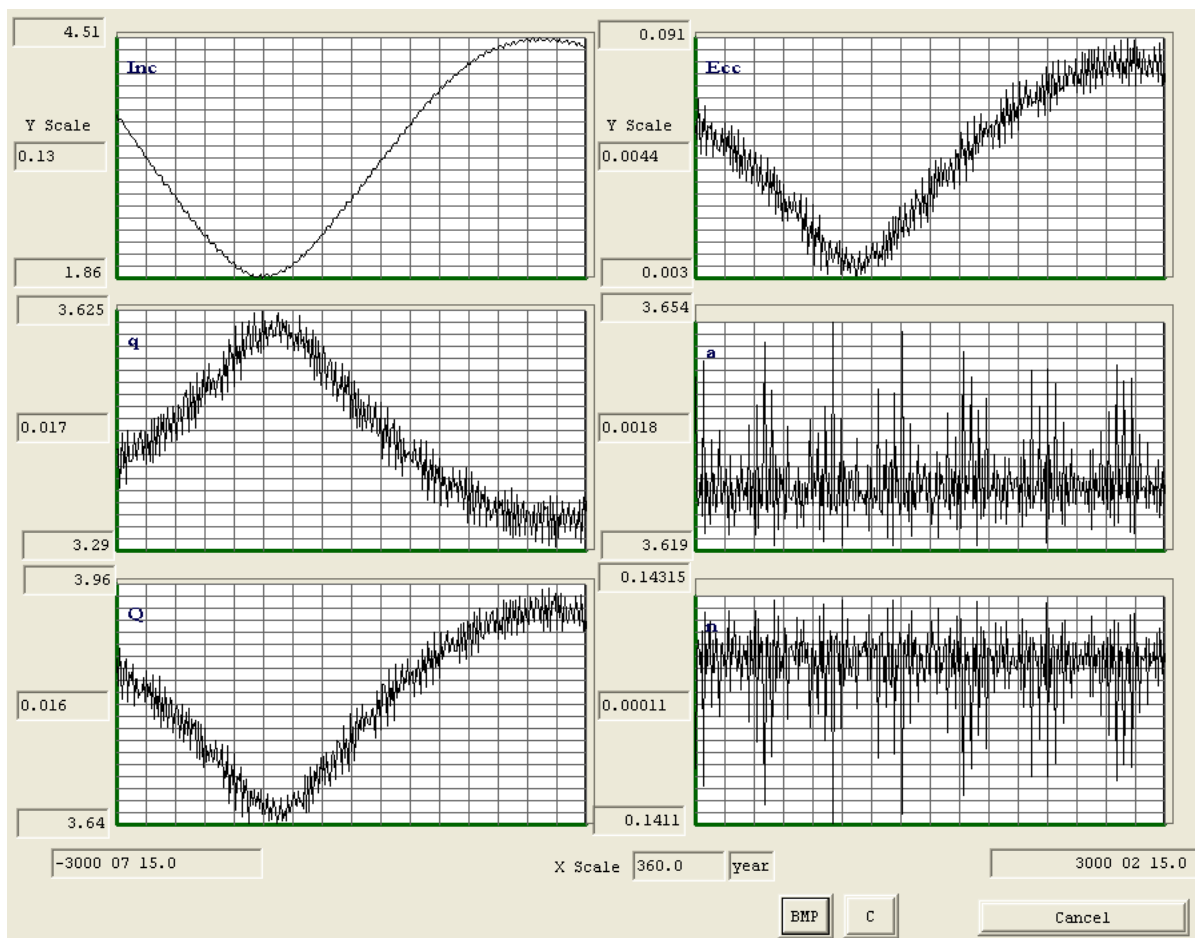


Рис. 3. Эволюция элементов орбиты астероида Helga на интервале времени от 3000 г. до н.э. до 3000 г.

У всех астероидов семейства долгота перигелия изменяется в режиме либрации в пределах 30° от перигелия орбиты Юпитера. Более значительные изменения долготы происходят, когда в процессе эволюции эксцентриситет оказывается близок к 0.

Средние значения элементов орбит семейства Helga:

$$a = 3.628 \text{ а.е.}$$

$$I = 3.185^\circ$$

$$E = 0.047$$

Динамическая устойчивость семейства, видимо, связана с резонансом 12 : 7 со средним движением Юпитера. Отметим и соизмеримость с движением Паллады 2 : 3. Таким образом, Helga и ее семейство являются важным элементом в многоярусной системе резонансов средних движений в Солнечной системе:

УРАН - ЮПИТЕР – ХЕЛЬГА – ПАЛЛАДА – МАРС – ЗЕМЛЯ – ВЕНЕРА
 1 7 12 18 44 83 135

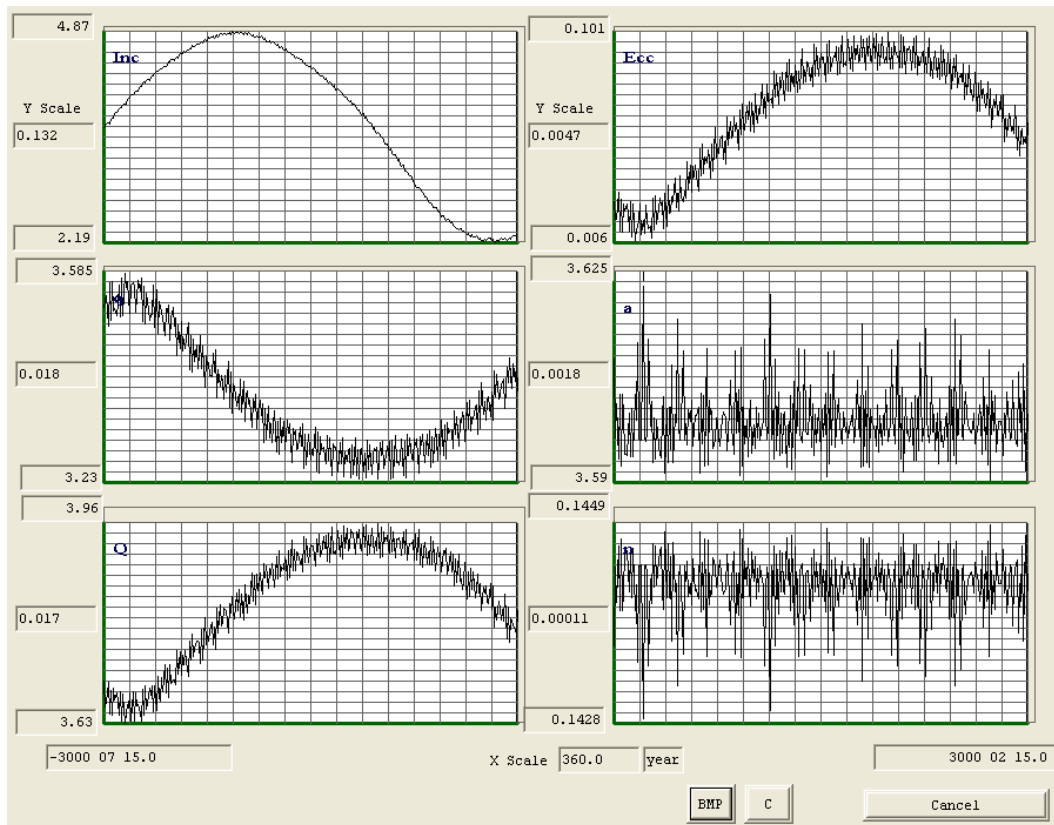


Рис. 4. Эволюция элементов орбиты астероида 2008 RH108.

Семейство (1390) Abastumani

Аналогичным образом был выделен кластер астероидов с высоким наклоном орбит и явным лидером по размеру **Abastumani**, диаметр которого оценивается в 100 км. Все остальные 8 членов открытого динамического семейства имеют размеры в несколько километров, и были обнаружены лишь в XXI веке.

В семействе обнаруживается удивительная близость значений орбитальных элементов для трех астероидов **Abastumani** – **2001 TC253** – **2007 TA60**, а также для пары **2005 YU95** - **2006 AA71**. Табл. 2 содержит больше столбцов по сравнению с табл. 1, чтобы дать возможность увидеть эту особенность.

Таблица 2. Состав семейства (1390) Abastumani.

<i>Name</i>	<i>Anm</i>	<i>Prh</i>	<i>Node</i>	<i>Inc</i>	<i>Ecc</i>	<i>a</i>	<i>H</i>
Abastumani	10.849	337.381	26.152	19.628	0.02922	3.43635	9.40
2002 UT16	213.667	281.678	80.254	19.589	0.05538	3.43566	14.30
2003 UZ276	120.479	157.389	235.416	19.485	0.03058	3.43449	14.90
2001 TC253	229.871	348.925	28.118	19.706	0.04007	3.42832	16.00
<i>2005 YU95</i>	<i>90.256</i>	<i>66.744</i>	<i>304.049</i>	<i>19.515</i>	0.04461	3.43577	14.95
2006 AQ42	101.921	236.380	134.090	19.574	0.02474	3.43134	15.97
<i>2006 AA71</i>	<i>105.053</i>	<i>62.735</i>	<i>306.539</i>	<i>19.539</i>	0.02037	3.43325	15.93
2006 SQ293	323.927	352.707	357.341	19.659	0.04978	3.43103	16.43
2007 TA60	235.220	25.001	27.494	19.593	0.07214	3.43999	15.16

На первый взгляд рисунки 5 и 6 совпадают, и один из них напечатан ошибочно. Но это не так! Это с трудом различимые картины сходной динамической эволюции орбит крупного астероида **Abastumani** и небольшого астероида **2001 TC253**.

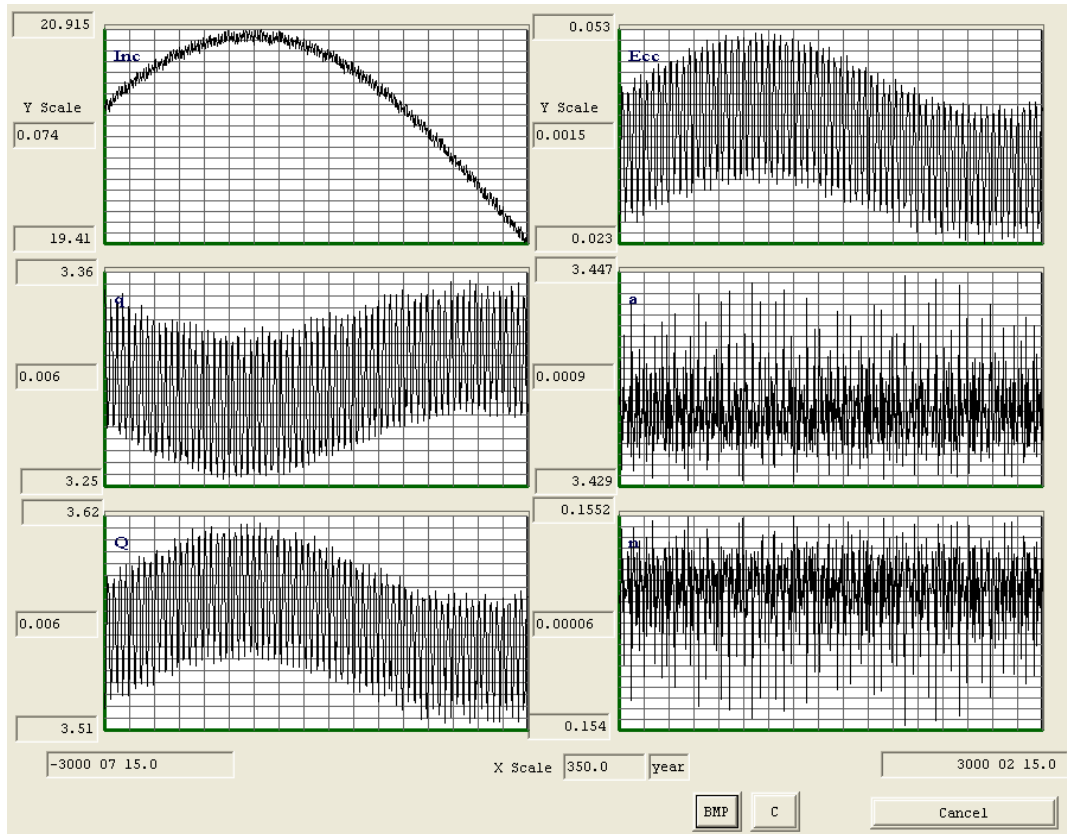


Рис. 5. Эволюция элементов орбиты астероида Abastumani.

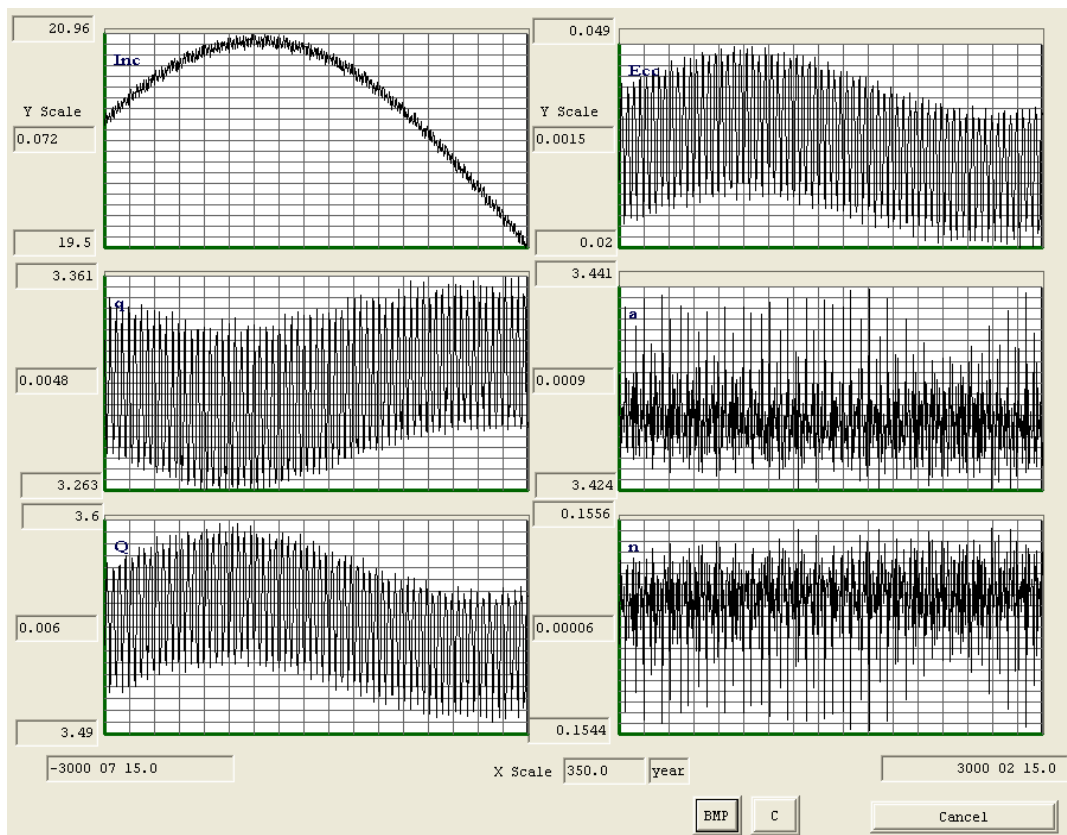


Рис. 6. Эволюция элементов орбиты астероида 2001 TC253 практически совпадает с рис. 5.

Не менее интересна пара 2005 YU95 - 2006 AA7. Рис. 7 хорошо показывает резонансный характер движения членов нового семейства. В центре координат Юпитер, а треки астероидов охватывают период 83 года. Итак, и Abastumani с семейством оказывается встроенным в многоярусный каскад резонансов Солнечной системы, упомянутый выше!

**83 года (обращения вокруг Солнца) Земли = 13 обращений Абастумани =
= 7 обращений Юпитера = 6 соединений Юпитера и Абастумани**

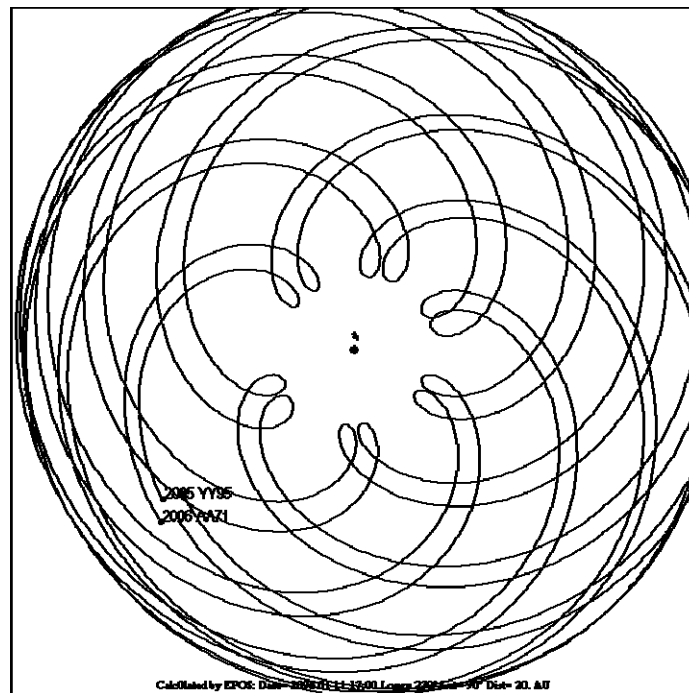


Рис. 7. Роза эпициклов астероидов 2005 YU95 и 2006 AA71 относительно Юпитера за 83 года.

Автор благодарит С.Д. Цекмейстер и В.Н. Львова за помощь, полезное обсуждение и программное обеспечение работы.

Литература

1. *Смирнов С.С.* Новые семейства астероидов во внешней части Главного пояса вблизи соизмеримости 9:5. // Известия ГАО № 218, СПб, 2006.

НАБЛЮДЕНИЯ, ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

**Соков Е.Н., Верещагина И.А., Девяткин А. В., Гнедин Ю. Н.,
Мартюшева А.А., Петрова С.Н.**

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе представлены полученные на основе наблюдательных данных изменения моментов средин транзитов для экзопланет Qatar-1b, WASP-12b и WASP-11b/HAT-P-10b. Проведен частотный анализ полученных рядов данных с помощью метода CLEAN и метода Скаргла, в результате которого сделаны оценки периодов изменения моментов средин транзитов для данных экзопланет. Кроме того, для экзопланеты Qatar-1b был уточнен период орбитального движения вокруг родительской звезды и ее радиус.

Введение

Задача обнаружения и изучения экзопланет представляет огромный научный интерес с точки зрения понимания происхождения и эволюции планетных систем. До недавнего времени было неизвестно является ли Солнечная система уникальной во Вселенной, а однозначного представления об её происхождении нет до сих пор. С обнаружением первых экзопланет, наконец, появилась возможность взглянуть на эволюцию планетных систем со стороны, и, таким образом, построить общую теорию происхождения и эволюции планетных систем у звезд различных классов. Данный вопрос становится еще интереснее в связи с тем, что первые же обнаруженные планетные системы у других звезд показали сильное отличие по своей структуре от Солнечной системы. В частности, планеты-гиганты типа Юпитера, как правило, обнаруживаются на очень близких расстояниях от звезды, в то время как в Солнечной системе дело обстоит как раз наоборот.

С момента обнаружения первых экзопланет прошло уже более двадцати лет. Первые методы поиска таких редких на тот момент объектов имеют названия «Метод лучевых скоростей», «Метод временной задержки у пульсаров». Долгое время исключительно только этими методами открывали все новые и новые экзопланеты.

В 2000 году после подтверждения существования планеты у звезды HD209458 методом определения лучевых скоростей телескопом Хаббл были обнаружены регулярные изменения блеска у этой звезды, которые, как было доказано в дальнейшем, были обусловлены прохождением планеты по диску звезды и вследствие этого - уменьшением на 1.5 процента яркости звезды [1]. С появлением этой экзопланеты появился и новый метод поиска экзопланет, который получил название «Транзитный метод». В последующие годы этот метод стал активно развиваться, ввиду простоты получения наблюдательных данных даже с использованием телескопов сравнительно небольших апертур.

С накоплением наблюдательных данных для подтвержденных экзопланет, полученных транзитным методом за более чем десятилетний период развития этого метода, становится возможным прослеживать характер изменения во времени параметров, получаемых из наблюдений. К числу таких параметров относятся: моменты начала, середины и конца транзитов, продолжительность транзитов, глубина падения блеска в момент прохождения планеты по диску звезды и угол наклона орбиты экзопланеты.

В 2005 году в работе [2] впервые были представлены теоретические расчёты возмущающего влияния невидимого объекта на движение по своей орбите наблюдаемой экзопланеты. Данный метод получил название «Method of Transit Timing Variations (TTVs)». На тот момент ещё не представлялось возможным применить этот метод на

имеющемся наблюдательном материале. Но, с появлением таких проектов, как «Kepler», а также с накоплением наблюдательных данных на достаточном интервале времени, только сейчас стало возможным применять этот метод на практике для реальных планетных систем. Впервые этим методом была открыта планета KOI 872c [3]. Также есть еще несколько работ, в которых на основе данного метода предполагается существование других, новых планет [4,5].

В 2009 году в работах [6,7] был предложен новый модифицированный метод «Transit Duration Variation (TDV)», основанный на методе «Method of Transit Timing Variations (TTVs)», благодаря которому авторы предлагают проводить оценки возможного существования экзопланет в изучаемых планетных системах. Такая техника ещё только находится в стадии развития.

С появлением и развитием подобных методов, на основе анализа накопленного наблюдательного материала для транзитных экзопланет появляется возможность обнаруживать новые экзопланеты, а также экзопланеты.

Методы исследования

Для исследования накопленного наблюдательного материала для ряда экзопланет использовались наблюдения, полученные авторами данной работы на телескопах 3А-320М и МТМ-500М [8], а также наблюдения других авторов, доступные в базе данных Чешского астрономического сообщества <http://var2.astro.cz/ETD>. Наблюдения выбирались с таким расчетом, чтобы полученная кривая падения блеска звезды при транзите экзопланеты позволяла определять момент середины транзита с точностью не хуже 0.8 минут. Таким образом, были получены ряды данных для моментов середин транзитов, а также их продолжительности и глубины падения блеска для экзопланет Qatar-1b, WASP-12b, WASP-11b/HAT-P-10b. Для этих экзопланет полученные ряды данных для моментов середин транзитов проявляли заметное изменение со временем.

Полученные ряды данных были исследованы на предмет наличия периодичностей с помощью двух разных методов частотного анализа – метода CLEAN и метода Скаргла [9].

Результаты исследований: экзопланета Qatar-1b

Для экзопланеты Qatar-1b был накоплен ряд наблюдений ее транзитов продолжительностью около двух лет. При этом обнаружилось, что моменты середин транзитов данной экзопланеты заметно меняются со временем. На рисунке 1 показан ряд О-С для моментов середин транзитов экзопланеты Qatar-1b, т.е. разность теоретически предсказанных моментов середин транзитов и моментов середин транзитов, полученных из наблюдений. Прежде всего, заметен существенный линейный тренд, который вероятнее всего связан с изначально неточно определенным периодом обращения экзопланеты Qatar-1b вокруг родительской звезды. На рисунке 1 показано уравнение для полученного линейного тренда. С его помощью в рамках настоящей работы был уточнен период орбитального движения Qatar-1b и внесена соответствующая поправка в исходные данные. Таким образом, определенный в данной работе период обращения экзопланеты Qatar-1b вокруг родительской звезды равен 1.4200250 ± 0.0000003 суток. Прежний период оценивался как 1.420033 дня.

Помимо линейного тренда, вызванного неточным периодом обращения экзопланеты, данные О-С также показывают заметные вариации, которые, возможно, имеют периодический характер. Для того чтобы выяснить характер этих вариаций, был проведен частотный анализ данного ряда с помощью двух методов – метода CLEAN и метода Скаргла. В результате был надежно выявлен период, присутствующий в данных для моментов середин транзитов, равный 127.3 дня. Но, помимо него, также было обнару-

жено еще три периода, которые превысили порог 99-процентной вероятности, равных 44, 56.6 и 52 дня соответственно. Определение первого периода в 127.3 дня является максимально достоверным. Что касается остальных трех периодов, то их достоверность стоит проверить на последующих наблюдательных данных, поскольку они достаточно короткие, а промежуток между соседними наблюдательными данными достаточно велик, чтобы однозначно сказать, насколько полученные периоды реальны и точны. Однако восстановленный ряд с помощью полученных периодов гораздо лучше вписывается в наблюдательные данные, если учесть все четыре периода. На рисунке 2 показан восстановленный ряд с использованием одного периода в 127.3 дня, на рисунке 3 – восстановленный ряд с использованием всех четырех периодов.

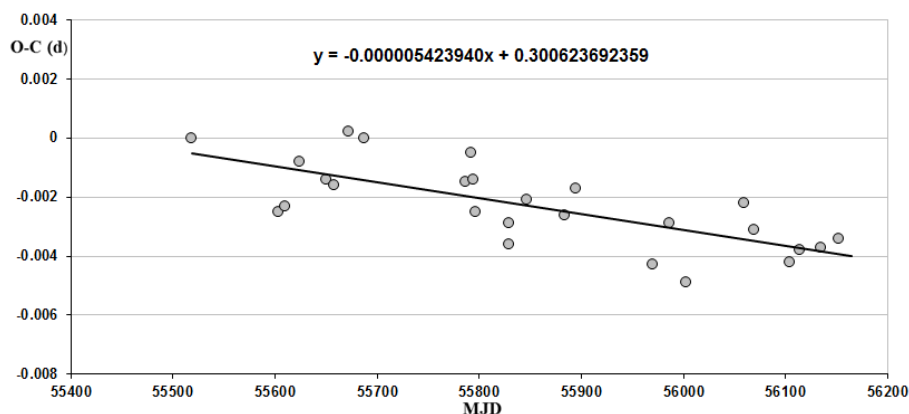


Рис. 1.

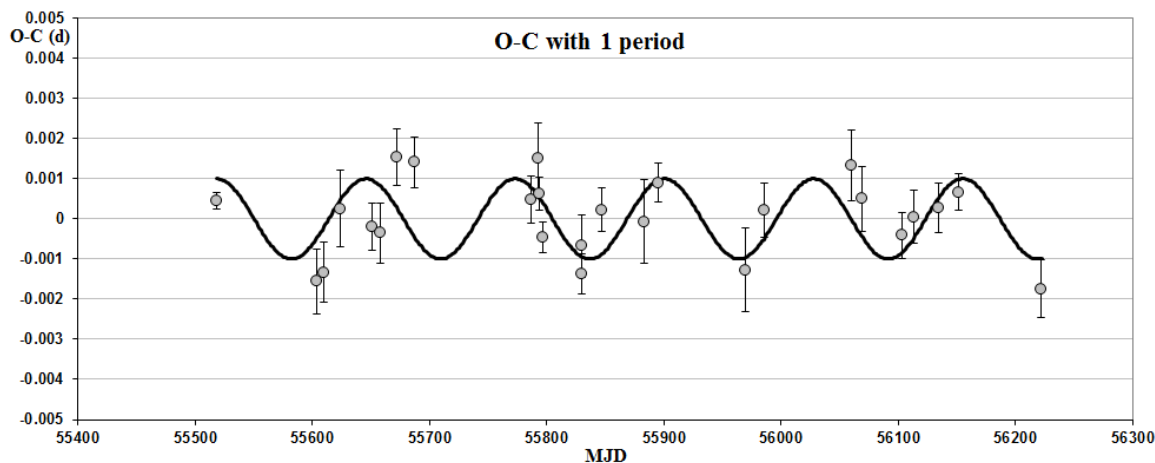


Рис. 2.

Кроме ряда данных O-C для моментов середин транзитов частотный анализ был также проведен и для рядов данных продолжительности транзитов и глубины падения блеска при транзите. Полученные ряды данных также показали присутствие четырех периодов, схожих с полученными периодами для O-C. Однако точность данных для ряда глубины падения блеска при транзитах не позволяет делать какие-либо окончательные выводы.

Что касается радиуса экзопланеты Qatar-1b, то его прежнее значение считалось равным 1.164 ± 0.05 радиусов Юпитера. Данная оценка была получена на основе первых наблюдений транзитов данной экзопланеты. Однако, на основе двухлетнего ряда накопленных наблюдений транзитов с учетом того, что глубина падения блеска периодиче-

ски изменяется со временем, радиус данной экзопланеты нельзя определить точно. В рамках настоящей работы было определено среднее значение радиуса экзопланеты Qatar-1b на основе двухлетнего ряда наблюдений ее транзитов. Таким образом, величина радиуса составила 1.22 радиуса Юпитера. Данное значение колеблется в пределах ± 0.44 радиусов Юпитера.

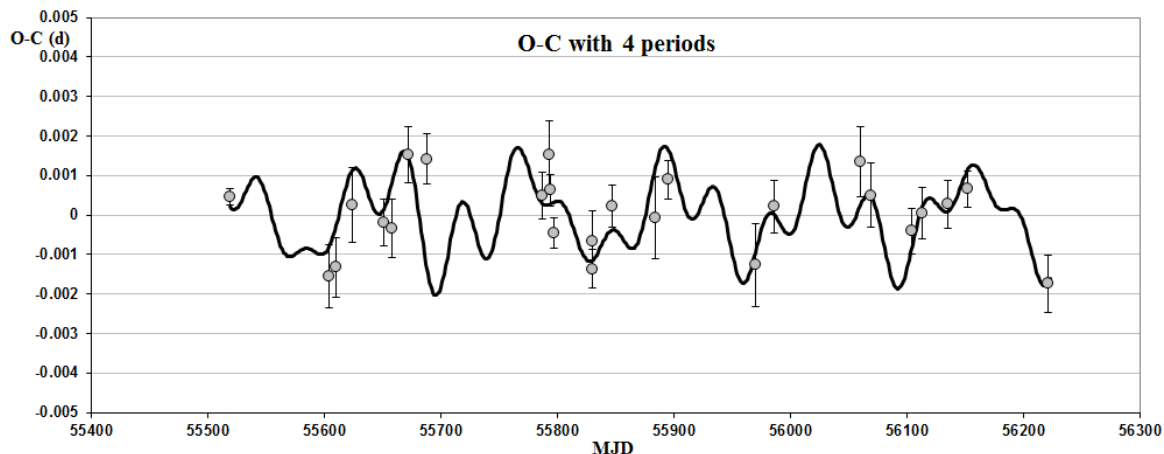


Рис. 3.

Исходя из всех расчетов, можно предположить, что в рядах данных О-С для моментов середин транзитов, продолжительности транзитов и глубины падения блеска присутствуют периодические изменения. Данные изменения могут быть вызваны возмущениями орбиты экзопланеты Qatar-1b третьим телом, присутствующим в системе, в частности, другой планетой Qatar-1c. В ближайшем будущем планируется получить оценки массы и параметров орбиты возможной планеты, вызывающей соответствующие возмущения орбиты Qatar-1b.

Результаты исследований: экзопланета WASP-12b

Продолжительность ряда наблюдений транзитов экзопланеты WASP-12b составляет четыре года. К сожалению, условия видимости данной экзопланеты не позволяют наблюдать ее транзиты регулярно. Существуют интервалы, когда ее наблюдать невозможно, длительность которых составляет несколько месяцев. Однако, несмотря на это, полученный ряд О-С для моментов середины транзитов показывает их изменение со временем, носящее долгопериодический характер.

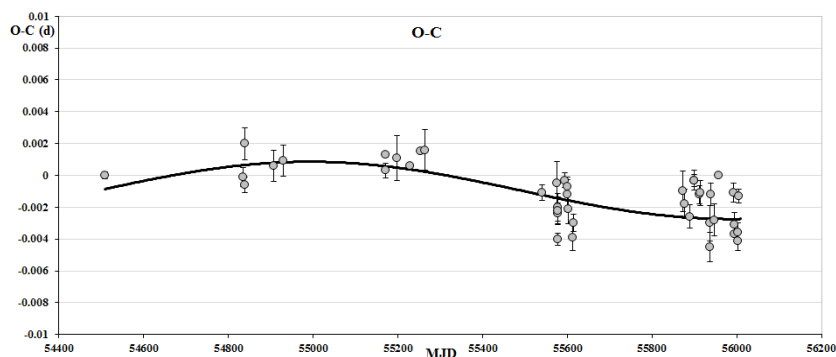


Рис. 4.

Для анализа данного ряда был также проведен частотный анализ двумя методами CLEAN и Скаргла. Оба метода уверенно выделили период изменения моментов сере-

дин транзитов равный 1991.5 суток. Амплитуда данного изменения составляет 2.5. минуты, т.е. диапазон изменения О-С составляет $\delta t = 5$ минут при точности наблюдений в 0.8 минут. Полученный результат можно видеть на рисунке 4, где приведен восстановленный ряд для периода 1991.5 дня (5.5 лет) в сравнении с исходными наблюдательными данными для моментов середины транзита О-С.

Отсутствие периодических изменений в данных для продолжительности транзита и глубины падения блеска, скорее всего, может говорить о том, что изменения имеют амплитуду, которая находится ниже точности наблюдательных данных, используемых для анализа. Для оценки величин таких изменений планируется также провести моделирование и рассчитать возможную массу и орбиту планеты, которая, возможна, возмущает орбиту планеты WASP-12b.

Результаты исследований: экзопланета WASP-11b/НАТ-P-10b

Продолжительность наблюдений транзитов экзопланеты WASP-11b/НАТ-P-10b составляет около 3.5 лет. Для нее также выявлены долгопериодические изменения О-С для середин моментов транзитов. Кроме того, методы частотного анализа также выявили изменения блеска для рядов глубины падения блеска и продолжительности транзитов. Период, полученный для всех трех рядов данных, одинаков и составляет 1430 дней (3.9 года).

На рисунке 5 приведен восстановленный на основе полученного периода ряд данных для моментов середины транзита. На рисунке 6 приведен восстановленный ряд с использованием полученного периода для продолжительности транзита.

Полученные результаты могут говорить о том, что в данной планетной системе может существовать другая планета, которая оказывает возмущающее влияние на орбиту экзопланеты WASP-11b/НАТ-P-10b.

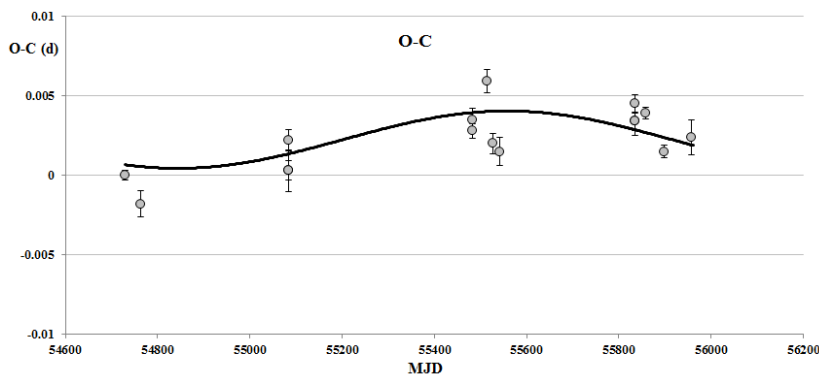


Рис. 5.

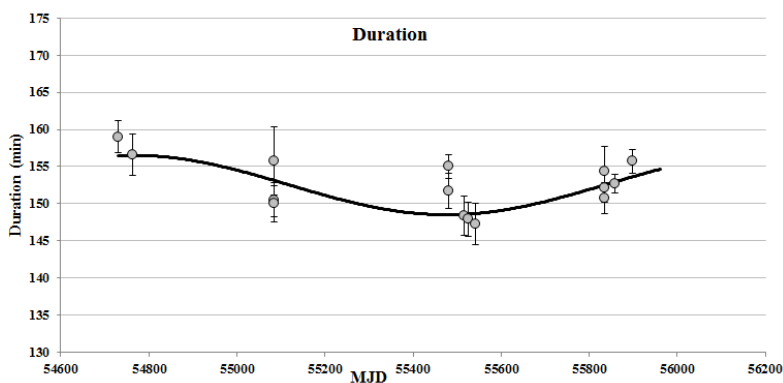


Рис. 6.

Заключение

В рамках настоящей работы было выявлено и доказано с помощью частотного анализа существование изменений моментов средин транзитов со временем для экзопланет Qatar-1b, WASP-12b, WASP-11b/HAT-P-10b. Данные изменения могут свидетельствовать о том, что в системах с данными экзопланетами могут существовать другие тела, в частности, другие планеты, которые оказывают возмущающее воздействие на орбиты исследуемых экзопланет.

Кроме того, для экзопланет Qatar-1b и WASP-11b/HAT-P-10b были также выявлены периодические изменения в рядах продолжительности транзитов и глубины падения блеска, что может являться дополнительным подтверждением того, что орбиты исследуемых экзопланет изменяются со временем под воздействием возмущающего тела.

Полученные результаты требуют дальнейшего анализа с целью получения оценок масс и определения орбит возможных возмущающих планет в данных планетных системах.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. *Charbonneau et al.*, 2000, "Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star". *The Astrophysical Journal Letters* 529 (1), pp.L45–L48
2. *Eric Agol et al.*, 2005, "On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits", *MNRAS*, Vol. 359, pp. 567-579
3. *David Nesvorný et al.*, 2012, "The Detection and Characterization of a Nontransiting Planet by Transit Timing Variations", *Science*, Vol. 336 no. 6085 pp. 1133-1136
4. *Sarah Ballard et al.*, 2011, "The Kepler-19 System: a transiting 2.2 Rearth planet and a second planet detected via transit timing variations", *ApJ*, Vol. 743, Issue 2, article id. 200
5. *R. Alonso et al.*, 2008, "Limits to the planet candidate GJ 436c", *A&A*, Vol. 487, L5-L8
6. *David M. Kipping*, 2009, "Transit Timing effects due to an exomoon-I", *MNRAS*, Volume 392, Issue 1, pp. 181-189.
7. *David M. Kipping*, 2009, "Transit Timing effects due to an exomoon-II", *MNRAS*, Volume 396, Issue 3, pp. 1797-1804
8. *Девяткин А.В., Кулиш А.П., Шумахер А.В., Верещагина И.А., Курприянов В.В., Бехтева А.С.* "Оптический датчик угла положения автоматизированного телескопа ЗА-320М Пулковской обсерватории", *Оптический журнал*, том 75, №1, 2008, с. 73-79.
9. *Витязев В.В.* "Анализ неравномерных временных рядов". Издательство С.-Петербургского университета, 2001, 67 с.
10. *Scargle J.D.* "Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data", *Ap.J.*, 263, 1982, p. 835-853.

INVESTIGATION OF EXOPLANET TIME TRANSIT VARIATIONS (TTV METHOD) BASED ON PHOTOMETRICAL OBSERVATIONS

Sokov E.N., Vereshchagina I.A., Devyatkin A.V., Gnedin Yu.N., Martyusheva A.A., Petrova S.N.
Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, Saint-Petersburg

In the present work variations of the mid moments of transits are derived for Qatar-1b, WASP-12b и WASP-11b/HAT-P-10b exoplanets based on observation data. Frequency analysis of obtained data series with the use CLEAN and Scargle methods were made, after that estimates of periods of variations of the mid moments of transits were made. Beside this, for Qatar-1b exoplanet the orbital period and its radius were refined.

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

Тимошкова Е.И.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Известно, что все последние годы наблюдается многократный количественный рост популяции астероидов и комет, сближающихся с Землей за счет вновь открываемых объектов. В связи с этим одной из важнейших тем многих исследований является проблема "астероидной опасности". В данной работе методами численного интегрирования исследуются особенности движения небольшой группы потенциально опасных астероидов, которые в настоящее время имеют сближения с орбитой Земли на расстояния меньше 0.014 а.е. В качестве основных изучаемых параметров рассматриваются оскулирующие элементы орбиты и минимальное расстояние между орбитами Земли и астероида (MOID). Здесь будут представлены предварительные результаты сравнительного изучения орбитальной эволюции группы из 15 потенциально опасных астероидов на временном интервале в 10 тысяч лет.

1. Постановка задачи

Потенциально опасными для Земли объектами принято считать астероиды и кометы, орбиты которых в принятую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний меньших или равных 0.05 а.е. [1]. Все потенциально опасные астероиды (ПОА), очевидно, принадлежат к многочисленной популяции астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). В настоящее время общее число ПОА значительно превышает 1000 объектов. Значительная доля потенциально опасных астероидов - это малые тела размером в сотни или даже десятки метров. Постоянно обновляемый список ПОА содержится в электронной версии List of the Potentially Hazardous Asteroids (PHAs) [2]. Более подробная информация, включая анализ различных распределений в элементном пространстве для нумерованных ПОА имеется в нашей работе [3]. В данной работе методом численного интегрирования исследуются особенности движения группы из 15 нумерованных потенциально опасных астероидов (ПОА) на сравнительно небольших интервалах времени (от 10000 до 100 000 лет). Выбор этой группы астероидов был обусловлен главным образом тем обстоятельством, что в настоящее время их орбиты локализованы в узкой области изменения большой полуоси a , а минимальное расстояние между орбитами Земли и астероида (MOID) меньше 0.014 а.е. Выборка проводилась из числа всех нумерованных на начало 2011 года астероидов по двум параметрам:

$$0.85 \text{ а.е.} < a < 1.1 \text{ а.е.}, \quad \text{MOID} < 0.014 \text{ а.е.}$$

Таких астероидов из общего числа более 1000 нумерованных ПОА оказалось только 15. Если рассматривать нумерованные ПОА в указанной области больших полуосей с $\text{MOID} < 0.05 \text{ а.е.}$, то их уже будет 41 астероид.

Для каждого астероида была получена численная модель движения путем интегрирования системы дифференциальных уравнений движения в прямоугольных координатах с учетом возмущений от 8 больших планет и Плутона на временном интервале в 10 тысяч лет. Интегрирование выполнялось методом Эверхарта с переменным шагом. В качестве начальных данных интегрирования использовались значения оскулирующих элементов астероидов и больших планет, которые были взяты из "Эфемерид малых планет на 2011 год" [4]. В табл. 1 приведены значения оскулирующих элементов для 15 астероидов. Элементы относятся к эклиптике и равноденствию 2000.0 г., эпоха 2011, август 27.0. В первой колонке таблицы дается номер астероида, для оскулирующих

элементов используются стандартные обозначения. Значения угловых переменных всюду даются в градусах, а значения средних суточных движений n в град/сутки.

Таблица 1. Оскулирующие элементы для начального момента времени для группы из 15 астероидов.

N	a	e	I	ω	Ω	M
3362	0.989466	0.468635	9.3062	55.0185	152.4787	233.5535
4581	1.022444	0.357029	4.9135	255.2262	180.3655	316.2978
54509	1.005875	0.230132	1.5998	278.7519	278.3449	91.0255
65679	0.915281	0.264857	1.2917	15.0056	178.2520	190.3500
65909	1.091249	0.539832	3.5591	284.4286	108.6626	6.1988
68950	1.056652	0.344181	25.1545	255.5206	236.2632	20.2218
99942	0.922300	0.191076	3.3319	126.4244	204.4304	287.5826
138175	1.004826	0.293347	5.2421	280.8835	25.9147	32.4222
143649	1.085340	0.186967	62.1025	104.9776	1.0055	310.0842
153201	0.911335	0.780595	7.7768	213.6403	69.3199	181.7543
162120	1.087943	0.570869	2.1300	278.6943	217.9960	70.3208
163348	0.876446	0.434322	5.4155	222.2168	259.5564	199.9142
164207	1.001134	0.136274	13.6487	280.6762	38.7558	20.3461
171576	1.084258	0.583472	17.2968	255.2262	208.1800	245.7574
208023	0.933943	0.235711	6.5001	61.5319	327.1829	192.7044

Как видно из табл. 1, большинство астероидов (11 из 15) имеют орбиты с наклоном к плоскости эклиптики $i < 10^\circ$. Максимальное значение наклона чуть больше 62° наблюдается у орбиты астероида 143649 2003 QQ47. Один астероид имеет сильно вытянутую орбиту ($e > 0.7$), которая располагается почти в одной плоскости с орбитой Меркурия. Наименьшее значение $e=0.1362742$ имеет астероид 164207 2004 GU9. Следует заметить, что орбита этого астероида ближе всех других из 15 локализована в области резонанса 1/1 с Землей. Интересно также отметить, что 10 астероидов из 15 имеют значения аргумента перигелия в интервале $200^\circ < \omega < 310^\circ$ и только 2 астероида имеют значения ω во второй четверти. Это - астероид 99942 Апофис, который в 2029 г. пройдет на расстоянии примерно в 38000 км от центра Земли [5], и астероид 143649, у которого орбита имеет самый большой наклон к плоскости эклиптики ($i = 62^\circ.1$) из всех рассматриваемых 15 астероидов.

Таблица 2.

N	$EMOID$	$VMOID$	$r +$	$r -$	q	Q
3362	0.01343	0.08160	0.60864	1.05584	0.52577	1.45317
4581	0.00346	0.00569	0.98147	0.81767	0.74390	1.38749
54509	0.00043	0.07592	0.92038	0.98717	0.71380	1.23736
65679	0.01397	0.00366	0.67770	1.14365	0.67286	1.15770
65909	0.01292	0.01822	0.68156	0.89341	0.50216	1.68034
68950	0.00608	0.10491	1.01919	0.85767	0.69297	1.42033
99942	0.00021	0.06975	1.00235	0.79808	0.74607	1.09853
138175	0.00086	0.00908	0.87016	0.97221	0.71006	1.29959
143649	0.00285	0.26199	1.10058	0.999912	0.88242	1.28826
153201	0.00325	0.00990	1.01686	0.21579	0.19995	1.62272
162120	0.01205	0.01545	0.67513	0.80266	0.46687	1.70902
163348	0.00696	0.07622	1.04832	0.53805	0.49579	1.25711
164207	0.00083	0.17889	0.95835	1.00799	0.71252	1.26530
171576	0.00177	0.12411	0.55952	0.99066	0.45162	1.71689
208023	0.00577	0.01080	0.78796	1.00166	0.71380	1.15408

Для более полного анализа области начальных данных для рассматриваемой группы астероидов были вычислены еще несколько величин, которые представлены в табл. 2. Здесь в колонках *EMOID* и *VMOID* даны значения минимального расстояния между орбитами Земли и астероида, и между орбитами Венеры и астероида соответственно. Величины q и Q обозначают расстояние астероида от Солнца в перигелии и апоцентре, r^+ и r^- -гелиоцентрические расстояния в восходящем и нисходящем узлах орбиты.

Сравнивая две первые колонки этой таблицы, нетрудно видеть, что для многих из рассматриваемых астероидов возмущающее действие Венеры может быть сопоставимо с влиянием Земли. Из данных табл. 2 можно также заметить, что в девяти случаях из 15 значения $r^+ > r^-$, что соответствует значениям ω расположенным в первой и четвертой четвертях и в 6 случаях наоборот имеем $r^- < r^+$, тогда значения ω расположены во второй и третьей четвертях.

2. Описание численных моделей и их сравнительный анализ

В качестве основных изучаемых параметров рассматриваются шесть оскулирующих элементов орбиты: большая полуось, эксцентриситет, наклон к плоскости эклиптики, аргумент перигелия, долгота узла и средняя аномалия. Помимо этих элементов вычислялись гелиоцентрическое расстояние астероида r , и расстояния между астероидом и планетами земной группы rp с целью выявления близких сближений с этими планетами. Отмечались все сближения, когда $rp < 0.1$ а.е., соответствующие моменты времени, а также скорости астероида и планеты.

Из анализа всех полученных численных моделей движения на всем интервале интегрирования в 10000 лет следует, что орбитальная эволюция рассматриваемой группы астероидов отличается достаточным разнообразием, поскольку большинство астероидов с разной степенью периодичности испытывают сближения с планетами земной группы, особенно частые с Венерой.

Вместе с тем, если рассматривать некую общую картину эволюции всей группы, то можно выделить, условно говоря, три типа с характерными изменениями основных эволюционных параметров a , e , i .

Один тип – орбиты с начальными значениями $i > 10^\circ$. Это 4 астероида—68950 2002 QF15, 143649 2003 QQ47, 164207 2004 GU9 и 171576 1999 VP 11. Все они имеют в начальный момент времени значения $a > 1$ а.е. и на всем интервале интегрирования имеют достаточно регулярный характер изменения всех трех эволюционных параметров a , e , i . Здесь особо следует выделить астероид 164207 2004 GU9, орбита которого находится в области резонанса 1/1 с Землей практически на всем промежутке интегрирования в 10000 лет. На рис. 2. для астероида 164207 2004 GU9 представлены изменения трех оскулирующих элементов a , e , i в зависимости от времени на всем интервале интегрирования в 10000 лет. Полученные результаты хорошо согласуются с численным анализом орбитального движения этого астероида, который имеется в работе Т.Ю. Галушиной [6].

Другой тип эволюции в изучаемой группе представляет широко известный астероид 99942 Апофис. Здесь мы не будем останавливаться на описании его орбитальной эволюции, поскольку этой теме посвящено уже достаточно много работ (см., например [5, 7].) Для третьего типа эволюции характерной особенностью можно считать чередование с различной периодичностью серии сближений астероида с Землей и Венерой. Однако, как показал более детальный анализ вычисляемых при сближениях минимальных расстояний от соответствующих планет, для всех оставшихся 10 астероидов всегда $rp > 0.04$ а.е. на всем промежутке времени в 10000лет. Таким образом, сближений с Землей и Венерой до расстояний меньших 5.9 млн. км нет, тогда как радиус сферы

Хилла для Земли составляет примерно 1.5млн. км и 1 млн. км для Венеры. Поэтому вероятность столкновения с Землей исключается. Среди астероидов с этим типом эволюции на основе полученных численных моделей движения было проведено и более детальное изучение основных эволюционных параметров орбиты на всем интервале интегрирования. Поведение трех основных эволюционных параметров орбиты - большой полуоси, эксцентриситета и наклона к плоскости эклиптики - достаточно характерно для орбит, имеющих достаточно тесные сближения с внутренними планетами. А именно, здесь можно видеть хаотические изменения большой полуоси и сравнительно большие изменения в вариациях эксцентриситетов и наклонов. В отдельных случаях наблюдается синхронизация вариаций эксцентриситетов и наклонов или большой полуоси с эксцентриситетом.

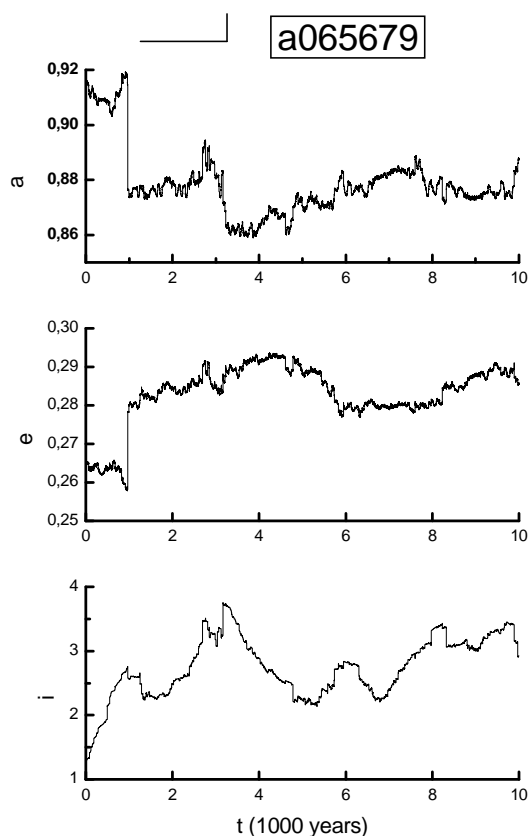


Рис. 1.

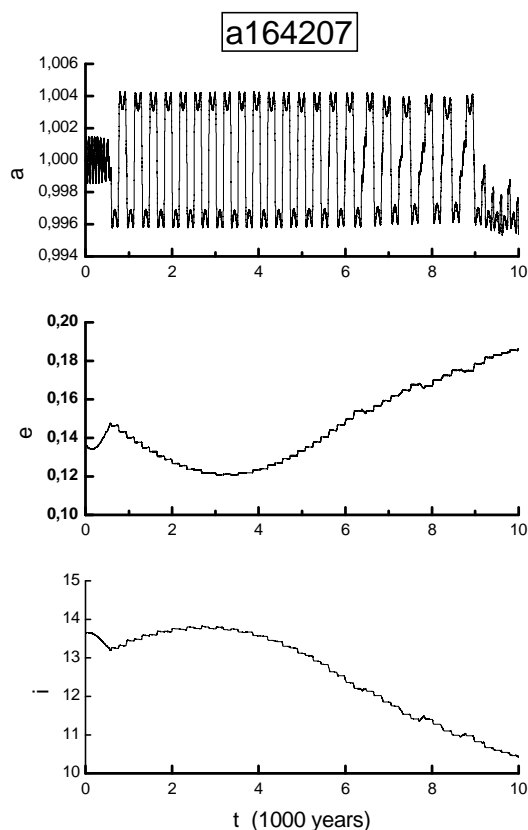


Рис. 2.

В качестве примеров разнообразного поведения орбитальных параметров на рис. 1-4 представлены изменения элементов a , e , i в зависимости от времени для астероидов 65679 1989 UQ, 164207 2004 GU9, 138175 2000 EE104 и 54509 Yorg на интервале интегрирования в 10000 лет.

Особо следует отметить, что ряд астероидов на отдельных промежутках времени оказывается на орбитах, расположенных в области резонансов низких порядков с Землей и Венерой. К ним относятся астероиды 4581 Asclepius, 54509 Yorg, 138175 2000 EE104 (резонанс 1/1 с Землей) и 656791989 UQ, 163348 2002 NN4 (резонанс 3/4 с Венерой), 208023 1999 AQ10 (вблизи резонанса 2/5 с Венерой). Интересный пример орбитальной эволюции дает астероид 153201 2000 NQ107.. Его орбита в начальный момент интегрирования находится почти в одной плоскости с Меркурием и имеет большой эксцентриситет. В процессе эволюции астероид имеет тесные сближения с Меркурием.

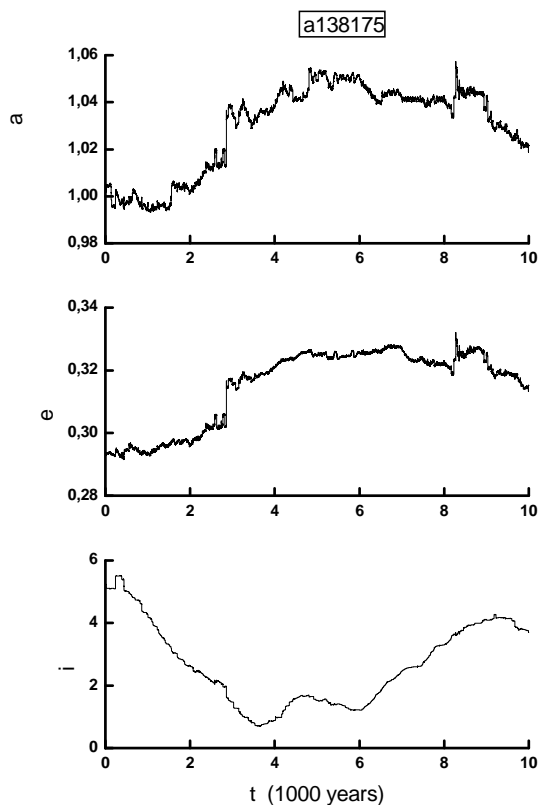


Рис. 3.

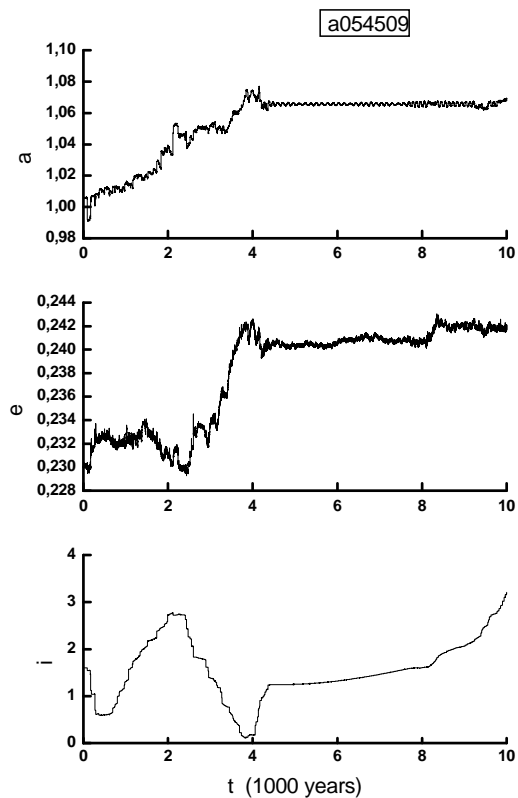


Рис. 4.

3. Заключение

Сравнительное изучение полученных численных моделей движения группы из 15 считающихся на начало 2011 года потенциально опасных астероидов позволяет выявить основные характерные особенности их движения. Вместе с тем, представленные результаты имеют предварительный характер, поскольку здесь мы не пытались в полной мере установить - какие факторы существенны для получения выделенных нами "типов эволюции". Предполагается выполнить такое исследование в дальнейшем. В заключение отметим, что движение отдельных астероидов из нашего списка в том или ином аспекте изучалось разными авторами. Как уже говорилось, много работ посвящено астероиду Апофис. Из других известных нам случаев отметим астероиды посвящено астероиду Апофис. Из других известных нам случаев отметим астероиды 3362 Khufu [8] и 164207 2004 GU9, движение которого изучалось в [6].

Литература

1. Виноградова Т.А. и др. Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Труды ИПА РАН. 2003. Вып. 9.
2. <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups>
3. Тимошкова Е.И. Динамические и статистические свойства потенциально опасных астероидов. Известия ГАО, 2009, вып.4., № 219, 323-328.
4. Эфемериды малых планет на 2011 год. Шор В. А. (ред.). СПб: Институт прикладной астрономии РАН, 2011.
5. Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Насколько точна орбита астероида (99942) Апофис и какова вероятность столкновения с ним в 2036-2037гг. Астрономический вестник, 2009, т.43, № 4, 358-347
6. Галушина Т.Ю. Перечень астероидов, сближающихся с Землей и движущихся в окрестности орбитальных резонансов низких порядков с внутренними планетами. Вестник ТГУ. Математика и механика. 2003а, № 4 (16), 61-69

7. Соколов Л.Л., Башаков А.А., Путьев Н.П. Особенности движения астероида 99942 Апофис. *Астрономический вестник*, 2008, т.42, № 1, 20-29
8. *Apostolos A. Christou Numerical Survey of Transient Co-orbitals of the Terrestrial Planets. Icarus*, 2000, 144, P.1-20.

PECULIARITIES OF THE MOTION OF SOME POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS

Timoshkova E.I.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

The Earth-crossing asteroids that have an absolute magnitude less than 22 and the minimum separation distance between their orbit and that of the Earth (MOID) less than 0.05 A.U. are catalogued as potentially hazardous asteroids (PHAs). In this paper we have investigated numerically the peculiarities of the motion of 15 potentially hazardous asteroids with MOID < 0.014 A.U. The osculating elements and the minimum orbital intersection distance (MOID) with the Earth of PHAs are the main parameters that have been analyzed in this paper. The orbital evolution of these asteroids is studied by the numerical integration over 100000 years when the perturbations from 8 major planets and Pluto. are taken into account. The behaviour of the osculating semi-major axis, the eccentricity and the inclination has been analyzed for all time of integration. Our analysis has demonstrated that the character of change of the main evolutionary parameters of 14 asteroids (with the exception of Apophis) could not be perturbed into a collisional trajectory within 10000 years.

МАССЫ РЯДА ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Исследованы факторы, влияющие на определяемые значения масс астероидов по оптическим наблюдениям других (возмущаемых) астероидов, а именно: 1) выбор возмущаемых астероидов; 2) работа с наблюдениями, которая включала выбор системы назначения весов в зависимости от эпохи наблюдения и/или от средней ошибки представления наблюдений отдельного возмущаемого астероида; 3) выбор динамической модели и интегрирование уравнений движения; 4) решение системы условных уравнений, которое выполнялось методом наименьших квадратов и методом регуляризации Тихонова. Выполнено тестирование на основе сравнения найденных нами масс кратных астероидов со значениями, полученными по наблюдениям спутников и имеющими высокую точность.

При использовании результатов тестирования найдены значения масс для 10-ти кратных астероидов и интервалы их возможных значений. Найдены также значения масс 14-ти астероидов, включенных в число определяемых параметров при построении эфемерид EPM2011, DE423, INPOP10a, значения которых определены по наблюдениям времени запаздывания радиосигналов от космических аппаратов. В пределах вероятных ошибок полученные нами значения согласуются с результатами, основанными на других типах наблюдений. Сделан вывод о том, что астрометрические наблюдения астероидов могут быть использованы для определения масс этих тел наряду с другими типами наблюдений.

1. Тестирование различных этапов работы

Имеется ряд трудностей, которые могут возникнуть при определении масс астероидов динамическим методом, когда в качестве тестовых частиц используются другие астероиды. К ним можно отнести относительно большие ошибки и/или нереальные значения определяемых масс. В настоящем исследовании мы поставили задачу протестировать на конкретном числовом материале различные особенности этой задачи и сравнить их результаты с результатами, полученными по наблюдениям спутников кратных астероидов и имеющими более высокую фактическую точность.

При использовании динамического метода можно выделить четыре этапа: 1) отбор возмущаемых астероидов; 2) работа с наблюдениями; 3) выбор динамической модели и интегрирование уравнений движения; 4) решение системы условных уравнений.

На первом этапе, который является наиболее ответственным, по оптическим наблюдениям каждого из возмущаемых астероидов, рассматривавшихся как тестовые частицы, определялась масса возмущающего астероида и уточнялись орбитальные параметры возмущаемого астероида. Оптические наблюдения возмущаемых астероидов выбирались из каталога Международного центра малых планет по состоянию на май 2012 г. По результатам этого этапа отбирались те возмущаемые астероиды, которые давали наименьшие ошибки определяемой массы возмущающего астероида. Этот критерий был предложен в работе [1] и является, с нашей точки зрения, наиболее объективной оценкой пригодности данного астероида для решения задачи. После этого проверялось, имеются ли тесные сближения у выбранного возмущаемого астероида с другими крупными астероидами. Если такие сближения есть, возмущаемый астероид не включался в общее решение или в его уравнения движения включались возмущения от этих астероидов. Окончательное значение массы получалось в результате общего решения относительно орбитальных элементов всех отобранных астероидов и искомого значения массы.

Работа с наблюдениями включает выбор системы назначения весов в зависимости от эпохи наблюдения и/или от средней ошибки представления наблюдений (ошибки единицы веса), полученной по наблюдениям отдельного возмущаемого астероида.

Численное интегрирование уравнений движения и уравнений в вариациях выполнялось методом Эверхарта 15-го порядка. Учитывались гравитационные возмущения от всех больших планет, Цереры, Паллады, Весты и 297 астероидов. Координаты больших планет вычислялись по эфемериде DE405. В модель также включались релятивистские возмущения от Солнца, возмущения от динамического сжатия Земли и Солнца, возмущения от светового давления. Уравнения движения 300 астероидов интегрировались совместно с уравнениями движения возмущаемого и возмущающего астероидов. Начальные значения орбитальных элементов для всех этих астероидов были взяты из Эфемерид малых планет на 2012, а значения масс – в соответствии с эфемеридой DE405. При редукции наблюдений учитывалось гравитационное отклонение света и поправка за эффект фазы. Была выполнена также редукция наблюдений, выполненных после середины 2001 г., за систематические ошибки звездных каталогов в соответствии с работой [3].

Ниже показано, как влияют на определяемые значения масс астероидов перечисленные выше факторы.

1. Влияние весов наблюдений. Рассмотрены следующие схемы назначения весов в зависимости от года наблюдения (табл. 1):

Таблица 1. Веса наблюдений в зависимости от года наблюдения.

Вариант назначения весов	Вес в зависимости от года наблюдения				
	год <1900	1900<год<1950	год>1950	1950<год< 1995	год>1995
1	1	1	1	1	1
2	1/9	1/4	1	1	1
3	1/9	1/9	-	1/4	1
4	1/16	1/9	-	1/4	1
5	1/16	1/4	-	1/2.25	1

Кроме того, рассматривалось назначение весов наблюдениям отдельных астероидов в соответствии с ошибками единицы веса при включении в общее решение.

2. Влияние исключения ошибочных наблюдений. Наблюдения исключались по критерию 3σ , где σ – ошибка единицы веса: * означает исключение ошибочного условного уравнения по α или по δ ; ** означает исключение всего наблюдения, если ошибочны уравнения по α и/или по δ .

В табл. 2 на примере определения массы астероида с номером 45 (m_{45}) по наблюдениям астероида 308 показаны результаты, найденные при: 1) разных интервалах времени наблюдений, 2) различных схемах назначения весов, 3) в зависимости от способа исключения ошибочных измерений, 4) в зависимости от учета или неучета систематических ошибок звездных каталогов. Найденное из наблюдений спутников значение $m_{45} = (0.2860 \pm 0.00600) \times 10^{-11} M_{\text{Sun}}$, будем в дальнейшем считать наиболее близким к истинному и эталонным.

Данные табл. 2 показывают, что получаемые значения массы могут превышать эталонное значение почти в три раза. Жирным шрифтом выделены значения, наиболее близкие к эталонному. Увеличение интервала наблюдений приводит к уменьшению ошибки определяемого значения массы и, в большинстве случаев, приближает значение массы к эталонному. Наиболее точными значения m_{45} получаются для двух схем назначения весов – 3 и 4. Для других схем отличие может в 2–3 раза превышать эта-

лонное значение. Способ исключения наблюдений (* или **) может существенно изменить

Таблица 2. Влияние различных факторов на определяемое значение m_{45} по наблюдениям астероида 308 Поликсо.

Наблюдения астероида 308 Поликсо		m_{45} (в единицах $10^{-11} M_{\text{Sun}}$)				
		Веса – 1	Веса – 2	Веса – 3	Веса – 4	Веса – 5
1891–2010 гг: 1536 набл.	*	.757 ±.079	.434±.089	.411±.095	.419±.098	.465±.096
	**	.757 .064	.672 .072	.414 .088	.394 .090	.551 .087
1891–2012гг: 1641набл.	*	.626 .075	.334 .085	.265 .090	.318 .089	.444 .086
	**	.664 .060	.456 .072	.278 .083	.309 .084	.420 .080
1891–2012гг: 1641набл. + учет СОЗК	*	.712 .059	.470 .067	.298 .080	.305 .082	.390 .073
	**	.633 .056	.562 .063	.349 .076	.365 .078	.371 .070

определяемое значение массы. Учет систематических ошибок звездных каталогов (СОЗК) приводит к уменьшению ошибок определяемых значений масс для всех вариантов, однако не во всех случаях приближает получаемое значение к эталонному.

3. Влияние модели движения. На примере определения m_{45} из наблюдений астероидов 308 и 371 выполнена оценка влияния учета в уравнениях движения возмущений от разного числа астероидов (табл. 3). Результаты показывают, что это влияние может быть заметным. Однако необходимо помнить, что влияние масс, имеющих ошибочные значения, может оказаться больше, чем не учет этих масс.

Таблица 3. Влияние модели движения на определяемое значение m_{45} (в ед. $10^{-11} M_{\text{Sun}}$).

Учет возмущений:	Церера, Паллада, Веста	128 астероидов	300 астероидов	680 астероидов
m_{45}	0.7141±0.0519	0.5798±0.0527	0.5762±0.0524	0.5619±0.0526

4. Отбор возмущаемых астероидов по критерию отсутствия сближений с другими, кроме возмущающего, астероидами. Возмущаемый астероид, выбранный нами для определения массы возмущающего астероида, может испытывать заметные гравитационные возмущения со стороны других астероидов. Рассмотрим этот вопрос на примере определения m_{45} из совместного решения. Отобранные возмущаемые астероиды (ВА) с номерами 100, 308, 371, 673, 13915 имеют следующие сближения (табл. 4). Видно, что астероид 673 имеет очень тесное сближение с астероидом 202, кроме астероида 45, а астероид 13915 – с астероидом 5.

Таблица 4. Сближения возмущаемых астероидов с возмущающими астероидами.

ВА	Тесные сближения ВА с возмущающими астероидами (в а.е.)						
	5	45	64	100	202	241	308
100		0.06					0.03
308		0.01		0.03			
371		0.03					
673		0.004	0.03		0.004	0.01	
13915	0.009	0.03					

Последовательное включение этих возмущаемых астероидов в общее решение показало, что включение в решение наблюдений астероида 673, имеющего наибольшее количество сближений с другими астероидами, приводит к увеличению ошибки значе-

ния массы с $0.05803 \cdot 10^{-11} M_{\text{Sun}}$ до $0.06397 \cdot 10^{-11} M_{\text{Sun}}$. Сами значения массы астероида 45 изменяются в пределах $(0.59547 - 0.71650) \cdot 10^{-11} M_{\text{Sun}}$, что составляет примерно удвоенную ошибку массы. Из этого следует, что требуется проводить некоторое дополнительное исследование результатов отбора возмущаемых тел по значению ошибки возмущающей массы, перед тем как приступить к следующим этапам определения массы.

В результате выполненного тестирования на примере определения масс кратных астероидов, известных с высокой точностью, выработана методика исследований, которая и была использована в дальнейшем при определении масс астероидов. В частности, было показано, что определяемое значение массы может изменяться в некоторых пределах в зависимости от принятых допущений, причем далеко не всегда можно сделать окончательный вывод о том, какое из допущений является наиболее близким к истине.

2. Результаты

Найденные нами значения масс десяти кратных астероидов приводятся в табл. 5. В этой таблице в 1-ом столбце указан номер астероида N, во 2-ом – показаны значения масс двойных астероидов, полученных методом наименьших квадратов (МНК) с наименьшей ошибкой. В 3-ем столбце приводятся результаты после исправления наблюдений за систематические ошибки звездных каталогов (МНК+), в 4-ом – найденные по методу регуляризации Тихонова (МРТ) [3]. В столбцах МНК и МНК+ приводятся значения масс, полученные с наименьшими ошибками. В 5-ом столбце приводятся интервалы найденных значений, в которые входят все наши результаты вычислений соответствующих значений масс по МНК с учетом различных весовых схем и с учетом ошибок единицы веса для отдельных астероидов, вошедших в список отобранных. В 6-ом столбце приводятся значения, найденные другими авторами из наблюдений спутников (данные взяты на сайтах <http://home.earthlink.net/~jimbaer1/astmass.html> и <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>). Курсивом выделены значения, полученные по оценкам диаметров и средней плотности.

Таблица 5. Результаты определения масс кратных астероидов.

N	Массы кратных астероидов (в единицах $10^{-11} M_{\text{sun}}$)				
	МНК	МНК +	МРТ	МНК (интервал)	Другие авторы
22	0.513 ± 0.107	0.402 ± 0.089	0.372	(0.402 – 0.544)	0.4070 ± 0.0100 (2008)
45	0.281 ± 0.068	0.314 ± 0.051	0.310	(0.231 – 0.447)	0.2860 ± 0.00600 (2008)
87	0.749 ± 0.220	0.673 ± 0.166	0.705	(0.400 – 0.888)	0.7431 ± 0.00300 (2005)
90	0.077 ± 0.068	0.021 ± 0.057	0.025	(0.020 – 0.080)	0.0414 ± 0.0011 (2008)
93	0.260 ± 0.084	0.145 ± 0.048	0.144	(0.142 – 0.398)	<i>0.24</i>
107	0.555 ± 0.254	0.407 ± 0.135	0.693	(0.407 – 0.687)	0.5630 ± 0.0150 (2008)
121	0.450 ± 0.057	0.329 ± 0.055	0.316	(0.296 – 0.460)	0.2363 ± 0.01006 (2009)
130	0.338 ± 0.157	0.315 ± 0.148	0.310	(0.130 – 0.668)	0.3320 ± 0.0200 (2008)
216	0.241 ± 0.074	0.217 ± 0.073	0.402	(0.088 – 0.443)	<i>0.36</i>
379	0.175 ± 0.034	0.096 ± 0.034	0.120	(0.029 – 0.175)	0.01926 ± 0.000100 (2008)

Анализ результатов, приведенных в табл. 5, показывает, что наши значения масс имеют оценки ошибок, превышающие оценки ошибок, полученные из наблюдений спутников. Сами же значения масс находятся в хорошем согласии с результатами других авторов, особенно с учетом найденных интервалов значений. По-видимому, необходимо указывать интервалы возможных значений в зависимости от принятых допу-

щений, перечисленных выше. В настоящее время наблюдения астероидов могут позволить оценить значения масс лишь довольно крупных астероидов, как правило, с диаметром не менее 150 км.

Для контроля и оценки нашего подхода мы определили значения масс ряда крупных астероидов, которые были ранее найдены в ходе построения эфемерид EPM2011 [5], DE423 [6], INPOP10a [7] по наблюдениям времени запаздывания радиосигналов с КА. В последнем столбце табл. 6 приводятся значения масс и интервалы значений, полученные нами динамическим методом по оптическим наблюдениям астероидов.

Таблица 6. Оценки масс астероидов, найденные при построении эфемерид EPM2011, DE423, INPOP10a по наблюдениям времени запаздывания радиосигналов и найденные нами динамическим методом по оптическим наблюдениям астероидов.

N	Массы астероидов (в единицах $10^{-12} M_{\text{Sun}}$)			
	Наблюдения времени запаздывания			Оптические наблюдения астероидов
	EPM2011	DE423	INPOP10a	
3	14.67 ± 0.25	12.10 ± 0.91	11.6 ± 1.3	12.09 ± 0.99 (12.09 – 12.40)
6	4.05 ± 0.46	6.73 ± 1.64	7.1 ± 1.2	4.27 ± 0.54 (4.27 – 6.60)
7	6.54 ± 0.30	5.53 ± 1.32	7.7 ± 1.1	6.59 ± 0.43 (6.41 – 7.26)
9	1.64 ± 0.25	3.28 ± 1.08	–	1.76 ± 0.28 (1.76 – 2.13)
10	41.61 ± 1.34	44.97 ± 7.36	–	41.21 ± 0.82 (41.10 – 41.34)
15	14.45 ± 0.55	14.18 ± 1.49	18.8 ± 1.6	15.62 ± 0.14 (15.62 – 15.76)
16	12.75 ± 1.03	12.41 ± 3.44	11.2 ± 5.2	9.59 ± 0.78 (8.75 – 10.67)
19	4.36 ± 0.13	3.20 ± 0.53	–	4.36 ± 0.21 (4.09 – 4.36)
29	5.39 ± 0.50	7.42 ± 1.49	–	5.30 ± 0.37 (5.30 – 5.87)
41	4.17 ± 0.44	4.24 ± 1.77	9.2 ± 2.6	4.92 ± 2.31 (2.78 – 6.02)
52	9.06 ± 1.32	11.17 ± 8.40	42.3 ± 8.0	12.73 ± 1.03 (12.56 – 13.52)
324	5.10 ± 0.14	5.34 ± 0.99	4.67 ± 0.38	5.83 ± 1.02 (5.83 – 7.83)
532	7.07 ± 0.62	4.97 ± 2.81	2.89 ± 0.76	7.02 ± 1.66 (5.05 – 7.02)
704	12.22 ± 0.96	19.97 ± 6.57	-	14.44 ± 1.06 (14.44 – 18.83)

Данные табл. 6 показывают, что наши значения хорошо согласуются с результатами, основанными на других наблюдениях, а для 5-ти значений имеют и меньшие ошибки (наименьшие значения ошибок выделены жирным шрифтом).

3. Заключение

В результате выполненной работы оценено влияние различных факторов (назначение весов и выбор интервала учитываемых наблюдений, способ исключения ошибочных наблюдений; порядок отбора возмущаемых астероидов; способ решения систем условных уравнений) на определяемые значения масс ряда двойных астероидов, для которых значения массы найдены с высокой точностью из наблюдений спутников. Сделан вывод о том, что диапазон определяемых значений масс при учете различных факторов находится в интервале, не превышающем утроенную оценку ошибки массы (табл. 5), хотя точность определения масс по оптическим наблюдениям возмущаемых астероидов ниже, чем по наблюдениям спутников астероидов.

С учетом выполненных исследований определены значения масс 10-ти двойных астероидов, в том числе и тех, для которых не были найдены значения масс по наблюдениям спутников. Для этих последних на основе найденных нами масс можно определить их средние плотности и периоды обращения спутников. Получены также значения масс 14-ти астероидов, включенных в число определяемых параметров при построении эфемерид EPM2011, DE423, INPOP10a и основанных на наблюдениях времени запаздывания радиосигналов с КА. Найденные нами значения хорошо согласуются с дан-

ными этих трех эфемерид, а для нескольких астероидов нами определены значения с меньшими ошибками. Все это говорит о том, что позиционные астрометрические наблюдения астероидов могут быть использованы для определения возмущающих масс, наряду с другими типами наблюдений.

Авторы благодарят В.А. Шора (ИПА РАН) за полезные советы и обсуждение.

Исследование выполнено при частичной поддержке Программы Президиума РАН “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”, раздел “Малые тела Солнечной системы”.

Литература

1. Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М. Определение масс некоторых малых планет динамическим способом. *Околосемная астрономия* – 2003, Том 1, 233–239.
2. Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., и др. О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса. *Астрон. вестник*, 2012, т.46, No. 2, 131–142.
3. Chesley, S.R., Baer, J., Monet, D.G. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. *Icarus*, 2010, V. 210, 158–181.
4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., и др. Численные методы решения некорректных задач, М: Наука. 1990.
5. Путьева Е.В. EPM2011 – обновленные планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований. *Астрон. вестник* (в печати).
6. Konopliv, A.S., Asmar, S.W., Folkner, W.M., et al., Mars high resolution gravity fields from MRO, Mars seasonal gravity, and other dynamical parameters. *Icarus*, 2011, V. 211, 401–428.
7. Fienga, A., Laskar, J., Kuchynka, P., et al., The INPOP10a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics. 2011, arXiv: 1108.5546v1, 1–31.

DETERMINATION OF MASSES OF A NUMBER OF BINARY ASTEROIDS BY THE DYNAMICAL METHOD

Chernetenko Yu.A., Kochetova O.M.

Institute of Applied Astronomy of RAS, Saint Petersburg, Russia

A number of factors, affecting on the process of determination of asteroid masses from position observations of test particles (perturbed asteroids) were investigated, namely: 1) selecting perturbed asteroids; 2) weighting the observations; 3) selection of dynamical model and integration of equations of motion; 4) solution of the conditional equations by the least squares method and by the method of regularization of A.N. Tikhonov. All stages of this work were tested through comparison of determined masses of binary asteroids with their masses obtained by other authors with high accuracy using observations of satellites.

Using developed approaches we obtained masses of ten binary asteroids and intervals of their possible values, and masses of fourteen asteroids which previously were determined in the course of construction of ephemerides EPM2011, DE423, INPOP10a. The last-mentioned masses were obtained using measurement of the time delay of signals from cosmic apparatuses. Our values of masses are in agreement with other ones within limits of their probable errors.

The conclusion was made that astrometric observations of asteroids can be successfully used for mass determination of perturbing asteroids, along with other types of observations.

**ОРБИТА АСТЕРОИДА (99942) АПОФИС С УЧЕТОМ НАБЛЮДЕНИЙ,
ВЫПОЛНЕННЫХ В 2012 Г.,
И ПРОГНОЗ ЕГО ТЕСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ ПОСЛЕ 2036 ГОДА**

Шор В.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

В статье описаны результаты уточнения орбиты потенциально опасного астероида Апофис по оптическим и радиолокационным наблюдениям, выполненным с 2004 г. по 2012 г. Новым элементом в данной работе также является учет поправок в наблюдениях Апофиса за ошибки звездных каталогов. Точность представления радиолокационных и оптических наблюдений на основе новой орбиты вполне сопоставима с их точностью на основе зарубежных решений. Орбиты также хорошо согласуются между собой, но имеются отличия в оценке точности орбитальных параметров, которые в нашем случае определены с формально несколько большей точностью. Была предпринята попытка найти негравитационное ускорение в движении Апофиса из наблюдений. Для этой цели использовался метод наименьших квадратов и метод Тихонова регуляризации плохо обусловленных систем. Последний метод позволил найти значение негравитационного ускорения, которое не противоречит физическим соображениям. В данном исследовании мы расширили интервал прогноза сближений астероида с Землей с учетом новых наблюдений и вероятных значений негравитационных ускорений в движении астероида.

Открытый в 2004 г. астероид Апофис имеет с Землей необычайно малое межорбитальное расстояние, равное 0.00026 а.е., что ведет к возможности тесного сближения астероида с Землей вблизи восходящего узла его орбиты на эклиптике. 13 апреля 2029 г. состоится очень тесное сближение Апофиса с Землей до расстояния порядка 38000 км. Под влиянием возмущений со стороны планеты орбита астероида претерпит изменение, величина которого критически зависит от минимального расстояния от Апофиса до центра Земли в ходе сближения. До настоящего времени орбита астероида известна с точностью, недостаточной для предсказания его движения после сближения на десятилетия вперед.

В данной статье обсуждаются результаты уточнения орбиты астероида по наблюдениям, выполненным на интервале 2004–2012 гг. На этом интервале имеется 7 радиолокационных и 1524 оптических наблюдений астероида. Результаты наших предыдущих определений орбиты Апофиса изложены в ряде статей [1–4]. В данном исследовании мы расширили интервал прогноза сближений астероида с Землей с учетом новых наблюдений и вероятных значений негравитационных ускорений в движении астероида. Новым элементом в данной статье также является учет поправок в наблюдениях Апофиса за ошибки звездных каталогов [5].

В нашей работе орбита Апофиса уточнена в результате сравнения вычисляемых методом численного интегрирования положений с наблюдаемыми положениями и определения поправок к исходным значениям координат и скоростей по методу наименьших квадратов. Модель движения астероида учитывает все основные возмущения, в том числе релятивистские возмущения и световое давление. Редукция наблюдений включает поправки за искривление лучей света в поле тяготения Солнца. Выполнено сравнение наших результатов с результатами, полученными в Пизанском университете, Италия (сайт НЕОДиС). В целом орбиты, найденные в указанных учреждениях, хорошо согласуются между собой, но имеются существенные отличия в оценке точности орбитальных параметров. Основной причиной различия, по-видимому, являются процедура взвешивания наблюдений. В нашей работе веса назначались как оптическим, так и ра-

диолокационным наблюдениям обратно пропорционально квадрату их средней ошибки. При этом для радарных наблюдений принимались ошибки, сообщаемые наблюдателями при публикации наблюдений. Для оптических наблюдений были опробованы два метода взвешивания: 1) равные веса для всех наблюдений; $p = 1/\sigma_0^2$, где σ_0 – средняя ошибка оптических наблюдений (решение типа А); 2) придание веса p наблюдению в соответствии со средней ошибкой σ_i наблюдений Апофиса на данной обсерватории; $p = 1/\sigma_i^2$ (решение типа Б).

Сравнение обоих решений позволяет оценить пределы различия решений, зависящие от некоторой неопределенности в назначении весов. При определении параметров орбиты на интервале 2004–2012 гг. для нахождения решения типа А было использовано 91% всех оптических наблюдений и для решения типа Б – 96% наблюдений. В табл. 1 приведены результаты решений типа А и типа Б, найденные нами с учетом ошибок звездных каталогов, как это рекомендовано в работе [5]. Можно отметить, что учет поправок к каталожным положениям опорных звезд привел к использованию на 10 оптических наблюдений больше в решении типа А и на восемь наблюдений меньше в решении типа Б. В обоих решениях немного уменьшилась средняя ошибка представления наблюдений. В последнем столбце табл. 1 указаны соответствующие результаты с сайта НЕОДиС. На сайте Лаборатории реактивного движения (ЛРД) решение с учетом наблюдений 2012 г. до сих пор не опубликовано. Сравнение наших решений с решениями ЛРД, найденными ранее на основе меньшего числа наблюдений, можно найти в [2, 3].

Таблица 1. Уточнение параметров орбиты Апофиса по наблюдениям 2004–2012 гг. с учетом ошибок звездных каталогов. Эпоха JD2456000.5 = 2012 март 14.0 TDB.

Эл-т	ИПА, А	ИПА, Б	НЕОДиС**
M (°)	$150.1347158 \pm 1.25e-5$	$150.1347300 \pm 1.18e-5$	$150.1347722 \pm 2.91e-5$
ω (°)	$126.4241758 \pm 2.07e-5$	$126.4241947 \pm 0.88e-5$	$126.4241912 \pm 3.08e-5^*$
Ω (°)	$204.4293899 \pm 2.07e-5$	$204.4293705 \pm 0.87e-5$	$204.4293774 \pm 3.06e-5^*$
i (°)	$3.33194372 \pm 4.55e-7$	$3.331943271 \pm 3.83e-7$	$3.331942843 \pm 9.74e-7^*$
e	$0.19109042159 \pm 1.47e-8$	$0.19109042649 \pm 1.29e-8$	$0.19109046710 \pm 3.12e-8^*$
n (°/сут.)	$1.11275310922 \pm 4.66e-9$	$1.112753114381 \pm 4.70e-9$	$1.11275312828 \pm 11.6e-9^*$
a (а.е.)	$0.92229567407 \pm 2.58e-9$	$0.922295671223 \pm 2.60e-9$	$0.922295663542 \pm 6.42e-9$
σ (")	0.2633	0.3234	0.5042
N	1395 (7рад+1388 опт)	1461 (7рад+1454 опт)	1511 (7рад+1504 опт)
Δ_{\min} (км)	38407 ± 62	38339 ± 62	$38102 \pm 154^{**}$

* Значения вычислены нами на основе опубликованных эквиноктиальных элементов.

** Сайт НЕОДиС (данные на май 2012 г.)

В табл. 2 представлены результаты сравнения наших решений и решения НЕОДиС с радиолокационными наблюдениями Апофиса. Как это видно из таблицы, нет принципиальных отличий в представлении наблюдений всеми тремя решениями.

В нашей работе при исследовании возможности столкновений космических тел с Землей был использован подход, предложенный в работе А. Милани и др. [6]. Совокупность частиц, имеющих начальные условия движения, совместимые с наличным набором наблюдений, образует поток виртуальных (возможных) астероидов. Виртуальные астероиды движутся по траекториям, более или менее подобным траектории номинального решения. Рассматриваются точки пересечения виртуальных астероидов с плоскостью, проходящей через центр Земли нормально к вектору скорости тел относительно Земли (с так называемой плоскостью цели). Точки пересечения образуют на этой плоскости эллипс рассеяния виртуальных астероидов. Центр эллипса совпадает с точкой пересечения номинального решения с плоскостью цели (рис. 1). Чем ближе точ-

ка пересечения к образу Земли на этой плоскости, тем на меньшем расстоянии виртуальный астероид проходит мимо Земли в данном сближении. Земля своим притяжением изменяет орбиту астероида, причем величина изменения зависит от минимального расстояния, достигнутого в ходе сближения. Виртуальные астероиды, чьи точки пересечения с плоскостью цели образуют на ней эллипс рассеяния, в результате сближения получают, вообще говоря, разные импульсы и их средние движения приобретают разные приращения.

Таблица 2. Представление радиолокационных наблюдений в решениях ИПА (А и Б) и НЕОДиС.

Дата (UTC)	Измерение	σ	$O - C$			Единицы
			ИПА, А	ИПА, Б	НЕОДиС	
2005.01.27.9798611	-100849.14	.25	-0.08539	-0.08402	+0.00749	Гц
2005.01.29.0000000	192028507.13	4.00	+0.86905	+0.79111	+0.81870	Мкс
2005.01.29.0000000	-102512.91	.25	-0.01699	-0.01551	-0.05278	Гц
2005.01.30.0125000	195808170.79	4.50	+0.32294	+0.19258	-0.57180	Мкс
2005.01.30.0125000	-103799.82	.15	+0.03316	+0.03474	-0.09751	Гц
2005.08.07.7131944	8186.80	.20	+0.00099	+0.01542	-0.01740	Гц
2006.05.06.5340278	-118256.80	.10	-0.01178	-0.00276	-0.06345	Гц

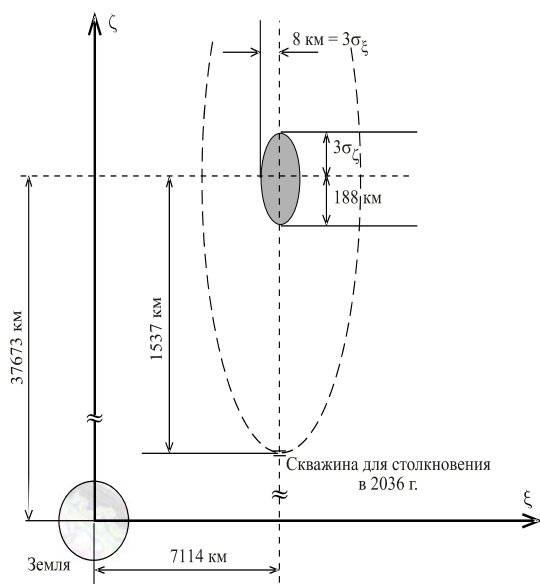


Рис. 1. Положение эллипса рассеяния на плоскости цели 13 апреля 2029 г.

Может случиться, что спустя некоторое целое число лет часть виртуальных астероидов успеют совершить несколько полных оборотов вокруг Солнца и окажутся вблизи той же точки своей орбиты, где несколько лет тому назад они сближались с Землей. Поскольку со времени последнего сближения прошло целое число лет, то и Земля окажется в окрестности той же точки своей орбиты, где она сближалась с астероидом (в этом случае говорят о соизмеримости средних движений астероида и Земли). Произойдет новое тесное сближение виртуальных астероидов с Землей, и, возможно, столкновение с нею некоторых из них. Оценить вероятность подобного развития событий в результате тесного сближения можно численным образом путем варьирования среднего движения n тела по номинальной орбите в некоторых пределах (например, $\pm 3\sigma_n$, где σ_n –

средняя ошибка n) и последующего прослеживания движения виртуальных тел с варьированным средним движением на интервале времени в несколько десятилетий. В качестве примера рассмотрим поиск столкновения с Землей виртуальных астероидов, образованных варьированием среднего движения в приведенном в табл. 3 решении Б.

Как показывает табл. 3, для решения Б к столкновению ведут вариации в диапазоне $(14393.63 - 14399.26) \cdot 10^{-11}$ °/сут. Если проследить, в каких местах плоскости цели виртуальные астероиды с соответствующими вариациями среднего движения пересекают ее 13 апреля 2029 г., то окажется, что точки пересечения располагаются на продолжении большой оси эллипса рассеяния на расстоянии примерно в 10 раз превышающем утроенную большую полуось эллипса.

Таблица 3. Минимум расстояния, Δ_{\min} , от Земли в 2036 г. в зависимости от вариации среднего движения n (решение типа Б: $n = 1.112753114381 \pm 4.698 \cdot 10^{-9} \text{°/сут}$).

Вариация n (10^{-11}°/сут)	T=2036 04 13+	Δ_{\min} (км)	Вариация n (10^{-11}°/сут)	T=2036 04 13+	Δ_{\min} (км)
14393.63	0.36927	6475.6	14397.0	0.37294	2294.1
14394.0	0.36907	5504.0	14398.0	0.37783	3564.2
14395.0	0.36891	3373.1	14399.0	0.38383	5776.9
14396.0	0.36995	2220.9	14399.26	0.38548	6470.8

Отрезок большой полуоси (или ее продолжения), в пределах которого находятся точки, ведущие к столкновению в определенном году, называется замочной скважиной (для столкновения в данном году). Замочная скважина для столкновения в 2036 г., как указано выше, расположена на столь большом расстоянии от центра эллипса в 2029 г., что вероятность прохождения через нее виртуального астероида практически равна нулю (то же самое другими словами можно выразить так: вероятность ошибки, равной $14396 \cdot 10^{-11} \text{°/сут}$, в найденной величине среднего движения (решение типа Б) практически равна нулю).

Заметное действие на движение Апофиса может оказать неравномерное переизлучение солнечной радиации – эффект Ярковского, который не был явным образом учтен ни в одном из трех сравниваемых решений. В этой связи мы предприняли попытку выявить дополнительное негравитационное ускорение в движении околоземных астероидов и астероидов Главного пояса, имеющих небольшие размеры и длительную историю наблюдений. Для 219 объектов (в их число не попал Апофис) оказалось возможным найти трансверсальную компоненту A_2 дополнительного ускорения в орбитальной системе координат с ошибкой, меньшей величины самой компоненты. Найденные значения A_2 находятся в интервале от $-15 \cdot 10^{-14} \text{ а.е./сут}^2$ до $+10 \cdot 10^{-14} \text{ а.е./сут}^2$. Наличие данной компоненты может интерпретироваться как проявление эффекта Ярковского, поскольку ее действие, как и эффекта Ярковского, сводится к вековому изменению большой полуоси орбиты. Тем не менее, влияние альтернативных факторов нельзя исключить. Нами были предприняты попытки найти значения A_2 для Апофиса из наблюдений 2004–2012 гг. методом наименьших квадратов (МНК) и методом регуляризации Тихонова плохо обусловленных систем (МРТ) [7]. Метод МНК дал неправдоподобно большие значения A_2 с очень большой относительной ошибкой. Метод МРТ позволил найти значения, не противоречащие физическим соображениям (рис. 2).

Был также выполнен ряд уточнений орбиты Апофиса при фиксированных значениях A_2 с целью найти те значения A_2 , которые приводят к столкновению с Землей в 2036 г. При значениях A_2 , близких к $-12.041 \cdot 10^{-14} \text{ а.е./сут}^2$ (решение типа Б), вероятность столкновения с Землей в 2036 г. оказывается максимальной, так как номинальное решение в этом случае проходит через соответствующую замочную скважину. При этом значении A_2 вероятность столкновения в 2036 г. оцениваются как 0.0035 (вероятность не равна единице, так как длина большой полуоси эллипса рассеяния на плоскости цели в 2029 г. значительно превышает размер замочной скважины). Вычисления показывают, что при значениях A_2 , больших чем $-8.0 \cdot 10^{-14} \text{ а.е./сут}^2$ (с учетом знака), вероятность столкновения в 2036 г. становится исчезающей малой величиной.

Величина эффекта Ярковского для Апофиса в настоящее время остается неопределенной, поскольку она зависит от неизвестных величин - положения оси вращения астероида и теплопроводности его поверхностных слоев, - а непосредственно из обработки наблюдений находится неуверенно. Поэтому прогнозы движения Апофиса после 2029 г. приходится делать с оглядкой на это обстоятельство. Можно, однако, заключить, что вероятность столкновения с ним в 2036 г. очень мала.

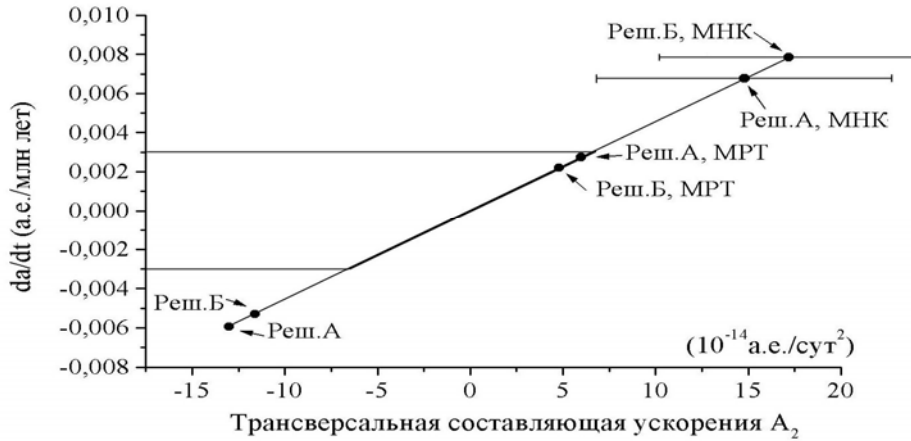


Рис. 2. Соотношение между A_2 и скоростью изменения большой полуоси da/dt (прямая линия). Утолщенная часть прямой соответствует значениям A_2 и da/dt , которые вероятны (возможны) для астероидов [8]. Отмечены значения A_2 , определенные из наблюдений методом наименьших квадратов (МНК) и методом регуляризации Тихонова (МРТ). Внизу слева показаны значения A_2 , при которых вероятность столкновения с Землей в 2036 г. оказывается наибольшей.

Как видно на рис. 2, значения A_2 , при которых вероятность столкновения в 2036 г. максимальна, лежат за пределами физически обоснованных значений. При изменении A_2 вероятность столкновения быстро уменьшается. Но даже если эффект Ярковского заставит номинальное решение пройти через замочную скважину, то и в этом случае вероятность столкновения при современной точности орбиты Апофиса оценивается как 0.0035.

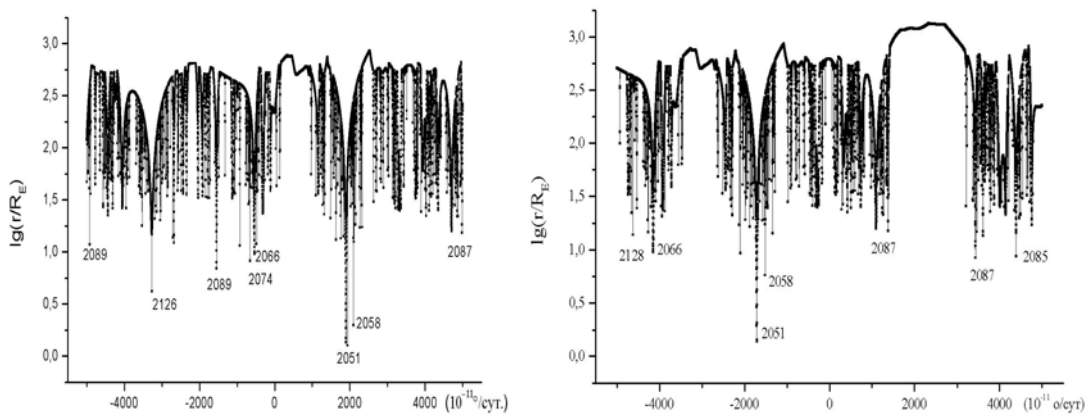


Рис. 3. Минимальные расстояния Апофиса от центра Земли на интервале от 2012 г. до 2130 г., достигаемые при различных вариациях номинального значения среднего движения (величина вариации отложена вдоль горизонтальной оси). Вдоль вертикальной оси отложен логарифм расстояния, выраженного в долях радиуса Земли. Отмечены годы наибольших сближений Апофиса с Землей. Левая часть рисунка соответствует случаю, когда дополнительное ускорение A_2 не учитывается в уравнениях движения, правая - соответствует случаю, когда в уравнениях движения учитывается дополнительное ускорение при значении $A_2 = -3 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут².

С целью поиска тесных сближений Апофиса с Землей в ближайшие десятилетия, в данной работе было выполнено варьирование среднего движения номинального решения типа Б, найденного по наблюдениям 2004–2012 гг., в пределах $n \pm 10\sigma_n$ ($\sigma_n = 5.042 \cdot 10^{-9}$) с шагом 10^{-11} о/сут. и численным интегрированием прослежено движение образованных виртуальных частиц вплоть до 2130 г. (рис. 3). В результате обнаружено, что ряд виртуальных частиц имеет на этом интервале очень тесные сближения с

Землей в том или ином году. Учитывая, что эффект Ярковского способен изменить траектории движения виртуальных частиц, то же самое исследование было проделано при возможном с физической точки зрения значении дополнительного ускорения A_2 , равном $-3 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Результаты этих вычислений представлены на рис. 3.

Следует отметить, что эффект Ярковского не меняет радикально картину, изображенную на рис. 3 слева. Он лишь сдвигает картину влево или вправо относительно горизонтальной шкалы в зависимости от знака ускорения. При этом вероятность одних тесных сближений увеличивается, других – уменьшается. Номинальное решение находится в “спокойной” области. Но эффект Ярковского способен привести Апофис к очень тесным, вплоть до касательных сближений с Землей.

Данное исследование проведено при поддержке Программы 22 Президиума РАН.

Литература

1. *Виноградова Т.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., и др.* Орбита астероида (99942) Апофис, определенная из оптических и радарных наблюдений. *Астрон. вестник*, 2008, т. 42, № 3, 1-10.
2. *Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А.* Насколько точна орбита астероида (99942) Апофис и какова вероятность столкновения с ним в 2036–2037 гг. *Астрон. вестник*, 2009, т. 43, № 4, 338-347.
3. *Chernetenko Yu.A.* The Yarkovsky effect in the motion of NEAs// In Proceedings of the international conference Asteroid, Comet Hazard-2009 “Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei”. Eds. A. Finkelstein, W. Huebner, V. Shor. Nauka, St. Petersburg, 2010, 289-293.
4. *Shor V.A., Chernetenko Yu.A., Kochetova O.M., et al.* On the impact of the Yarkovsky effect on Apophis’ orbit. *Solar System Reserch*, 2012, V.46, N.2, 119-129.
5. *Chesley S.R., Baer J., Monet D.G.* Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. *Icarus*, 2010, V. 210, 158-181.
6. *Milani A. Chesley S.R. Sansaturio M.E. et al.* Nonlinear impact monitoring: line of variation search for impactors. *Icarus*, 2005, V. 173, 362-384.
7. *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., и др.* Численные методы решения некорректных задач. М. “Наука”, Физ.Мат.Лит. 1990. С.1-230.
8. *Chesley S.R.* Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect. IAA Planetary Defense Conference, 9-12 May 2011, Bucharest, day 2, 1145.

ORBIT OF THE ASTEROID (99942) APOPHIS WITH REGARD TO OBSERVATIONS MADE IN 2012 AND PROGNOSIS OF ITS CLOSE APPROACHES TO THE EARTH AFTER 2036

Shor V.A., Kochetova O.M., Chernetenko Yu.A
Institute of applied astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia

The results of orbit improvement of potentially hazardous asteroid Apophis on a basis of optical and radar observations made from 2004 till 2012 are described. A fresh element in our work also is usage of observations with allowance made for the errors of star catalogues. The precision of representation of radar and optical observations proceeding from new orbit is well compared with that of resulting from solutions obtained in other research centers. The orbits found in these centers are also in good agreement, though there are differences in estimation of precision of orbit parameters, which in our case are determined with some lesser formal errors. An attempt was made to find nongravitational acceleration in Apophis motion from observations. With this aim in view the least-square method and the Tikhonov’ method of regularization of ill-conditional systems were used. The last one has enabled solution not in contradiction with physical considerations to be found. In present research we extended the interval of prognosis of close approaches of the asteroid to the Earth basing on more precise orbit and possible values of nongravitational accelerations in Apophis motion.

Секция 4

**ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ,
КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА
ГАЛАКТИКИ**

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ АКТИВНОСТИ МИКРОКВАЗАРОВ

Дёмин С.А., Панищев О.Ю., Нефедьев Ю.А.

*Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта
Казанского федерального университета, г. Казань, Россия*

Показано, что анализ сигналов полного потока рентгеновской активности микроквazarов, фиксируемых обзорной камерой ASM (All-Sky Monitor) орбитальной обсерватории RXTE (Rossi X-Ray Timing Explorer), позволяет не только установить некоторые механизмы аккреции вещества в двойных звездных системах, но и провести их классификацию в зависимости от проявления эффектов статистической памяти. В качестве примера, с помощью частотных зависимостей корреляторов, вычисляемых на основе формализма функций памяти, выявляются особенности рентгеновского излучения микроквazара GRS 1915+105. Установлены три класса двойных рентгеновских систем в зависимости от соотношения временных масштабов релаксации и существования статистической памяти, реализующихся в сигналах рентгеновской активности указанных объектов.

1. Введение

Возросший интерес к математическому описанию сложных систем на основе подходов теоретической физики содействовал широкому распространению методов статистического анализа временных последовательностей экспериментальных показателей, генерируемых подобными объектами, в самых разных областях современного естествознания. В частности, использование указанных методов в анализе динамических и спектральных особенностей излучения микроквazarов способствовало установлению некоторых особенностей их эволюции и структурной организации.

В настоящей работе демонстрируются возможности формализма функций памяти (ФФП) в анализе релаксационных особенностей рентгеновской активности 19 микроквazarов. Микроквazarы – тесные двойные системы, состоящие из черной дыры или нейтронной звезды и оптического компаньона, для которых характерна струйная активность в виде джетов. Введенные ФФП-параметры позволили классифицировать рентгеновское излучение двойных звездных систем путем сопоставления и сравнения временных масштабов релаксации и существования статистической памяти. Более подробно мы остановимся на исследовании динамики корреляций в рентгеновской активности микроквazара GRS 1915+105.

Статистический анализ проводился для временных рядов полного потока рентгеновского излучения указанных источников. Регистрация осуществлялась обзорной камерой ASM орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE [1] в период с 01.01.1996 по 31.12.2005. Экспериментальные данные представляют собой экспонированные значения 90-секундных наблюдений полного потока рентгеновского излучения S ($1.5 \div 12$ кэВ) в собственных единицах ASM. Полный поток Крабовидной туманности в диапазоне $2 \div 10$ кэВ приблизительно соответствует 75 ASM ед/с. Для обработки исходные данные посуточно усреднялись.

2. Основные положения формализма функций памяти

Ранее в работах [2-4] были представлены основные понятия и положения ФФП для анализа равномерных и неравномерных временных сигналов, генерируемых сложными системами. Интенсивность рентгеновской активности микроквazarов описывает-

ся временной последовательностью $\{x_j\}$ величины $X = \{x(T), x(T + \tau), \dots, x(T + (N - 1)\tau)\}$. Здесь T – начальный момент регистрации сигнала, $(N - 1)\tau$ – время регистрации сигнала, τ – временной шаг дискретизации, $x_j = x(T + j\tau)$ – значение величины X на j -м шаге, $\delta x_j = x_j - \langle X \rangle$ – флуктуация на j -м шаге.

$$a(t) = \frac{\langle \mathbf{A}_k^0(0) \mathbf{A}_{m+k}^m(t) \rangle}{\langle |\mathbf{A}_k^0(0)|^2 \rangle}.$$

Здесь нормированная временная корреляционная функция (ВКФ) $a(t)$ представлена в виде скалярного произведения векторов начального состояния системы:

$$\mathbf{A}_k^0(0) = \{\delta x_0, \delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_{k-1}\} = \{\delta x(T), \delta x(T + \tau), \delta x(T + 2\tau), \dots, \delta x(T + (k - 1)\tau)\},$$

и состояния в момент времени t :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{m+k}^m(t) &= \{\delta x_m, \delta x_{m+1}, \delta x_{m+2}, \dots, \delta x_{m+k-1}\} = \\ &= \{\delta x(T + m\tau), \delta x(T + (m + 1)\tau), \delta x(T + (m + 2)\tau), \dots, \delta x(T + (m + k - 1)\tau)\}. \end{aligned}$$

Исходная ВКФ $a(t) = M_0(t)$ связана с функциями памяти $M_{n-1}(t)$ посредством дискретных конечно-разностных уравнений вида:

$$\frac{\Delta M_{n-1}(t)}{\Delta t} = \lambda_n M_{n-1}(t) - \tau \Lambda_n \sum_{j=0}^m M_n(j\tau) M_{n-1}(t - j\tau).$$

ВКФ, функции статистической памяти, кинетические λ_n и релаксационные Λ_n параметры определяются непосредственно из экспериментальных временных серий.

Отметим, что приведенные выше функции памяти характеризуют взаимосвязи между скоростью изменения переменных на различных уровнях статистического описания. Исключительное значение памяти было осознано в естественных науках после 1906 г. [5]. Тогда русский математик А.А. Марков опубликовал свою первую статью о процессах, получивших впоследствии название марковских, сыгравшую историческую роль в развитии теории случайных процессов. В ней впервые было сформулировано представление о мгновенной статистической памяти случайного процесса с точки зрения его предыстории.

Для описания эффектов статистической памяти используются меры, впервые представленные в работах [2, 6]:

$$\varepsilon_i(\nu) = \left\{ \frac{\mu_{i-1}(\nu)}{\mu_i(\nu)} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \delta_i(\nu) = \left| \frac{\tilde{M}'_{i-1}(\nu)}{\tilde{M}'_i(\nu)} \right|,$$

где $\mu_i(\nu)$, $\tilde{M}_i(\nu)$ представляют собой спектры мощности функции памяти $M_i(t)$:

$$\mu_i(\nu) = \left| \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} M_i(t) \cos(2\pi\nu t_j) \right|^2.$$

Меры $\varepsilon = \varepsilon_1(0)$, $\delta = \delta_1(0)$ позволяют охарактеризовать степень проявления эффектов памяти в долговременной составляющей временных сигналов. Если параметры $\varepsilon, \delta \gg 1$ рассматриваемый процесс является марковским. Время существования памяти в системе намного короче времени релаксации исходной ВКФ. В пределе $\varepsilon, \delta \rightarrow \infty$ процесс характеризуется *дельта*-образной памятью. В случае $\varepsilon, \delta \sim 1$ время существования памяти соизмеримо со временем релаксации исходной ВКФ. При $\varepsilon, \delta > 1$ процесс характеризуется умеренной (промежуточной по времени существования) памятью.

3. Динамические и спектральные особенности излучения GRS 1915+105

На рис. 1 представлены, определенные в рамках ФФП, спектры мощности исходной ВКФ $\mu_0(\nu)$ (рис. 1a) и функций памяти $\mu_i(\nu)$ (рис. 1b-d) рентгеновской активности GRS 1915+105. На всех спектрах в окрестностях частот $\nu_1 \sim 0.025 \text{ f.u.}, \nu_2 \sim 0.058 \text{ f.u.}$ обнаруживаются всплески, характеризующие периодические особенности рентгеновского излучения. Временной интервал $T_1 \sim 40\tau$ связан с орбитальным периодом обращения оптической звезды в двойной системе $P = 33.5 \pm 1.5$ сут. Второй интервал $T_2 \sim 17\tau$ согласуется с периодом $12 \div 17$ сут, ранее обнаруженным в работах [7, 8]. Период соответ-

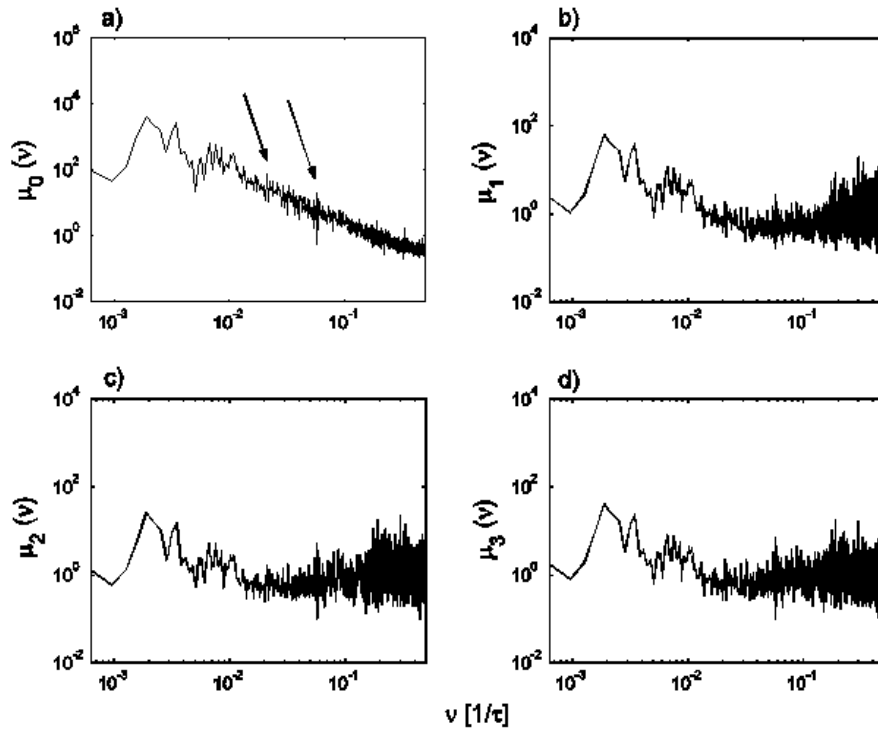


Рис. 1. Спектры мощности исходной ВКФ $\mu_0(\nu)$ (a) и функций памяти $\mu_i(\nu)$ рентгеновской активности двойной системы GRS 1915+105, представленные в двойной логарифмической системе.

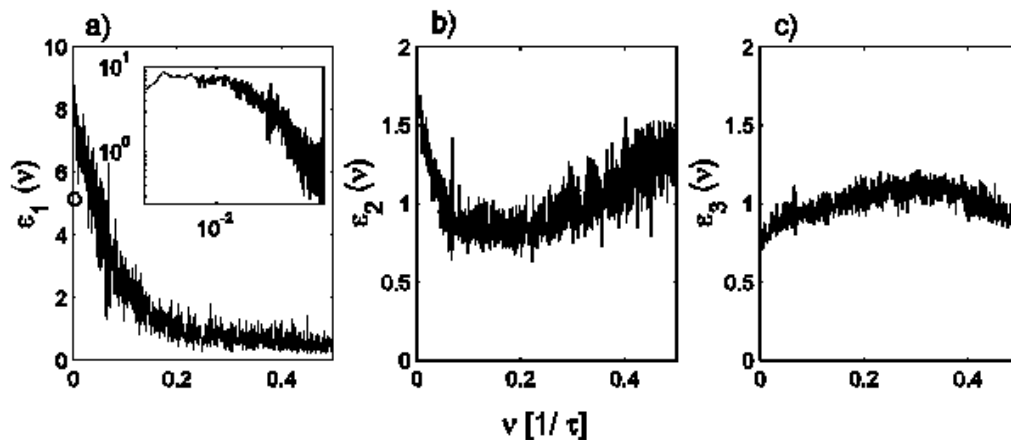


Рис. 2. Частотная зависимость меры памяти $\varepsilon_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$ (a-c), для рентгеновской активности GRS 1915+105. Круглым маркером обозначено значение $\varepsilon_1(0) = 5.16$. Во вставке (a) зависимость представлена в двойной логарифмической шкале.

ствует временному масштабу турбулентного движения в системе с интервалом $12 \div 17$ сут, дающим устойчивое рентгеновское излучение GRS 1915+105. Периодические процессы, выявляемые на широкой полосе средних и высоких частот рентгеновского излучения (рис. 1b-d), свидетельствует о «запутанном» наложении импульсов различной мощности и длительности (вплоть до миллисекунд). Совокупная динамика указанных процессов приводит к сложной конфигурации мелкомасштабных флуктуаций во временной последовательности рентгеновской активности GRS 1915+105 – сильной переменности на малых временных интервалах.

На рис. 2 представлена частотная зависимость первой меры памяти $\varepsilon_i(\nu)$, $i=1, 2, 3$, для усредненной динамики рентгеновского излучения GRS 1915+105. Как уже было сказано ранее, значения параметров $\varepsilon_1(0)=5.16$, $\delta_1(0) = 62.04$ определяют промежуточные времена существования памяти, что свидетельствует об относительной неоднородности структуры внутренних слоев аккреционного диска микроквазара GRS 1915+105, преимущественно генерирующих рентгеновское излучение и умеренной скорости аккреции – переноса вещества.

4. Классификация рентгеновского излучения микрокварзаров

В табл. 1 приведена классификация рентгеновского излучения 19 микрокварзаров в зависимости от степени проявления эффектов статистической памяти. Заметим, что изначально нельзя говорить о чисто марковском или немарковском характере рентгеновского излучения микрокварзаров, которое связано с разнообразными физическими процессами, в том числе и аккрецией вещества. Установление специфических особенностей данных процессов представляет собой отдельную и достаточно трудоемкую зада-

Табл. 1. Классификация рентгеновского излучения микрокварзаров в зависимости от степени проявления эффектов статистической памяти.

1 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 1 \div 10$		1 группа: $\delta_1(0) \sim 1 \div 10$	
LSI+61303	1.03	LSI+61303	1.04
RX J1826.2-1450	1.07	RX J1826.2-1450	1.23
GRO J0422+32	1.08	GRO J0422+32	1.39
XTE J1118+480	1.08	1E1740.7-2942	1.46
1E1740.7-2942	1.2	XTE J1118+480	1.78
SS433	1.4	SS433	2.01
GRS 1758-258	1.4	GRS 1758-258	2.11
Scorpius X-1	1.64	Scorpius X-1	2.56
V4641 Sgr	1.8	V4641 Sgr	3.06
XTE J0421+560	1.86	XTE J0421+560	5.1
GRS 1915+105↓	6.06		
2 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 10 \div 100$		2 группа: $\delta_1(0) \sim 100 \div 1\ 000$	
Cygnus X-3	9.86	GRS 1915+105↑	62.04
Circinus X-1	15.61	Circinus X-1	238.58
Cygnus X-1	18.23	Cygnus X-3	241.07
XTE J1859+226↓	34.95	Cygnus X-1	288.54
XTE J1550-564↓	45.69	H1743-322	664.63
GX 339-4↓	51.35		
H1743-322	52.6		
3 группа: $\varepsilon_1(0) \sim 100 \div 1\ 000$		3 группа: $\delta_1(0) \sim 1\ 000 \div 100\ 000$	
GRO J1655-40	101.08	XTE J1859+226↑	1 804.7
		XTE J1550-564↑	2 502.3
		GRO J1655-40	18 204
		GX 339-4↑	30 518

чу, требующую проведения дальнейшего статистического анализа временных сигналов, генерируемых двойными звездными системами в разных диапазонах энергий. В частности, в работе А. Черепашука [9] отмечено, что рентгеновские наблюдения со специальных спутников позволяют судить о наличии компактного объекта в двойной системе, а по быстрой переменности рентгеновского излучения, вплоть до 10^{-3} с, оценивать его характерные размеры. В то же время оптические наземные наблюдения дают возможность исследовать движение оптической звезды и тем самым оценить массу компактного объекта.

Полученные в табл. 1 результаты свидетельствуют о довольно сложном характере и взаимосвязях физических процессов, определяющих механизмы переноса вещества в исследуемых системах и генерации рентгеновского излучения. В динамике большей части микроквazarов проявляются эффекты долговременной памяти – существенные времена затухания корреляций (1 группа). В этом случае релаксационные процессыобладают значительной скоростью. Отдельный интерес представляют рентгеновские двойные звезды второй и третьей групп приведенной классификации. Рентгеновская активность указанных объектов характеризуется кратковременными эффектами статистической памяти и меньшей скоростью релаксационных процессов.

5. Заключение

В настоящей работе формализм функций памяти используется для анализа динамики корреляций в последовательностях вариаций интенсивности рентгеновской активности 19 двойных рентгеновских систем. Как показывают наши предварительные исследования в большинстве случаев рентгеновская активность астрофизических объектов другого типа: квазаров, лацертид, активных галактик, пульсаров характеризуется дальнедействующими эффектами статистической памяти. В случае микроквazarов были выделены три группы временных сигналов рентгеновского излучения, характеризующиеся разной степенью проявления эффектов статистической памяти и разной скоростью потери корреляционных связей. Обнаружены объекты, для которых временная эволюция рентгеновской активности характеризуется немарковским характером (дальнедействующие эффекты статистической памяти) и значительными временами затухания корреляций, квазимарковским поведением (промежуточная по времени существования статистическая память) и марковским сценарием (короткая статистическая память) с малыми временами реализации корреляционных связей. В частности, динамика потока рентгеновского излучения микроквзара GRS 1915+105 характеризуется промежуточной по времени существования памятью, преобладанием квазимарковских эффектов и умеренной скоростью релаксационных процессов.

Многообразие эффектов статистической памяти, обнаруженное в сигналах рентгеновской активности микроквazarов, определяет направления дальнейшего анализа:

- исследование автокорреляций и эффектов статистической памяти в сигналах излучения микроквazarов, фиксируемых в других диапазонах энергетического спектра;
- анализ перекрестных корреляций для одновременно фиксируемых сигналов излучения микроквazarов в разных частотных диапазонах;
- установление эффектов частотно-фазовой синхронизации между равномерной и неравномерной последовательностями флуктуаций рентгеновской активности микроквazarов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-97000-р_поволжье_а.

Литература

1. *Levine, A.M., Bradt, H., Cui, W. et al.* First Results from the All-Sky Monitor on the Rossi X-ray Timing Explorer. *ApJ*, 1996, V. 469, No. 1, L33-L36.
2. *Yulmetyev, R.M., Hänggi, P., Gafarov, F.M.* Stochastic dynamics of time correlation in complex systems with discrete current time. *Phys. Rev. E*, 2000, V. 62, 6178-6194.
3. *Дёмин, С.А., Юльметьев, Р.М., Панищев О.Ю. и др.* Нелинейная стохастическая динамика событийных корреляций в астрофизических объектах. *Нелинейный мир*, 2008, Т. 6, № 10, 560-578.
4. *Yulmetyev, R.M., Demin, S.A., Khusnutdinov, R.M. et al.* Non-Markov Statistical Effects of X-Ray Emission Intensity of the Microquasar Grs 1915+105. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2006, V. 9, No. 4, 313-330.
5. *Марков, А.А.* Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга. *Изв. физ.-мат. общ-ва Казан. ун-та*, 1906, Т. 15, № 4, 135-156.
6. *Mokshin, A.V., Yulmetyev, R.M., Hänggi, P.* Simple Measure of Memory for Dynamical Processes Described by a Generalized Langevin Equation. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, V. 95, 200601-1-4.
7. *Greenhough, J., Chapman, S.C., Chaty, S. et al.* Identification of a 12-17 d time-scale in X-ray observations of GRS 1915+105. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2003, V. 340, 851-855.
8. *Greenhough, J., Chapman, S.C., Chaty, S. et al.* Characterising anomalous transport in accretion disks from X-ray observations. *A&A*, 2002, V. 385, 693-700.
9. *Черепанчук, А.М.* Оптические исследования рентгеновских двойных систем. *УФН*, 2011, Т. 181, № 10, 1097-1104.

RELAXATION CHARACTERISTICS OF MICROQUASARS X-RAY ACTIVITY

Demin S.A., Panischev O.Yu., Nefediev Yu.A.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

Engelhard Astronomical Observatory, Kazan, Russia

We show that analyzing the total flux X-ray activity of microquasars registered by ASM review camera (All-Sky Monitor) RXTE orbital observatory (Rossi X-ray Timing Explorer), allows not only to study some accretion mechanisms in binary systems but also to carry out their classification according to the strength of the statistical memory effects. To discover the properties of X-ray activity we analyze the power spectra of memory functions, derived from the memory functions formalism, using data from microquasar GRS1915+105 as an example. Our results allow to determine three classes of the X-ray binary systems depending on ratio between the time relaxation scales and the statistical memory existence.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ТДС

Дремова Г.Н.

Российский Федеральный Ядерный Центр, Снежинск, Россия

На базе теоретических эволюционных звездных моделей-треков прогнозируются временные ряды основных процессов, сопровождающих приливную эволюцию компонентов тесных двойных систем (ТДС). Это период апсидального движения, время синхронизации осевого вращения компонентов с их орбитальным обращением, время циркуляризации орбиты ТДС и ее возраст. Оценки прогнозирования выполнены на данных двух каталогов ТДС – Свечникова, Перевозкиной, 1999 и Torres, Andersen, Gimenez, 2010 – и сравнены между собой.

1. Характерные шкалы приливной эволюции ТДС

Общей концепцией задач прогнозирования является идея построения единой последовательности временных шкал, удовлетворяющих принципу иерархической вложенности. В нашей задаче прогнозируется приливная эволюция ТДС.

В качестве опорной шкалы рассмотрим *период орбитального движения* P звезд-компонентов в ТДС, устанавливаемый из анализа транзитной фотометрии, которая также дает информацию о наклоне орбиты ТДС к картинной плоскости i , относительных радиусах r_1, r_2 и блесках компонентов L_1, L_2 . Если двойственность подтверждается спектроскопическими данными наблюдений, тогда можно оценить массы звезд M_1, M_2 , их радиусы R_1, R_2 , расстояние между звездами A , а также эксцентриситет орбиты e .

В случае $e \neq 0$ в результате приливно-вращательной деформации компонент, а также вследствие общего искривления пространства, эллиптическая орбита ТДС деформируется, совершая вращение относительно центра масс. Период вращения, известный как *период апсидального движения*, будет составлять временную шкалу следующего уровня, характеризующую приливную эволюцию ТДС.

Другое свидетельство апсидального эффекта – фазовый сдвиг в распределении поверхностной яркости компонентов, трактуемый как снос «горба» приливной волны относительно направления на спутник и обусловленный разными диссипативными процессами, доминирующими в зависимости от типа оболочки звезды. Эти процессы: конвективное трение, турбулентная вязкость, лучистое охлаждение создают в среде звезды моменты сил, стремящиеся разрушить прилив, минимизировать вариацию приливной компоненты, стабилизировать орбиту. Процессы диссипации сопровождаются синхронизацией осевого вращения звезд с их орбитальным обращением и постепенной циркуляризацией орбиты ТДС. Теория приливных осцилляций позволяет выполнить количественные оценки продолжительности этих процессов, а значит спрогнозировать временные шкалы следующего уровня – *шкалы синхронизации и циркуляризации орбиты*.

2. Тесты прогнозирования приливной эволюции ТДС

2.1. Тест I: возрасты компонентов ТДС

Определение всех выше описанных шкал, характеризующих приливную эволюцию звезд в ТДС, привязано к одному моменту времени – возрасту. Отсюда следует первый важный тест на достоверность прогнозирования: *тест на единовременность происхождения компонентов ТДС*.

Все оценки шкал выполняются в одной и той же модельной сетке треков, чтобы избежать ошибок сравнения. Предпочтение отдано моделям Claret, 2004 [1], которые в отличие от других моделей, представляют информацию о константах тормозных мо-

ментов E_2 и λ_2 , отражающих природу диссипативных сил. Все классические ингредиенты моделей связаны одним параметром – временем, что позволяет организовать численный алгоритм, обобщающий идею *изохроны* [2]. Построенные в диаграмме наиболее точно определяемых астрофизических параметров «масса-радиус», семейства изохрон проецируются в диаграммах искомых параметров: « k_2 - M », « E_2 - M », « λ_2 - M » (Рис. 1). Знание возраста звезды позволяет легко достигаться к значениям ее индивидуальных констант.

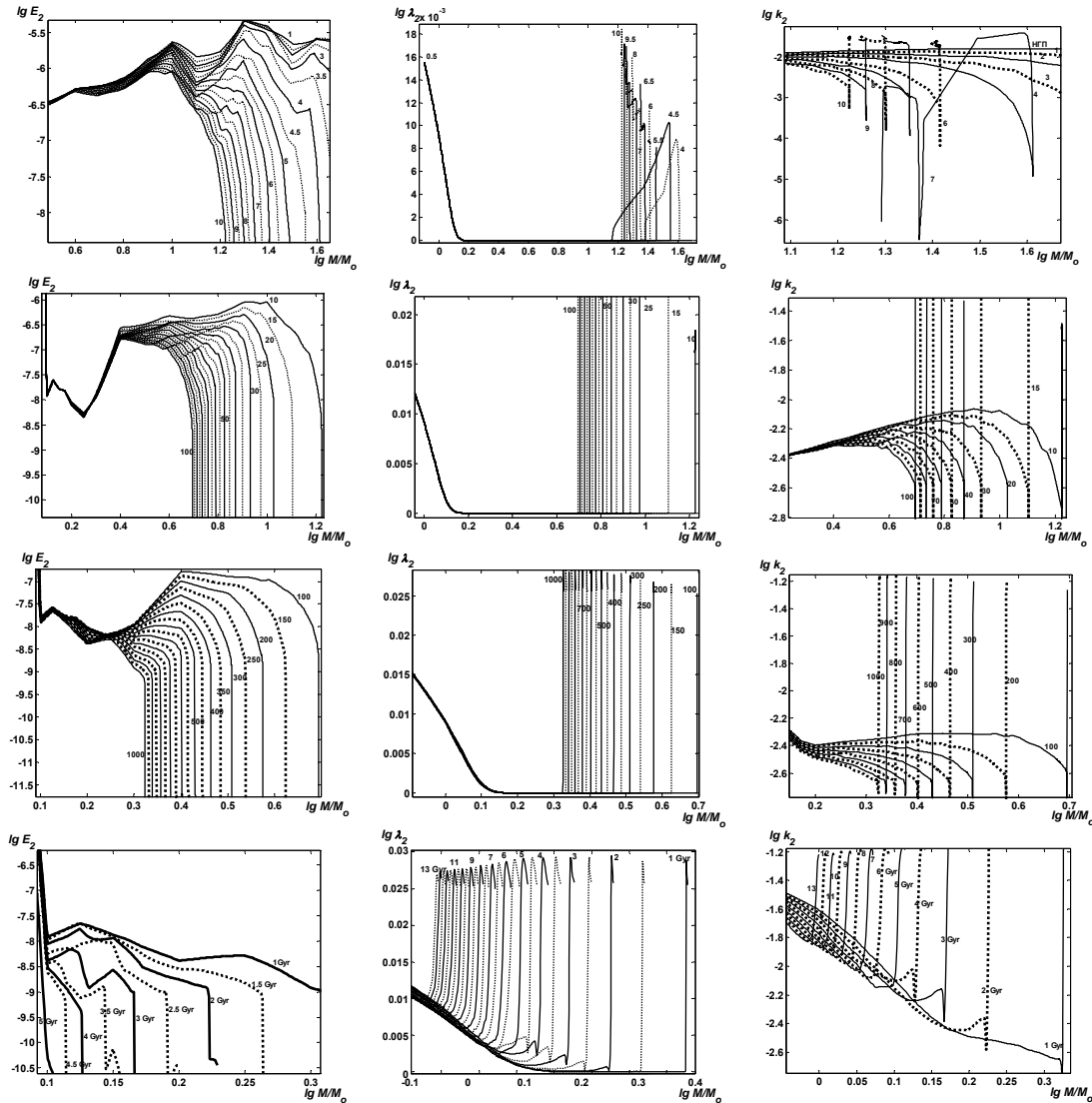


Рис. 1. Изохроны в диаграммах « E_2 - M » (слева); « λ_2 - M » (в центре); « k_2 - M » (справа).

Численный алгоритм, в основе которого теоретические звездные модели одиночных звезд, накладывает важное ограничение на класс изучаемых систем – это должны быть звезды статуса РГП. В соответствии с классификацией ТДС, разработанной Свечниковым, 1969 [3] это ТДС с Разделенными компонентами, принадлежащими Главной Последовательности, что исключает обменные процессы в системе.

Здесь рассматриваются ТДС из двух каталогов – каталога Свечникова, Перевозкиной, 1999 (С&П,1999 [4]), отражающего уровень астрометрических измерений XX века, когда подавляющее большинство систем открывались массовым фотографическим способом, и каталога XXI века Torres, Andersen, Gimenez, 2010 (TAG, 2010 [5]),

использующего данные современных космических миссий. Каковы результаты прогнозирования?

Первый тест на достоверность прогнозирования показывает, что для большинства ТДС обоих каталогов возрасты обоих компонентов находятся в хорошем согласии (Рис. 2). Систематический тренд уклонения зависимости от линии равных возрастов, выявляемый для звезд с массами, меньшими $1.5M_{\odot}$, непротиворечиво интерпретируется в рамках динамической теории магнитного торможения. Звезды с конвективными оболочками способны поддерживать интенсивный магнитный звездный ветер, который в значительной мере ускоряет темп приливной эволюции по сравнению с ядерной шкалой [6].

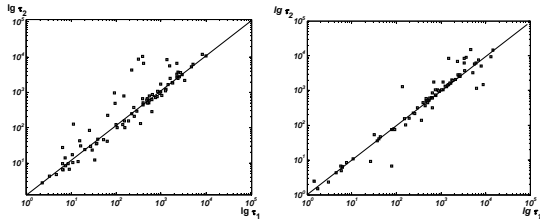


Рис. 2. Сравнение возрастов звезд τ в ТДС: данные С&П, 1999 (слева) и TAG, 2010 (справа).

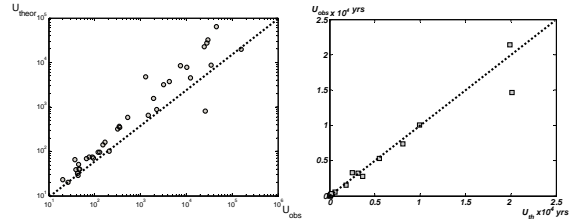


Рис. 3. Сравнение U_{obs} и U_{th} : данные С&П, 1999 (слева) и TAG, 2010 (справа).

2.2. Тест II: апсидальное движение

Замечательное свойство апсидального движения, состоящее в существовании прямой зависимости темпа поворота орбитального эллипса от распределения плотности в каждом компоненте, позволяет рассматривать параметры разложения наблюдаемого апсидального периода в качестве констант внутреннего строения k_2 . Отсюда можно сформулировать второй тест прогнозирования: *совпадение наблюдаемого и теоретического периода апсидального движения*. Наблюдаемое значение периода апсидального движения оценивается по угловой скорости периастрия $\dot{\omega}$, определяемой из диаграммы изменения орбитального периода: $U_A = 2\pi Pa / \dot{\omega}$. Теоретическая оценка периода апсидального движения выполняется в рамках теории внутреннего строения и динамической теории апсидального движения [7].

Результаты второго теста показывают (Рис. 3), что для подавляющего большинства систем с $e \neq 0$ (42 ТДС из С&П, 1999 и 22 ТДС из TAG, 2010), выполняется соответствие наблюдаемого периода апсидального движения U_{obs} и его теоретической оценкой U_{th} . Исключение составляют ТДС с ненадежными кривыми блеска. Важно подчеркнуть, что сегодня не стоит больше проблема рассогласования наблюдаемого и теоретического значений апсидального периода. Проблема, известная как релятивистский парадокс, поскольку была замечена в системах с большим релятивистским вкладом (RE) в апсидальное движение.

И пример этому – *DI Her* (RE=56%), для которой был измерен эффект Росситера-Маклафлина [8], позволяющий из анализа формы искажения спектральных линий поглощения установить степень некомпланарности. Оказалось, что оси вращения компонент высоко наклонены к орбитальной оси, и сегодня эта система, которая в течение нескольких десятилетий стимулировала апелляции к теории внутреннего строения и ОТО, показывает различие теории и практики в пределах формальной ошибки 10%.

Похожая на нее по своим параметрам система *AS Cam* демонстрирует на порядок более медленный темп апсидального движения [9] по сравнению с теоретической оценкой. В 1985 году Шакура [10] численно показал, что приведение в согласованность наблюдаемого темпа апсидального движения с теоретическим, потребует почти перпен-

дикулярной ориентации осей вращения компонентов к орбитальной оси ($\approx 87^\circ$). Необходимо измерение эффекта Росситера-Маклафлина, чтобы подтвердить этот расчет. С другой стороны, у ряда систем с $RE \rightarrow 100\%$, таких как *GG Ori*, *V541 Cyg*, *V1143 Cyg*, *V1147 Cyg*, нет рассогласования данных наблюдений и теории [11].

2.3. Тест III: синхронизация осевого вращения компонентов

Для удобства анализа шкал синхронизации τ_{syn} осевого вращения компонентов, а также сравнения их с наблюдаемыми временами синхронизации в этих ТДС, системы обоих каталогов были разделены на однородные группы по типу оболочек.

В первую группу выделяются ТДС с конвективными оболочками обоих компонентов — 24 ТДС из С&П, 1999 и 31 ТДС из TAG, 2010. Статус синхронизации устанавливался из сравнения возраста компонента и его шкалы синхронизации. Все компоненты ТДС первой группы уже синхронизовали свое вращение, что подтверждается спектроскопическими данными о скоростях вращения звезд. Вторая группа включает ТДС с лучистыми оболочками обоих компонентов — 69 ТДС из С&П, 1999 и 45 ТДС из TAG, 2010, из которых уже синхронизовались 37 и 27 ТДС, соответственно. Анализ параметров тормозных моментов с точки зрения внутреннего строения звезды позволяет спрогнозировать очередность синхронизации компонентов ТДС (Рис. 4 и Рис. 5).

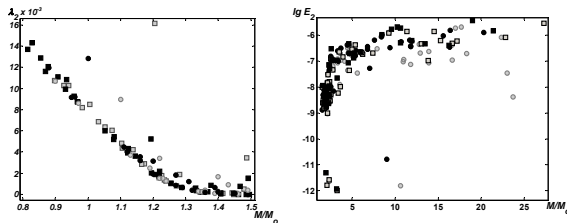


Рис. 4. Диаграммы « λ_2 - M » и « E_2 - M »: ТДС из С&П, 1999 – кружки; из TAG, 2010 – квадратики.

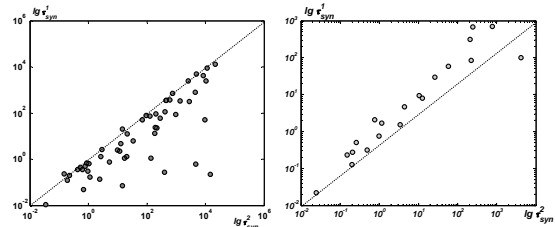


Рис. 5. τ_{syn} для ТДС из С&П, 1999: с лучистыми оболочками – (слева); с конвективными (справа).

В ТДС с конвективными оболочками меньший по массе компонент быстрее синхронизирует свое собственное вращение с орбитальным движением, тогда как в массивных ТДС с лучистыми оболочками – наоборот. В третью группу отнесены ТДС, представляющие собой «симбиоз» массивного главного компонента с лучистой оболочкой и маломассивного конвективного спутника. Как следует из расчетов, спутники в таких системах синхронизируются быстрее главных компонентов, причем разница может достигать трех и более порядков по величине – именно такой разрыв в значениях сохраняется в константах тормозных моментов, характеризующих природу диссипативных сил.

2.4. Тест IV: циркуляризация орбиты ТДС

Такое же разбиение ТДС на группы сохранялось при анализе шкалы циркуляризации. Для первой группы ТДС из С&П, 1999 оказалось, что 12 из 24 систем уже циркуляризовали свои орбиты. Этот факт устанавливается из сравнения возраста ТДС и длительности шкалы циркуляризации. Нулевые значения известных спектроскопических эксцентриситетов также подтверждают факт циркуляризации орбиты.

Результаты анализа первой группы ТДС из каталога TAG, 2010 показали, что 22 из 31 ТДС циркуляризовали свои орбиты. Во второй группе ТДС (оба компонента с лучистыми оболочками) расклад следующий: свои орбиты успели циркуляризовать 15 из 69 и 9 из 45 ТДС из каталогов С&П, 1999 и TAG, 2010, соответственно. Все это массивные системы с близко разделенными компонентами $R_1/A > 0.25$. Для некоторых из этих систем (*V822 Her*, *U Oph*) получены формальные спектроскопически оцененные экс-

центриситеты, значения которых исчезающе малы: 0.009 и 0.003, соответственно. Такие ложные эксцентриситеты могут возникать в решении кривых лучевой скорости по причине газовой материи, движущейся вместе с компонентами ТДС [12]. Для большинства ТДС третьей группы оцененная шкала циркуляризации орбиты превосходит в несколько раз хаббловское время, что делает эти шкалы эволюционно незначимыми. Как правило, это ТДС с широким разделением $R_1/A < 0.1$ и с очень слабыми диссипативными свойствами (параметры тормозных моментов $\lg E_2 < -8$).

3. Сравнительный анализ результатов

Как уже отмечалось, оценки шкал синхронизации τ_{syn} и циркуляризации τ_{cir} проводились в формализме теории приливных осцилляций Zahn [13,14], используя простые формулы, фиксирующие текущее состояние звезды, вместо системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени орбитальных элементов и астрофизических параметров компонентов ТДС. Ввиду отсутствия информации о начальных данных были произведены оценки «сверху» шкал циркуляризации. Интересно сравнить эти оценки с результатами Халиуллина, Халиуллиной, 2010 [15], полученными для массивных ТДС методом обратного интегрирования по агрегату t/t_{cir} (t — возраст), условно назад к начальной ГП. Это более корректный способ восстановления орбитальной истории ТДС.

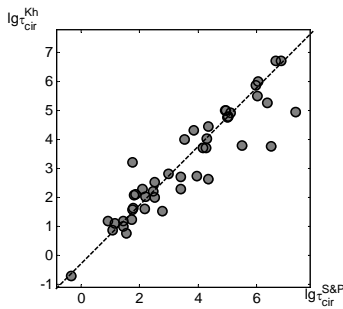


Рис. 6. Сравнение оценок шкал циркуляризации, выполненных в формализме Zahn [13,14] и в [15].

Как видно из Рис. 6, результаты сравнения находятся в неплохом согласии. Это можно объяснить тем, что рассматриваемые нами ТДС принадлежат ГП, внутри которой для звезд заданной массы, константы тормозных моментов E_2 и λ_2 , определяющие продолжительность процесса циркуляризации, меняются слабо. Поэтому независимо от направления интегрирования получаемые оценки оказываются близки к своему среднему значению.

Сравнение результатов прогнозирования на общих 54 ТДС рассматриваемых здесь каталогов

показывает высокий уровень согласованности за исключением нескольких ТДС. Расхождение в оценке возраста системы HS Hya объясняется различием в оценке масс и радиусов компонентов: ($M_1=1.34M_o$, $R_1=1.3R_o$; $M_2=1.29M_o$, $R_2=1.28R_o$) согласно С&П, 1999 и ($M_1=1.255M_o$, $R_1=1.275R_o$; $M_2=1.219M_o$, $R_2=1.217R_o$) согласно TAG, 2010 (Рис. 7).

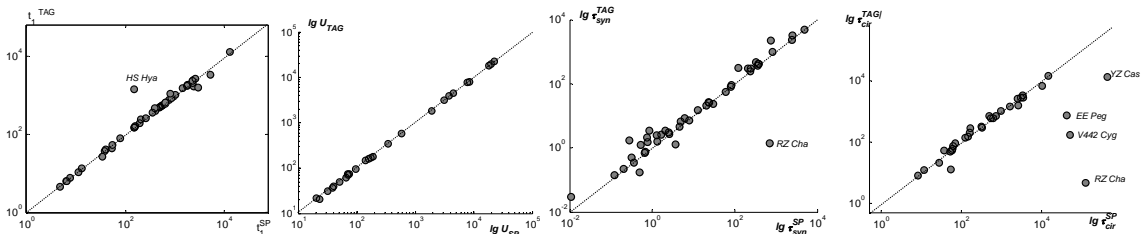


Рис. 7. Сравнение результатов прогнозирования на общих данных каталогов С&П, 1999 и AG, 2010.

Оценки периодов апсидального движения по данным двух каталогов находятся в хорошем согласии (Рис. 7). Такой же вывод следует из анализа шкал синхронизации за исключением RZ Cha. По данным С&П, 1999 массы обоих компонентов RZ Cha отвечают структуре звезд с лучистыми оболочками, по данным TAG, 2010 – с конвективными оболочками. Разрыв в значениях параметров тормозных моментов $E_2=1.3 \cdot 10^{-9}$ и

$\lambda_2=10^{-3}$ объясняет разрыв в длительности шкал синхронизации: 705 и 1.4 млн. лет, соответственно.

Анализ длительности шкал циркуляризации орбиты ТДС двух каталогов выявляет четыре системы (YZ Cas, V442 Cyg, RZ Cha, EE Peg), для которых уточненные светимости по данным TAG, 2010 привели к более реалистичным оценкам шкалы циркуляризации.

Таким образом, сравнительный анализ результатов прогнозирования приливной эволюции ТДС не выявляет заметных различий в начальных данных каталогов.

Работа выполнена по гранту проекта РФФИ 10-02-00426 "Определение фундаментальных параметров, эволюционного статуса и истории звездообразования затменных двойных систем".

Литература

1. Claret A., "New grids of stellar models including tidal evolution", A&A, 2004, **424**, 919–925.
2. Dryomova G., Svechnikov M., "Tidal torque constants as a critical test for an evolution of close eclipsing binaries", A&SS, 2012, **338**, 103–126.
3. Свечников М., «Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд», Уч. Записки УрГУ, Свердловск, серия астроном., 1969, вып. 5, N 88.
4. Свечников М., Перевозкина Е., «Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей звезд типа РГП», изд. УрГУ, Екатеринбург, 1999.
5. Torres G., Andersen J., Giménez A., "Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications", Astron. and Astrophys. Rev., 2010, **18**, 67–126.
6. Тутуков А., Дремова Г., Свечников М., «Эволюционная связь разделенных ТДС, контактных типа W UMa и звезд типа «Голубые Странники», АЖ, 2004, **81**, 244–254.
7. Russell H., "On the advance of periastron in eclipsing binaries", MNRAS, 1928, **88**, 641–643.
8. Albrecht S., Reffert S., Snellen I., Winn J., "Misaligned spin and orbital axes cause the anomalous precession of DI Herculis", Nature, 2009, **461**, 373–376.
9. Pavlovski K., Southworth J., Kolbas V., "Apsidal Motion of the Eclipsing Binary AS Camelopardalis: Discrepancy Resolved", AJ Letters, 2011, **734**, 29–34.
10. Шакура Н., «О некоторых особенностях апсидального движения в двойных звездных системах», Письма в АЖ, 1985, **11**, 536–541.
11. Wolf M., Claret A. et al., "Relativistic apsidal motion in eccentric eclipsing binaries", A&A, 2010, **509**, 18–31.
12. Боцула Р., «Нестационарность в двойных разделенных затменных системах с компонентами солнечного типа. UV Leo», Известия АО Энгельгардта, N **43, 44**, 170–184.
13. Zahn J., "The Dynamical Tide in Close Binaries", A&A, 1975, **41**, 329–344.
14. Zahn J., "Tidal Effects in Close Binary Stars," in *Proceedings of the IAU Symposium N.105*, 379–389.
15. Khaliullin K., Khaliullina A., "Synchronization and circularization in early-type binaries on main sequence", MNRAS, 2010, **401**, 257–274.

PREDICTION OF TIDAL EVOLUTION OF CBS

Dryomova G. N.

Russian Federal Nuclear Centre, Snezhinsk, Russia

The time series of basic processes, accompanying the tidal evolution of star-components of Close Binary Systems (CBS) are predicted in the framework of evolutionary stellar models. The series includes apsidal motion period, timescale of synchronization of axial rotation of the star with the orbital revolution, orbit circularization timescale, and CEB' age. Data from two catalogues by Svechnikov & Perevozkina, 1999 and Torres, Andersen, Gimenez, 2010 are used for testing the numerical prediction algorithm.

НОВАЯ ВЕРСИЯ КАТАЛОГА БЛИЖАЙШИХ ЗВЕЗД И СУБЗВЕЗД

Захожай В.А.¹, Бабенко М.А.²

¹*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина*

²*Херсонский государственный университет, Украина*

Показано, что существуют объективные обстоятельства для пересмотра Zkh-каталога ближайших звезд, в связи с появлением новой существенной информации об объектах расположенных ближе 10 пк от Солнца. В работе приведен анализ открытых ближайших субзвезд, экзопланет и околозвездных дисков, а также данных, полученных в результате осуществления миссий HIPPARCOS, и KEPLER, проекта 2MASS. Приведены результаты составления новой версии каталога звезд и субзвезд, расположенных в десятипарсековом солнечном окружении. Проведено сравнение старой (Zkh) и новой (ZkhB) версий каталогов. Обсуждаются приведенные характеристики объектов каталога, полученные прямыми и статистическими методами.

1. Введение

Изучение околосолнечного окружения, установление физических и статистических зависимостей для этой области является важной составляющей исследования Галактики. Неизбежным при этом является определение всех физических параметров объектов солнечного окружения и составления их каталога.

Первым каталогом близких объектов, в котором указывались физические параметры (массы, радиусы), был каталог ближайших к Солнцу звезд Захожая (до 10 пк, принятое сокращение названия звезд каталога – Zkh) [1], а через три года – дополнение к нему [5]. Эти каталоги включали 356 объектов, в которых была попытка исключить субзвезды. Электронная версия каталога ближайших звезд Захожая опубликована в 1996 году в международной базе каталогов внесолнечных объектов VisieR [18].

Астрофизические характеристики ближайших к Солнцу звезд со временем уточнялись и дополнялись в серии работ Захожая и его соавторов, опубликованных в период 1994-2002 гг. Это каталоги масс [6], ИК-источников [9], металличностей [10], радиусов и спектров [7] ближайших звезд. Однако эти данные остаются не обобщенными.

За последние 20 лет в результате наземных и космических миссий были уточнены и впервые определены многие астрометрические, фотометрические и спектроскопические параметры большого числа объектов, среди которых есть и ближайшие звезды и субзвезды. Получены высокоточные позиционные характеристики более 118 тыс. звезд в результате миссии HIPPARCOS. В единой системе получены астрометрические параметры более 1 млн. звезд по программе TYCHO. Для более 300 млн объектов определены фотометрические параметры в инфракрасном диапазоне и занесены в 2MASS-каталог. В космической миссии KEPLER ведется наблюдения за больше чем 100 тыс. объектами с целью поиска экзопланет.

В последние годы открыто значительное число субзвезд, в том числе и в околосолнечной области. Отличия в строении и эволюции субзвезд от звезд и планет позволили выделить их в отдельный класс [1, 3]. Стало ясно, что этот класс космических объектов столь же распространенный, как звезды и планеты, что необходимо учитывать при изучении Галактики.

В последнее десятилетие появились также каталоги отдельных выборок близких объектов: металличностей звезд в радиусе 15 пк от Солнца [12], L-карликов [15] и белых карликов [16], которые расположены ближе 20 пк от Солнца и др.

Всё вышеперечисленное указывает на необходимость пересмотра Zkh-каталога близких звезд [1, 5-7, 9, 10, 18], уточнение параметров объектов, входящих в него, выяснения их природы, уточнении старых и выявлении новых физических и статистических закономерностей для звезд и субзвезд.

2. Предварительная статистика близких звезд и субзвезд

Мы предлагаем новый каталог ближайших к Солнцу звезд и субзвезд, основанный на Каталоге ближайших звезд до 10 пк Захожая [18], имеющий определенные и значительные от него отличия.

Основным параметром, который задает, какие именно объекты должны быть занесены в каталог, а также общее их количество, является параллакс. На сегодня наиболее точно параллаксы объектов до 9^m и частично до 11^m измерены в миссии HIPPARCOS. Поэтому, последнюю версию этого каталога [13] мы использовали для выявления близких объектов и в качестве источника экваториальных координат в системе ICRS, собственных движений и лучевых скоростей звезд. Фотометрические данные взяты из каталогов 2MASS [17], USNO-B [14] и др. Все окосолнечные объекты представлены в указанных каталогах, что позволяет однозначно их идентифицировать.

Основную сложность при составлении каталога представляет определение астрофизических параметров, таких как масса, радиус, эффективная температура, светимость, металличность, а также параметры, характеризующие осевое вращение. Сложность заключается в том, что для окосолнечной области указанные параметры прямыми методами определены лишь для 10% объектов. Однако, накопленный за последние 30 лет статистический материал позволяет вычислить существенное число этих параметров косвенными методами.

В итоге, в новом каталоге планируется опубликовать следующие параметры звезд и субзвезд: экваториальные координаты, собственные движения, лучевые скорости, параллаксы, видимые, абсолютные и болометрические звездные величины (согласованные с приводимой светимостью), спектры, массы, радиусы, эффективные температуры, металличности, скорости осевого вращения, параметры кратных систем и сведения о наличии экзопланет и невидимых спутниках.

Большая часть работы над каталогом выполнена. На момент составления каталога (середина 2012 г.), в радиусе 10 пк от Солнца насчитывалось 360 объектов, из которых 15% составляют объекты со спектральными типами M5,5-M9, L, T (такие объекты сейчас относят к субзвездам). Среди ближайших звезд и субзвезд встречаются преимущественно звезды главной последовательности, присутствует небольшое количество субгигантов, субкарликов и белых карликов. М-карликов наблюдается больше всего – 323. Отсутствуют гиганты и звезды спектральных типов O, B. Также в этой области содержится 51 переменная звезда, 58 двойных или кратных систем.

У 19 звезд выявлены планетные системы. Всего в окосолнечной области насчитывается 38 планет (включая классические, т.е. большие, планеты Солнечной системы), плотность распределения которых по массе подчинена примерно равномерному закону. Среди экзопланет, наименьшую массу (около $2m_{\oplus}$) имеют GJ581e и GJ139c.

Число объектов в новом каталоге лишь незначительно превышает (на 4) число звезд каталога Захожая версии 1996 г. [18]. Это связано с тем, что астрометрический телескоп HIPPARCOS определял параллаксы в основном до 9^m , в то время как основная доля неизвестных близких звезд, как показал анализ функции светимости ближайших звезд [8], имеют абсолютные величины более 12^m . С другой стороны, более точное определение годовых параллаксов у ряда звезд ярче 9^m , оказалось меньше $0''.100$.

3. Структура ZkhB-каталога

После уточнения параллаксов 83 объекта Zkh-каталога оказались с параллаксами $\pi < 100$ мс дуги (табл. 1). Из них 37% звезд и субзвезд попадают в интервал $0''.090 < \pi < 0''.100$, для 10% объектов отклонение параллакса в меньшую сторону от 100 мс дуги составляет до 90%. Формально, эти объекты должны быть исключены из Zkh-каталога.

Таблица 1. Параллаксы (π) звезд и субзвезд Zkh-каталога, чьи значения < 100 мс дуги.

Zkh	π , мс дуги	Zkh	π , мс дуги	Zkh	π , мс дуги	Zkh	π , мс дуги	Zkh	π , мс дуги	Zkh	π , мс дуги
10	99,35	56	63,40	131	87,96	183	1,67	207	84,76	291	91,31
11	99,35	57	63,40	132	87,96	185	69,59	216	7,33	292	91,31
12	99,35	61	87,78	136	66,00	186	2,73	220	99,00	295	97,00
13	90,42	72	80,40	138	81,08	188	97,91	223	10,19	296	97,00
21	95,50	83	91,65	140	73,30	189	60,30	224	60,83	313	48,22
22	99,80	84	91,65	143	60,80	191	85,54	229	44,49	322	61,29
32	87,62	86	98,06	152	93,00	192	48,38	230	93,32	323	2,48
35	90,86	101	60,94	158	75,97	195	75,38	231	93,32	324	27,11
37	3,60	103	39,75	159	75,97	196	64,06	239	96,67	325	61,79
39	96,02	104	39,76	160	5,11	197	64,06	240	94,59	327	97,61
40	79,68	105	39,76	164	98,04	202	91,44	241	74,84	329	96,00
41	83,75	119	71,10	166	3,20	203	76,87	257	8,50	330	96,00
47	96,60	122	58,79	170	91,50	205	87,75	261	64,47	352	87,56
55	64,40	128	95,58	175	98,45	206	87,75	283	38,96		

Вместе с этим, согласно полученным новым данным, 87 звезд и субзвезд попадают в область 10 пк от Солнца. Параметры этих объектов приведены в табл. 2. Они и составили основу нового Каталога близких звезд и субзвезд под номерами ZkhB 401 – ZkhB 487.

Таблица 2. Экваториальные координаты (α , δ) на эпоху J2000, звездные величины (m_V) в V-полосе, спектральные типы и классы светимости (Sp) звезд и субзвезд ZkhB-каталога.

ZkhB	Идентификатор	α_{2000} , h m s	δ_{2000} , o ' "	m_V	π , мс ду- ги	Sp
1	2	3	4	5	6	7
401	GJ 1005 A	00 15 27,7	-16 07 56	13,29	191,86	M4V
402	GJ 1005 B	00 15 27,8	-16 07 56	15,96	191,86	M5,5V
403	GJ 2005 B	00 24 44,2	-27 08 24		135,30	M8,5V
404	GJ 2005 A	00 24 44,9	-27 08 25	15,42	135,30	M5,5V
405	GJ 2005 C	00 24 44,2	-27 08 24		135,30	L0V
406	2MASS J00361617+1821104	00 36 16,2	+18 21 10		114,20	L3,5V
407	GJ 2012	00 41 26,0	-22 21 02	14,60	110,54	DQ9
408	LHS 1326	02 02 16,2	+10 20 14	15,61	112,00	M6V
409	LHS 1339	02 05 48,6	-30 10 36		107,81	M2,5V
410	GJ 3146	02 16 29,8	+13 35 14	15,79	118,20	M6V
411	2MASS J02550357-4700509	02 55 03,6	-47 00 51		181,80	L8V
412	2MASS J03393521-3525440	03 39 35,2	-35 25 44		201,40	M9V
413	2MASS J04151954-0935066	04 15 19,5	-09 35 07		174,00	T8V
414	GJ 3306	04 37 47,4	-08 49 11	14,10	105,10	DQ7
415	LHS 1723	05 01 57,5	-06 56 46	12,16	187,92	M4V
416	LTT 2151	05 02 28,4	-21 15 24	8,36	116,59	M0V
417	GJ 3325	05 03 20,1	-17 22 25	11,74	108,61	M3V

Продолжение табл. 2.

1	2	3	4	5	6	7
418	GJ 190	05 08 35,0	-18 10 19	10,30	107,85	M3,5V
419	GJ 3379	06 00 03,5	+02 42 24	11,33	190,93	M4V
420	GJ 3378	06 01 11,1	+59 35 51	11,71	132,20	M3,5V
421	GJ 3380	06 02 29,2	+49 51 56	14,48	107,70	M5V
422	GJ 229 B	06 10 35,1	-21 51 18		173,19	T7V
423	HIP 31293	06 33 43,3	-75 37 48	10,35	110,88	M2V
424	HIP 31292	06 33 46,8	-75 37 30	11,41	115,19	M3V
425	GJ 3421	07 03 55,7	+52 42 08	13,30	108,50	M5V
426	UGPS J072227.51-054031.2	07 22 27,9	-05 40 32		340,00	T9V
427	2MASS J07271824+1710012	07 27 18,3	+17 10 01		110,00	T7V
428	8pc 162.00B	07 36 25,0	+07 04 44	13,22	162,00	M5V
429	GJ 3454	07 36 25,1	+07 04 43	13,29	116,60	M5V
430	HIP 40501	08 16 07,9	+01 18 09	10,09	109,62	M2
431	GJ 3517	08 53 36,2	-03 29 32	18,80	116,80	M9V
432	8pc 224.00A	08 58 56,1	+08 28 28	10,89	147,66	M3,5V*
433	8pc 224.00B	08 58 56,1	+08 28 28		147,66	M3,5V*
434	8pc 224.00C	08 58 56,1	+08 28 28		147,66	M3,5V*
435	HIP 46655	09 30 44,6	+00 19 22	11,71	103,46	M3,5V
436	2MASS J09373487+2931409	09 37 34,9	+29 31 41		163,00	T6V
437	HIP 47425	09 39 46,4	-41 04 03	10,69	105,63	M3V
438	LHS 288	10 44 21,3	-61 12 35	13,92	208,95	M4V
439	GJ 3622	10 48 12,6	-11 20 08	15,60	221,00	M6V
440	HIP 56528	11 35 27,0	-32 32 24	9,81	112,58	M1,5V
441	HIP 57443	11 46 31,1	-40 30 01	4,87	108,45	G2V
442	GJ 467 A	12 28 40,3	-71 27 54	13,62	152,00	K5V
443	GJ 473	12 33 17,4	+09 01 16	12,47	227,00	M5V
444	GJ 480.1	12 40 46,3	-43 33 59	12,24	128,52	M3V
445	GJ 2097	13 07 00,0	+20 49 00	12,54	156,00	M1,5V
446	GJ 3789	13 31 46,6	+29 16 37	12,19	126,00	M4V
447	HIP 66906	13 42 43,3	+33 17 24	11,97	107,77	M4V
448	GJ 3855	14 30 37,9	+59 43 25	17,88	103,30	M6,5V
449	HIP 72509 B	14 49 31,8	-26 06 42	12,07	214,67	M1,5V
450	HIP 72511 A	14 49 32,6	-26 06 21	11,66	247,89	M1V
451	CE Boo A	14 54 29,2	+16 06 04	10,20	103,59	M2,5V
452	CE Boo B	14 54 29,2	+16 06 04		103,59	M8,5V
453	CE Boo C	14 54 29,2	+16 06 04		103,59	M9V
454	GJ 3877	14 56 38,3	-28 09 47	17,05	157,80	M7V
455	GJ 570 D	14 57 15,0	-21 21 48		169,32	T7,5V
456	GJ 570 C	14 57 26,5	-21 24 42	8,00	133,63	M3V
457	2MASS J15074769-1627386	15 07 47,7	-16 27 39		136,40	L5,5V
458	12 Oph	16 36 21,5	-02 19 29	5,77	102,55	K2V
459	HIP 82725	16 54 32,6	-62 24 14	11,58	241,17	K0IV
460	GJ 3988	17 03 23,9	+51 24 22	13,56	105,20	M4V
461	8pc 137.84A	17 09 31,5	+43 40 53	11,77*	137,84	M3,5*
462	8pc 137.84B	17 09 31,5	+43 40 53	11,77*	137,84	M3,5*
463	G 203-47	17 09 31,5	+43 40 53	11,78	334,31	M3V
464	GJ 661 A	17 12 07,9	+45 39 58	9,35*	167,29	K5V*
465	GJ 661 B	17 12 07,9	+45 39 58	9,35*	167,29	K5V*
466	36 Oph A	17 15 21,0	-26 36 10	4,32*	168,54	K2V*
467	37 Oph B	17 15 21,0	-26 36 10	4,32*	168,54	K2V*
468	HIP 84581	17 17 23,5	-07 52 35	11,17	103,28	F0IV

Продолжение табл. 2.

1	2	3	4	5	6	7
469	GJ 667 A	17 18 57,2	-34 59 23	5,91	146,29	K3V
470	GJ 667 B	17 18 57,2	-34 59 23		146,29	K5V
471	HIP 85605	17 29 36,3	+24 39 11	11,15	146,84	K0V
472	HIP 86057	17 35 13,6	-48 40 51	10,13	102,83	M3V
473	70 Oph	18 05 27,4	+02 29 58	4,03	196,72	K0V
474	GJ 4053	18 18 57,3	+66 11 33	13,46	137,30	M4,5V
475	Chi Dra A	18 21 03,4	+72 43 58	3,57	124,11	F7V
476	GJ 4063	18 34 36,7	+40 07 26	11,75	138,00	M3,5V
477	GJ 1245 C	19 53 54,9	+44 24 54	17,50	220,20	M5,5V
478	HIP 103039	20 52 33,0	-16 58 29	11,46	175,03	M4V
479	GJ 829 A	21 29 36,9	+17 38 36		148,29	M4V
480	GJ 829 B	21 29 36,9	+17 38 36	11,06	148,29	M3,5V
481	V* V374 Peg	22 01 13,1	+28 18 25	11,98	112,33	M4V
482	Eps Ind B	22 04 10,5	-56 46 58		275,79	T1V
483	Eps Ind C	22 04 10,5	-56 46 58		275,79	T6V
484	GJ 4274	22 23 07,0	-17 36 25	13,25	134,10	M4V
485	GJ 866 B	22 38 33,0	-15 18 06	13,24	289,50	M5V
486	HIP 112465 A	22 46 51,6	+44 20 22	10,66*	198,07	G5V*
487	HIP 112465 B	22 46 51,6	+44 20 22	10,66*	198,07	G5V*

В табл. 2 символом «*» обозначены спектральные типы и звездные величины кратной системы в целом. Указанные параметры отдельных компонентов пока не удалось определить. Среди объектов нового ZkhB-каталога 29% - субзвезды со спектральными типами M5,5-T9, 2% - белые карлики, 2% - субкарлики и 67% - звезды спектральных типов F7-M5.

Заключение

Готовящийся к изданию каталог продолжает традиции предыдущего издания каталога ближайших звезд [4, 5, 18], в котором наряду с позиционными, кинематическими и фотометрическими характеристиками приводятся астрофизические параметры. Спектр может быть установлен для подавляющего числа звезд. Учитывая это и установив зависимости «масса – спектр» и «радиус – спектр» для звезд главной последовательности [2, 11], теперь имеется возможность вычислить вероятные массы и радиусы большинства звезд каталога. Это и выполнено в готовящейся версии нового каталога.

Характерной особенностью нашего каталога является также наличие в нем субзвезд, которые как отмечено выше, представлены поздними M-карликами, L- и T-карликами.

Литература

1. Александров Ю.В., Захожай В.А. Что такое планеты // Астрон. вестн. – 1980. – Т. 14, № 3. – С. 129-132.
2. Бабенко М.О., Захожай В.А. Новые массы звезд, вычисление прямыми методами// Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т.8, №1. – С.6-12.
3. Захожай В.А., Бабенко М.О. Ближайшие к Солнцу звезды и субзвезды: обзор // Кинем. и физ. неб. тел. – В печати.
4. Захожай В.А. Ближайшие звезды // Вестн. Харьк. ун-та. – 1979. – № 190, вып. 14: Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия. – Харьков. – С. 52-77.
5. Захожай В.А. Дополнения и исправления каталога ближайших звезд до 10 пс // Вестн. Харьк. ун-та. – 1982. – № 232, вып. 17: Астрометрия и физика Солнечной системы. – Харьков. – С. 64-70.

6. *Захожай В.А.* Массы ближайших звезд // Кинем. и физ. неб. тел. – 1994. – Т. 10, № 2. – С. 68-73.
7. *Захожай В.А.* Радиусы и спектры ближайших звезд // Кинем. и физ. неб. тел. – 2002. – Т. 18, № 6. – С. 535-552.
8. *Захожай В.А.* Статистические свойства звезд и кратных систем в области 10 пк // Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды. – Свердловск: УрГУ. – 1990. – С. 44-54.
9. *Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф., Васильев В.П. и др.* ИК-источники в окрестностях Солнца // Кинем. и физ. неб. тел. – 1994. – Т. 10, № 2. – С. 74-85.
10. *Захожай В.А., Шапаренко Э.Ф.* Металличности близких звезд // Кинем. и физ. неб. тел. – 1996. – Т. 12, № 2. – С. 20-29.
11. *Babenko M.A., Zakhzhaj V.A.* New stellar radii, calculation of direct methods // *Odessa Astron. Publ.* – In press.
12. *Luck R.E., Heiter U.* Stars Within 15 Parsecs: Abundances for A Northern Sample // *Astron. J.* – 2005. – Vol. 129. – P. 1063–1083.
13. *Leeuwen F.* Validation of the new Hipparcos reduction // *Astron. Astroph.* – 2007. – Vol. 474, Is. 2. – P. 653-664.
14. *Monet D.G., Levine S.E., Canzian B. et al.* The USNO-B Catalog // *Astron. J.* – 2003. – Vol. 125, Is. 2. – P. 984-993.
15. *Reid I.N., Cruz K.L., Burgasser A.J. et al.* L-Dwarf Binaries in the 20-Parsec Sample // *Astron. J.* – 2008. – Vol. 135. – P. 580-587.
16. *Sion E.M., Holberg J.B., Oswalt T.D. et al.* The White Dwarfs Within 20 Parsecs of the Sun: Kinematics and Statistics // *Astron. J.* – 2009. – Vol. 138. – P. 1681- 1689.
17. *Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* – 2006. – Vol. 131, Is. 2. – P. 1163-1183.
18. *Zakhzhaj V.A.* Catalogue of stars within ten parsecs of the Sun. – 1996. – URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=V/101> .

NEW VERSION OF THE NEAREST STARS AND SUBSTARS CATALOGUE

Zakhzhaj V.A.¹, Babenko M. A.²

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine*

²*Kherson State University, Ukraine*

In the paper is shown that there are objective reasons for the Zkh-catalog of nearest stars revision, due to the advent of new substantial information about the objects located closer 10 pc to the Sun. The discovered nearest substars, exoplanets and circumstellar disks, as well as data obtained from the missions HIPPARCOS and KEPLER, and 2MASS project are analyzed. The results of the new version of the catalog of nearest stars and substars complication are presented. Old (Zkh) and new (ZkhB) versions of the catalog are compared. Objects characteristics presented in the catalog and obtained by direct and statistical methods are discussed.

КАТАЛОГ ЗВЕЗД С БОЛЬШИМИ СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ (ВЕРСИЯ 3.0)

Иванов Г.А.

Главная Астрономическая Обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

На основе оригинальных определений собственных движений звезд каталога ФОНАК 1.1, Hipparcos, Tycho-2, UCAC2,3 СМС (STAR 11), PPM, PPMX, NPM1, NPM2, Carte du Ciel (Bordo), XZ80Q, Pul-3, Pul2, NLTT, LHS, GCVS, LHS, Lowell Proper Motion, Bruce Proper Motion и литературных источников, в количестве около 800, составлен каталог 4 300 000 звезд с большими (≥ 40 мсд/год) собственными движениями, включающий астрометрические и астрофизические характеристики.

На основе оригинальных определений собственных движений звезд каталога ФОНАК 1.1, каталогов Hipparcos, Tycho-2, UCAC2 (до $+40^\circ$ по склонению и в отдельных областях до $+52^\circ$), UCAC3, СМС (STAR 11), PPM, PPMX, NPM1, NPM2, Carte du Ciel (Bordo), XZ80Q, Pul-3, Pul2, NLTT, LHS, GCVS, Lowell Proper Motion, Bruce Proper Motion и литературных источников, в количестве около 800, составлен каталог звезд с большими собственными движениями. Большими считали движения 0.04сек./год - суммарное значение по обеим координатам - и больше. Таких звезд в зоне охвата по склонению от $-2^\circ.5$ до $+90^\circ$ и предельной звездной величине 16^m (для кратных систем спутники до 17^m) в нашем списке оказалось 4 300 000 [1] (в версии 2.0 [2] 514 000 звезд). В каталог включены экваториальные (B1950.0- пп.53-66, см. ниже табл. 2; J2000.0 в системе ICRF- пп.68-76, 86-93), галактические координаты (J2000.0- пп.39-52), собственные движения (пп.79-84, 94-99), оценки звездных величин, а также астрофизические характеристики; точные (до 0.05^m) звездные величины в системе V (пп.120-124, 223600 определений), В или В-V (пп.114-118, 197400 определений), U или U-B (пп.126-130, 7400 определений), R или V-R (пп.132-136, 6200 определений), I или R-I, V-I (пп.138-142, 26000 определений), J (пп.144-148, 4137200 определений), H (пп.150-154, 4137200 определений), K (пп.156-160, 4137200 определений); металличность [Fe/H] или [M/H] (пп.162-165, 4300 определений), радиальную скорость (пп. 167-172, 6800 определений), спектр (пп.175-177), класс светимости (пп.179-180); метки переменности (пп.181, 4300 звезд), кратности системы и другие характеристики. Для удобства пользования приведены номера звезд из различных каталогов, авторских списков звезд (пп.195-322) и номера основных источников (пп.3-38), которые послужили основой для создания каталога. Значения прямого восхождения, склонения, собственного движения, звездной величины, радиальной скорости и других характеристик выписаны с точностью их определения в источниках. Каталог представлен массивом звезд, упорядоченным по прямому восхождению. Информация о звезде записана в цифровом целочисленном виде одной строкой, включающей 322 символа. Наличие дополнительной информации (например, несколько значений определения звездной величины, радиальной скорости и др.) увеличивает количество строк отводимых на одну звезду (см. п.1). С учетом этого общее количество строк составляет 4 540 000.

На данный момент каталог включает коды 67 каталогов и авторских списков звезд. На web страничке Главной Астрономической Обсерватории в ближайшее время будет размещен каталог: <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/astro/h-pms3.dat>

Эти звезды представляют определенный интерес при проведении различных звездно-статистических работ, в частности для определения функции светимости в окрестности Солнца, определения координат апекса Солнца, калибровки шкалы звездных

величин и решения других задач. Имея, по возможности, полную выборку звезд до определенной звездной величины интересно было бы рассмотреть их движения с целью выявления звездных потоков и изменения их с течением времени.

Используя величины J, H, K каталогов PPMX, UCAC2,3, были найдены общие звезды (около 4570) с известными B, V, R_k, I_k величинами, разбитых на три группы по спектрам, для определения коэффициентов перехода и дальнейшего вычисления значений V, R_k, I_k для всех звезд PPMX, UCAC2,3 в нашем каталоге:

$$R_k = f(J, H, K), \quad I_k = f(J, H, K), \quad V = f(J, H, K).$$

Для проблемных звезд (искаженные значения R_k) исключали из решения уравнений связи, в предположении ошибочности значения K, или H, или J

$$R_k = f(J, H), \quad R_k = f(J, K), \quad R_k = f(H, K).$$

Аналогично для I_k, V. В итоге получили значения V, R_k, I_k с точностью ±0.31^m, ±0.22^m, ±0.11^m соответственно [3].

При определении координат апекса Солнца [4] пренебрегали вращением Галактики и предполагали, что распределение пекулярных движений звезд и ошибок определения собственных движений подчиняются случайному закону распределения. Тогда собственные движения рассматриваемых звезд лежат на больших кругах небесной сферы, полюса которых тяготеют к большому кругу, один из полюсов которого близок к апексу Солнца. Решения проводили для различных спектральных классов звезд. Координаты A, D оказались меньшими, чем по звездам с μ < 50 мсд/год, поскольку звезды с большими собственными движениями, являясь наиболее близкими к Солнцу, движутся иначе, чем более отдаленные объекты тех же спектральных классов.

Очень часто бывает, что одна и та же звезда, встречаясь в разных каталогах, имеет различную идентификацию. Составлен идентификационный список таких звезд [3]. В первой версии идентификационный список содержал 515 100 номеров звезд, в версии 2.0 [5] – 1 005 200, в версии 3.0 около 4 190 000 номеров; причем по десять номеров содержат около 3500 звезд, 11 номеров – 1215, 12 номеров – 525, 13 номеров – 290, 14 номеров – 190, 15 номеров – 125, 16 номеров – 66, 17 номеров – 20, 18 номеров – 8, 19 номеров – 1, 20 номеров – 1.

Достоверность результатов решения любой, выше приведенной, задачи зависит от полноты выборки звезд в конкретном интервале звездных величин и значений собственных движений. В нашем случае выборка будет более - менее полной до 15.5^m - 16.0^m величины (по оценкам около 85%) для всех значений собственных движений ≥ 40 мсд/год в выбранном нами интервале звездных величин. Ниже приводим в процентном отношении, усредненные по 2-х-часовым интервалам прямого восхождения, вклад основных каталогов в общий список звезд:

Таблица 1.

Вклад основных каталогов	Проценты
Pul-3	0.5
Luyten	0.5
Carte du Ciel (Bordo)	1.5
FONAC 1.1	1.5
Hipparcos	1.5
Tycho-2	7.0
PPMX	19.0
CAC2,3	68.5

Примечание

Значения прямого восхождения, склонения, собственного движения, звездной величины, радиальной скорости и других характеристик выписаны с точностью их определения в источниках. При этом, как правило, номер источника, который послужил основой для координат и собственных движений, записывали в последней колонке (пп.35-38), отводимой под номер. Если значения координат и собственных движений отличались в пределах 2σ точности их определения в источниках, то проводили усреднение и номера источников записывали в предпоследней и последней колонке (пп.31-38), отводимой под номер. Усреднение проводили также, если значения характеристик для конкретной звезды, взятых из различных источников, отличались в пределах 0.01-0.02 звездной величины, радиальной скорости – 1 км/сек., металличности – 0.1. Для кратных систем значения углов и расстояний от центральной звезды до спутников (пп.185-193) обновляли в процессе получения новой информации. В случаях записи информации о звезде в нескольких строках, начиная со второй, в колонках склонение (B1950.0, J2000.0), собственное движение и эпоха ставили пробел. При наличии дополнительных точных координат и собственных движений в соответствующих колонках для J2000.0 выписывали эти значения. Ниже приведена, для примера, краткая форма записи информации о звездах в каталоге:

Таблица 2.

Позиция	Примечание
1	информация о звезде записана в двух и более строках
3-38	номера источников, использованных при составлении каталога
39-52	галактические координаты, J2000
53-66	экваториальные координаты, B1950
68-76, 86-93	экваториальные координаты, J2000
79-84, 94-99	собственные движения
114-160	значение звездной величины в системе B, V, U, R, I, J, H, K
162-165	значение металличности
167-172	радиальная скорость
175-177	спектр звезды
179-180	класс светимости
181	метка звезды
185-193	значения углов и расстояний от центральной звезды до спутника
195-332	коды и номера звезд в каталогах

Информация о каталоге систематически пополняется. На данный момент в CDS находится 3 версии идентификационных списков звезд [6, 7, 8] и 2 версии каталога [9, 10]. Готовится окончательный вариант третьей версии.

Литература

1. *Иванов Г.А.* Каталог звезд с большими собственными движениями (версия 3.0). // Кинематика и физика небес. тел. – 2012. – 28, №5. – С. 76-80.
2. *Иванов Г.А.* Каталог звезд с большими собственными движениями (версия 2.0). // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – 24, №6. – С. 480-483.
3. *Иванов Г.А., Яценко А.И.* Идентификационный список звезд с большими собственными движениями (версия 3.0). Калибровка звездных величин // Кинематика и физика небес. тел. – 2011. – 27, №5. – С. 60-64.
4. *Иванов Г.А., Яценко А.И.* Определение координат апекса Солнца по звездам с большими собственными движениями // Кинематика и физика небес. тел. – 2005. – 21, №4. – С. 317-320.

5. *Иванов Г.А.* Идентификационный список звезд с большими собственными движениями (версия 2.0) // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – 24, №2. – С. 164-166.
6. *Ivanov G.A.* Cross - identification of stars with high-proper motions .V1.0 // CDS Strasbourg – 2005. - <ftp://cdsars.u-strasbg.fr/pub/cats/IV/28>
7. *Ivanov G.A.* Cross - identification of stars with high-proper motions .V2.0 // CDS Strasbourg – 2008. - <ftp://cdsars.u-strasbg.fr/pub/cats/IV/30>
8. *Ivanov G.A.* Cross - identification of stars with high-proper motions. V3.0 // CDS Strasbourg – 2012. - <ftp://cdsars.u-strasbg.fr/pub/cats/IV/32>
9. *Ivanov G.A.* Catalogue of stars with high-proper motion. V 1.0 // CDS Strasbourg -2007.-<ftp://cdsars.u-strasbg.fr/pub/cats/I/306>
10. *Ivanov G.A.* Catalogue of stars with high-proper motion. V 2.0 // CDS Strasbourg -2008.-<ftp://cdsars.u-strasbg.fr/pub/cats/I/306A>

CATALOGUE OF STARS WITH HIGH - PROPER MOTION (VERSION 3.0)

Ivanov G.A.

Main Astronomical Observatory National Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

Catalogue (astrometric and astrophysical parameters) of 4 300 000 stars up to 16^m magnitude (declination -2.5° - +90°) with high-proper motion (more than 0.04"/year) has been compiled using original definitions from catalogue FONAK1.1 , the data of catalogues Hipparcos, Tycho-2, CAC2,3, CMC (STAR 11), PPM, PPMX, NPM1, NPM2, XZ80Q, Pul-3, Pul2, Carte du Ciel (Bordo), NLTT, GCVS, LHS, Lowell Proper Motion, Bruce Proper Motion as well as the data of about 800 other published sources.

ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛАКСЫ 88 ЗВЕЗД С БОЛЬШИМИ СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

Измайлов И.С., Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю.

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

Тригонометрические параллаксы 88 звезд с большими собственными движениями были определены на основе результатов ПЗС-наблюдений, выполненных с помощью 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории ($D = 65$ см, $F = 10.5$ м, $FOV = 12 \times 12$ arcmins, $scale = 238$ mas/pix, предельная звездная величина $V = 19^m$ при экспозиции 3 мин.). Эти звезды, в основном, являются М-карликами главной последовательности. Три звезды представляют собой белые карлики. 15 сравнительно далеких звезд ($\pi \leq 10$ mas), скорее всего, следует считать субкарликами галактического гало. Относительные параллаксы программных звезд определялись на основе ПЗС-кадров, полученных в ходе трех-четырёх серий (3 или 4 точки в течение 1.5 — 2 лет). Наблюдения 29 звезд Sample-1 ($\mu > 1$ arcsec/yr) были выполнены, в основном, в 2007-2009 годах. Дополнительные наблюдения этих звезд и 59 новых звезд Sample-2 ($\mu > 0.5$ arcsec/yr) были осуществлены в 2009-2011 годах. Число опорных звезд варьировалось от 5 до 20. Процедура абсолютизации позволила перейти от относительных параллаксам к абсолютным (тригонометрическим). Тестирование алгоритма абсолютизации, выполненное с помощью данных каталога Hipparcos2, продемонстрировало его состоятельность. Тригонометрические параллаксы 45 звезд из данного списка были определены впервые. Типичное значение стандартной ошибки полученных тригонометрических параллаксам составило 2 mas — 4 mas. Для 13 звезд эта величина лежит в пределах 6 mas — 15 mas.

Введение

Для построения «трехмерной карты» ближайших галактических окрестностей Солнца, понимания космогонии комплекса небесных тел, расположенных в этой области Галактики, необходимо знать точные расстояния до рассматриваемых объектов. Менее чем для половины из этих объектов (в основном, это звезды низкой светимости) известны тригонометрические параллаксы. Поэтому в разных обсерваториях мира реализуются соответствующие наблюдательные проекты.

Звезды низкой светимости, расположенные в солнечной окрестности, характеризуются большими (более 0.1 arcsec/yr) собственными движениями. Неслучайно именно каталоги быстрых звезд (например, LSPM [1]) использовались и используются для формирования параллактических программ разных обсерваторий. Тысячи быстрых звезд были включены в программу определения параллаксам обсерватории Йельского университета. Полученные в рамках этого проекта данные представлены в Общем каталоге тригонометрических параллаксам звезд (YPC [2]). Похожие проекты были реализованы в USNO [3 и 4]. В последнее десятилетие целый ряд научных групп ведут работы в этом направлении (например, STIOP1 [5]).

В Пулковской обсерватории реализуется комплексная программа исследования звезд с большими собственными движениями, частью которой является план по уточнению и определению ранее неизвестных тригонометрических параллаксам звезд низкой светимости в окрестностях Солнца [6 и 7].

Наблюдения и обработка данных

Наблюдения 29 звезд (Sample-1, $\mu > 1$ arcsec/yr) были выполнены, в основном, в 2007-2009 годах. Дополнительные наблюдения этих звезд и 59 новых звезд (Sample-2,

$\mu > 0.5$ arcsec/yr) были осуществлены в 2009-2011 годах. Все наблюдения выполнены с помощью 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории ($D = 65$ см, $F = 10.5$ м, $FOV = 12 \times 12$ arcmins, $scale = 238$ mas/pix, предельная звездная величина $V = 19^m$ при экспозиции 3 мин., камера FLI ProLine09000). Каждая серия состояла из 5-ти ПЗС-кадров с экспозицией 45 секунд. Все наблюдения выполнялись при часовых углах в пределах получаса от меридиана в моменты, когда значения паралактического фактора по склонению были близки к нулю. Это позволило учесть систематические ошибки координат звезд, вызванные влиянием атмосферной дисперсии. Относительные параллаксы вычислялись с использованием стандартной методики. Положения определяемой звезды и опорных звезд определялись на каждом кадре путем вычисления параметров PSF (профиль Лоренца) с помощью нелинейного МНК. Далее вычислялись параметры перехода от текущего кадра к стандартному. С их помощью вычислялись пиксельные координаты определяемой звезды в системе стандартного кадра для соответствующих моментов времени. Движение определяемой звезды рассматривалось как линейное движение, искаженное паралактическими отклонениями. Решение уравнений этой модели при помощи МНК дало возможность определить относительные параллаксы программных звезд.

Вычисление абсолютизирующих поправок

Так как в роли опорных объектов выступили звезды, расстояние до которых являются конечными величинами, то необходимо вычислить поправку, позволяющую перейти от относительных параллаксам к абсолютным (тригонометрическим) параллаксам. Существуют разные методы оценки величины поправки (например, [8]). В нашем случае искомая поправка определялась как сумма произведений депенденсов опорных звезд на их фотометрические параллаксы.

Фотометрические параллаксы опорных звезд оценивались в два приближения. Зная величину приведенного собственного движения, нетрудно получить грубую оценку абсолютной звездной величины в полосе J. Второе приближение основано на популярном синтезе диаграмм «цвет - абсолютная звездная величина» (CMD) с помощью библиотеки изохрон [9], параметров безансонской модели Галактики [10]. В результате строилась CMD для заданного гелиоцентрического расстояния и направления в Галактике. Модельные CMD позволили оценивать абсолютные звездные величины опорных звезд.

Для тестирования этой методики были привлечены более чем 25 тысяч звезд каталога Hipparcos2 [11]. Звезды были распределены по площадкам неба в соответствии со схемой HEALPix. В каждом пикселе было от 5 до 15 звезд (что соответствует параметрам наших наблюдений). Как оказалось, вариации средних по площадкам разностей вида «тригонометрический параллакс минус фотометрический параллакс» лежат в пределах плюс-минус 2 mas для большинства пикселей (что соответствует относительной вариации плюс-минус 20%).

Обсуждение результатов

В результате применения рассмотренной методики были вычислены относительные и тригонометрические параллаксы 88 звезд. Полученные величины приведены в таблицах 1—4. Оказалось, что 61 звезда имеет значение $\pi_{tr} > 10$ mas. Стандартные ошибки параллаксам этих звезд в большинстве случаев варьируются в пределах 2-4 mas. Для 13 звезд $\varepsilon_{\pi_{tr}}$ лежат в пределах от 6 до 15 mas. В Общем каталоге тригонометрических параллаксам звезд (YPC) содержатся данные для 43 звезд из 88. Разности параллаксам для этих звезд лежат в пределах от -5 mas до 5 mas (в пределах 1-сигма) в 23 случаях из 38 для звезд с $\pi > 10$ mas. Значимые систематические ошибки пулковских параллаксам

далеких звезд были выявлены для далеких объектов ($\pi \leq 10$ mas) на основе сравнений с данными УРС и фотометрическими оценками параллаксов данных звезд. Данные сравнения подтверждают, что малые параллаксы исследуемых звезд не являются случайной ошибкой. Звезды действительно следует рассматривать как субкарлики галактического гало.

Таблица 1. Компоненты относительных собственных движений (μ_x, μ_y), величины относительных параллаксов (π_r), абсолютизирующих поправок ($\Delta\pi$), тригонометрических параллаксов (π_{tr}) и их стандартные ошибки для звезд Sample-1 ($\pi_r > 10$ mas).

LSPM	μ_x	$\epsilon_{\mu x}$	μ_y	$\epsilon_{\mu y}$	π_r	$\epsilon_{\pi r}$	$\Delta\pi$	$\epsilon_{\Delta\pi}$	π_{tr}	$\epsilon_{\pi tr}$
	mas/yr				mas					
J0231+5722	1121.9	3.1	22.7	5.2	51.3	2.3	1.4	0.3	52.7	2.3
J0234+1745	670.4	5.8	-943.8	8.4	26.9	4.6	1.6	0.3	28.5	4.6
J0246+1625	-912.6	40.4	-574.3	41.0	121.6	17.6	3.0	0.6	124.6	17.6
J0350+4325	370.7	3.4	-1374.0	4.7	27.7	1.6	2.4	0.3	30.1	1.6
J0600+6808	420.7	2.8	-1092.0	5.3	48.5	2.1	1.6	0.3	50.1	2.1
J0600+6809	414.9	4.0	-1090.0	6.3	47.7	3.0	1.4	0.2	49.1	3.0
J0601+5935	-100.5	2.9	-923.2	3.9	125.6	2.6	1.5	0.2	127.1	2.6
J0614+1509	746.5	3.8	-1289.4	14.7	34.5	2.9	3.7	0.7	38.2	3.0
J0621+6558	465.9	3.2	-1041.9	3.2	19.5	2.9	1.5	0.2	21.0	2.9
J0648+3708	-149.5	2.7	4.6	3.3	27.1	2.3	1.4	0.3	28.5	2.3
J0649+3706	214.4	3.9	-1596.9	5.6	65.9	3.4	1.5	0.2	67.4	3.4
J0703+5242	664.2	2.0	-914.6	5.0	109.7	1.8	1.0	0.1	110.7	1.8
J0730+4810	-210.0	2.4	-1274.3	3.1	85.6	2.0	2.1	0.3	87.7	2.0
J0730+4811	-197.6	2.9	-1276.0	4.1	84.6	2.5	2.1	0.3	86.7	2.5
J0733+2223	922.9	9.9	-632.9	14.1	35.6	6.6	2.0	0.4	37.6	6.6
J0803+3456	-493.3	6.3	-1480.6	11.1	27.0	3.7	1.7	0.3	28.7	3.7
J0825+6902	-648.1	8.2	-1238.0	7.7	74.7	5.8	1.3	0.1	76.0	5.8
J0835+6804	-840.6	2.7	-560.1	3.5	75.5	2.2	1.2	0.1	76.7	2.2
J0841+5929	-269.9	5.0	-1254.6	8.2	103.1	3.9	0.9	0.1	104.0	3.9
J0900+4825	-261.0	5.4	-1033.0	7.1	54.8	7.4	1.4	0.2	56.2	7.4
J0915+5325	-1086.3	2.3	-1108.8	3.2	97.2	2.9	1.3	0.2	98.5	2.9
J0917+5825	27.9	4.6	-1154.5	5.9	64.9	6.3	0.9	0.1	65.8	6.3
J1035+6926	-1658.4	3.4	-652.1	6.5	84.5	3.2	1.4	0.2	85.9	3.2
J1049+3532	-631.5	3.9	-1014.2	6.4	108.5	7.8	1.0	0.2	109.5	7.8
J1110+2856	-919.1	4.4	-467.6	4.1	30.3	4.5	1.0	0.2	31.3	4.5
J1123+2553	-1010.2	4.4	-318.5	6.5	65.1	5.0	1.7	0.3	66.8	5.0
J1150+4822	-1526.7	4.6	-963.4	4.0	120.0	5.8	0.4	0.1	120.4	5.8
J1202+3636	-440.8	2.7	-935.5	2.5	20.8	2.5	0.4	0.1	21.2	2.5

Таблица 2. Компоненты относительных собственных движений (μ_x , μ_y), величины относительных параллаксов (π_r), абсолютизирующих поправок ($\Delta\pi$), тригонометрических параллаксов (π_{tr}) и их стандартные ошибки для звезд Sample-2 ($\pi_{tr} > 10$ mas).

LSPM	μ_x	$\epsilon_{\mu x}$	μ_y	$\epsilon_{\mu y}$	π_r	$\epsilon_{\pi r}$	$\Delta\pi$	$\epsilon_{\Delta\pi}$	π_{tr}	$\epsilon_{\pi tr}$
	mas/yr				mas					
J0045+3347	259.8	4.9	11.0	6.1	50.8	5.1	1.4	0.6	52.2	5.1
J0046+3349	252.6	4.0	-6.8	4.1	15.4	3.1	2.7	1.2	18.1	3.3
J0051+3750	587.2	4.2	-111.9	9.0	19.5	4.1	2.8	0.5	22.3	4.1
J0051+3751	583.1	6.1	-99.8	5.9	22.2	5.9	3.3	0.7	25.5	5.9
J0058+6248	645.9	3.1	280.1	4.0	14.2	2.9	1.9	0.4	16.1	2.9
J0140+5528	568.4	2.1	-386.2	2.7	12.8	2.3	2.3	0.4	15.1	2.3
J0251+5924	220.6	2.6	-178.2	4.0	9.6	1.6	2.4	0.5	12.0	1.7
J0306+5103	697.9	3.9	-492.9	8.1	33.0	2.3	0.4	0.3	33.4	2.3
J0317+2337	450.6	3.2	-443.4	7.5	9.4	2.0	2.1	0.3	11.5	2.0
J0343+6339	569.2	1.7	-799.2	1.6	32.6	1.2	1.4	0.3	34.0	1.2
J0412+6234	259.4	4.0	-512.8	2.2	37.3	2.6	0.7	0.1	38.0	2.6
J0448+2206	51.0	4.6	-698.5	7.8	8.8	2.6	1.7	0.4	10.5	2.6
J0453+6911	511.6	4.4	-274.6	8.2	42.4	8.2	2.0	0.3	44.4	8.2
J0453+6914	203.0	2.7	-129.1	1.6	19.5	2.7	2.1	0.4	21.6	2.7
J0456+2553	-264.9	6.6	-484.4	7.3	20.2	5.0	2.3	0.6	22.5	5.0
J0456+2554	-271.4	1.7	-482.0	1.9	17.7	1.3	2.4	0.8	20.1	1.5
J0529+5239	350.9	5.7	-549.7	6.3	39.0	7.6	1.2	0.2	40.2	7.6
J0802+2534	175.4	7.3	-871.3	5.6	22.6	11.3	0.8	0.3	23.4	11.3
J0850+3438	-633.3	3.1	-727.0	6.9	47.5	3.6	1.5	0.2	49.0	3.6
J1010+2126	554.8	9.4	-572.5	7.8	10.9	10.5	1.3	0.3	12.2	10.5
J1014+6209	-485.6	1.7	-452.3	4.5	18.1	1.8	1.7	0.5	19.8	1.9
J1030+4944	-574.4	3.1	-431.1	4.2	13.8	4.0	1.3	0.3	15.1	4.0
J1037+4812	-669.1	5.2	-410.6	4.9	36.9	6.7	0.5	0.1	37.4	6.7
J1045+3223	-332.3	6.1	-196.8	6.8	20.7	5.8	0.4	0.8	21.1	5.8
J1046+3217	-665.5	3.6	-271.1	5.5	30.0	3.7	0.8	0.2	30.8	3.7
J1115+3202	-599.1	2.7	138.6	4.3	24.9	2.9	1.8	0.4	26.7	2.9
J1117+1715	-75.4	5.8	-865.2	7.6	22.9	6.6	2.1	0.6	25.0	6.6
J1118+2704	-650.5	4.5	-275.7	3.6	37.1	5.4	2.5	0.9	39.6	5.5
J1142+2506	261.0	7.5	-760.7	7.3	22.2	12.5	2.5	0.7	24.7	12.5
J1159+6228	-310.7	6.0	-778.1	7.2	19.2	11.9	0.9	0.2	20.1	11.9
J1221+2854	-976.9	7.4	-290.6	10.3	43.2	15.1	0.7	0.4	43.9	15.1
J1231+4950	-717.7	3.4	-10.3	4.0	27.1	8.2	1.5	0.3	28.6	8.2
J1231+4954	-123.0	5.1	-95.5	3.9	9.5	13.3	3.0	0.7	12.5	13.3
J1232+6106	-583.1	2.6	-181.3	4.0	18.9	6.6	0.6	0.1	19.5	6.6

Таблица 3. Компоненты относительных собственных движений (μ_x , μ_y), величины относительных параллаксов (π_r), абсолютизирующих поправок ($\Delta\pi$), тригонометрических параллаксов (π_{tr}) и их стандартные ошибки для компонент двойных систем, вошедших в Sample-2.

LSPM	μ_x	$\epsilon_{\mu x}$	μ_y	$\epsilon_{\mu y}$	π_r	$\epsilon_{\pi r}$	$\Delta\pi$	$\epsilon_{\Delta\pi}$	π_{tr}	$\epsilon_{\pi tr}$
	mas/yr				mas					
J0154+6541N	592.7	3.2	-105.5	13.3	17.8	2.6	2.2	0.4	20.0	2.6
J0154+6541S	570.3	16.7	-130.2	11.5						
J0251+5922E	388.4	1.9	-468.4	3.6	37.3	4.8	1.9	0.3	39.2	4.8
J0251+5922W	414.3	6.3	-464.6	5.0						
J0316+3132E	488.4	12.6	-557.7	4.5	25.5	8.4	0.9	0.5	26.4	8.4
J0433+6846E	154.5	7.4	-540.4	10.0	53.8	6.2	1.3	0.2	55.1	6.2
J0433+6846W	192.7	7.8	-503.8							
J0603+1921E	676.3	4.4	-600.2	12.6	29.7	7.1	1.7	0.3	31.4	7.1
J0638+2219W	-194.6	2.7	-538.8	1.9	25.6	3.8	1.7	0.3	27.3	3.8

Таблица 4. Компоненты относительных собственных движений (μ_x , μ_y), величины относительных параллаксов (π_r), абсолютизирующих поправок ($\Delta\pi$), тригонометрических параллаксов (π_{tr}) и их стандартные ошибки для звезд Sample-1 и Sample-2 с $\pi \leq 10$ mas.

LSPM	μ_x	$\epsilon_{\mu x}$	μ_y	$\epsilon_{\mu y}$	π_r	$\epsilon_{\pi r}$	$\Delta\pi$	$\epsilon_{\Delta\pi}$	π_{tr}	$\epsilon_{\pi tr}$
	mas/yr				mas					
J0046+3350	878.7	9.4	22.9	15.5	-13.5	10.7	1.5	0.3	-12.0	10.7
J0123+3510	596.9	5.6	-24.6	5.7	-6.1	6.1	1.4	0.2	-4.7	6.1
J0152+5017	640.7	16.4	-449.7	31.3	-17.0	6.6	3.0	0.5	-14.0	6.6
J0204+4855	600.3	20.2	-41.2	14.5	5.7	9.4	1.7	0.3	7.4	9.4
J0224+4113	530.5	6.5	-159.9	5.2	3.0	3.4	2.3	0.5	5.3	3.4
J0340+5124	361.3	10.2	-860.8	15.3	-7.1	6.4	0.8	0.1	-6.3	6.4
J0341+2520	590.9	11.2	-181.6	6.8	-0.3	6.2	2.6	0.5	2.3	6.2
J0441+2254	376.1	3.9	-526.7	6.1	5.8	2.5	2.8	0.4	8.6	2.5
J0442+2929	383.8	14.7	-695.6	10.4	1.7	5.2	2.2	0.7	3.9	5.2
J0522+3814	385.1	8.7	-1589.0	14.2	-1.9	10.7	2.1	0.3	0.2	10.7
J0529+5236	256.3	2.1	-102.7	3.8	-1.6	2.1	1.1	0.4	-0.5	2.1
J0633+5752	122.2	2.8	-529.2	2.3	1.8	3.1	1.3	0.2	3.1	3.1
J1009+4651	-23.5	3.1	-693.5	4.0	-1.5	6.4	0.8	0.1	-0.7	6.4
J1058+5019	299.3	3.9	-641.5	4.8	0.2	7.4	2.2	0.4	2.4	7.4
J1136+2849	265.7	3.4	-839.4	3.3	1.8	4.3	1.0	0.2	2.8	4.3
J1142+2505	239.3	8.0	-767.3	9.9	1.8	13.5	3.1	0.9	4.9	13.5
J1142+5248	-343.5	3.5	-642.2	3.4	2.7	7.4	0.6	0.1	3.3	7.4

Выводы

В рамках реализации пулковской программы исследования звезд с большими собственными движениями определены тригонометрические параллаксы 88 звезд. Большинство звезд являются близкими М-карликами в пределах 50 пк от Солнца. Точность определения параллаксов большинства звезд составляет 2—4 mas. Для некоторых близ-

ких и 15 далеких звезд точность определения параллаксов несколько ниже —15 mas. Для 45 звезд параллаксы получены впервые. Сравнение с данными YPC продемонстрировали высокое качество полученных параллаксов. 17 звезд имеют значения параллаксов меньше 10 mas. Оценки фотометрических параллаксов этих звезд и анализ публикаций показали, что это не является следствием грубых ошибок определения параллаксов. Эти звезды действительно являются далекими субкарликами галактического гало.

Литература

1. *S. Lepine and M.M. Shara.* 2005. AJ, 129, 1483.
2. *W.F. van Altena, J.T. Lee and E.D. Hoffleit.* 1995. The General Catalogue of Trigonometric Stellar Parallaxes (New Haven, CT: Yale Univ. Observatory).
3. *R.S. Harrington and C.C. Dahn.* 1980. AJ, 85, 454.
4. *D.G. Monet, C.C. Dahn, F.J. Vrba, H.C. Harris, J.R. Pier, C.B. Luginbuhl, H.D. Ables.* 1992. AJ, 103, 638.
5. *W.-Ch. Jao, T.J. Henry, J.P. Subasavage, J.G. Winters, A.R. Riedel, P.A. Ianna.* 2011. AJ, 141, 4, 117.
6. *E.V. Khrutskaya, I.S. Izmailov, M.Yu. Khovritchev.* 2010. Astronomy Letters, 36, 8, 576.
7. *E.V. Khrutskaya, A.A. Bereznoi, M.Yu. Khovritchev.* 2011. Astronomy Letters, 37, 6, 420.
8. *T.J. Dupuy and M.C. Liu.* 2012. ApJS, 201:19.
9. *P. Marigo, L. Girardi, A. Bressan, M.A.T. Groenewegen, L. Silva, G.L. Granato.* 2008. A&A, 482, 3, 883.
10. *A.C. Robin, C. Reyl, S. Derrière and S. Picaud.* 2003. A&A, 409, 523.
11. *F. van Leeuwen.* 2007. A&A, 474, 2, 474.

TRIGONOMETRIC PARALLAXES OF 88 STARS WITH LARGE PROPER MOTIONS

Izmailov I.S., Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu.

Pulkovo Observatory, Saint Petersburg

Trigonometric parallaxes of 88 large proper motions stars have been determined with 26-inch refractor of the Pulkovo observatory ($D = 65$ cm, $F = 10.5$ m, $FOV=12 \times 12$ arcmins, scale = 238 mas/pix, limiting V-band magnitude is 19 with 3 mins exposure time). These stars are mostly main sequence M-dwarfs. Three stars are white dwarfs and 15 distant stars ($\pi \leq 10$ mas) are most probably halo subdwarfs. Relative parallaxes of the targets were determined using three or four separate series of observations (3 or 4 points during 1.5 or 2 years). Observations of 29 stars with $\mu > 1$ arcsec/yr (Sample-1) were mostly performed in 2007 - 2009. Additional observations of the Sample-1 targets and 59 stars with $\mu > 0.5$ arcsec/yr (Sample-2) were made in 2009 - 2011. Number of the reference stars are 5 to 20. Procedure of conversion from relative parallaxes to the trigonometric parallaxes was applied. It was based on calculations of photometric parallaxes of the reference stars. This procedure was successfully tested using Hipparcos2 data. Trigonometric parallaxes of 45 stars of this lists have been determined for the first time. Typical standard errors of parallaxes are 2 to 4 mas in the most cases. Trigonometric parallaxes of 13 stars were derived with accuracy of 6 mas to 15 mas.

ПУЛКОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ «ЗАБЫТЫХ» ДВОЙНЫХ И КРАТНЫХ ЗВЕЗД НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ

**Киселев А.А., Кияева О.В., Романенко Л.Г., Калининченко О.А.,
Васильева Т.А., Василькова О.О.**

Пулковская обсерватория

Представлены относительные положения и движения компонентов 30 визуально-двойных и кратных звезд, полученные для одного среднего момента времени по однородным многолетним рядам фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе. Термин «забытые» обозначает то, что в мировой практике накоплено мало наблюдений этих звезд, в основном, из-за очень медленного орбитального движения. Полученные результаты могут служить надежным репером для будущих исследований этих звезд. Сравнение относительного движения с собственным движением компонентов, а также сравнение относительных движений внутренней и внешней пары в тройных системах позволили обнаружить вероятные оптические компоненты в семи системах (в четырех впервые). Две пары – ADS 861 и ADS 12925 – возможно, имеют невидимые спутники с периодами порядка 20 лет. Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение требуются дополнительные высокоточные наблюдения.

1. Введение

Регулярные фотографические наблюдения на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории проводились с 1958 по 2007 год. В программу входили как хорошо известные звезды с заметным относительным движением, так и так называемые «забытые» звезды, которые очень мало наблюдались со времени их открытия, согласно данным каталога WDS [1]: не более 20 наблюдений за 200 лет. В данной работе исследуется относительное движение 30 звезд пулковской программы на основе однородных рядов наблюдений: один телескоп, один сорт эмульсии, одна измерительная машина. Результаты для 24 звезд уже опубликованы [2].

До 1995 года измерения проводились на измерительной машине Аскорекорд, после 1995 года – на сканере [3]. Если звезда уже была измерена на Аскорекорде, но продолжала наблюдаться, то весь ряд переизмерялся на сканере, так как наша главная задача – получить однородные ряды, по которым можно надежно определить не только положения, но и относительные движения. В некоторых случаях удавалось получить относительное движение менее 1 мсд/год. Благодаря возрастающим техническим возможностям, в ближайшем будущем для этих звезд будут получены параллаксы и лучевые скорости, и появится возможность определить их орбиты методом параметров видимого движения (ПВД) [4, 5].

Дополнительным результатом данной работы является проверка физической связи компонентов. Используются 2 критерия:

1. Если относительное движение в паре гораздо меньше собственного движения – пара физическая, если оба вида движений малы и одного порядка – вопрос о физической связи остается открытым.
2. Если в кратной системе движение внешней пары больше, чем внутренней – внешний спутник оптический.

2. Относительные положения и движения компонентов

Результаты представлены в табл.1. В первом столбце – порядковый номер системы, для звезд, отмеченных *, имеются комментарии в примечаниях. Во втором столбце – номера по каталогам ADS[6] и WDS[1], звездные величины; далее – год открытия и

Таблица 1. Сравнение относительных и собственных движений в исследуемых звездных системах.

	ADS WDS m ₁ m ₂	WDS T ₁ k	26''refr. ΔT n	T ₀ 1900 +	ρ [″]	θ ₂₀₀₀ [°]	Rel. motion [mas]		Prop. motion [mas]		N O T E
							Δμ _x	Δμ _y	μ _{x1} μ _{x2} SP ₁	μ _{y1} μ _{y2} SP ₂	
1	- 00082+6217 10.7 11.3	1828 10	1961-91 5	81.0	12.846 ±.013	204.524 ±.066	-15.0 ±1.4	01.5 ±1.2	+15 -2		o
2 *	637 AB 00466+6131 9.0 11.0	1903 7	1968-07 17+5	81.0	6.623 .009	272.605 .098	-01.1 0.5	02.7 0.5	+151 G0	-61	ph
	637 AC 00466+6131 9.0 9.2	1900 8	1968-93 17	81.0	69.914 .008	299.003 .005	-92.9 0.7	57.6 0.6	+151 +53	-61 -11	o
3	737 00557+6903 9.1 9.2	1891 18	1982-95 20	89.0	6.458 .009	70.641 .031	04.9 1.9	03.0 1.3	-89 -94 G0	-38 -37	ph
4	764 00557+5748 9.3 9.4	1892 7	1969-76 13	74.0	4.389 .009	116.389 .075	-01.8 2.9	06.2 2.8	+1 +0	-4 -2	?
5	807 00586+4709 10.3 10.4	1893 5	1976-91 7	84.0	4.744 .008	69.646 .115	-02.4 1.3	-02.8 1.3			?
6	826 01004+3228 9.2 9.4	1902 7	1977-91 13	85.0	6.943 .006	192.271 .049	-05.9 1.3	-00.9 1.3	+5	-6	?
7 *	830 AB 01023+8153 var 11.2	1881 5	1975-91 8	83.0	13.772 .013	63.321 .072	02.3 4.8	-06.9 2.9	+25 +23 B8V	-4 -2 G8	ph
	830 AC 01023+8153 var 12.2	1881 5	1975-91 8	83.0	23.461 .007	316.470 .050	-30.1 4.3	-16.1 2.3	+25 B8V	-4	o
	830 BC 01023+8153 11.2 12.3	-	1975-91 8	83.0	30.427 .019	290.871 .061	-39.1 6.1	-6.4 6.2	+23 G8III	-2	o
8	861 01032+6032 9.4 9.4	1900 9	1976-91 9	83.0	7.663 .010	298.664 .033	-00.3 1.4	-01.5 0.8	+15 +15	-2 -7	ph
9	1259 01368+4007 10.5 10.5	1893 8	1982-04 5	94.0	6.479 .017	55.824 .060	04.6 1.5	02.4 1.0	+19	-3	ph
1 0	1342 AB 01430+6402 10.0 11.2	1898 9	1971-93 24	80.0	8.930 .003	351.814 .021	-00.5 0.4	00.4 0.4	+0	-3	ph
	1342 AC 01430+6402 10.0 10.8	-	1971-93 24	80.0	34.464 .004	61.949 .006	-00.1 0.4	00.3 0.4	+0	-3	ph
	1342 BC 01430+6402 11.2 10.8		1971-93 24	80.0	32.530 .005	76.917 .005	00.0 0.6	-00.6 0.4			ph

Продолжение таблицы 1.

	ADS WDS m ₁ m ₂		WDS T ₁ k	26''refr. ΔT n	T ₀ 1900 +	ρ [″]	θ ₂₀₀₀ [°]	Rel. motion [mas] Δμ _x Δμ _y		Prop. motion [mas] μ _{x1} μ _{y1} μ _{x2} μ _{y2} SP ₁ SP ₂		N O T E
1 1 *	- 01435+6402 10.8 11.3	1971 2	1971-93 24	80.0	23.815 .003	110.593 .008	00.4 0.4	-00.4 0.4	- -	- -	?	
1 2	- 03278+5627 10.0 10.2	1911 5	1969-91 25	80.0	10.806 .003	74.267 .019	-01.1 0.4	00.1 0.5	+0 +2	-3 +1	ph	
1 3 *	2536 AB 03279+5625 10.5 10.6	1911 7	1975-85 13	80.0	3.923 .012	46.796 .085	-05.2 2.5	-02.8 1.8	-22	-6	?	
	2536 AC 03279+5625 10.5 10.6	-	1969-85 12	79.0	14.011 .006	122.189 .059	-02.6 2.0	04.0 1.6	-3	-6	?	
	2536 BC 03279+5625 10.6 10.6	1911 7	1969-85 12	79.0	13.561 .006	138.381 .064	-01.7 2.2	03.5 1.5	- -	- -	?	
1 4	2539 03282+5628 10.2 10.3	1919 3	1969-85 20	79.0	2.506 .035	248.227 .243	-08.6 6.5	01.1 4.0	+4	-3	?	
1 5	2878 03576+5712 10.0 11.1	1911 6	1971-79 12	76.0	4.824 .012	242.792 .172	-03.8 4.9	11.1 4.9	-2	-1	?	
1 6	- 06037+2741 11.0 11.6	1899 6	1982-98 15	90.0	9.952 .017	155.096 .067	03.7 2.5	-01.9 2.3	+3	-4	?	
1 7	- 06040+2734 7.6 10.8	1899 5	1982-98 15	90.0	22.865 .009	133.889 .036	-09.2 2.2	29.3 1.9	+11 +1 A0	-38 -2	o	
1 8	6700 AB 08167+4053 8.5 9.4	1908 11	1969-98 24	83.5	20.448 .017	340.368 .041	37.0 1.6	13.6 1.9	-41 +67 G0	-45 +84	o	
	6700 BC 08167+4053 9.4 9.6	1894 14	1969-98 24	83.5	4.838 .007	209.902 .040	-02.2 0.9	-01.5 0.7	+67	+84	ph	
1 9	- 08554+6414 11.6 12.0	1907 4	1970-88 17	80.0	8.023 .005	213.960 .051	-01.6 1.2	00.2 0.9	-7	+4	ph	
2 0 *	7361 AB 09257+3837 8.8 11.2	1893 7	1970-01 14	86.0	8.343 .009	315.446 .066	03.3 1.1	05.8 1.2	-7 K2	-5	o	
	7361 AC 09257+3837 8.8 10.0	1893 6	1970-01 15	86.0	93.043 .021	319.651 .031	19.8 4.4	18.2 4.2	-7 -14 K2	-5 +55	o	
	7361 BC 09257+3837 11.2 10.0	-	1970-01 13	86.0	84.751 .042	320.006 .043	-00.1 7.0	-09.1 7.0	- -10	- +11	o	
	7361 CD 09257+3837 10.0 11.0	1906 4	1970-01 8	86.0	4.161 .015	173.648 .111	00.3 0.9	-07.4 1.4	-14	+55	ph	

Продолжение таблицы 1.

	ADS WDS m ₁ m ₂	WDS T ₁ k	26''refr. ΔT N	T ₀ 1900 +	ρ [""]	θ ₂₀₀₀ [°]	Rel. motion [mas]		Prop. motion [mas]		N O T E
							Δμ _x	Δμ _y	μ _{x1} μ _{x2} SP ₁	μ _{y1} μ _{y2} SP ₂	
2 1	7455 09381+6249 8.8 9.2	1907 7	1970-05 29	78.0	8.925 .004	268.880 .035	-03.7 0.4	-01.1 0.4	-33 -52	K0	ph
2 2	7752 10248+6739 9.5 9.9	1926 1	1970-05 18	78.0	6.557 .020	249.205 .160	-02.2 1.1	-02.2 1.1	-21 +5		ph
2 3	7962 AB 10532+4359 8.5 9.3	1894 9	1969-90 76	80.0	9.159 .004	38.427 .025	-07.6 0.6	18.2 0.6	-11 -32	K0	ph
2 4	- 11022+0945 9.0 9.3	1825 18	1961-93 21	81.6	13.319 .003	93.922 .012	01.7 0.3	-00.7 0.2	-86 -79	+22 +18	ph
2 5	8475 12147+5853 9.9 10.2	1919 6	1970-99 18	84.7	2.863 .018	188.307 .111	-01.1 2.5	03.4 1.9	+23 -9		ph
2 6	9327 AB 14375+4743 9.0 10.7	1898 11	1964-06 13	85.0	4.761 .015	14.732 .121	01.2 1.0	01.4 1.1	-6 -7	G5 K0	ph
	9327 AC 14375+4743 9.0 9.0	1898 11	1964-06 13	85.0	78.843 .008	117.331 .005	-12.8 0.5	-06.4 0.6	-6 -15	-7 -7	o
	9327 BC 14375+4743 10.7 9.0	1898 11	1964-06 13	85.0	80.012 .009	120.660 .013	-13.8 1.1	-07.9 1.0	- -15	- -7	o
2 7	- 19072+2053 10.8 10.8	1897 13	1996-07 14	52.7	114.699 .028	290.670 .016	04.5 0.6	-16.8 0.6	-474 -479	-350 -333	ph
2 8	12922 19467+3143 10.7 11.5	1902 7	1971-91 10	82.0	6.242 .026	270.229 .144	10.5 3.1	05.8 2.6	-6 +0	-1 +1	?
2 9	12925 19469+3204 8.7 10.6	1873 10	1971-91 20	82.0	8.912 .008	297.574 .052	01.8 1.6	-00.5 1.5	-0 +2	+2 ?	?
3 0 *	- 19472+3141 11.0 12.2	1998 2	1971-06 7	85.0	9.012 .011	295.402 .051	-07.4 1.0	-04.4 1.1	+4 +0	-2 +2	?

Примечания к таблице: ADS 637 – для повышения точности относительного движения используются ПЗС наблюдения, полученные на нашем 26-дюймовом рефракторе в 2003-2007гг.

ADS 830 – звезда А переменная типа Алголя, колебания блеска 6.9^m-9.1^m с периодом ≈2.5дня[6]

WDS 01435+6402 – звезда была открыта на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.

ADS 2536 – ПВД получены только по высокочувствительным пластинкам KODAK. Есть существенное расхождение в собственном движении звезды А μ_{x1} по данным из каталога WDS и из сводного каталога Харченко и др. [7] (μ_{x1}=-3.0±3.9mas), поэтому нельзя уверенно утверждать, что связь физическая;

ADS 7361 – в каталоге Харченко и др. [7] собственное движение компонента С (μ_x=-9.8±1.3mas, μ_y=+11.7±1.8mas) отличается от данных в каталоге WDS.

WDS 19472+3141 – в каталоге WDS указано, что первое наблюдение было выполнено в 1998 г., но в Пулковской обсерватории она наблюдается с 1971 г.

число наблюдений в WDS; период наблюдений в Пулкове и число наблюдений; момент, для которого вычислены относительные положения и движения (соответствующие формулы см. в [2]): ρ – угловое расстояние между компонентами, θ – позиционный угол, $\Delta\mu_x$ и $\Delta\mu_y$ – относительные движения по прямому восхождению и склонению соответственно; в следующем столбце – собственные движения компонентов и спектральные классы согласно данным каталога WDS, если они известны, в последнем столбце – указание, является ли пара физически связанной (ph), оптической (o) или это пока неизвестно.

Следует отметить, что, так как мы исследуем движение только в картинной плоскости, мы можем делать выводы с большой степенью вероятности. Уверенные выводы можно делать только после определения параллакса и лучевых скоростей.

3. Новые результаты

Относительные положения и движения, полученные по однородным наблюдениям, сами по себе являются новым результатом. Кроме того, в семи системах выявлены компоненты, которые являются оптическими с большой степенью вероятности. Для трех систем наши результаты подтверждаются различием в собственных движениях, но для четырех систем это обнаружено впервые.

WDS 00082+6217 – пара оптическая, так как относительное движение с высокой точностью отражает собственное движение звезды А относительно далекой звезды В.

ADS 830 – компонент С оптический, так как $\Delta\mu_{AC} \gg \Delta\mu_{AB}$.

ADS 7361 – пара АВ оптическая и никак не связана с физической парой CD. Относительное движение пары АВ отражает собственное движение звезды А, кроме того, так как движение АВ мало, то в случае физической связи пары АВ, движение ВС было бы также велико.

ADS 9327 – по общему собственному движению и близким лучевым скоростям компонентов А и С система считается физической и включена в каталог кратных звезд MSC [8]. Наш результат показывает, что компонент С, скорее всего, оптический, так как $\Delta\mu_{AC} \approx \Delta\mu_{BC} \gg \Delta\mu_{AB}$.

В двух системах – ADS 861 и ADS 12925 – по однородным наблюдениям обнаружены возмущения с периодом порядка 20 лет (более подробно об этом см. [2]). На основании только наших наблюдений невозможно уверенно определить, вызвано это гравитационным влиянием невидимого спутника или другими систематическими ошибками. Эти звезды необходимо наблюдать в дальнейшем с более высокой точностью.

4. Заключение

Широкие визуально-двойные звезды с большим периодом обращения являются мало изученными объектами, динамическое исследование которых возможно только благодаря однородным многолетним наблюдениям. Относительные положения и движения для одного момента времени, полученные по таким рядам, являются надежным репером для будущих исследований этих звезд.

Для определения физической связи звезд требуется знание параллакса или скоростей в трехмерном пространстве, однако сравнение собственных и относительных движений в картинной плоскости позволяет с большой степенью вероятности выявить оптические пары. Среди исследованных звезд выявлено 4 новых претендента в оптические составляющие систем.

Для двух звезд (ADS 861 и ADS 12925) в относительном движении обнаружены колебания, которые могут быть вызваны невидимыми спутниками. Для подтверждения или опровержения этих предположений, необходимы дополнительные современные высокоточные наблюдения.

Авторы благодарны всем наблюдателям 26-дюймового рефрактора, которые в течение 50 лет получали наблюдательный материал, который был нами использован.

Глубокая благодарность авторам каталога WDS, который был создан в Военно-морской обсерватории США и постоянно пополняется.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 12-02-00185-а).

Литература

1. *B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, et al.* // *Astron. J.* **122**, 3466 (2001).
2. *О.В. Кияева, А.А. Киселев, Л.Г. Романенко и др.* // *Астрон. журн.* **89**, 1045 (2012).
3. *И.С. Измайлов* // *Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове*, **214**, 533 (2000).
4. *А.А. Киселев, О.В. Кияева* // *Астрон. журн.* **57**, 1227 (1980).
5. *А.А. Киселев* // в кн. *Теоретические основания фотографической астрометрии.* // Ленинград: Наука (1989).
6. *R.G. Aitken*, *New catalogue of double stars within 120° of the North Pole.* // *Carnegie Inst. Washington, Publ. №417* (1932).
7. *Н.В. Харченко, С. Рёзер и др.* // *Кинемат. и физ. небесн. тел.* **17**, 409 (2001).
8. *A. Tokovinin* // *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 75, 1997.

PULKOVO OBSERVATIONS OF THE “FORGOTTEN” DOUBLE AND MULTIPLE STARS BY 26-INCH REFRACTOR.

**Kiselev A.A., Kiyayeva O.V., Romanenko L.G., Kalinichenko O.A.,
Vasil’eva T.A., Vasil’kova O.O.**
Pulkovo observatory, St. Petersburg

Relative positions and motions of components for 30 visual double and multiple stars are presented. They were obtained for one average moment of time thanks to long-term uniform sets of photographic observations with 26-inch refractor of Pulkovo observatory. The term "forgotten" denotes these stars were a little observed because of very slow orbital movement. The obtained results can serve as a reliable reference point for future researches of these stars. Comparing relative motions and proper motions of the components the probable optical components were detected in seven systems (in four systems for the first time). Two pairs (ADS 861 and ADS 12925) have, possibly, invisible satellites with the periods about 20 years. To confirm or disprove this assumption additional high-precision observations are required.

ЧЕТВЕРНАЯ СИСТЕМА ADS 9626

Кияева О.В.¹, Жучков Р.Я.², Малоголовец Е.В.³, Орлов В.В.^{1,4}

¹Пулковская обсерватория, г. Санкт-Петербург

²Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань

³Специальная астрофизическая обсерватория, п. Нижний Архыз

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Четверная система ADS 9626 состоит из двух внутренних подсистем: Аа ($\rho=0.08''$) и ВС ($\rho=2.2''$), отстоящих друг от друга на расстоянии $107''$ и имеющих общие параллаксы и собственные движения. На основе позиционных наблюдений, выполненных на пулковском 26-дюймовом рефракторе, путем прямых астрометрических измерений получены разности звездных величин и отношение масс во внутренней подсистеме ВС: $\Delta m=0.59\pm 0.06$, $M_B/M_C=1.18\pm 0.02$. На основе спектроскопических наблюдений на РТТ-150 определены лучевые скорости компонентов Аа, В и С. На основе спекл-интерферометрических наблюдений на БТА впервые получены разности звездных величин в тесной подсистеме Аа: $\Delta m=0.48\pm 0.01$ (фильтр 550/20нм) и $\Delta m=0.41\pm 0.01$ (фильтр 800/100нм). Новые наблюдения не противоречат известным орбитам [1] и [2], в согласии с которыми получены лучевые скорости центров масс внутренних подсистем. Методом параметров видимого движения (ПВД) получена орбита пары ВС, согласующаяся с [1]. Показано, что невозможно определить эллиптическую орбиту внешней системы Аа-ВС, определены элементы гиперболической орбиты.

1. Введение

Широкая двойная звезда ADS 9626 АВ ($\rho>100''$) была открыта Гершелем в 1781 году, через год он же нашел третий компонент С на расстоянии $2''$ от компонента В. Пара ВС много наблюдалась, в каталоге WDS содержится более 700 наблюдений. Орбита пары ВС определялась дважды [3,1], при этом обе орбиты хорошо проходят через современные наблюдения, но систематически хуже согласуются с наблюдениями до 1850 года. В данной работе мы также определили орбиту пары ВС методом ПВД [4,5], опираясь на короткую дугу современных наблюдений, выбирая среди семейства ПВД-орбит ту, которая лучше проходит через удаленные наблюдения XIX века. В 1988 году на обсерватории USNO был открыт компонент у звезды А, а в 2010 году была определена орбита Аа с периодом 1368 дней [2]. Система физическая согласно данным о собственных движениях и параллаксах компонентов (см. табл. 1). В данной работе выполнено динамическое исследование и уточнены физические характеристики на основе новых позиционных наблюдений, выполненных на пулковском 26-дюймовом рефракторе, спектроскопических наблюдений, проведенных на 1.5-м телескопе КФУ РТТ-150 (Турецкая национальная обсерватория ТЮБИТАК) и спекл-интерферометрических позиционных и фотометрических данных, полученных на 6-м телескопе БТА САО РАН.

Таблица 1. Данные о компонентах звезды ADS 9626ABC=WDS 15245+3723.

Hip	Comp.	Sp	m	μ_x , mas	μ_y , mas	π , mas	Mass, SUN	Fe/H
75411	Аа	F2IV	4.3	-147	+86	28.83 ± 0.74	3.12	0.28 [6]
75415	В	G0V	7.1	-151	+87	27.73 ± 0.65	1.10	0.05 [7]
75415	С	-	7.6	-151	+87	-	0.94	-

Звездные величины, спектральные классы и собственные движения взяты из каталога WDS, параллакс – из Гиппаркос, версия 2007 г.[8], оценка масс – из MSC[9].

2. Наблюдения

Фотографические наблюдения на 26-дюймовом рефракторе выполнялись с желтым фильтром, фотометрическая система близка к визуальной. За период наблюдений 1983-2005 гг. было получено всего 13 фотографических пластинок данной звезды. Это связано с тем, что пара ВС ($\rho=2''$) плохо разделяется при фотографических наблюдениях на рефракторе, что накладывает дополнительные требования на атмосферные условия наблюдений. При этом в 1996 году удалось получить 5 пластинок, хорошо согласующиеся между собой, которые послужили основой для данных исследований. Пластинки измерялись на сканере [10] в режиме измерения взаимодействующих изображений для пары ВС и в режиме отдельных изображений для пар АВ, АС и А-ВС, где измерялся фотоцентр взаимодействующих изображений ВС. На каждой пластинке измерялись от 7 до 25 изображений. Среднегодовые положения, полученные по пяти пластинкам на момент 1996.25 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты позиционных наблюдений на момент 1996.246.

Индекс пары	Пара	ρ ["]	θ_{2000} [°]	$\sigma_{1\rho}$ ["]	$\sigma_{1\tau}$ ["]
1	Аа-ВС	108.179±0.015	170.853±0.008	0.033	0.034
2	Аа-В	108.916±0.017	170.989±0.011	0.038	0.046
3	Аа-С	106.914±0.037	170.614±0.009	0.083	0.037
4	В-С	2.162±0.034	10.928±0.137	0.076	0.012

Здесь $\sigma_{1\rho}$ и $\sigma_{1\tau}=\rho*\sigma_{1\theta}/57.3$ – среднеквадратические ошибки одного положения (пластинки) по внешней сходимости в радиальном и тангенциальном направлениях.

Видно, что лучше всего измерялись пары АВ и А-ВС, где ошибки во всех направлениях одинаковы. На основе этих измерений вычислен коэффициент β , характеризующий положение фотоцентра ВС и коэффициент B , характеризующий положение центра масс пары ВС относительно звезды В, в единицах расстояния между компонентами В и С.

$$B = (\rho_2 \sin\theta_2 - \rho_1 \sin\theta_1) / (\rho_2 \sin\theta_2 - \rho_3 \sin\theta_3) = (\rho_2 \cos\theta_2 - \rho_1 \cos\theta_1) / (\rho_2 \cos\theta_2 - \rho_3 \cos\theta_3) \quad (1)$$

$$\Delta m = 2.5 \lg(1/\beta - 1) \quad (2)$$

$$\lg(M_B/M_C) = 0.12 \Delta m \quad (3)$$

Формула (3) справедлива, если спектральные классы В и С не сильно отличаются. Тогда

$$\beta = 0.367 \pm 0.013, \quad \Delta m = 0.59 \pm 0.06, \quad M_B/M_C = 1.18 \pm 0.02, \quad B = 0.459 \pm 0.004, \quad B - \beta = 0.092 \pm 0.014.$$

Эти результаты, полученные чисто астрометрически, согласуются с данными из каталогов TDSC[11] ($\Delta m_V = 0.54$, $\Delta m_B = 0.66$), и MSC [9] ($\Delta m = 0.65$, $M_B/M_C = 1.17$).

Таблица 3. Результаты наблюдений лучевой скорости.

Дата	T	Компонент	V_r [км.с]	Примечания
28.10.2010	2010.829	Аа	-11.7 ± 1.0	Звезды не разделяются
30.10.2010	2010.834	В	-7.4 ± 0.4	Южный компонент
30.10.2010	2010.834	С	-9.3 ± 0.1	Северный компонент
15.03.2012	2012.207	Аа	-11.3 ± 2.0	

Для определения разности лучевых скоростей компонентов нами были получены спектры исследуемой системы на кудэ-эшелле спектрографе 1.5-м телескопа РТТ-150 (АЗТ-22), установленного в Турецкой Национальной обсерватории ТЮБИТАК (г. Бакырлытепе, 2500 м). Спектры трех компонентов Аа, В и С имеют разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda = 50000$, отношение сигнал/шум $S/N \approx 100$. Редукция данных и измерение луче-

вых скоростей проводились стандартным образом с помощью пакета программ Галазутдинова DECH [12]. Результаты приведены в таблице 3.

Эфемеридное значение разности скоростей компонентов В и С, рассчитанное на основе данных [1] на октябрь 2010 года, равно 2.3 км/с, что согласуется с наблюдаемым $V_{\text{В}}-V_{\text{С}}=1.9\pm 0.5$ км/с. В результате получаем гамма-скорость пары ВС (т.е. скорость центра масс (ЦМ) системы ВС) на октябрь 2010 года, равную -8.4 ± 0.5 км/с.

Опубликованная в работе [2] орбита пары Аа с периодом 1368 дней достаточно надежна и не улучшалась в настоящей работе. Если принять, что главный компонент подсистемы Аа имеет спектральный класс F0V -F2IV, то его масса будет около 1.6 масс Солнца, так что при полной массе системы $3.12M_{\text{Sun}}$ вторичный компонент оказывается почти близнецом. Для контроля наблюдения подсистемы ADS2626Аа были проведены в 2012 году, спустя 15 месяцев от первой эпохи. Если бы яркости компонентов значительно различались, то фотоцентр (ФЦ), скорость которого мы, фактически, измеряем, был бы расположен далеко от ЦМ, и скорость изменилась бы на величину до 3 км/с. То, что скорость не изменилась, говорит и о том, что ФЦ и ЦМ близки, и полученная эффективная скорость близка к скорости ЦМ.

Это подтверждается спекл-интерферометрическими наблюдениями. В ночь 5/6 июля 2012 года на 6-м телескопе телескопе БТА САО РАН были проведены спекл-интерферометрические наблюдения внутренней подсистемы ADS9626Аа в визуальной и ближней инфракрасной области спектра с использованием спекл-интерферометра на базе EMCCD [13]. В каждой серии для каждого из двух фильтров (центрированных на 550 и 800 нм) накапливалось 1000 кадров спекл-изображений со временем экспозиции одного кадра 20 мс. На основе полученных данных были измерены позиционные параметры и разности блеска компонентов. Методика редукции спекл-интерферометрических данных БТА описана в работах [13-15]. Результаты представлены в табл. 4. Обозначения стандартные. Данные о разности блеска компонентов данной подсистемы получены впервые. В последнем столбце приведены центральные длины волн и полуширины фильтров в нанометрах.

Таблица 4. Результаты спекл-интерферометрических наблюдений пары Аа.

T	θ [°]	ρ ["]	Δm	Фильтр [nm]
2012.5147	239.9 ± 0.3	0.077 ± 0.001	0.48 ± 0.01	550/20
2012.5147	240.0 ± 0.4	0.077 ± 0.001	0.41 ± 0.01	800/100

При разности блеска в V-полосе около 0.4^m (в данном случае малая ширина интерферометрического фильтра, центрированного на V полосе, приведет к смещению разности блеска не более, чем на 0.05^m) разница спектральных типов составит не более двух подклассов, а масс – не более, чем $0.1M_{\text{Sun}}$ [16]. Поэтому в пределах ошибки можно полагать $M_A=1.6\pm 0.1M_{\text{Sun}}$ и $M_a=1.5\pm 0.1M_{\text{Sun}}$, и тогда $K_2=1.06K_1$. На практике такая разница амплитуд соответствует различию скоростей не более 0.6 км/с, что находится внутри точности измерений. Поэтому в данной работе в качестве первого приближения мы рассмотрели случай $K_1=K_2$.

Приняв отношение масс $M_A/M_a=1.07$, а отношение освещенностей в визуальном диапазоне $E_A/E_a=1.45$, при относительной полуоси около $0.1''$ получим расстояние ФЦ-ЦМ $\approx 0.007''$ и максимальное отличие лучевых скоростей ЦМ и ФЦ около 1.4 км/с. Именно с такой точностью должно выполняться условие постоянства скорости ФЦ, что и наблюдается на практике.

В результате для расчетов было принято значение $V_{\gamma Aa} = -11.6\pm 1.4$ км/с, учитывая отличие ЦМ и ФЦ подсистемы и результаты измерений на эпохи 2010 и 2012. Возмущения во внешней орбите от движения внутри пары Аа нигде не учитывалось, по-

сколько ее период (около 3 лет) при имеющемся уровне ошибок в астрометрических измерениях не обнаружен. Сами ошибки определения позиционных параметров внешней пары существенно превышают полуось орбиты Аа, составляющую около $0.1''$. Таким образом, получаем относительную лучевую скорость широкой пары Аа-ВС, равную

$$\Delta V_r = -3.2 \pm 1.5 \text{ км/с}$$

(при имеющемся периоде обращения пары разница в числах внутри месяца не важна).

3. Определение орбит

Вес единственной дополнительной точки, полученной авторами для пары Аа, при любом уровне ее значимости слишком мал по сравнению с остальным рядом наблюдений. Поэтому в данной работе используется решение, полученное Мютерспагхом и др. [2].

Наши пулковские наблюдения пары ВС – 10 пластинок 1987-2005 гг. – также ничего не добавили в общий ряд, насчитывающий более 700 наблюдений, так как только в 1996 году удалось получить 5 пластинок, в 1990 г. – 2 пластинки, расходящиеся в результатах на $0.1''$ по ρ и на 0.6° по θ , а еще 3 пластинки – в разные эпохи.

С помощью метода ПВД [4, 5] мы получили орбиту пары ВС, которая лучше, чем предыдущие согласуется с наблюдениями XIX века. В качестве исходной короткой дуги, по которой получены параметры видимого движения, мы используем однородный ряд фотографических наблюдений USNO 1962-1974гг, дополненный среднегодовыми положениями 1976-2010 гг., вычисленными по данным WDS. Значения параметров на эпоху 1985.0 представлены в табл. 5. Там же приводятся значения ПВД для широкой пары (см. ниже). Среднее для всей системы ABC значение параллакса равно $0.028''$, относительная лучевая скорость, полученная нами из наблюдений, $\Delta V_{rBC} = V_{rC} - V_{rB} = -1.9 \pm 0.5 \text{ км/с}$.

Таблица 5. Параметры видимого движения.

Пара	BC	Аа-BC 1	Аа-BC 2
n	48	98	
$T_1 - T_n$	1962-2010	1821-2005	
T_0	1985.0	2011.0	
$\rho ['']$	2.181 ± 0.006	107.952 ± 0.008	107.969 ± 0.008
$\theta_{2000} [^\circ]$	13.576 ± 0.092	170.834 ± 0.006	$170.839.006$
$\mu [''/\text{год}]$	0.0157 ± 0.0003	0.0030 ± 0.0003	0.0029 ± 0.0004
$\psi [^\circ]$	309.6 ± 0.9	337.9 ± 9.2	332.2 ± 10.3
$\rho_c ['']$	0.9 ± 0.1	-	-
$\sigma_\rho ['']$	0.035	0.276	0.277
$\sigma_\theta [^\circ]$	1.08	0.22	0.20

Здесь n – число наблюдений на интервале времени $T_1 - T_n$, ρ – расстояние между компонентами, θ – позиционный угол, μ – видимое относительное движение, ψ – позиционный угол направления относительного движения, ρ_c – радиус кривизны, σ_ρ и σ_θ – ошибки единицы веса по ρ и θ .

Варьируя относительную лучевую скорость в пределах ошибки, мы получили, что лучше всего с удаленными наблюдениями 1820-1885 гг. согласуется орбита, у которой сумма масс компонентов $M_{B+C} = 2.3 M_{\text{Sun}}$, а относительная лучевая скорость на момент 1985.0 $\Delta V_{rBC} = -1.6 \pm 0.1 \text{ км/с}$. Эфемериды на момент наблюдений 2010 равна -2.1 км/с , что согласуется с наблюдениями (-1.9 км/с).

ПВД-орбита лучше проходит через наблюдения XIX века, чем определенные ранее [1] и [3], хорошо согласуется с современными наблюдениями, но на участке 1857-1947гг наблюдается волна в позиционном угле с периодом примерно 90 лет и амплиту-

дой приблизительно 2 градуса. Это может быть результатом неточной орбиты или систематических ошибок наблюдений.

Элементы орбит разных авторов приведены в табл. 6. Большие ошибки ПВД-орбиты определяются ошибками исходных данных и, в основном, превышают расхождение элементов всех трех орбит между собой.

Таблица 6. Элементы орбит пары BC.

Орбита	a ["]	P [год]	e	i [°]	ω [°]	Ω [°]	T [год]
Данная работа	1.52 ± 0.08	264.6 ± 20.2	0.60 ± 0.03	134.2 ± 4.5	326.9 ± 11.7	165.4 ± 5.7	1863.1 ± 14.2
Содерхельм	1.47	257	0.58	134	336	174	1864.2
Скардия	1.45	260.2	0.58	134.5	338.5	175.2	1864.4

В каталоге WDS в таблицах наблюдений широкой пары Aa-BC нет различия между наблюдениями A-B, A-C и A-BC. Из сравнения с пулковскими наблюдениями мы легко отсеяли немногочисленные наблюдения A-C. Несколько труднее было отделить наблюдения A-B от наблюдений A-BC. В первом приближении мы считали, что наблюдения XIX века, в основном, относятся к фотоцентру BC, и исключали орбиту фотоцентра, а из наблюдений XX века исключали орбиту компонента B. Во втором приближении мы анализировали причины отскоков и исправляли допущенные ошибки. После 1956 года мы использовали только наши пулковские наблюдения и наблюдение Гиппаркос. Исследование движения проводилось с помощью метода ПВД.

Относительная лучевая скорость $\Delta V_r = V_{rBC} - V_{rA} = -3.2 \pm 1.5$ км/с, параллакс равен $0.028 \pm 0.001''$.

Параметры видимого движения вычислялись по линейным формулам и экстраполированы на среднюю эпоху наблюдений лучевой скорости 2011.0. В табл. 5 мы приводим 2 набора параметров: 1 – соответствует учету ПВД-орбиты пары BC, 2 – соответствует учету орбиты Содерхельма. Видно, что параметры отличаются несущественно.

С данным набором исходных данных эллиптическая орбита возможна только при суммарной массе системы более 22 масс Солнца, что в нашем случае практически невозможно. Относительное движение в картинной плоскости мало. Если суммарная масса системы $5.5 M_{Sun}$, то относительная пространственная скорость должна быть по модулю не более, чем 1.6 км/с, а относительная лучевая скорость по модулю менее 1.5 км/с. Таким образом, мы, по-видимому, наблюдаем редкий случай пролета по гиперболической орбите.

Таблица 7. Элементы орбит пары Aa-BC.

ΔV_r [км/с]	a ["]	e	i [°]	ω [°]	Ω [°]	T [год]	Γ_{min} [AE]
-3.2	-17.3	7.16	87.2	189.3	350.8	2923	3811
-1.7	-237.0	1.43	84.8	205.5	350.8	6428	3631
-4.2	-6.9	16.47	88.1	185.9	350.8	2410	3836

Минимальное расстояние между компонентами на момент 2011.0, согласно условию проекции, равно $\rho/\pi_r = 3855 a.e.$ Для этого предельного случая при условии, что полная масса системы равна $5.5 M_{Sun}$, вычислены элементы гиперболической орбиты для трех значений ΔV_r , которые определяются большой ошибкой этого параметра (табл. 7). Здесь $\Gamma_{min} = a(1-e)$ – максимальное сближение подсистем в момент T – определяется вполне уверенно.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 12-02-00185-а, 10-02-01145-а и 12-02-97006.

Авторы благодарят создателей Вашингтонского каталога двойных звезд (WDS), а также ТЮБИТАК и КФУ за частичную поддержку в использовании РТТ-150.

Литература

1. *S. Soderhjelm* // *A&A*, 341, 121(1999).
2. *M.W. Muterspaugh, W.I. Hartkopf, B.F.Lane et al.* // *Astron. J.*, 140, 1623(2010).
3. *M. Scardia* // *Astr. Nachr.*, 307, 2, 149(1986).
4. *А.А. Киселев, О.В. Кияева* // *Астрон.ж.*, т.57, с.1227(1980).
5. *А.А. Киселев.* Теоретические основания фотографической астрометрии. М. "Наука" (1989).
6. *N. Cardiel, J. Falcon-Barroso, J. Gorgas et al.* // *MNRAS* 374, 664(2007).
7. *A.M. Voesgaard and M.J. Tripicco* // *ApJ*, 313, 389(1987).
8. *F. Van Leeuwen* // *Astron. & Astrophys.*, 474, 653(2007).
9. *A. Tokovinin* // *Astron. and Astrophys. Suppl.*, 124, 75(1997).
10. *И.С. Измайлов* // *Известия ГАО в Пулкове*, N214, с.533(2000).
11. *C. Fabricius, Hoeg E., Makarov V et al.* // *Astron. Astrophys.*, 384, 180(2002).
12. *Г.А. Галазутдинов, DECH 2.0.* // *Препринт Специальн. астрофиз. обсерв.* N96(1992).
13. *А.Ф. Максимов, Ю.Ю. Балега, В.В. Дьяченко и др.* // *Астрофиз. бюлл.*, 64, 308(2009).
14. *I.I. Balega, Y.Y. Balega, K.-H. Hofmann et al.* // *Astron.&Astrophys.*, 385, 87(2002).
15. *A.F. Maximov, Y.Y. Balega, U. Beckmann et al.* // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, 56,102(2003).
16. *A.N. Cox.* *Allen's Astrophysical Quantities.* Springer Verlag (2000).

THE QUADRUPLE SYSTEM ADS 9626

Kiyayeva O.V.¹, Zhuchkov R.Ya.², Malogolovetz E.V.³, Orlov V.V.^{1,4}

¹*Pulkovo observatory, St. Petersburg*

²*Kazansky (Privolzhsky) Federalny University, Kazan*

³*Special Astrophysical observatory, Nizhny Arkhyz*

⁴*St Petersburg State University, St Petersburg*

The quadruple system ADS 9626 consists of two subsystems: Aa ($\rho=0.08''$) and BC($\rho=2.2''$). The distance between them is $107''$. They have common parallaxes and proper motions. The residuals of magnitudes and the relation of masses for the subsystem BC are obtained on the basis of positional observations with Pulkovo 26-inch refractor: $\Delta m=0.59\pm 0.06$, $M_B/M_C=1.18\pm 0.02$. Radial velocities of components Aa, B and C are defined on the basis of spectroscopic observations with RTT-150. The differences of magnitudes of components in the close subsystem Aa are obtained on the base of spekl-interferometric observations with BTA for the first time: $\Delta m=0.48\pm 0.01$ (filter 550/20 nm) and $\Delta m=0.41\pm 0.01$ (filter 800/100nm). New observations don't contradict known orbits [1] and [2]. The radial velocities of centres of masses for both internal systems are obtained in agree with them. The orbit of BC is obtained by the apparent motion parameters (AMP) method. It is in agree with [1]. It is shown that it is impossible to obtain an elliptic orbit of external system of Aa-BC, elements of a hyperbolic orbit are defined.

НОВЫЕ СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРЫХ ЗВЕЗД

Куликова А.М., Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бережной А.А.

Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Получены новые собственные движения быстрых звезд в зоне склонения $+30^\circ - +70^\circ$. В качестве положений первых эпох взяты положения из каталогов *CMC14*, *2MASS* и *SDSS DR8*. В качестве положений второй эпохи – положения, полученные из наблюдений звезд на Пулковском Нормальном Астрографе. Точность полученных положений: ≈ 40 mas по RA и ≈ 50 mas по Dec. Точность вычисленных собственных движений: ≈ 6 mas/yr по RA и ≈ 7 mas/yr по Dec. Разности эпох: от 6 до 14 лет. Вычисленные собственные движения рассматривались в качестве «квазимгновенных». В качестве «средних» брались собственные движения из каталога *LSPM*, разности эпох: от 15 до 45 лет. Вычисленные «квазимгновенные» собственные движения и «средние» из каталога *LSPM* использовались для детектирования среди программных звезд «Дв-двойных» по методу Вилена, использованному для построения каталога *FK6*. Выявлено 63 кандидата в «Дв-двойные». 15% из выявленных кандидатов в каталоге *LSPM* отмечены как двойные звезды. Дополнительно для 300 звезд вычислены собственные движения методом прямой редукции с кадра на кадр. Проведенное сравнение собственных движений, полученных двумя методами, показало расхождение в результатах до 10 mas/yr.*

Введение

Быстрые звезды (звезды с большими собственными движениями) это объекты из ближайшей галактической окрестности Солнца, что обуславливает интерес к исследованию различных эффектов, связанных с ними. Близость объектов к Солнцу позволяет изучать их даже при их относительно низкой светимости. В свою очередь изучение объектов низкой светимости (М-карликов главной последовательности, субкарликов, белых и коричневых карликов) позволяет выявить неизвестные ранее особенности строения и эволюции Галактики и Вселенной. Одной из важных задач для звезд низкой светимости остаётся определение их высокоточных тригонометрических параллаксов. Быстрое перемещение звезд с большими собственными движениями относительно звезд фона открывают возможность наблюдения явлений гравитационного микролинзирования, в которых быстрые звезды могут выступать в роли как линзирующего, так и линзируемого объекта. Благодаря близости этих звезд к Солнцу появляется возможность использования специфических методов детектирования среди них двойных и кратных объектов. Наиболее полный каталог быстрых звезд – *LSPM* [1]. Он содержит около 120000 звезд до 21^m с собственными движениями ≥ 150 mas/yr. Собственные движения получены из разностей положений звезд, определенных с помощью различных обзоров неба для различных эпох. Разность эпох: 15 – 45 лет. Точность координат составляет ≈ 120 mas, точность собственных движений: ≈ 10 mas/yr для звезд севернее $+30^\circ$ и ≈ 20 mas/yr для более южных звезд. В настоящее время в Лаборатории Астрометрии и Звездной Астрономии Пулковской обсерватории ведутся активные наблюдения быстрых звезд из каталога *LSPM*, а так же работа по определению новых, высокоточных собственных движений этих объектов.

Наблюдения

Наблюдения, вошедшие в пулковский каталог быстрых звезд, в основном проводилось на Нормальном Астрографе ($D = 330$ мм, $F = 3467$ мм) Пулковской обсерватории в период с 2008 по 2012 год в зоне склонения от $+30^\circ$ до $+70^\circ$. Так же привлекались отдельные наблюдения 26-дюймового рефрактора ($D = 650$ мм, $F = 10413$ мм), проводившиеся по иным программам, если в этих наблюдениях присутствовали интересные для исследования объекты.

Каталог собственных движений

В итоге в исследование звезд с большими собственными движениями было включено 1003 объекта. На Рис. 1 представлено распределение объектов в плоскости экваториальных координат. Можно увидеть, что в основной зоне склонения (от $+30^\circ$ до $+70^\circ$) звезды распределены достаточно равномерно и плотно. Звезды, находящиеся вне этой зоны, попали в обзор в результате поиска быстрых звезд на ПЗС-кадрах с астероидами.

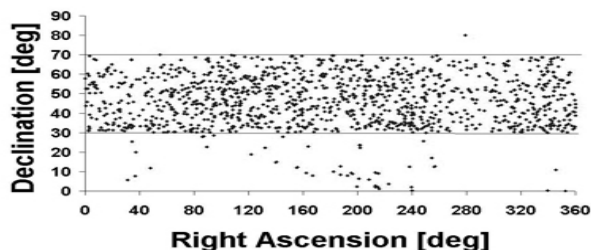


Рис. 1. Распределение звезд пулковского каталога быстрых звезд в плоскости экваториальных координат

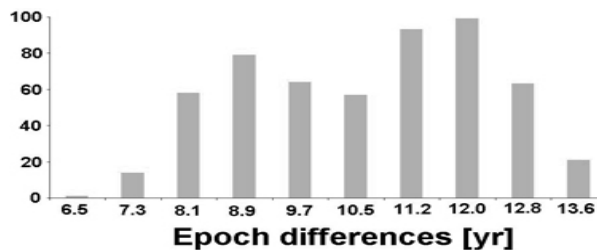


Рис. 2. Гистограмма распределения разностей эпох между каталогами.

Собственные движения звезд вычислялись с привлечением положений, взятых из каталогов CMC14 [2], 2MASS [3], SDSS DR8 [4], и пулковских ПЗС-наблюдений. На гистограмме (Рис. 2) показано распределение количества звезд, имеющих в нескольких каталогах с различной разностью средних эпох. Наиболее ранние эпохи наблюдений звезд - эпохи наблюдений в рамках обзоров CMC14, 2MASS, SDSS DR8, вторые эпохи соответствуют пулковским наблюдениям.

При вычислении собственных движений в целях достижения максимальной точности учитывались все имеющиеся положения: от 2 до 4. Разброс в разностях эпох (Рис. 2), а так же то, что исследуемые звезды часто присутствуют не во всех используемых каталогах, внесло свой вклад в ошибку определяемых собственных движений.

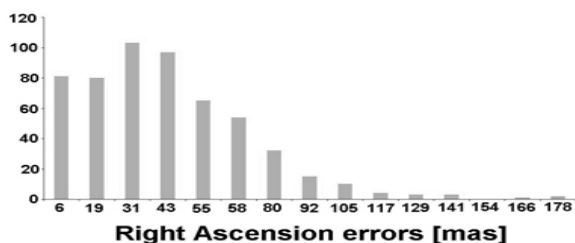


Рис. 3. Гистограмма ошибок положений звезд по прямому восхождению.

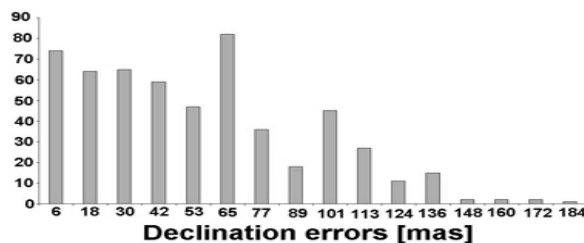


Рис. 4. Гистограмма ошибок положений звезд по склонению.

На рисунках 3 и 4 представлены распределения ошибок положений звезд в пулковском каталоге. Средние ошибки положений: ≈ 40 mas для RA, ≈ 50 mas для Dec. Отклонения видов гистограмм ошибок положений от вида χ^2 -распределения случайных величин можно объяснить тем, что координаты звезд взяты из разных каталогов, и, соответственно, мы имеем наложение друг на друга распределений с разными стандартами.

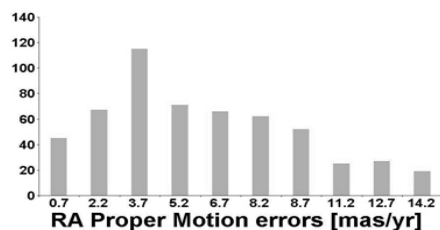


Рис. 5. Гистограмма ошибок собственных движений звезд по прямому восхождению.

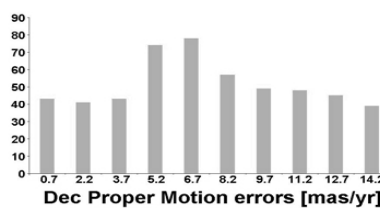


Рис. 6. Гистограмма ошибок собственных движений звезд по склонению.

Средние ошибки собственных движений звезд по прямому восхождению ≈ 6 mas/yr, по склонению ≈ 7 mas/yr.

Полученные таким образом собственные движения считались «квазимгновенными», а собственные движения, взятые из каталога LSPM [1] – «средними». Два набора собственных движений звезд было использовано для проверки программных звезд на двойственность.

Астрометрические двойные

При выявлении астрометрических двойных вместо трудоёмких исследований траектории движения звезды проводится более упрощенный анализ статистической значимости разностей «квазимгновенное собственное движение-среднее» относительно ошибок их определения. Статистически значимые разности собственных движений относительно их ошибок, могут являться указателем на присутствие у звезды невидимой компоненты, влияющей на неё движение в пространстве, а, значит, и на собственное движение. Идея и первая реализация такого метода принадлежит Вилену [5]. Звезды, обнаруженные таким образом, были названы Виленом « $\Delta\mu$ -двойными» при построении каталога FK6 [6, 7]. Вилен использовал «мгновенные» собственные движения, полученные в ходе миссии Hipparcos (интервал наблюдений составил примерно три года), а так же собственные движения наземных каталогов, полученные из наблюдений с большой разностью эпох. Эти собственные движения рассматривались как «средние». Далее на основе разностей мгновенных и средних движений ($\Delta\mu_\psi, \Delta\mu_{\bar{\psi}}$) по двум некоррелируемым координатам ($\psi, \bar{\psi}$) и ошибкам этих разностей ($\varepsilon_{\Delta\mu_\psi}, \varepsilon_{\Delta\mu_{\bar{\psi}}}$) анализировалась критическая статистика F, имеющая вид:

$$F^2 = \frac{\Delta\mu_\psi^2}{\varepsilon_{\Delta\mu_\psi}^2} + \frac{\Delta\mu_{\bar{\psi}}^2}{\varepsilon_{\Delta\mu_{\bar{\psi}}}^2}. \quad (1)$$

Для параметра F были построены две функции: интегральное распределение в случае, если разности собственного движения распределены нормально:

$$W(F) = e^{-\frac{F^2}{2}}, \quad (2)$$

а так же плотность вероятности:

$$w(F) = -\frac{dW(F)}{dF} = F \cdot e^{-\frac{F^2}{2}}. \quad (3)$$

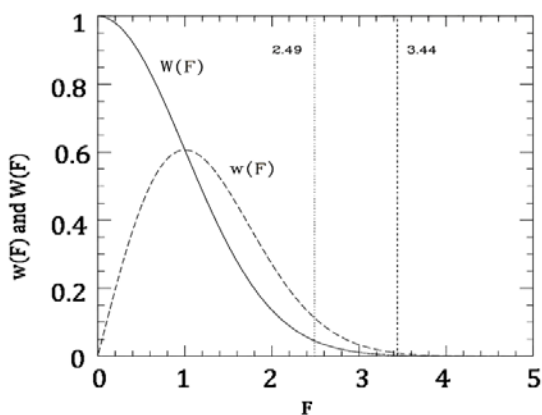


Рис. 7. Интегральное распределение и плотность вероятности величины F.

Из рис. 7 можно видеть поведение данных функций. Функция $w(F)$ сначала возрастает, достигает своего максимума при значении аргумента $F \approx 1$, а затем убывает, причем достаточно быстро, а $W(F)$ убывает экспоненциально с ростом F , из чего можно заключить, что большое значение параметра F является адекватным индикатором для отнесения звезды к астрометрическим двойным. При $F > 2.49$ (уровень значимости ≈ 0.95) Вилен предлагает характеризовать исследуемую звезду как кандидата в « $\Delta\mu$ -двойные», при $F > 3.44$ (уровень значимости ≈ 0.99) — как астрометрическую двойную.

В нашем случае в качестве «квазимгновенных» собственных движений брались собственные движения, определенные с разностями эпох от 6 до 14 лет, как это можно увидеть из рис. 2. В качестве «средних» брались собственные движения каталога LSPM (разность эпох ~ 50 лет). После вычисления квазимгновенных собственных движений

были образованы разности «квазимгновенные собственные движения - средние» для каждой звезды. Была проанализирована зависимость образованных разностей от звездной величины (рис. 8-9).

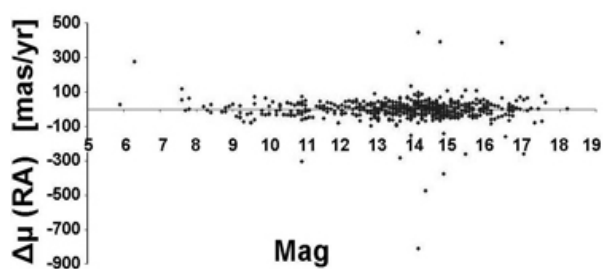


Рис. 8. Зависимость разностей «среднего» и «квазимгновенного» собственных движений по прямому восхождению от звездной величины звезды.

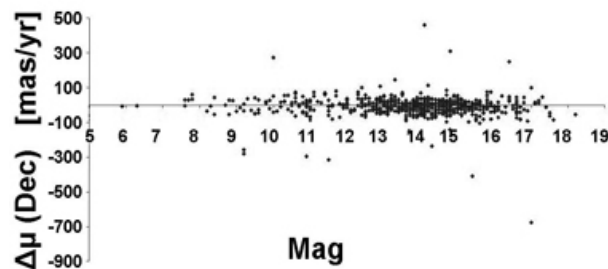


Рис. 9. Зависимость разностей «среднего» и «квазимгновенного» собственных движений по склонению от звездной величины звезды.

Рис. 8 и 9 показывают, что в первом приближении зависимость изучаемых разностей от звездных величин не наблюдается. В дальнейшем планируется исследовать зависимость более детально и при необходимости учесть её.

Также была проанализирована зависимость F от звездной величины (рис. 10-11).

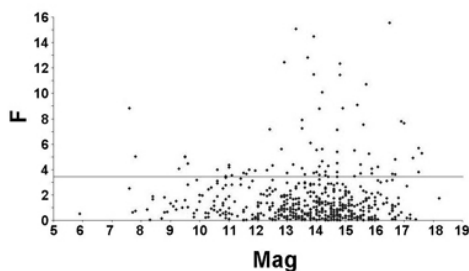


Рис. 10. Зависимость параметра F от звездной величины (для $F < 18$).

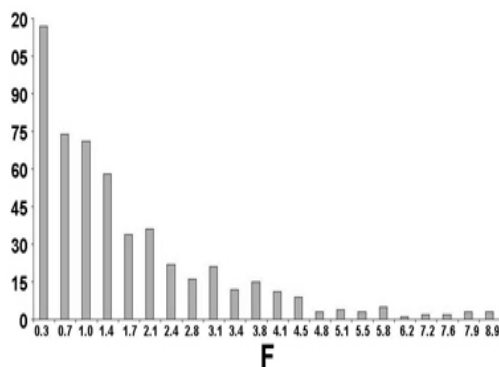


Рис. 11. Гистограмма $F < 9$.

На рис. 10 показана зависимость F от звездной величины для $F < 18$, т.к. значения $F \geq 18$ составляют совсем малую часть от общего числа, но сильно влияют на общий вид зависимости из-за значительного различия в величинах. О зависимости значений F от звездной величины из данного рисунка судить сложно, так как очевидно преобладание в выборке звезд с видимыми звездными величинами от 12 до 16 перед теми, которые не попали в этот диапазон.

Однако можно увидеть, какую примерно долю от общего числа составляют звезды со значением $F > 3,49$ (их граница на рисунке отмечена горизонтальной линией). Следует так же отметить, что для оценки доли таких астрометрических двойных необходимо выполнить целый ряд исследований. По современным данным доля двойных звезд в солнечной окрестности может превышать 0.7. Однако далеко не все эти звезды проявляют себя как астрометрические двойные. В дальнейшем для оценки доли астрометрических двойных предполагается выполнить расчеты методом популяционного синтеза.

Рисунок 11 показывает, что распределение значений F вполне соответствует распределению случайной величины даже при строгой выборке $F < 9$. При учете всех значений параметра F график распределения ещё более крутой.

Прямая редукция с кадра на кадр

Учитывая, что систематические ошибки каталогов оказывают влияние определяемые собственные движения, была сделана попытка получить их собственные движения, используя их пиксельные координаты прямой редукцией с кадра на кадр. Первоначальные исследования с использованием этого подхода уже были выполнены ранее [8]. Использовались ПЗС-кадры и сканы пластинок обзоров SDSS DR7 [9], POSS-I [10], POSS-II [11], а так же пулковские ПЗС-наблюдения. На каждом из снимков были получены пиксельные координаты исследуемых звезд и переведены в систему опорного кадра. Положения звезд на кадре определялось вписыванием в изображение звезд профиля Лоренца с применением алгоритма оптимизации Левенберга-Марквардта [12]. Переход от системы пиксельных координат произвольного кадра к системе пиксельных координат опорного (пулковского) кадра производился с применением модели 6 постоянных. 6 постоянных перехода были получены на основе пиксельных координат опорных звезд обоих кадров с помощью МНК. Использовалась единая система опорных звезд на всех снимках. Далее полученные пиксельные координаты в единой системе опорного кадра были переведены в систему тангенциальных координат. В качестве опорной использовалась система каталога UCAC3 [13]. На основе полученных тангенциальных координат были вычислены собственные движения звезд. Ошибки единицы веса при переходе к опорной системе лежат в интервале от 80 до 120 mas, поправки для отдельных звезд составляют до 100 mas. Таким способом были вычислены «средние» собственные движения, с использованием положений звезд в обзорах POSS-I и POSS-II, и «квазимгновенные» с использованием положений звезд в обзоре SDSS DR7 и положений, полученных в результате наблюдений на пулковском Нормальном Астрографе. На основе этих собственных движений для каждой звезды были вычислены значения параметра F по формуле, аналогичной (1). В результате работы [8] из 15 исследуемых звезд 4 были отнесены к кандидатам в астрометрические двойные, а для одной альтернативным методом была подтверждена её относительная близость к Солнцу. Позднее ещё для 300 программных звезд были вычислены собственные движения методом прямой редукции с кадра на кадр.

Выводы

Получены новые собственные движения для 1003 быстрых звезд с использованием экваториальных координат звезд каталогов-источников (Пулковский, СМС14, 2MASS, SDSS DR8). Точность полученных собственных движений лежит в пределах от 2 до 15 mas/yr. Средняя точность по каталогу: 6 mas/yr по прямому восхождению и 7 mas/yr по склонению. Проанализированы на статистическую значимость разности новых собственных движений быстрых звезд, полученных при относительно небольшой разности эпох (8-14), и собственных движений тех же звезд из каталога LSPM [1]. Критическое значение параметра, указывающее на вероятность кратности звезды 95%, $F=2.49$. Наиболее уверенно к звездам кандидатам в астрометрические двойные отнесены звезды, обнаруженные во всех использованных обзорах и каталогах. 63 звезды программы имеют $F>2.49$ и наблюдались во всех четырех обзорах. 15% из этих 63 звезд отмечены в списке LSPM как двойные. Для 300 звезд были получены собственные движения с использованием метода прямой редукции с кадра на кадр. Сравнение результатов показало высокую точность собственных движений для каждого из методов, но обнаружило заметное расхождение (до 10 mas/yr) между собственными движениями, полученными двумя методами. Это может быть вызвано наличием систематических ошибок координат звезд, которые предполагается выявить и учесть в ходе дальнейшей работы.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН N 21.

Литература

1. *S. L'epine1, M.M. Shara1, R.M. Rich*, A New All-Sky Catalog of Stars with Large Proper Motions // A Giant Step: From Milli- To Micro- Arcsecond Astrometry Proceedings IAU Symposium No. 248, p. 74-77, 2008
2. *D.W. Evans, M.J. Irwin, L. Helmer*, The Carlsberg Meridian Telescope CCD drift scan survey // *Astron. Astrophys.*, 395, L347-L356, 2002.
3. *M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening et al.*, The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *AJ*, 131, p. 1163, 2006.
4. *Aihara, Prieto, An, et al.*, The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 193:29 (17pp), 2011.
5. *R. Wielen, C. Dettbarn, H. Jahreiβ, H. Lenhardt, H. Schwan*, Indications on the Binary Nature of Individual Stars derived from a Comparison of their HIPPARCOS Proper Motions with Ground-Based Data. I. Basic Principles // *Astron. Astrophys.* 346, L675, 1999.
6. *R. Wielen, H. Schwan, C. Dettbarn, et al.*, Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6), Part I, Basic Fundamental Stars with Direct Solutions // *Veröffentlichungen, Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, Kommissions-Verlag G. Braun, Karlsruhe*, 1999.
7. *R. Wielen, H. Schwan, C. Dettbarn, et al.*, Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6), Part III, Additional Fundamental Stars with Direct Solutions // *Veröffentlichungen, Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg, Kommissions-Verlag G. Braun, Karlsruhe*, 2000.
8. *Куликова А.М.*, «Быстрые звезды: поиск звезд-кандидатов в астрометрические двойные» // *Известия ГАО, труды IV молодежной конференции*, 2012.
9. *Abazajian, et al.*, The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophysical Journal Supplement Series*, 182, 543, 2009.
10. *G.O. Abell*. The national geographic society Palomar Observatory Sky Survey // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Leaflet No. 366 – December, 1959.
11. *I.N. Read, C. Brewer, R.J. Brucato et al.* The Second Palomar Sky Survey // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103, L661-L674, 1991.
12. *Kenneth Levenberg*, A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares // *Quarterly of Applied Mathematics* 2: 164-168, 1944.
13. *Zacharias N., et al.*, UCAC3 Catalogue (Zacharias+, 2012) // 2012yCat. 1322. ... 0Z

NEW PROPER MOTIONS OF FAST STARS

Kulikova A., Khrutskaya E., Khovrichev M., Berezhnoy A.

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

New proper motions of 1003 stars with large proper motions in +30° to +70° declination zone were determined. The list of fast stars was constructed using LSPM catalogue. Positions of first epochs were obtained from CMC14, 2MASS and SDSS DR8. Positions of second epochs were obtained with the Pulkovo Normal Astrograph. The obtained positions accuracy is ≈ 40 mas in RA and ≈ 50 mas in Dec. The calculated proper motions accuracy is ≈ 6 mas/yr in RA and ≈ 7 mas/yr in Dec. The epochs differences for calculated proper motions are 6 to 14 yr. The calculated proper motions were adopted as “quasi-instantaneous” proper motions. The proper motions from LSPM catalogue were considered as “mean” proper motions. The LSPM proper motion accuracy is ≈ 20 mas/yr for stars located to the North of +30° and ≈ 10 mas/yr for stars located to the South of +30°. The epoch differences for LSPM proper motions are 15-45 yr. The calculated “quasi-instantaneous” proper motions and the LSPM “mean” proper motions were used for “ $\Delta\mu$ -binaries” detections. This technique is similar to Wielen's approach used to search for astrometric binaries among bright FK6 and Hipparcos stars. 63 targets were detected as “ $\Delta\mu$ -binaries” candidates. 15% of them were marked as double stars in LSPM catalogue. In addition, proper motions of 300 stars were calculated by “frame to frame” reduction method. First comparison of two various binaries stars detection methods was done. 10 mas/yr disagreement in methods was revealed.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОПРЕДЕЛЕНИЙ ГАЛАКТОЦЕНТРИЧЕСКОГО РАССТОЯНИЯ СОЛНЦА

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В. Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

*К настоящему времени накопилось несколько десятков определений расстояния от Солнца до центра галактики R_0 , полученных разными методами и по разному набору объектов. В работе проведен статистический анализ 52 результатов, опубликованных за последние 20 лет. Основными целями этого исследования были изучение статистической согласованности этих разнородных данных, определение наилучшего среднего значения и проверка наличия в данных "эффекта присоединения к большинству" (ЭПБ, *bandwagon effect*), подозреваемого некоторыми авторами. Оказалось, что результаты определения R_0 являются статистически согласованными. Наилучшее среднее значение, вычисленное по совокупности нескольких статистических методов, получилось равным 8.0 ± 0.25 кпс. Статистически значимого тренда со временем в этих данных не обнаружено, что не подтверждает выводы некоторых предыдущих работ. Отсутствие тренда также ставит под сомнение наличие в результатах определения R_0 ЭПБ. В то же время найдено статистически значимое уменьшение ошибок определения R_0 со временем.*

Введение

История этих определения расстояния от Солнца до центра Галактики (R_0) насчитывает уже около ста лет, в течение которых были сделаны несколько десятков измерений R_0 разными методами, по разным наборам объектов, и с разной точностью. В то же время астрономическое сообщество нуждается в некотором стандартном значении R_0 , соответствующем современным определениям. В частности, побудительным мотивом для настоящей работы послужила необходимость улучшения точности вычисления аберрации в собственных движениях (Галактической аберрации) внегалактических радиоисточников [2]. За прошедшие годы было предпринято несколько попыток получить среднее значение из имеющихся данных. Как правило, опубликованные работы основаны на тщательном звездно-астрономическом анализе имеющихся результатов, но ни в одной не сделана попытка их серьезного статистического анализа. Вместе с тем, как показывает опыт определения фундаментальных констант, например, в физике, эта задача является не только специально-научной, но и метрологической. В настоящей работе проведен анализ 52 определений R_0 , сделанных в течение последних 20 лет разными статистическими методами. Основные целями исследования были вычисление наилучшего среднего значения и его реалистичной ошибки, а также определение тренда в данных, который может свидетельствовать об эффекте присоединения к большинству (ЭПБ, в англоязычной литературе *bandwagon effect*) в опубликованных значениях R_0 , что иногда обсуждается в литературе.

Детали этой работы могут быть найдены в [7].

Использованные данные

Одной из причин расхождения результатов предыдущих авторов может быть селекция использованных данных в результате их анализа, предпочтений автора или из-за недоступности публикаций. Чтобы избежать этого, мы постарались собрать все данные, опубликованные за последние 20 лет, за исключением трех, пересмотренных авторами позднее. В результате, было использовано 52 значения R_0 (табл. 1).

Таблица 1. Используемые результаты определения R_0 .

7.9 ± 0.8	Merrifield, M. R. 1992, AJ, 103, 1552
8.1 ± 1.1	Gwinn, C. R., et al. 1992, ApJ, 393, 149
7.6 ± 0.6	Moran, J. M., et al. 1993, Lecture Notes in Physics, 412, 244
7.6 ± 0.4	Maciel, W. J. 1993, Astrophys. and Space Sci., 206, 285
8.09 ± 0.3	Pont, F., et al. 1994, Astron. Astrophys., 285, 415
7.5 ± 1.0	Nikiforov, I. I., Petrovskaya, I. V. 1994, Astron. Rep., 38, 642
7.0 ± 0.5	Rastorguev, A. S., et al. 1994, Astron. Lett., 20, 591
8.8 ± 0.5	Glass, I. S., et al. 1995, MNRAS, 273, 383
7.1 ± 0.5	Dambis, A. K., et al. 1995, Astron. Lett., 21, 291
8.3 ± 1.0	Carney, B. W., et al. 1995, AJ, 110, 1674
8.21 ± 0.98	Huterer, D., et al. 1995, AJ, 110, 2705
7.95 ± 0.4	Layden, A. C., et al. 1996, AJ, 112, 2110
7.55 ± 0.7	Honma, M., Sofue, Y. 1996, PASJ, 48, L103
8.1 ± 0.4	Feast, M. W. 1997, MNRAS, 284, 761
8.5 ± 0.5	Feast, M., Whitelock, P. 1997, MNRAS, 291, 683
7.66 ± 0.54	Metzger, M. R., et al. 1998, AJ, 115, 635
8.1 ± 0.15	Udalski, A. 1998, Acta Astron., 48, 113
7.1 ± 0.4	Olling, R. P., Merrifield, M. R. 1998, MNRAS, 297, 943
8.51 ± 0.29	Feast, M., et al. 1998, MNRAS, 298, L43
8.2 ± 0.21	Stanek, K. Z., Garnavich, P. M. 1998, ApJ, 503, L131
8.6 ± 1.0	Surdin, V. G. 1999, Astron. Astrophys. Trans., 18, 367
7.4 ± 0.3	Glushkova, E. V., et al. 1999, Astron. Astrophys. Trans., 18, 349
7.9 ± 0.3	McNamara, D. H. et al. 2000, PASP, 112, 202
8.67 ± 0.4	Stanek, K. Z., et al. 2000, Acta Astron., 50, 191
8.2 ± 0.7	Nikiforov, I. I. 2000, ASP Conf. Ser., 209, 403
8.24 ± 0.42	Alves, D. R. 2000, ApJ, 539, 732
8.05 ± 0.6	Genzel, R., et al. 2000, MNRAS, 317, 348
8.3 ± 0.3	Gerasimenko, T. P. 2004, Astron. Rep., 48, 103
7.7 ± 0.15	Babusiaux, C., Gilmore, G. 2005, MNRAS, 358, 1309
8.01 ± 0.44	Avedisova, V. S. 2005, Astron. Rep., 49, 435
7.62 ± 0.32	Eisenhauer, et al., 2005, ApJ, 628, 246
8.7 ± 0.6	Groenewegen, M. A. T., Blommaert, J. A. D. L. 2005, Astron. Astrophys., 443, 143
7.2 ± 0.3	Bica, E., et al. 2006, Astron. Astrophys., 450, 105
7.52 ± 0.36	Nishiyama, S., et al. 2006, ApJ, 647, 1093
8.1 ± 0.7	Shen, M., Zhu, Z. 2007, Chin. J. Astron. Astrophys., 7, 120
7.4 ± 0.3	Bobylev, V. V., et al. 2007, Astron. Lett., 33, 720
7.94 ± 0.45	Groenewegen, M. A. T., et al. 2008, Astron. Astrophys., 481, 441
8.07 ± 0.35	Trippe, S., et al. 2008, Astron. Astrophys., 492, 419
8.16 ± 0.5	Ghez, A. M., et al. 2008, ApJ, 689, 1044
8.33 ± 0.35	Gillessen, S., et al. 2009, ApJ, 692, 1075
8.7 ± 0.5	Vanhollebeke, E., 2009, Astron. Astrophys., 498, 95
7.58 ± 0.40	Dambis, A. K. 2009, MNRAS, 396, 553
7.2 ± 0.3	Bonatto, C., et al. 2009, Globular Clusters---Guides to Galaxies, 209
8.4 ± 0.6	Reid, M. J., et al. 2009, ApJ, 700, 137
7.75 ± 0.5	Majaess, D. J., et al. 2009, MNRAS, 398, 263
7.9 ± 0.75	Reid, M. J., et al. 2009, ApJ, 705, 1548
8.24 ± 0.43	Matsunaga, N., et al. 2009, MNRAS, 399, 1709
8.28 ± 0.33	Gillessen, S., 2009, ApJ, 707, L114
7.7 ± 0.4	Dambis, A. K. 2010, Variable Stars, the Galactic halo and Galaxy Formation, 177
8.1 ± 0.6	Majaess, D. 2010, Acta Astron., 60, 55
8.3 ± 1.1	Sato, M., et al. 2010, ApJ, 720, 1055
7.80 ± 0.26	Ando, K., et al. 2011, PASJ, 63, 45

В тех случаях, когда авторы приводили оценки и случайных и систематических ошибок, эти ошибки складывались в квадратуре. Иногда авторы приводили в качестве оценки точности не среднеквадратическую ошибку, а несимметричный доверительный интервал. В таких случаях в качестве ошибки результата принималось среднее из верхней и нижней границы этого интервала. Поскольку эти границы во всех случаях оказались близки между собой, такая замена не оказала заметного влияния на полученные в настоящей работе результаты.

Анализ данных

Как уже сказано выше, анализ данных проводился в двух основных направлениях. Первой задачей было определение наилучшей оценки R_0 с учетом последних наблюдений. Не менее важным для дальнейшего использования было получить реалистичную оценку ошибки этого значения. Для решения задачи мы использовали несколько статистических методов, применяющихся при определении наилучших значений физических констант и описанных в [7] и в цитированной там литературе. Шесть из них являются вариантами метода наименьших квадратов (МНК), а два метода основаны на анализе медианных значений. Эти методы следующие:

1. МНК без весов;
2. МНК с весами, обратно пропорциональными ошибкам;
3. МНК с весами и модифицированным методом вычисления ошибки [3];
4. Метод ограничения относительных весов [9];
5. Метод нормализованных уклонений [5];
6. Метод Мандела-Пауле [11];
7. Медиана с вычислением ошибки результата по [8];
8. Бутстреп медиана.

Методы 4–6 являются вариантами МНК с весами, отличающиеся тем, что в них разными способами выделяются и перевзвешиваются исходные значения, статистически не согласующиеся с остальными. Результаты вычисления среднего значения R_0 каждым методом приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты вычисления среднего значения R_0 разными методами.

Метод	R_0 , кпс
Невзвешенное среднее	7.960 ± 0.062
Взвешенное среднее	7.909 ± 0.051
Взвешенное среднее (модифицированное)	7.909 ± 0.076
Ограничение относительных весов	7.909 ± 0.051
Нормализованные уклонения	7.909 ± 0.051
Мандел-Пауле	7.911 ± 0.051
Медиана	8.060 ± 0.075
Бутстреп медиана	8.028 ± 0.083

Прежде всего, следует заметить, что средние значения R_0 , полученные разными модификациями МНК с весами (методы 2–5), практически одинаковы, что говорит о статистической согласованности данных, хотя ошибки их различаются иногда существенно. В то же время, разброс средних значений, полученными разными методами, в некоторых случаях превышает стандартные ошибки, причем нет никаких теоретических или практических причин отдать предпочтение одному из них перед остальными. Надо заметить, что такая ситуация является типичной в такого рода задачах.

При таких обстоятельствах наилучшее среднее значение может быть получено из комбинации приведенных результатов. Мы вывели наилучшую оценку R_0 следующим

образом. Окончательное значение R_0 взято как середина интервала, покрываемого всеми полученными средними с их стандартными ошибками. В нашем случае это среднее между крайними значениями ($7.909-0.076$) и ($8.060+0.075$), равное 7.984 . Ошибка наилучшего значения может быть принята как половина этого интервала, т.е. 0.151 . Однако это только статистическая оценка ошибки. Хотя многие авторы рассматривали систематические ошибки определений R_0 разными методами, но их точная величина, разумеется, неизвестна (иначе она была бы учтена в публикуемых результатах!). Сопоставляя различные литературные данные и учитывая, что наше значение R_0 получено усреднением данных, полученных различными методами (что должно приводить к компенсации возможных систематических ошибок этих методов), мы считаем разумным пределом среднеквадратической величины систематической ошибки окончательного значения 0.2 кпс. Комбинируя все эти данные, мы получили окончательное значение $R_0=8.0\pm 0.25$, которое считаем наилучшей оценкой галактоцентрического расстояния Солнца на настоящий момент. Наше решение вместе с другими сводными значениями R_0 приведено в табл. 3. Можно видеть, что наилучшая оценка R_0 за последние 20 лет практически не изменилась.

Таблица 3. Все результаты вычисления среднего значения R_0 .

Работа	Интервал данных	Число измерений	R_0 , кпс
[6]	1974–1986	25	8.5 ± 1.1
[12]	1974–1987	30	7.7 ± 0.7
[13]	1974–1992	35	8.0 ± 0.5
[10]	1974–2003	65	7.9 ± 0.2
[1]	1992–2005	16	7.8 ± 0.32
Наст. работа	1992–2011	52	8.0 ± 0.25

Следующим этапом работы стало изучение тренда в изменении опубликованных значений R_0 со временем. На наличие тренда обращали внимание многие авторы, однако часто они приходили к разным выводам в отношении его величины и даже направления. Так в данных [10, 13, 14] присутствует значительный отрицательный наклон в период с 1970-х до начала 1990-х гг. (этот интервал в настоящей работе не рассматривается), в данных [14] практически отсутствует тренд в 1990–1998 гг., в данных [10] присутствует небольшой положительный тренд в 1990–2003 гг., а в [4] показан большой положительный тренд в 1992–2010 гг.

Для наших вычислений мы использовали данные табл. 1, которые показаны на рис. 1. По ним был определен линейный тренд МНК в двух вариантах: без использования весов и с весами, обратно пропорциональными ошибкам. В результате получилось значение тренда -0.011 ± 0.011 кпс/год для вычислений с весами и $+0.006\pm 0.010$ кпс/год для вычислений без весов. Таким образом, мы можем заключить, что статистически значимого тренда в определениях R_0 за последние 20 лет не обнаружено.

Этот вывод подкрепляется также результатами проверки наличия систематических изменений в данных по критерию Аббе. Для этого вычисляется статистика Аббе q , которая может быть представлена как отношение вариации Аллана $AVAR$ к несмещенной оценке дисперсии выборки D :

$$q = \frac{AVAR}{D}, \quad AVAR = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})^2}{2(n-1)}, \quad D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (1)$$

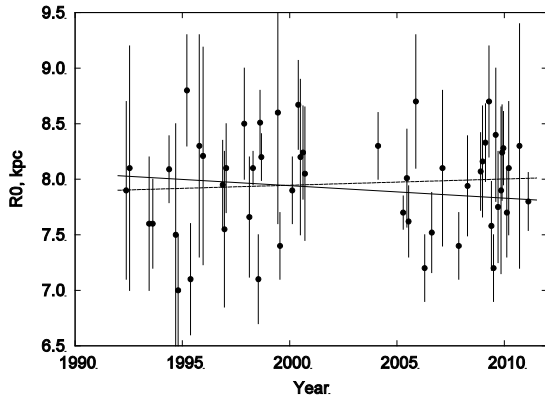


Рис. 1. Используемые определения R_0 и линейный тренд (сплошная линия – взвешенный, пунктирная линия – невзвешенный), кпс, кпс/год.

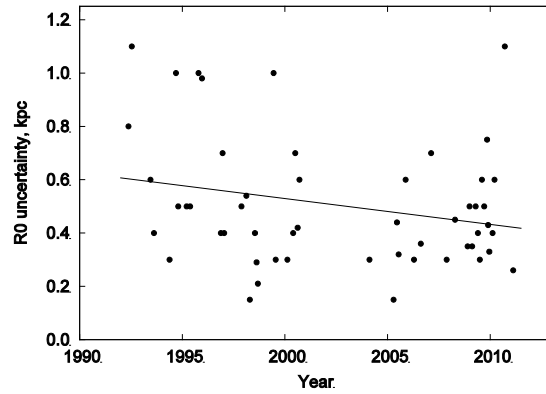


Рис. 2. Ошибки определения R_0 и линейный тренд, кпс, кпс/год.

В присутствии значительных систематических (низкочастотных) вариаций в данных величина D будет существенно больше $AVAR$, а q , соответственно, существенно меньше единицы. В нашем случае оказалось $q = 1.26$, что почти вдвое больше 1% критического значения 0.69. Впрочем, любое значение $q > 1$ уже говорит об отсутствии в данных статистически значимых низкочастотных изменений и тренда.

Причины расхождения нашего вывода об отсутствии тренда с результатом [4] видны из сравнения рис. 1 здесь с рис. 1 в работе [4]. Авторы последней по необъясненной причине не использованы несколько значений R_0 больше среднего из первой половины интервала и несколько значений меньше среднего из второй половины интервала, что и привело к найденному ими значительному росту публикуемых значений R_0 со временем. Дальнейший анализ показывает, что и расхождения между другими работами в отношении трендов объясняется разными наборами исходных данных.

Последней частью нашей работы было изучение изменения со временем ошибки определения R_0 . Соответствующие данные приведены на рис. 2 вместе с линией, соответствующей найденному МНК линейному тренду -0.0097 ± 0.0054 кпс/год. Таким образом, точность определения R_0 существенно улучшилась за последние 20 лет. Надо заметить, что в последние годы авторы стали обращать больше внимания на получение реалистичных ошибок своих результатов. Поэтому, с одной стороны, ошибки R_0 должны со временем уменьшаться по мере накопления и улучшения наблюдательных данных и используемых методов, а с другой стороны, эти ошибки могут увеличиваться из-за использования более корректных методов их оценки. Очевидно, первая тенденция в последние годы оказалась сильнее.

Заключение

В работе произведен статистический анализ 52 определений галактоцентрического расстояния Солнца R_0 , сделанных за последние 20 лет. При этом использовались несколько методов, что позволило лучше исследовать статистические свойства этих оценок. Хотя измерения были сделаны разными методами и по разным наборам объектов, они оказались согласованными в статистическом смысле. Заметим, что этот вывод не является тривиальным. Предварительный анализ определений угловой скорости вращения Галактики Ω_0 , сделанных за тот же период, показал, что эти измерения статистически не согласованы.

В качестве одного из основных результатов работы было вычислено среднее значение $R_0 = 8.0 \pm 0.25$, что находится в хорошем согласии с последними определениями $R_0 = 8.05 \pm 0.45$ [15]. Было также изучено изменение опубликованных значений R_0 со

временем. Статистически значимого тренда в этих данных не обнаружено, что может означать отсутствие в них ЭПБ, возможное наличие которого обсуждается несколькими авторами, например, [10,13]. В то же время, тренд в опубликованных ошибках определения R_0 получился равным $-0:0097 \pm 0054$ кпс/год, что говорит о статистически значимом улучшении точности измерений со временем.

Литература

1. *Аведисова В.С.* Галактические постоянные и кривая вращения Галактики по молекулярному газу. *Астрон. журн.*, 2005, т. 49, 488–499.
2. *Малкин З.М.* Влияние галактической аберрации на параметры прецессии, определяемые из РСДБ-наблюдений. *Астрон. журн.*, 2011, т. 88, 880–885.
3. *Малкин З.М.* О вычислении ошибки среднего взвешенного. *Наст. выпуск.*
4. *Foster T., Cooper B.* Structure and Dynamics of the Milky Way: The Evolving Picture. In: ASP Conf. Ser., v. 438, 2010, 16–30.
5. *James M.F., Mills R.W., Weaver D.R.* Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 1992, v. 313, 277–282.
6. *Kerr F.J., Lynden-Bell D.* Review of galactic constants. *MNRAS*, 1986, v. 221, 1023–1038.
7. *Malkin Z.* The current best estimate of the Galactocentric distance of the Sun based on comparison of different statistical techniques. arXiv:1202.6128, 2012.
8. *Müller J.W.* Possible advantages of a robust evaluation of comparisons. Report BIPM-95/2. BIPM, Sevres, France, 1995.
9. *Nichols A.L.* IAEA Co-ordinated Research Project: update of X-ray and gamma-ray decay data standards for detector calibration and other applications. *Appl. Rad. Isot.*, 2004, v. 60, 247–256.
10. *Nikiforov I.* The Distance to the Center of the Galaxy: the Current State-of-the-Art in Measuring R_0 . In: ASP Conf. Ser., v. 316, 2004, 199–208.
11. *Paule R., Mandel J.* Consensus Values and Weighting Factors. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1982, v. 87, 377–385.
12. *Reid M.J.* The Distance to the Galactic Center: R_0 (review). In: IAU Symposium, v. 136, The Center of the Galaxy, 1989, 37–46.
13. *Reid M.J.* The distance to the center of the Galaxy. *ARA&A*, 1993, v. 31, 345–372.
14. *Surdin V.G.* Distance to the galactic centre. *Astron. Astrophys. Trans.*, 1999, v. 18, 367–372.
15. *Honma M., Nagayama T., Ando K., et al.* Fundamental Parameters of the Milky Way Galaxy Based on VLBI astrometry. arXiv:1211.3843v2, 2012

SOME RESULTS OF STATISTICAL ANALYSIS OF THE DETERMINATIONS OF THE GALACTOCENTRIC DISTANCE OF THE SUN

Malkin Z.M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Based on R_0 measurements made during last decades, several studies were performed to derive the best R_0 estimate. Some of them used just simple averaging to get a result, whereas others provided comprehensive analysis of possible errors in published results. In both cases no detailed statistical analysis of data used was made. However, a computation of the best estimates of the Galactic rotation constants is not only astronomical but also metrological task. In this work we performed an analysis of 52 R_0 measurements published during last 20 years to assess the consistency of the data. Our analysis has shown that they are consistent (unlike Ω_0). The average value of R_0 found in our study is 8.0 ± 0.25 kpc. It was also shown that the trend in the R_0 estimates for the last 20 years is statistically negligible, which makes it doubtful a presence of the bandwagon effect. On the other hand, the formal error of the published R_0 estimates significantly improves with time.

ОРБИТАЛЬНЫЕ ДВОЙНЫЕ: ЭФФЕКТЫ СЕЛЕКЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ

Малков О.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Орбитальные двойные системы предоставляют возможность определить динамическую массу компонентов и орбитальные элементы. Кроме того, массы компонентов орбитальных двойных можно оценить из фотометрии и спектральной классификации. В работе представлен каталог орбитальных двойных, полученный путем слияния двух основных наблюдательных каталогов (ORB6 и OARMAC), с добавлением информации из баз данных WDS и SIMBAD. После исправления каталогизированных данных за эффекты селекции были получены распределения объектов каталога по основным орбитальным элементам и массам компонентов.

1. Введение

Комбинируя фотометрические и позиционные данные для орбитальных двойных (визуальные системы с заметным орбитальным движением и известными параллаксами), можно получить значения динамических масс компонентов, как и для спектроскопических затменных двойных. Однако, в отличие от последних, число известных орбитальных двойных составляет несколько тысяч: современные каталоги орбитальных двойных содержат 1700 (OARMAC, [1]) и 2000 (ORB6, [2]) пар.

Целью настоящей работы является создание самого полного каталога орбитальных двойных, содержащего орбитальные элементы, расстояния, а также звездные величины и спектральную классификацию компонентов. По данным каталога вычисляются значения динамических масс компонентов, они сравниваются с фотометрическими и спектральными значениями, а затем для исправленного за эффекты селекции набора строятся распределения систем по массам и орбитальным элементам.

2. Каталог орбитальных двойных

Существующие каталоги орбитальных двойных обладают рядом недостатков, препятствующих достижению целей, поставленных в настоящей работе. Так, ORB6 не содержит ни спектральной классификации, ни параллаксов, а OARMAC опубликован в неудобном формате и не содержит информации о точности орбитальных элементов. Кроме того, при анализе каждого каталога было обнаружено около ста ошибок (опечаток). Ни один из исследованных каталогов не является исчерпывающим.

Первым шагом к созданию объединенного каталога явилось объединение ORB6 и OARMAC. При этом из рассмотрения исключались системы с неизвестным периодом и/или большой полуосью орбиты. Далее в результирующий список добавлялись более свежие фотометрические данные и спектральная классификация из WDS. Наконец, SIMBAD использовался для получения позиционных данных (координаты и параллакс), фотометрии и спектров (если отсутствовали в других источниках), а также информации о затменной и спектроскопической природе компонентов.

Результирующий каталог содержит идентификаторы систем (WDS, ADS, HIP, имя); блески и спектральные типы компонентов; параллакс; оценку межзвездного поглощения (из галактических координат и расстояния); орбитальные элементы и их ошибки; индикаторы надежности орбиты из OARMAC и ORB6; информация о фотометрической или спектроскопической переменности компонентов. Каталог содержит 3139 орбит для 2278 пар (исходные каталоги зачастую содержат несколько орбиталь-

ных решений для одной пары). При этом пары содержатся как в двойных, так и в системах более высокой кратности. Среди каталогизированных орбит для 650 неизвестен блеск вторичного компонента, для 65 орбит нет спектральной информации, а параллакс для 270 орбит неизвестен, отрицателен или равен нулю.

Следующим шагом стало создание «очищенного» списка орбитальных двойных, пригодного для статистического анализа. Для этого из результирующего каталога были удалены все системы кратности три и выше (во избежание статистических смещений при вычислении динамических масс), системы с неизвестным или отрицательным/нулевым параллаксом и системы с низким качеством орбиты (флаг 4.5.9 в ORB6 или флаг C в OARMAC).

Для дальнейшего анализа в списке для каждой пары была оставлена только одна орбита. При выборе орбиты учитывалось ее качество (по информации из оригинальных каталогов), а также соответствие динамической массы, вычисленной с данными орбитальными элементами, фотометрической и спектральной массам. Эти три значения массы вычислялись, соответственно, по формулам

$$M_d \equiv M_1 + M_2 = a^3 / (\pi^3 P^3),$$

$$M_{1,2} = f_{MLR}(m_{1,2} + 5 \lg \pi + 5 - A(l, b, \pi)),$$

$$M_{1,2} = f_{MSR}(\text{SpType}_{1,2}).$$

Здесь M , m , SpType – масса (в солнечных единицах), блеск и спектральный тип компонентов, соответственно; a , π , P , A , l , b – большая полуось (в угловых секундах), параллакс (в угловых секундах), период (в годах), межзвездное поглощение и галактические координаты системы, соответственно. Соотношение масса-светимость f_{MLR} из [3], [4] и [5] использовалось для MS звезд умеренных, малых и самых малых масс, соответственно. Согласно [6], субгиганты и ранние (O-F6) гиганты на 1 mag ярче, чем карлики соответствующего спектрального типа. Фотометрические массы нескольких звезд, принадлежащих другим классам светимости (поздние гиганты и сверхгиганты) оценивались с помощью таблиц из [7]. Пары с неизвестным классом светимости считались парами звезд Главной последовательности (что представляется разумным предположением для сравнительно близких к нам орбитальных двойных). Класс светимости вторичного компонента, если был неизвестен, считался равным классу светимости главного компонента. У 35 систем блеск вторичного компонента был неизвестен и считался равным блеску главного компонента; в этом случае вычисленная фотометрическая масса представляет собой верхний предел. Значения фотометрических масс отсутствуют у 17 систем, поскольку в этих случаях вычисленные абсолютные звездные величины оказались не соответствующими заданным классам светимости. В качестве соотношения масса-спектр f_{MSR} использовались таблицы из [7].

Ошибки значений динамических масс оценивались из ошибок параллаксов, больших полуосей и периодов систем. Основным вкладом в ошибку фотометрической массы является неопределенность соотношения масса-светимость. Ошибку спектральной массы мы оцениваем в 20% для звезд ГП и в 30% для звезд остальных классов светимости. В ряде случаев вычисленные динамические массы заметно отличаются от фотометрических и спектральных. Причинами такого различия могут быть следующие: ошибочный параллакс, ошибочные орбитальные элементы, ошибочная спектральная классификация, наличие третьего тела в системе, переменность компонентов, недооценка межзвездного поглощения и др.

«Очищенный» список орбитальных двойных содержит 652 системы. Детали его создания и предварительного анализа описаны в [8].

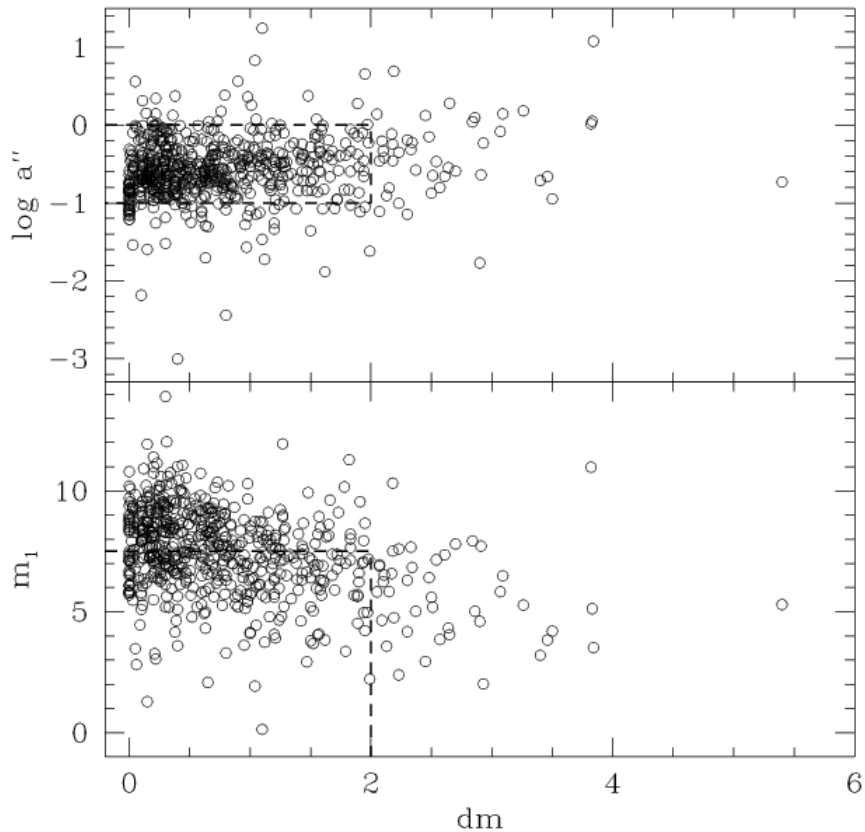


Рис. 1. Большая полуось орбиты (верхняя панель) и блеск главного компонента (нижняя панель) в сравнении с разницей блеска компонентов орбитальных двойных. Штриховые линии обозначают области, населенные системами, удовлетворяющими критериям $a'' \sim 0''.1 - 1''$, $m_1 \leq 7.^m5$ и $dm \leq 2^m$. Звездные величины V взяты из WDS.

3. Эффекты селекции и распределения по фундаментальным параметрам

Известно, что эффекты наблюдательной селекции ограничивают возможности наблюдения двойных систем различных типов и могут серьезно исказить результаты. Здесь мы анализируем основные эффекты селекции, которые определяют вид наблюдаемого набора орбитальных двойных.

Подавляющее большинство исследуемых здесь систем имеет блеск главного компонента не слабее 9.5^m . Кроме того, значения большой полуоси орбиты большинства систем лежат в пределах $0''.1 - 1''$, поскольку более тесные системы не разделяются инструментами с апертурой около 100 см (обычно используемых для наблюдения визуальных двойных), а более широкие системы не показывают заметного орбитального движения. Распределение систем по разнице блесков компонентов (которая может использоваться для оценки величины отношения масс компонентов) также подвержено влиянию эффектов селекции. У достаточно тесных двойных оба компонента могут наблюдаться, только если они имеют сравнимый блеск. Кроме того, у относительно слабых двойных, блеск главного компонента которых близок к предельной звездной величине наблюдений, второй компонент будет обнаружен только при малой разнице блеска.

На рис. 1 показано распределение исследуемых звезд в плоскостях $a'' - m_1 - dm$. Можно видеть, что среднее значение величины dm увеличивается с увеличением a'' и увеличивается с увеличением m_1 . Очевидно также, что при $a'' < 0''.1$, или $a'' > 1''$, или $m_1 > 7.^m5$, или $dm > 2^m$ набор определенно становится неполным. У 207 из 652 систем значения параметров удовлетворяют этим критериям полноты ($a'' \sim 0''.1 - 1''$, $m_1 \leq$

7. $m_5, dm \leq 2m$), и распределения этих двойных (вместе с распределениями всех 652 систем) по фундаментальным параметрам представлены на рис. 2.

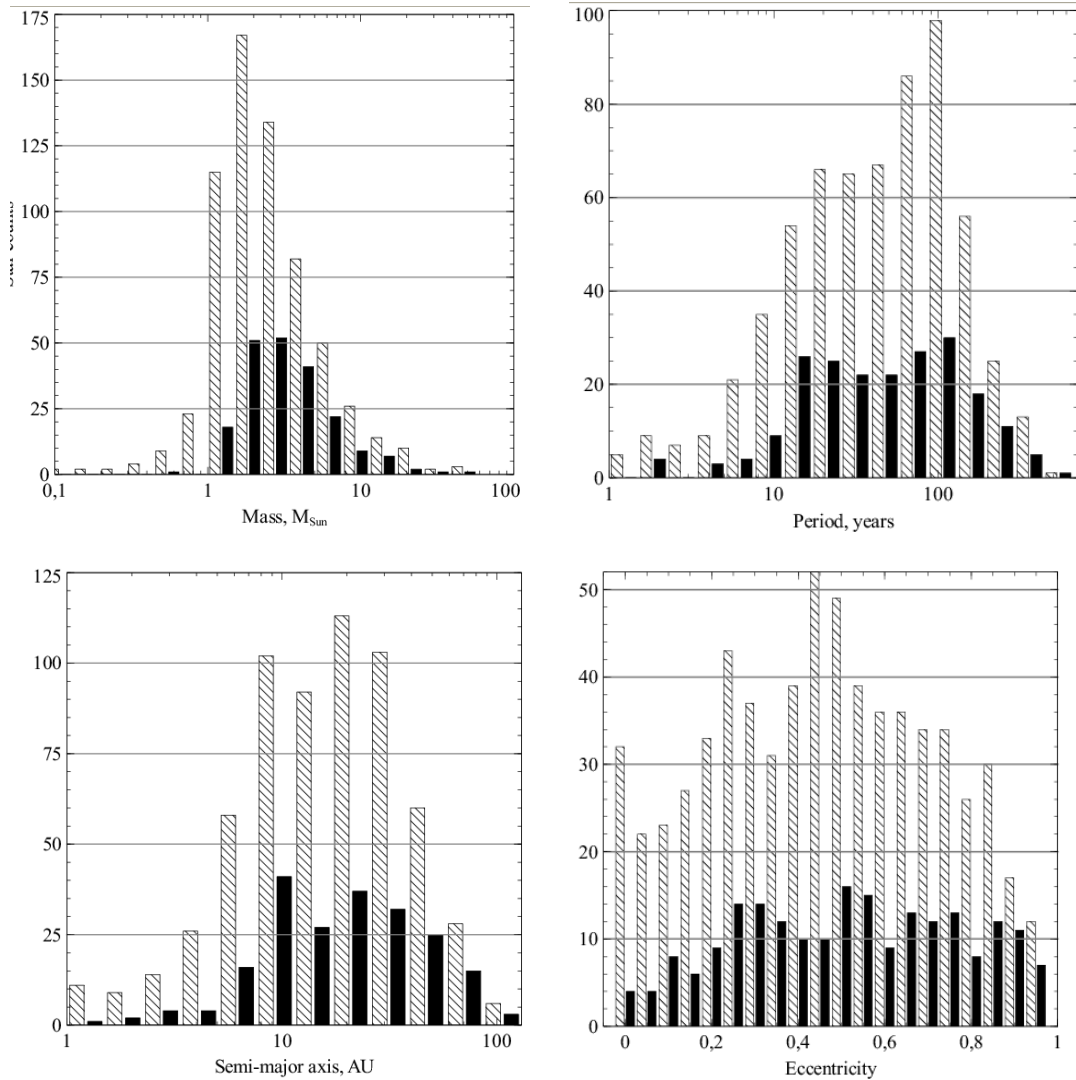


Рис. 2. Распределение орбитальных двойных по динамическим массам, периодам, большим полуосям, и эксцентриситетам орбит. Серые бары – 652 каталогизированные системы, черные бары – выбранные 207 систем со следующими значениями параметров: большая полуось орбиты 0".1 - 1", блеск главного компонента до 7.5 mag, разница блесков компонентов до 2 mag.

Анализируя распределение по периодам можно отметить, что в [9] по данным о солнечно-подобных звездах в ближайшей окрестности было найдено логнормальное распределение с пиком в районе 300 лет. Наше распределение существенно искажено в этой области, преимущественно из-за недостатка протяженных рядов наблюдений для долгопериодических систем.

В работе [10] было показано, что распределение по большим полуосям орбит двойных систем удовлетворяет зависимости $f(a) \sim 1/a$. Для широких (более 100 а.е.) систем это было подтверждено в [11]. Исследуемый нами набор неизбежно ограничен для больших a из-за слишком продолжительных для наблюдений орбитальных периодов широких двойных. Распределение по a представляет поэтому широкий, почти плоский пик, падающий к большим и к малым (из-за сложности наблюдений малых угловых расстояний) значениям.

Распределение по эксцентриситетам можно считать плоским на участке 0.3-1, для менее эксцентричных пар оно следует распределению $f(e) = 2e$ [12].

Необходимо заметить, что полученные распределения все еще искажены некоторыми эффектами селекции, присущими исходным каталогам OARMAC и ORB6, и не должны рассматриваться как современные или, тем более, начальные распределения двойных по параметрам. Так, вероятность открытия визуальной двойной зависит, очевидно, от ориентации и эксцентриситета орбиты. Однако, мы предполагаем, что полученные распределения (кроме, конечно, распределения по эксцентриситету) на зависят от этих параметров. Окончательный ответ на этот вопрос может дать моделирование ансамбля двойных с использованием начальных распределения по массам и орбитальным элементам, с дальнейшим учетом звездной эволюции и наблюдательных эффектов селекции.

4. Заключение

Целями данной работы являлись сбор и исследование данных о визуальных двойных системах с известными орбитальными элементами и параллаксами (орбитальных двойных). Основными источниками служили каталоги OARMAC и ORB6, а также базы данных WDS и SIMBAD. Результирующий каталог (VizieR: J/A+A/546/A69) содержит 3139 орбит для 2278 двойных и представляет крупнейший на сегодняшний день список орбитальных двойных с известными спектральными классификаторами, фотометрией и указаниями на фотометрическую или спектроскопическую переменность компонентов. Для дальнейшего анализа был создан «очищенный» список орбит (652 орбиты), содержащий только высококачественные орбиты, по одной на каждую пару, и не содержащий тройных и систем более высокой кратности. Полученный список планируется время от времени обновлять, поскольку обновляемыми являются и исходные каталоги. Для ряда звезд весьма желательно провести дополнительные наблюдения с целью определения недостающей фотометрии и спектральной классификации.

Анализ эффектов селекции показывает, что набор может считаться полным в пространстве параметров со следующими значениями: большая полуось орбиты 0".1 - 1", блеск главного компонента до 7.5 mag, разница блесков компонентов до 2 mag. Для 207 систем, удовлетворяющих этим требованиям, были построены распределения по фундаментальным параметрам: динамическим массам, периодам, большим полуосям и эксцентриситетам орбит. Эти распределения могут использоваться в дальнейшем для получения начальной функции масс звезд и истории звездообразования широких двойных.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-00426, 10-07-00342, 12-07-00528, при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант 02.740.11.0247), Программы Президиума РАН Поддержка ведущих научных школ (грант НШ-3602.2012.2), а также в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы.

Литература

1. *Docobo, J.A., Ling, J.F., & Campo, P.P.* 2012, Catalog of Orbits and Ephemerids of Visual Double Stars, Version On-Line (www.usc.es/astro/catalog.htm).
2. *Hartkopf, W.I., Mason, B.D., & Worley, C.E.* 2001, Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars (<http://www.ad.usno.navy.mil/wds/orb6/orb6.html>).
3. *Malkov, O.* 2007, MNRAS, 382, 1073.
4. *Henry, T.J., & McCarthy, D.W. Jr.* 1993, AJ, 106, 773.
5. *Henry, T.J., Franz, O.G., Wasserman, L.H., et al.* 1999, ApJ, 512, 864.
6. *Halbwachs, J.-L.* 1986, A&A, 168, 161.

7. *Straizys, V., & Kuriliene, G.* 1981, *ApSS*, 80, 363.
8. *Malkov O.Yu., Tamazian V.S., Docobo J.A., Chulkov D.A.* 2012, *A&A*, 546, 69.
9. *Raghavan D., McAlister H.A., Henry T.J. et al.* 2010, *ApJS* 190, 1.
10. *Opik E.* 1924, *Tartu Obs. Publ* 25.
11. *Poveda A., Allen C. & Hernandez-Alcantara A.* 2007, in *IAU Symposium 240*, eds. W.I. Hartkopf, E.F. Guinan and P. Harmanec. Cambridge: Cambridge University Press, 417.
12. *Амбарцумян В.А.* 1937, *АЖ* 14, 207.

ORBITAL BINARIES: SELECTION EFFECTS AND PARAMETER DISTRIBUTIONS

Malkov O.Yu.

Institute of Astronomy of RAS, Moscow, Russia

Visual binaries with known orbital elements and parallaxes (orbital binaries) allow us to determine dynamical masses as well as photometric and spectral masses of components. We present a set of orbital binaries, using data from current versions of OARMAC and ORB6 catalogues of orbital binaries as well as including updated information from WDS and SIMBAD. After correction of the set for selection effects, distributions of orbital binaries among dynamical mass, period, semi-major axis, and eccentricity of systems were constructed.

ПОИСК $\Delta\mu$ -BINARY СИСТЕМ В ПЛОЩАДКАХ АКСИАЛЬНОГО МЕРИДИАННОГО КРУГА НИКОЛАЕВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Мартынов М.В., Майгурова Н.В., Пинигин Г.И.

*Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»
54030, Украина, Николаев, ул. Обсерваторная, 1*

В результате наблюдений в 2008-2011 гг. на Аксиальном меридианном круге (АМК) НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» были получены два каталога общей численностью 284 557 объектов. Для их анализа была применена методика, оценивающая статистическую значимость разностей «квазимгновенных» и «долговременных» собственных движений по отношению к ошибкам их определения. Был получен список вероятных кандидатов в двойные и кратные системы, обладающие невидимыми спутниками, численностью 9 379 объектов.

Одно из актуальных направлений исследований близких к Солнцу звёзд – поиск и изучение звёзд с невидимыми (на данном этапе развития наблюдательной техники) спутниками субзвёздных масс. Программы таких исследований велись в различных обсерваториях мира [1, 2], в ходе которых у ряда звёзд выявляются периодические колебания в их орбитальном движении, вызванные наличием невидимого спутника.

Существует много методов определения двойной природы небесного объекта, который визуально представляется одиночным. В данной работе используется сравнительно новый метод поиска невидимых компонентов подобных систем [1]. Он был разработан при создании каталога FK6 и основывается на сравнении собственных движений звёзд, полученных за различные временные интервалы, в предположении, что для двойной системы с «невидимым» компонентом движение её фотоцентра на достаточно длительном промежутке времени будет не линейным, а волнообразным. Если обычная практика получения собственных движений по наземным наблюдениям опирается на наблюдения с разностью эпох 20-50 и более лет, то собственные движения, полученные с разностью эпох 10 и менее лет, могут рассматриваться в рамках данной методики как «квазимгновенные».

В работе [1] сравнивались «квазимгновенные» собственные движения, взятые из каталога HIPPARCOS, и средние («долговременные») собственные движения за столетие, представленные в каталоге FK5, а также полученные сравнением положений HIPPARCOS с каталогом GC. В основу метода легло предположение, что если разница собственных движений ($\Delta\mu$) статистически значима по отношению к ошибке их определения, то объект является, с большой долей вероятности, двойной системой. Было предложено назвать класс таких объектов ' $\Delta\mu$ binary' (или ' $\Delta\mu$ binary'). В противном случае звезда является ' $\Delta\mu$ single-star candidate', если нет других подтверждений её кратной природы.

Основное статистическое предположение, взятое за основу выявления $\Delta\mu$ -объектов, представлено в виде:

$$F^2 = (\Delta\mu_{RA}/\epsilon_{RA})^2 + (\Delta\mu_{DEC}/\epsilon_{DEC})^2, \quad (1)$$

где $\Delta\mu_{RA}$, $\Delta\mu_{DEC}$ – соответствующие разности «долговременных» и «квазимгновенных» собственных движений, а ϵ_{RA} , ϵ_{DEC} – ошибки их определения.

В [1] предложено считать $\Delta\mu$ binaries те объекты, для которых критерий $F \geq 3.44$ и означает, что на 10 000 звёзд придётся всего 27 ошибочных определений $\Delta\mu$ binaries, если их собственные движения в сравниваемых каталогах являются нормально распределёнными величинами, в одной опорной системе, при отсутствии значительных систематических ошибок.

Данную методику решено применить к каталогам, полученным по результатам ПЗС-наблюдений на Аксиальном меридианном круге (АМК, $D = 180 \text{ mm}$, $F = 2490 \text{ mm}$, $S1C 1094 \times 1160 \text{ px}$, $16 \times 16 \mu^2$) [3] НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НАО) в 2008-2011 гг.

Каталог 2008-2009 гг. содержит положения и собственные движения 140 321 звезды, расположенных, в основном, в площадках вдоль эклиптики (98%) и вокруг звезд с большими собственными движениями [4]. Наблюдения выполнялись в интегральном свете без применения фильтра. Предельная звездная величина каталога равна 16.5.

В 2010-2011 гг. программу наблюдений на АМК составляли звезды с большими собственными движениями. Список для наблюдений выбран из каталогов LSPM и сводного каталога звезд с высокими собственными движениями, созданного в ГАО НАНУ. В результате обработки получен массив положений и собственных движений 142 621 звезды в площадках вокруг программных объектов. Наблюдения выполнялись с применением V-фильтра системы Джонсона-Каззинса-Бесселя; предельная звездная величина полученного массива составила 15.5.

В качестве опорного каталога при выполнении астрометрических редуций в обоих случаях использовался каталог UCAC2. Средняя квадратичная ошибка каталожного положения звезды находится в пределах 20-65 мсд по прямому восхождению и 30-70 мсд по склонению. Среднее число наблюдений одного объекта составляет 7.8 раза (в каталог вошли звезды с числом наблюдений не менее 3 раз).

Таблица 1. Результаты кросс-идентификации каталогов АМК 2008-2009 гг. и 2010-2011 гг. (всего 284 557 объектов).

Каталог	Кол-во объектов	Идентифицировано объектов АМК, %	Наличие собственных движений в каталоге	Временной интервал определения собственных движений
2MASS	~470 млн.	99	-	-
СМС (1 ... 11)	180 812	1	+	1984-1998
СМС-14	~96 млн.	96	-	-
HIPPARCOS	118 218	3	+	1989-1993
LSPM	61 977	0.3	+	~1950-2000
NPM	~400 000	1.5	+	1947-1988
PPMX	~18 млн.	56	+	~1900-2000
Tycho-2	~2.5 млн.	7	+	~1900-2000
USNO-A2.0	~526 млн.	96	-	-
XPM	~314 млн.	93	+	~1950-2000

Для кросс-идентификации каталогов АМК 2008-2009 гг. и 2010-2011 гг. в других звездных каталогах, получения собственных движений и поиска объектов 'delta-mu binary' Мартыновым М.В. разработан программный пакет "peto" (от лат. "искать, добиваться, стремиться"). Это пакет консольных скриптов (всего – 48 скриптов), написанных на современном мультиплатформенном языке программирования Python.

На данный момент пакет "peto" работает с 18 каталогами: 2mass, AC2000, СМС (1-11), СМС14, Hipparcos, NPM, PPMX, Tycho-2, UCAC2, UCAC3, UCAC4, USNO-A2.0, XPM, а также с каталогами звезд с большими собственными движениями h-rms2 и LSPM (более 40 и 150 mas/year соответственно), каталогом двойных и кратных

систем WDS, каталогом лучевых скоростей RAVE, списком звёзд-кандидатов в двойные и кратные системы delta-mu binaries. Также программный пакет допускает сравнительно быстрое и несложное расширение базы для кросс-идентификации, т.е. подключение других каталогов. С помощью программного пакета “reto” выполнена кросс-идентификация полученных на АМК данных с десятью звёздными каталогами. Результаты кросс-идентификации представлены в табл. 1.

Затем выполнен анализ собственных движений на предмет поиска $\Delta\mu$ binaries объектов. Результаты данного поиска представлены в табл. 2. Вначале были сопоставлены между собой 3 разности между собственными движениями: полученными на разности положений каталогов АМК и CMC-14, АМК и 2mass, АМК и USNO-A2.0. При этом собственные движения $pm_{(AMK - CMC-14)}$ и $pm_{(AMK - 2MASS)}$ получены на разности эпох около 10 лет, поэтому их можно рассматривать как «квазимгновенные» и нельзя сравнивать между собой. В то же время собственные движения $pm_{(AMK - USNO-A2.0)}$, полученные для разности эпох 30-60 лет, можно рассматривать как «долговременные» и сопоставить с $pm_{(AMK - CMC-14)}$ или $pm_{(AMK - 2MASS)}$.

Таблица 2. Результаты поиска $\Delta\mu$ binaries объектов в каталогах АМК 2008-2011 гг. при $F \geq 3.44$.

Каталог АМК	$pm_{(AMK - CMC-14)}$, $pm_{(AMK - 2MASS)}$ ----- $pm_{(AMK - USNO-A2.0)}$ (3 $pm \rightarrow 2 \Delta pm$)	$pm_{(AMK - CMC-14)}$, $pm_{(CMC-14 - CMC-11)}$, $pm_{(Hip)}$ ----- $pm_{(AMK - USNO-A2.0)}$, $pm_{(XPM)}$, $pm_{(AMK - NPM)}$ (6 $pm \rightarrow 9 \Delta pm$)
2008-2009 гг. (141 936)	1 216	4 886
2010-2011 гг. (142 621)	1 342	4 493
Всего:	2 558	9 379

Затем количество сравниваемых собственных движений было увеличено до 6: с одной стороны – «квазимгновенные» $pm_{(AMK - CMC-14)}$, $pm_{(CMC-14 - CMC-11)}$ и $pm_{(Hipparcos)}$; с другой – определённые на значительно большем промежутке времени, так называемые «долговременные», $pm_{(AMK - USNO-A2.0)}$, $pm_{(XPM)}$, $pm_{(AMK - NPM)}$. 6 собственных движений даёт до 9 сравниваемых разностей собственных движений (для одной и той же звезды может не быть всех 6-и собственных движений). В предположении, что для определения объекта как $\Delta\mu$ binary достаточно, если хотя бы одна разность из 9 будет удовлетворять критерию F , количество кандидатов в двойные и кратные системы увеличилось примерно в 4 раза, что видно из табл. 2.

Одиночная звезда может быть ошибочно отнесена к $\Delta\mu$ -binary как из-за некорректной оценки точности каталожных данных, так и из-за ошибок кросс-идентификации, нередко затруднённой, например, для “быстрых” звёзд. Несмотря на вероятностную природу методики определения $\Delta\mu$ binaries, принадлежность объекта к их списку имеет смысл учитывать при выполнении дальнейших исследований этих звёзд. Наблюдения на больших инструментах могли бы в будущем подтвердить их двойную природу, а также определить ряд их астрофизических характеристик, необходимых, в частности, для детального изучения галактической окрестности Солнца.

Выводы

В результате анализа результатов наблюдений на Аксиальном меридианном круге Николаевской астрономической обсерватории в течение 2008-2011 гг. с помощью оценки статистической значимости разностей «квазимгновенных» и «долговременных» собственных движений по отношению к ошибкам их определения был получен список вероятных кандидатов в двойные и кратные системы, обладающие невидимыми спутниками, общей численностью 9 379 объектов.

Данная методика выявления астрометрических двойных является лишь первым этапом изучения класса $\Delta\mu$ binaries объектов, извлекающим кандидаты в двойные и кратные системы из весьма многочисленных массивов звёздных каталогов. Для более тщательного изучения и получения физических характеристик предполагаемых двойных и кратных систем, представляемых визуально одиночными звёздами, требуются другие методы, которые бы продолжили работу с полученным списком $\Delta\mu$ binaries. В частности, перспективным выглядит привлечение методов анализа временных рядов, но он требует значительного расширения списка привлекаемых каталогов с различными эпохами наблюдения – для их перекрёстной кросс-идентификации и как можно более плотного наполнения истории наблюдения $\Delta\mu$ binary объекта. Для последней цели также многообещающими являются виртуальные интернет-технологии (VAO), получившие столь большое распространение в астрономии в последнее время.

Литература

1. *R. Wielen, C. Dettbarn, H. Jahreiß, H. Lenhardt, and H. Schwan.* Indications on the binary nature of individual stars derived from a comparison of their HIPPARCOS proper motions with ground-based data. I. Basic principles // *Astronomy and Astrophysics*, 1999, V. 346, 675-685.
2. *Хруцкая Е.В., Бережной А.А., Ховричев М.Ю.* Исследование движений быстрых звёзд на основе результатов наблюдений, полученных с помощью Пулковского нормального астрографа // *Письма в астрономический журнал*, 2011, т. 37, № 6, 458-469.
3. *Ковальчук А.Н., Пинигин Г.И., Процюк Ю.И. и др.* ПЗС–аксиальный меридианный круг Николаевской обсерватории // *Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики: Тр. конф. - СПб: ИТА РАН, 1996, 91–96.*
4. *Майгурова Н.В., Мартынов М.В., Пинигин Г.И.* Каталог звёзд в площадках аксиального меридианного круга Николаевской обсерватории // *Кинематика и физика небесных тел*, 2013, № 1, 68-80.

SEARCH FOR $\Delta\mu$ -BINARY SYSTEMS IN THE FIELDS OF AXIAL MERIDIAN CIRCLE OF NIKOLAEV OBSERVATORY

Martynov M., Maigurova N., Pinigin G.
RI "Nikolaev Astronomical Observatory"

Two catalogs of the 284,557 stars were received as a result of observations in 2008-2009 with using Axial Meridian Circle of RI "Nikolaev Astronomical Observatory". The comparison of the quasi-instantaneously measured proper motion with the long-term averaged proper motion is used as method of analysis of their data. If the differences of the proper-motion $\Delta\mu$ are statistically significant with respect to their measured errors, the objects are very probably double stars. The list of the probable candidates of the double and multiple systems with invisible companions is contained 9,379 objects.

ДИНАМИКА ТРОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА 2:1

Мельников А.В.¹, Орлов В.В.^{1,2}, Шевченко И.И.¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

²Санкт-Петербургский государственный университет

В классе слабо-иерархических тройных гравитационных систем равных масс исследована динамика вблизи резонанса 2:1 между начальными орбитальными периодами внешней и внутренней пар. На представительных множествах начальных данных построены зависимости «ляпуновское время — время распада» системы. Показано, что характер этих зависимостей определяется эффектом прилипания траекторий к регулярной компоненте фазового пространства.

Введение

Характеристические показатели Ляпунова (ХПЛ) являются важным инструментом исследования хаотического движения. Величина, обратная максимальному ХПЛ (МХПЛ), — ляпуновское время — представляет собой характерное время предсказуемой динамики. В работах [1–3] был проведен ряд численных экспериментов по динамике объектов Солнечной системы и сделан вывод, что времена «резких изменений» в орбитальном поведении можно статистически предсказывать с помощью вычисления МХПЛ. Установлено, что между временем T_r резкого орбитального изменения и ляпуновским временем T_L существует простая степенная статистическая зависимость $T_r \propto T_L^\gamma$ с универсальным значением показателя степени $\gamma \approx 2$. Зависимости «ляпуновское время — время распада» (T_L — T_d) для различных вариантов задачи трех тел построены в работах [4,5]. Эти исследования выявили новый — квазилинейный — тип соотношения между ляпуновскими временами и временами распада. Цель нашей работы состоит в определении характера зависимостей T_L — T_d , обобщенных для всех элементов ляпуновского спектра, из численного моделирования динамики тройных систем. Мы рассматриваем слабо-иерархические тройные системы с компонентами равных масс и вычисляем полные спектры показателей Ляпунова. Начальные условия находятся в окрестности резонанса 2:1. Также мы изучаем распределения времен распада при данной околорезонансной постановке задачи.

Уравнения движения

Уравнения движения имеют вид

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad U = G \left(\frac{m_1 m_2}{r_{12}} + \frac{m_1 m_3}{r_{13}} + \frac{m_2 m_3}{r_{23}} \right),$$

где m_i — массы звезд, \mathbf{r}_i — вектор положения i -го тела, t — время, U — потенциал, r_{ij} — расстояние между телами i и j . Полагаем, что гравитационная постоянная $G = 1$, массы звезд $m_1 = m_2 = m_3 = 1$, первоначальный радиус круговой орбиты внутренней пары относительно своего барицентра равен единице.

Начальные значения координат и скоростей звезд выбраны так, что в начальный момент времени система находится в резонансе 2:1 и тела движутся в плоскости XU (см. рис.1). Резонанс 2:1 означает, что отношение периодов невозмущенных орбит внешней и внутренней пар равно 2:1. Мы рассматриваем орбиты внешнего тела m_3 , ретроградные относительно обращения внутренней пары. Массив начальных данных мы определяем путем вариации начального расстояния между центром масс внутренней двойной систе-

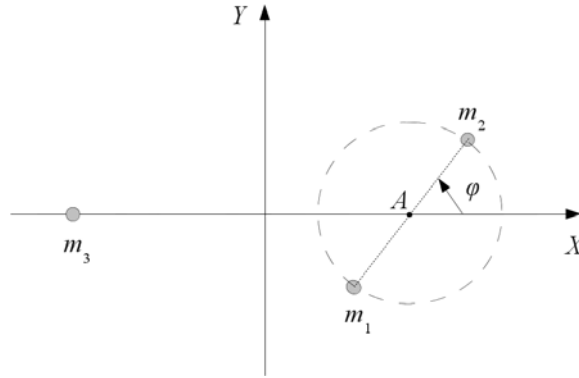


Рис. 1. Начальная конфигурация системы.

мы (точкой A) и третьей звездой m_3 на величину $\Delta x \in [0, 0.5]$ с шагом 10^{-6} . При изменении данного расстояния система покидает состояние точного резонанса и возникает возможность ее распада. В случае точного резонанса 2:1 для невозмущенных кеплеровых орбит внешней и внутренней двойных $\Delta x = 0$.

Ляпуновские спектры и времена распада

Поскольку у рассматриваемой системы число степеней свободы $N = 9$, она имеет 18 ХПЛ, которые в силу гамильтоновости системы распадаются на пары: $L_i = -L_{i+N}$, $i = 1, \dots, N$. Кроме того, поскольку задача плоская, то 6 показателей из 18 равны нулю. Далее мы будем рассматривать только положительные ХПЛ.

Вычисление ХПЛ проводилось при помощи HQRВ-метода [6], реализованного в виде программного комплекса в работах [7–9]. Для интегрирования уравнений движения использовался интегратор Дормана-Принса DOPRI8 [10], реализующий метод Рунге–Кутты 8-го порядка с автоматически изменяемой величиной шага интегрирования. При интегрировании контролировалось изменение полной энергии системы.

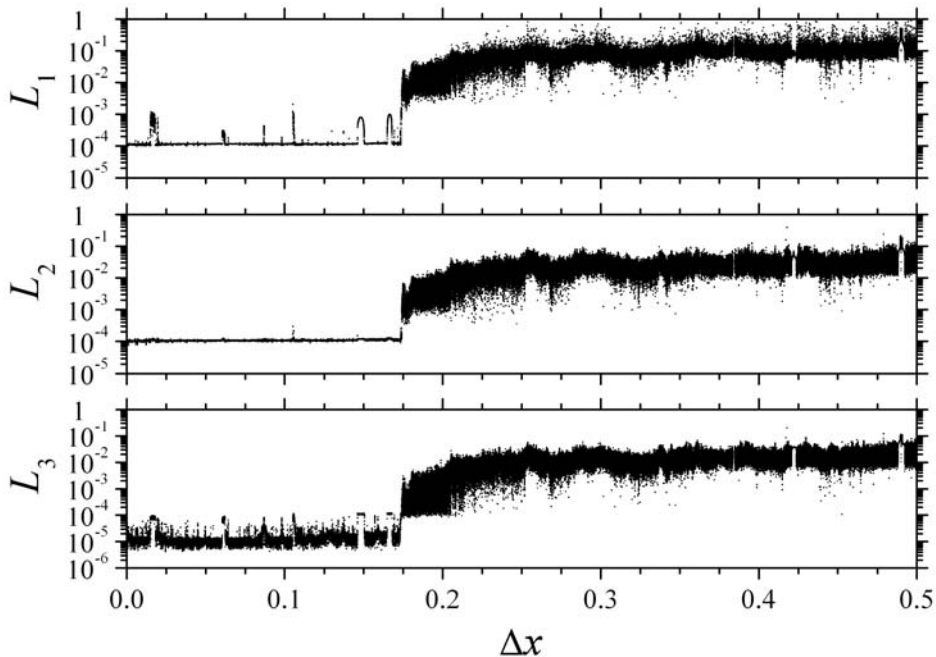


Рис. 2. Показатели Ляпунова (L_i , $i = 1, \dots, 3$; $L_i > L_{i+1}$) в зависимости от начального смещения по оси X от положения точного резонанса 2:1.

На рис. 2 приведены зависимости первых трех положительных ненулевых ХПЛ L_i , ($i = 1, \dots, 3$; $L_i > L_{i+1}$) от Δx , полученные посредством интегрирования уравнений движения на интервале времени $t = 10^5$ единиц (первоначальный период внутренней двойной в этих единицах равен $2\pi/\sqrt{2} \approx 4.44$). Зависимости для оставшихся трех положительных ХПЛ выглядят схожим образом. Из рис. 2 видно, что для Δx от 0 до ≈ 0.18 движение является устойчивым (все ХПЛ равны нулю). При $\Delta x > 0.18$ движение неустойчиво: все L_i ($i = 1, \dots, 6$) отличны от нуля. В зависимостях L_i от Δx наблюдается присутствие узких (по Δx) зон («люков») с относительно большими значениями L_i ; положения этих зон по Δx для разных i одни и те же. Очевидно, что сильная стохастичность движений (большие значения L_i) в этих люках приводит систему к быстрому распаду.

Далее мы будем подробно рассматривать динамику системы только вблизи резонанса — при $\Delta x \in [0, 0.2]$. На рис. 3 представлено нормированное дифференциальное распределение времен распада системы для $\Delta x \in [0, 0.2]$ на интервале $T_d \in [10^4, 10^5]$. Наилучшее приближение распределения для $T_d \in [5 \times 10^4, 10^5]$ степенной функцией AT_d^β (где A — нормирующий множитель) имеет показатель степени $\beta = -(1.966 \pm 0.075)$; $R^2 = 0.939$ — коэффициент корреляции между распределением и аппроксимирующей функцией.

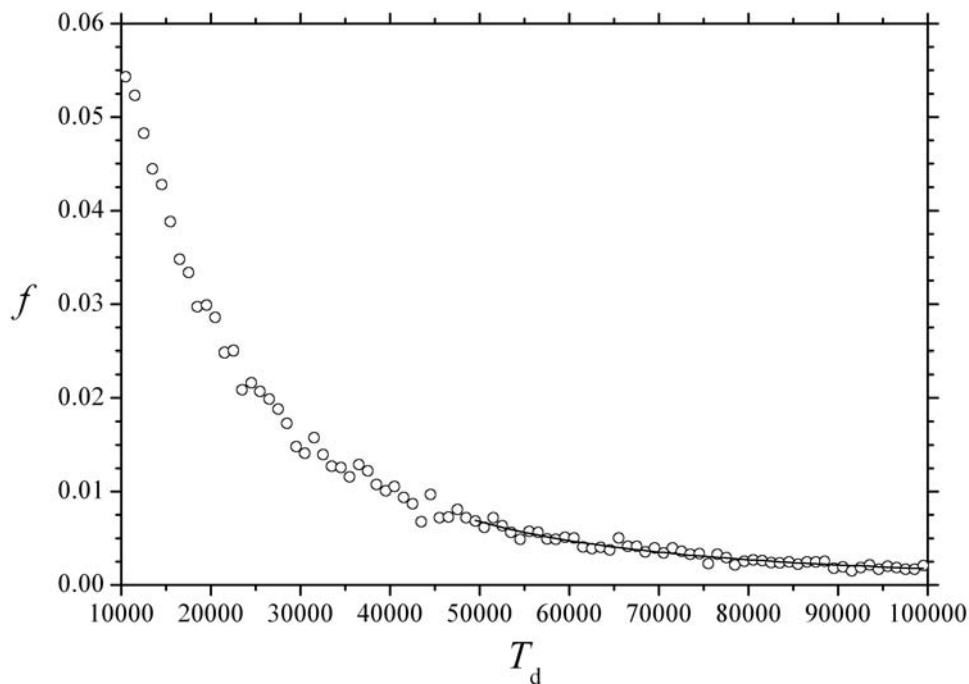


Рис. 3. Дифференциальное распределение времени распада (кружки) на интервале $T_d \in [10^4, 10^5]$ для $\Delta x \in [0, 0.2]$. Сплошная кривая — степенная аппроксимация наблюдаемого распределения.

Полученная величина показателя степени ($\beta \approx 2$) у функции, аппроксимирующей распределение времен распада, свидетельствует о том, что вблизи резонанса преобладающей является гамильтонова перемежаемость 2-го типа [11, 12], то есть эффект прилипания траекторий к границе области хаоса. Этот вывод выглядит естественным и соответствующим современным теоретическим представлениям.

Зависимости «ляпуновское время — время распада»

На рис. 4 представлены зависимости «ляпуновское время T_{Li} — время распада T_d » систем, где формально определено $T_{Li} = 1/L_i$. Здесь представлены зависимости только для $i = 1, 2, 3$. Для $i = 4, 5, 6$ зависимости имеют схожий вид. Отметим изменение угла наклона у зависимостей: для $(i+1)$ ХПЛ он меньше чем для i -ого. Далее рассмотрим подробно зависимость для максимального ХПЛ, которому соответствует T_{L1} .

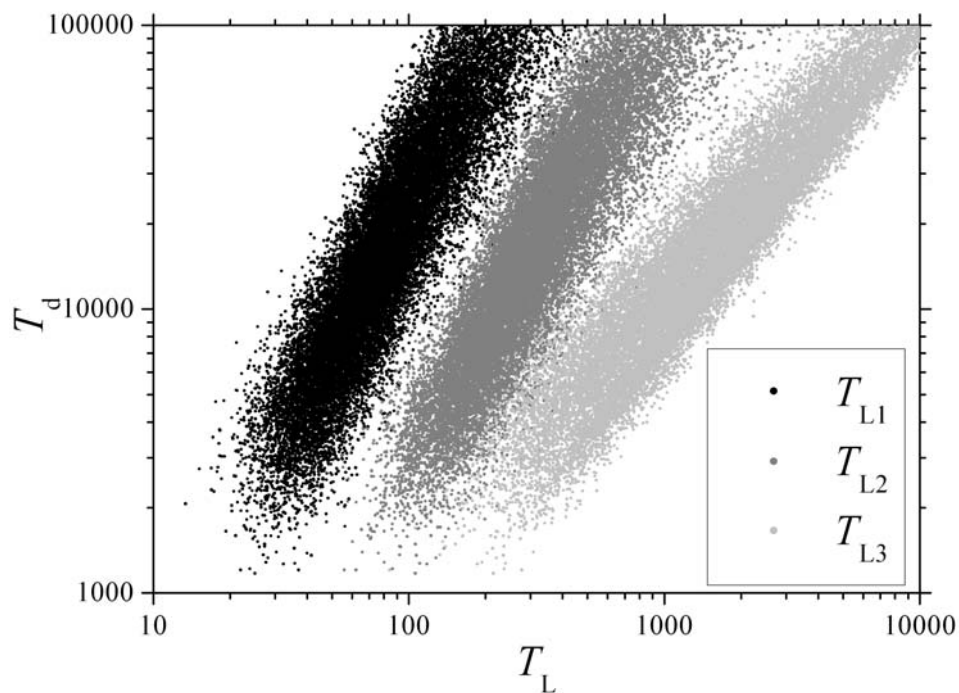


Рис. 4. Зависимости « T_{Li} — T_d » ($i = 1, 2, 3$) для $\Delta x \in [0, 0.2]$.

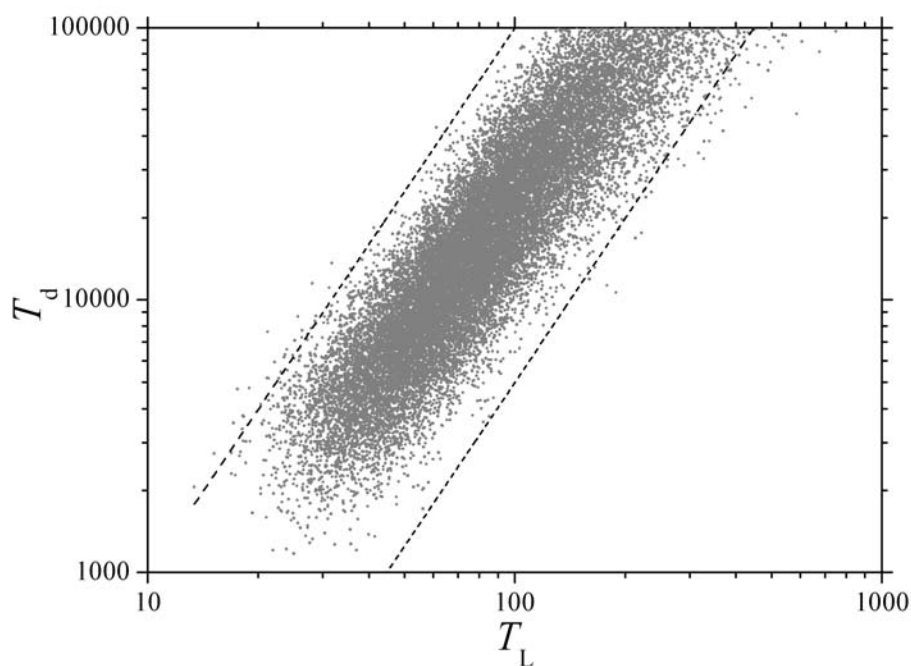


Рис. 5. Зависимость « T_{L1} — T_d » при $\Delta x \in [0, 0.2]$. Штриховыми линиями нанесены квадратичные функции.

На рис. 5 представлена зависимость « $T_{L1} — T_d$ » при $\Delta x \in [0, 0.2]$, то есть для начальных данных вблизи резонанса 2:1. Для ориентации на рис. 5 нанесены штриховые прямые с наклоном, соответствующим квадратичному закону $T_d \propto T_{L1}^2$. Наблюдаемая зависимость примерно следует наклону нанесенных прямых. Таким образом, вблизи резонанса зависимость « $T_{L1} — T_d$ » имеет квадратичный характер, соответствующий гамильтоновой перемежаемости 2-го типа [11,12].

Выводы

Итак, в настоящей работе рассмотрена динамика слабо-иерархических тройных звезд равных масс в окрестности резонанса 2:1. Для начальных условий вблизи резонанса путем численного интегрирования орбит найдены полные спектры показателей Ляпунова и построены зависимости «ляпуновское время — время распада» системы. Также проведен анализ распределения времен распада тройной системы для начальных условий вблизи резонанса. Показано, что вблизи резонанса проявляется эффект прилипания траекторий к регулярной компоненте фазового пространства (гамильтонова перемежаемость 2-го типа).

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 09-02-00267-а и № 12-02-00185-а), программой Президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» и программой поддержки ведущих научных школ (проект НШ-3290.2010.2).

Литература

1. *M. Soper, F. Franklin, M. Lecar, Icarus* **87**, 265 (1990).
2. *M. Lecar, F. Franklin, M. Murison, Astron. J.* **104**, 1230 (1992).
3. *M. Murison, M. Lecar, F. Franklin, Astron. J.* **108**, 2323 (1994).
4. *S. Mikkola, K. Tanikawa, MNRAS* **379**, 1, L21 (2007).
5. *D.J. Urminsky, D.C. Hoggie, MNRAS* **392**, 3, 1051 (2009).
6. *H.F. von Bremen, F.E. Udvardi, W. Proskurowski, Physica D* **101**, 1 (1997).
7. *I.I. Shevchenko, V.V. Kouprianov, Astron. Astrophys.* **394**, 663 (2002).
8. *V.V. Kouprianov, I.I. Shevchenko, Astron. Astrophys.* **410**, 749 (2003).
9. *V.V. Kouprianov, I.I. Shevchenko, Icarus* **176**, 224 (2005).
10. *E. Hairer, S.P. Nørsett, G. Wanner, Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems*, (Springer-Verlag, Berlin, 1987).
11. *I.I. Shevchenko, Phys. Lett. A* **241**, 53 (1998).
12. *I.I. Shevchenko, Phys. Rev. E* **81**, 6, 066216 (2010).

DYNAMICS OF THE TRIPLE STAR SYSTEMS IN THE VICINITY OF 2:1 RESONANCE

Melnikov A.V.¹, Orlov V.V.^{1,2}, Shevchenko I.I.¹

¹*Pulkovo observatory of RAS,*

²*Saint-Petersburg State University*

We consider the dynamics of weakly-hierarchical triple stars of equal mass. By numerical integration of the orbits, we found full spectra of Lyapunov exponents for different initial configurations of the system in the plane problem with initial conditions in the vicinity of the resonance 2:1 (initial ratio of the orbital periods of outer and inner binaries is close to 2:1). For initial conditions close to the resonance, we plot the “Lyapunov time — escape time” dependences. It is shown that the nature of these relationships can be explained by sticking of trajectories to regular component of the phase space.

МАССОВЫЙ ПОИСК ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В ИЗБРАННЫХ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Муминов М.М., Каххаров Б.Б.

Астрономический институт АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Представлены результаты многолетних мониторинговых ПЗС-наблюдений в R полосе и глубокой UBVR I ПЗС-фотометрия для центральных областей рассеянных звездных скоплений NGC 6633 и IC 4756. Исследованы 5361 звезд в обоих исследованных скоплениях. Выявлено 105 новых переменных звезд в направлении на скопление IC 4756 и 106 переменных в направлении на скопление NGC 6633, проведена их первичная классификация, определены их периоды и вероятности членства к скоплениям. На основе анализа полученных фотометрических данных и построения сводной диаграммы цвет-светимость для обоих скоплений выявлено 28 переменных звезд являющиеся вероятными членами данных скоплений.

1. Введение

Проблема исследования переменных звезд в рассеянных звездных скоплениях (РЗС) до сих пор остается одной из наиболее интригующих и малоизученных проблем современной астрономии. Возможность надежно определять расстояния до РЗС, их возраст, химический состав и другие параметры помогает решать широкий класс задач по изучению структуры и эволюции Галактики. Миссия HIPPARCOS сделала актуальным вопрос о коррекции шкалы галактических расстояний. Проблема состоит в том, что был выявлен реальный систематический сдвиг величиной в 10^{-3} угловую секунду между так называемой классической (наземной) шкалой галактических расстояний и новой космической шкалой. С выявлением этой систематики были поставлены два вопроса: первый, насколько реален и каков в действительности, если реален, этот сдвиг (проблема подтверждения другими независимыми наблюдательными экспериментами) и второй, какова физическая природа этого сдвига (проблема критического пересмотра основ звёздно-астрономической науки). Как видно из вышеизложенного, проблемой первоочередной важности представляется подтверждение наличия систематического сдвига между двумя шкалами расстояний независимым наблюдательным экспериментом. Группой исследователей рассеянных звёздных скоплений из Швейцарии и Узбекистана был предложен наблюдательный проекта по проверке и критическому анализу наличия систематического сдвига. В рамках этого проекта и появилась данная работа, целью которой является комплексное исследование с глубоким пределом двух близких РЗС NGC6633 и IC4756, с целью поиска и исследования переменных звезд в центральных областях этих скоплений.

2. Наблюдения и обработка

Фотометрические наблюдения рассеянных звездных скоплений NGC6633 и IC4756, выполнялись на ПЗС-камере BroCam (SiTe ST-005A), охлаждаемой жидким азотом и установленной на 1.5-метровом телескопе АЗТ-22 Майданакской Высокогорной Обсерватории Астрономического института АН РУз. Наблюдательный комплекс, включающий телескоп АЗТ-22 с дифракционно-ограниченной оптикой и башню с системой принудительной вентиляции был разработан фирмой ЛОМО (Ленинградский Оптико-Механическое объединение) (1.5-метровый телескоп АЗТ-22, 1990) и специально предназначен для проведения наблюдений с высоким угловым разрешением. Сам телескоп АЗТ-22, с диаметром главного зеркала 1.5 метра, имеет оптическую систему Ричи-Кретьена. Сменные вторичные зеркала позволяют реализовать как широкоуголь-

ную систему со светосилой 1:7.7, так и систему создающую изображения с большим масштабом (светосила 1:17). Согласно результатам заводских испытаний, качество оптики АЗТ-22 близко к дифракционно-ограниченному. Остаточная среднеквадратичная погрешность волнового фронта порядка 0.15λ .

Все патрульные наблюдения выполнялись в R-полосе каждую погожую ночь для обоих скоплений в период с июля 2001 по сентябрь 2003 года. В каждом скоплении наблюдались по 4 звёздные площадки общей площадью в 126.7 квадратных угловых минут. Наблюдения велись в двух взаимодополняющих модах: интенсивной и экстенсивной. В экстенсивной моде для каждой площадки было получено по 1-2 экспозиции в ночь с временами накоплений 120 и 20 секунд, что при сопоставлении всех полученных изображений для одной и той же площадки даёт возможность определить долгопериодические изменения. В интенсивной моде велся многочасовой мониторинг одной звёздной площадки в течение нескольких ночей подряд. В этой моде наблюдения велись с более глубоким пределом (с временами накоплений 300 и 30 секунд) с целью выявления кратковременных изменений с периодом от нескольких часов до нескольких дней. Обработка полученных ПЗС-изображений проводилась в стандартном пакете для обработки и анализа изображений IRAF(DAOPHOT). Для численного анализа астрономических временных рядов, был использован пакет программ для построения и анализа кривых блеска PERANSO.

При выполнении многоцветных UBVRi наблюдений скоплений NGC6633 и IC4756 использовалась главным образом дифференциальная фотометрия; абсолютные измерения применялись для привязок вторичных звезд-стандартов и для определения коэффициентов трансформации инструментальной системы в стандартную. ПЗС-камера использовавшаяся при наблюдениях на АЗТ-22, оснащена набором стеклянных фильтров, задающая в сочетании со спектральным распределением квантовой эффективности ПЗС-матрицы инструментальную фотометрическую систему UBVRi, близкую к стандартной широкополосной системе UBVRi Джонсона-Кузинса. Детальные исследования фотометрической системы «BroCam + АЗТ-22» показало, что наивысшая спектральная чувствительность для ПЗС-камеры BroCam достигается в инструментальных полосах V, R, I, самая низкая - в полосе U. Кроме того, инструментальные полосы V и R достаточно хорошо определены и близки к стандартным, а полосы B,U и I имеют существенные отличия от стандартных.

Для построения цветовых уравнений для фотометрической системы «BroCam + АЗТ-22» и учета атмосферной экстинкции одновременно с наблюдением ПЗС NGC6633 и IC4756 проводились наблюдения стандартных звезд полей Ландольта: SA107, PG1633+099, SA109, SA110, SA111, MARK_A и SA113 [166]. Наблюдения проводились в августе 2001 и 2002 годов, заведомо фотометрические ночи. В течение наблюдений каждая из площадок со стандартными звездами регистрировалась в инструментальных полосах UBVRi для значений $M(z)=1.1-1.9$.

3. ПЗС NGC 6633

Рассеянное звездное скопление NGC 6633 (другие названия CR 380, MEL 201), расположена в созвездии Змееносца и рядом своих свойств сходна со скоплениями Гиады и Ясли. Координаты центра скопления на эпоху 2000 года равны:

$$RA = 18 : 27 : 42$$

$$DEC = 06 : 34 : 00$$

Согласно данным WEBDA рассеянное скопление NGC 6633 имеет видимые размеры около 30 угловых минут и расположена в 376 парсеках. Возраст скопления оценивается в 800 млн. лет. Скопление классифицировалось Трюмплером как тип I2pE по внешнему виду и как i-2b-a по спектральному составу. Несмотря на недостаточную ин-

тенсивность в исследовании этого скопления, до сих пор не проводилось исследования с более глубокими экспозициями, с целью исследования слабых звезд. Для мониторинговых и многоцветных наблюдений в центральной части в скоплении NGC 6633 было выделено 4 звёздные площадки общей площадью в 126.7 квадратных угловых минут.

Все многоцветные UBVRi наблюдения проводились в августе 2001 и 2002. Камера установлена в 26-м фокусе телескопа при светосиле 1/17.34. Была проведена абсолютная калибровка фотометрических величин исследованных звезд в скоплении. Всего в центральной области скопления NGC 6633 были получены UBVRi значения для 2908 звезд с 13 по 21 V-величин. На основе полученных наблюдательных данных и их дополнении наблюдательными данными других авторов, построена сводная диаграмма цвет-звездная величина для рассеянного скопления NGC 6633 (Рис. 1).

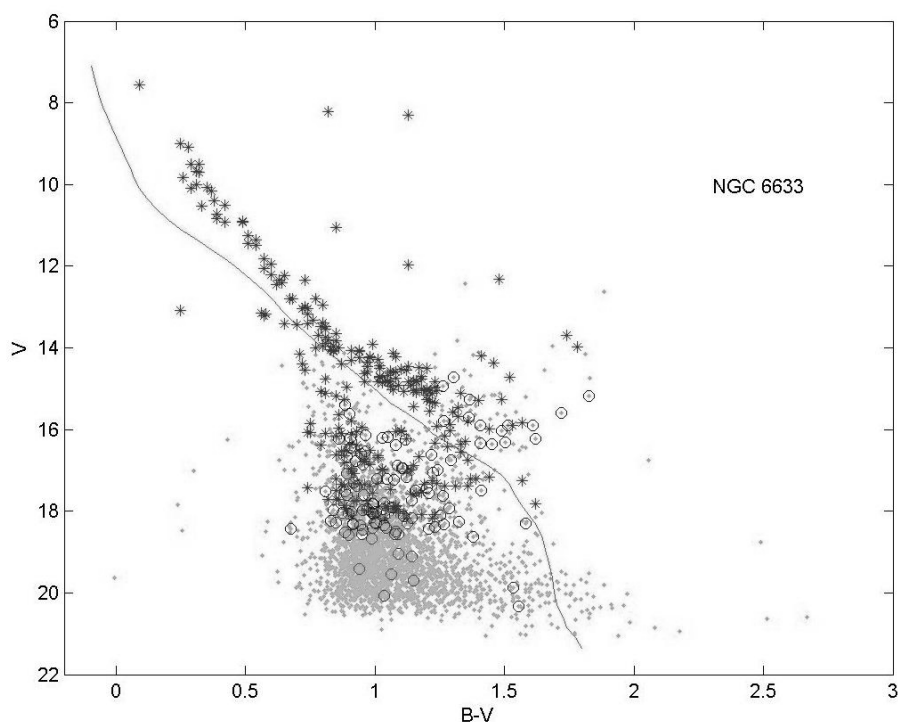


Рис. 1. Диаграмма V, B-V для рассеянного скопления NGC 6633. Звездочками обозначены известные члены скопления, точками звезды, вошедшие в наше исследование, кружочками обнаруженные переменные. Сплошная линия – главная последовательность нулевого возраста.

Составлены таблицы обнаруженных переменных звезд, содержащие данные по 106 переменных и заподозренных в переменности звезд для скопления NGC 6633. В таблицах даны полученные нами значения блеска в V полосе и показатели цвета B-V, U-B, V-R, V-I обнаруженных переменных звезд в скоплении NGC 6633 и соответствующие им ошибки измерений на период получения многоцветных UBVRi наблюдений. Из обнаруженных 106 переменных звезд 14 (а именно: 8a, 456a, 724a, 9b, 720b, 14c, 17c, 146c, 480c, 115d, 152d, 381d, 480d и 555d) являются возможными членами скопления NGC 6633, так как они располагаются на главной последовательности Г-Р диаграммы построенной для этого скопления. В четвертом параграфе приводятся результаты массового поиска переменных звезд. В течение трех наблюдательных сезонов с июля 2001 по сентябрь 2003 года были проведены патрульные наблюдения в фильтре R четырех звездных площадках центральной области рассеянного скопления NGC6633. В результате было получено около 600 тысяч оценок блеска в экстенсивной моде и около 300 тысяч оценок блеска в интенсивной моде для 2908 звезд проецирующихся на дан-

ную область. Для численного анализа временных рядов звезд были использованы методы Lomb-Scargle, Dworetsky, ANOVA и DFT (Diming) реализованные в пакете PERANSO. Выявлено, что 195a, 335a, 631b, 720b, 204c, 587c, 51d, 108d, 275d, 442d являются затменно-переменными, а переменные 48b, 444b, 568b, 54c, 145c, 150c, 263c, 465c, 342d, 442d, 515d, 651d являются мультипериодическими переменными.

4. РЗС IC 4756

Рассеянное звездное скопление IC 4756 расположено в созвездии Змеи. Согласно данным WEBDA скопление принадлежит II 3 r типу по классификации Трюмплера и имеет видимые размеры около 50 угловых минут, расстояние оценивается в 484 парсек. Координаты центра скопления на эпоху 2000 года равны:

$$RA = 18 : 38 : 54$$

$$DEC = 05 : 26 : 00$$

В скоплении IC 4756 так же были выделены четыре звездные площадки покрывающие центральную область скопления. Все наблюдения проводились параллельно с наблюдениями РЗС NGC 6633 на одной и той же светоприемной аппаратуре, одинаковых астроклиматических условиях и телескопе.

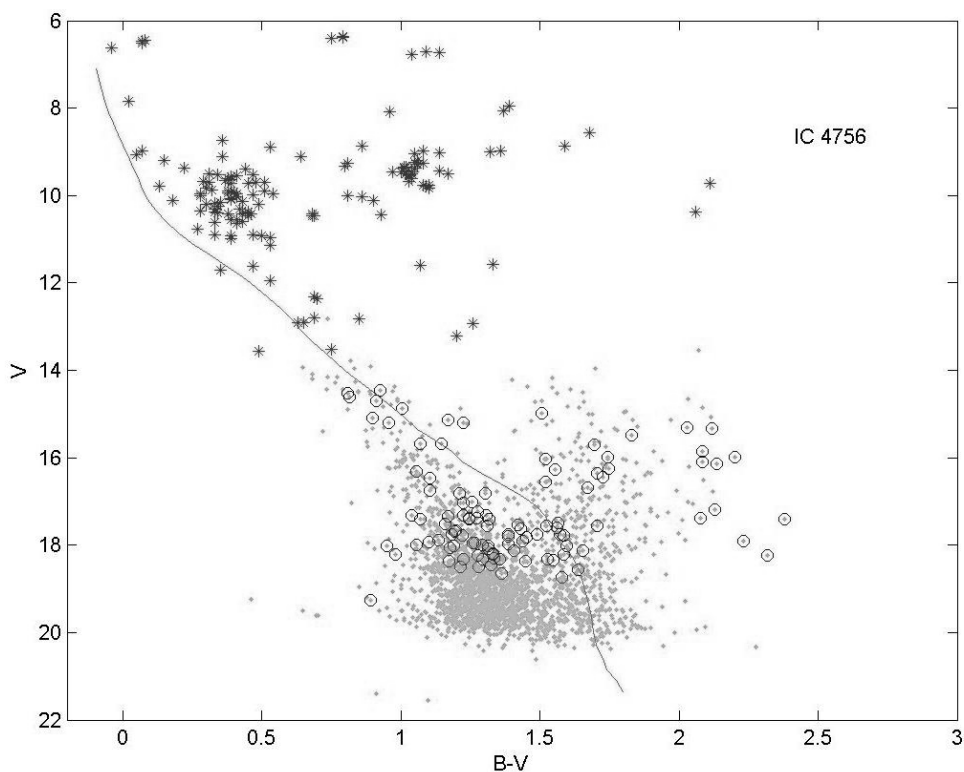


Рис. 2. Диаграмма V, B-V для рассеянного скопления IC 4756. Звездочками обозначены известные члены скопления, точками звезды вошедшие в наше исследование, кружочками обнаруженные переменные. Сплошная линия – главная последовательность нулевого возраста.

Обработка и анализ полученных ПЗС-изображений проводился в пакете IRAF (DAOPHOT). Всего в центральной области скопления IC 4756 были получены UBVRl значения для 2453 звезд с 13 по 21 V-величин. Совместив полученные различными авторами значения V и B-V величин для известных членов скопления с полученными нами наблюдательными данными, была построена сводная диаграмма цвет-звездная величина для рассеянного скопления IC 4756 (Рис. 2). Как видно из диаграммы в данном скоплении ранее наблюдались только яркие звезды и наблюдения более слабых звезд,

проецирующихся на центральную область, проводились впервые. Выявлено и заподозрено в переменности 105 звезд. Из обнаруженных переменных 14 (а именно: 599a, 251b, 555b, 536b, 658b, 85c, 107c, 159c, 308c, 388c, 428c, 432c, 527d и 562d) располагаются на главной последовательности Г-Р диаграммы построенной для этого скопления и являются возможными членами рассеянного звездного скопления IC 4756. Для более точного анализа принадлежности данных переменных звезд скоплению IC 4756 необходимо провести дополнительные астрометрические исследования.

При численном анализе временных рядов переменных звезд скопления IC 4756 было также использованы возможности пакета программ для построения кривых блеска PERANSO. Результаты поиска периодов для 105 выявленных переменных звезд приведены в сводной таблице, содержащей названия звезд в нашей идентификации, значения звездных величин в R-полосе, в которой и проводились мониторинговые наблюдения. Далее таблица разделена на две части соответствующие экстенсивным и интенсивным наблюдательным модам. Каждая часть разделена на четыре колонки, в которых даны период колебаний в сутках, среднеквадратичная ошибка определения периода, амплитуда колебаний и ошибки определения амплитуды. Звезды 241a, 251a, 260a, 539a, 251b, 289b, 678b, 706b, 375c, 388c, 131d, 178d, 470d затменно-переменные системы, а звезды 53a, 175a, 266a, 364a, 424a, 712a, 270b, 289b, 616b, 678b, 159c, 375c, 388c, 30d, 296d мультипериодические переменные.

5. Заключение

В результате выполнения данной работы получено более 3500 ПЗС изображений 8 звездных площадок в центральных областях РЗС NGC6633 и IC4756 в R-полосе и более 500 многоцветных UBVR I ПЗС изображений исследуемых звездных и стандартных полей Ландольта. Получено более 1,5 млн. индивидуальных измерений звездных величин для всех исследованных звезд и проведена абсолютная калибровка фотометрических величин для 5361 звезд найденных в обоих скоплениях. Проведен анализ мониторинговых наблюдений для 2453 звезд в скоплении IC 4756 и для 2908 звезд в скоплении NGC6633. Выявлено 211 переменных и заподозренных в переменности звезд. Определены периоды найденных переменных, проведена первичная классификация и составлен каталог переменных звезд проецирующихся на центральные области скоплений NGC 6633 и IC 4756. Построены диаграммы цвет-цвет и цвет-звездная величина для обоих скоплений по полученным многоцветным наблюдениям и выделены обнаруженные переменные звезды. На основе анализа полученных фотометрических данных и построения сводной диаграммы цвет-светимость для обоих скоплений выявлено 28 переменных звезд являющиеся вероятными членами данных скоплений. Полученные наблюдения, их обработка и кривые блеска свидетельствуют о том, что задача массового поиска переменных звезд в рассеянных звездных скоплениях в его предложенной реализации вполне жизнеспособен и выполним, а также даёт объективные и анализируемые результаты.

Литература

1. Муминов М., Ибрагимов М., Каххаров Б., Мермильо Ж.-К. «Затменно-переменные звёзды в рассеянных звёздных скоплениях и коррекция галактической шкалы расстояний» в сб. «Международное сотрудничество в области астрономии: состояние и перспективы», Москва: АстрО, 2002, 44.
2. Каххаров Б.Б. «Затменно-переменные звёзды в рассеянных звёздных скоплениях и коррекция галактической шкалы расстояний» в сб. «Материалы республиканской научной конференции молодых учёных». Ташкент, 2003.

3. *Muminov M.M., Ibrahimov M.A., Kahharov B.B., Mermilliod J.-C.* “Eclipsing binaries in open clusters and correction of a distance scale in Galaxy”, *Astron. and Astrophys. Trans (AAPT)*, 2002, 22, 1-5.
4. *Каххаров Б.Б.* «К проблеме коррекции галактической шкалы расстояний» труды конференции «Улугбекские чтения» Ташкент, 2004.
5. *Каххаров Б.Б.* «Переменные звёзды и затменно-переменные системы в рассеянных звёздных скоплениях NGC 6633 и IC 4756» труды конференции «Современные проблемы астрономии в Узбекистане» Ташкент, 2004.
6. *Гусев А.С.* Качество изображений и атмосферная экстинкция на Майданакской обсерватории по наблюдениям на 1,5 метровом телескопе АЗТ-22 // Москва, МГУ, 2005.
7. *Landolt A.U.* UBVRI photometric standard stars around the celestial equator // *Astron. J.* - 1983. - Vol. 88, No3. - P. 439-460
8. *Stetson P.B.* DAOPHOT - A computer program for crowded-field stellar photometry // *P.A.S.P.* - 1987. - Vol. 99. - P. 191- 222.
9. *Мермилюо (Mermilliod J.-C.)* The database for stars in open clusters // *Bull. Inform. I CDS* 1992, 30, 110-120 (A progress report on the introduction of new data).

MASS SEARCHING OF VARIABLE STARS IN SELECTED OPEN STAR CLUSTERS

Muminov M.M., Kahharov B.B.

Astronomical institute of UzAS, Tashkent, Uzbekistan

Presented results of long-term monitoring CCD-observations research in R-band and deep UBVRI CCD-photometry for central region open star clusters (OSC) NGC 6633 and IC 4756. Researched 5361 stars in both star clusters. Detected 105 new variable stars in the direction of OSC IC 4756 and 106 variable stars in the direction of OSC NGC 6633, determined their periods and membership probability. On the base obtained photometric data exposed 28 variables of probability members of this OSC.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ ИЗБЕГАНИЯ В СИСТЕМЕ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИКИ

Никифоров И.И., Агладзе Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается проблема реальности существования в системе шаровых скоплений (ШС) конуса избегания (КИ) вдоль оси вращения Галактики. По данным новой версии (2010 г.) каталога Harris [7] проведен анализ пустот в распределении ШС. Полученные результаты свидетельствуют в пользу наличия в системе ШС Галактики осевой зоны избегания, близкой по форме к двойному конусу. Показано, что оценка по КИ расстояния до центра Галактики в работе Sasaki, Ishizawa [4] ($R_0 = 9.2 \pm 1.3$ кпк) является некорректной из-за присутствия внеосевых КИ, обусловленных дискретностью системы ШС. Выполненное нами моделирование приводит к оценке угла полураствора КИ $\alpha = 14.^\circ 4_{-2.09}^{+1.2}$ и оценке расстояния до вершины конуса $R_0 = 7.3 \pm 0.1_{stat-0.3/sys}^{+0.6}$ кпк (систематическая неопределенность учитывает возможную селекцию в системе ШС).

1. Введение

Явление дефицита шаровых скоплений (ШС) в двойном конусе избегания (КИ), ось которого ортогональна плоскости Галактики (ПГ), а вершина находится в ее центре, было замечено в середине 60-х годов (см., например, [1]). Позднее появились работы, позволяющие динамически обосновать существование КИ [2–4]. Так, Sasaki, Ishizawa (1978) [4] показали, что неустойчивость орбит с малым угловым моментом и приливное разрушение ШС в результате прохождения вблизи ядра Галактики могут в совокупности обеспечить существование КИ в системе ШС за время порядка 10 млрд. лет. В той же работе КИ в смысле *полного* отсутствия в нем ШС был впервые использован для оценки расстояния от Солнца до центра Галактики (R_0). В результате авторы [4] вывели оценку $R_0 = 9.2 \pm 1.3$ кпк и оценку угла полураствора КИ $\alpha_0 = 14.^\circ 3 \pm 2.^\circ 8$. Более поздних работ о КИ найти не удалось. Но и опровержения факта его существования в литературе отсутствуют. При этом в обзорах по проблеме R_0 продолжались ссылки на результат [4] (см., например, [5, 6]).

В настоящей работе мы показываем несостоятельность процедуры [4], проверяем факт существования осевого КИ и оцениваем его параметры посредством моделирования распределения галактоцентрических широт ШС.

2. Данные о шаровых скоплениях

Работа основана на новой версии (2010 г.) каталога Harris [7], содержащей данные о 157 ШС. В этой версии принята шкала расстояний

$$M_v(\text{HB}) = 0.16 [\text{Fe}/\text{H}] + 0.84, \quad (1)$$

где $[\text{Fe}/\text{H}]$ – металличность ШС. При рассмотрении отдельных подсистем ШС (гало и диска) мы принимали границу между ними на значении $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.9$ dex [8].

3. Формальные конусы избегания в системе шаровых скоплений

Построим для пробного значения $R_0 = 7.9$ кпк распределение ШС на плоскости RZ (рис. 1), где Z – расстояние от ШС до ПГ, R – расстояние от ШС до оси вращения Галактики (галактоосевое расстояние). Величины Z и R вычислялись по формулам

$$Z = r \sin b, \quad R = \sqrt{R_0^2 + r^2 \cos^2 b - 2 R_0 r \cos l \cos b}. \quad (2)$$

Здесь r – гелиоцентрическое расстояние, l и b – галактические долгота и широта. На рис. 1 ШС действительно дефицитны в конусе с $\alpha_0 \approx 15^\circ$. Однако из-за дискретности системы ШС такой КИ получается не при единственном значении R_0 . Это показывает зависимость $\varphi_0(R_0)$, где $\varphi_0 = \pi/2 - \alpha_0$ – наибольший из модулей галактоцентрической широты $\varphi = \arctan(Z/R)$ скоплений (см. рис. 2). Видно, что функция $\varphi_0(R_0)$ имеет несколько сопоставимых по глубине минимумов. Очевидно, что только один из них может отвечать осевому КИ, а остальные появляются при R_0 отличных от истинного из-за дискретности распределения ШС.

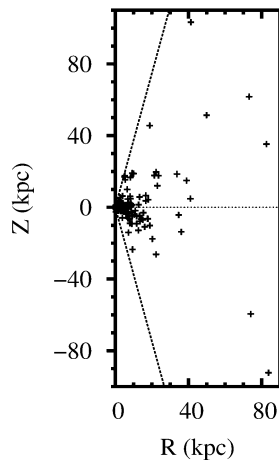


Рис. 1.

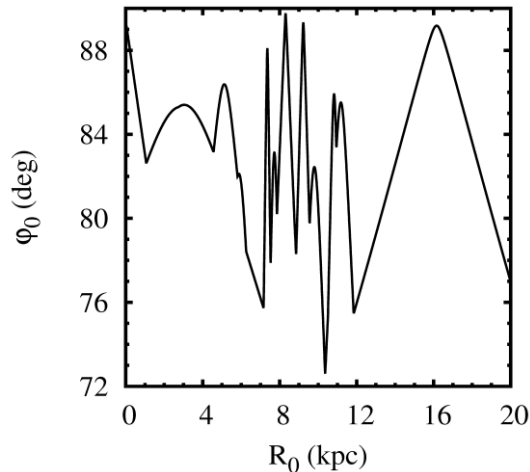


Рис. 2.

Sasaki, Ishizawa [4] выбирали то значение R_0 , которое соответствует наименьшему минимуму. Но определить, какой минимум – истинный, на этом этапе мы не можем. Авторы [4] также понимали, что результат, полученный таким способом ненадежен, но сочли главным источником ошибок неопределенность r . Поэтому они варьировали расстояния до ШС. Для каждого квазислучайного каталога определялось минимальное значение φ_0 , а соответствующие каждому такому минимуму α_0 и R_0 усредняли по этим каталогам. Но при варьировании r глубина минимумов менялась и наибольшим становился то один, то другой. Усреднение соответствующих им R_0 по всем случайным каталогам фактически близко к усреднению значений R_0 , при которых на зависимостях $\varphi_0(R_0)$ получаются наиболее глубокие минимумы. Поэтому абсолютный минимум зависимости $\varphi_0(R_0)$ в общем случае дает неверный результат.

4. Картирование осевой зоны избегания

Чтобы изучить зоны избегания в системе ШС, разобьем все пространство на слои, границы которых параллельны ПГ. Разбиение начнем с ПГ, а границы подберем таким образом, чтобы число входящих в каждый слой ШС было не менее 10. Мы получили 13 подвыборок ШС. Следуя логике [4], будем искать в каждом слое наибольшие зоны избегания. Для каждого Z -слоя была построена зависимость $\rho(X)$, где ρ – расстояние от пробной точки на оси X (от Солнца на центр Галактики) до ближайшего ШС, и найдены ее максимумы $\rho_c(X)$. Таким образом мы получили максимальные радиусы и X -координаты осей (X_c) цилиндрических областей избегания [цилиндрических войдов

(ЦВ)] для каждого Z -слоя. Чтобы представить картину в целом, проведем разрез построенной системы ЦВ плоскостью XZ . Ребра пересечений ЦВ будем изображать длинными штрихами, короткими штрихами – границы неизолированных ЦВ, попавшие внутрь объединяющего их войда, сплошными линиями – внешние границы войдов. На рис.3 (левая панель) приведена зависимость $\rho(X)$ для одного из Z -слоев ($-9.1 < z < -4.7$ кпк, 12 ШС). На нижней правой панели изображена проекция ЦВ на плоскость XU (ПГ), а на правой верхней – разрез слоя плоскостью XZ . Открытыми кружками изображены ШС, определяющие ЦВ, закрытыми – остальные ШС.

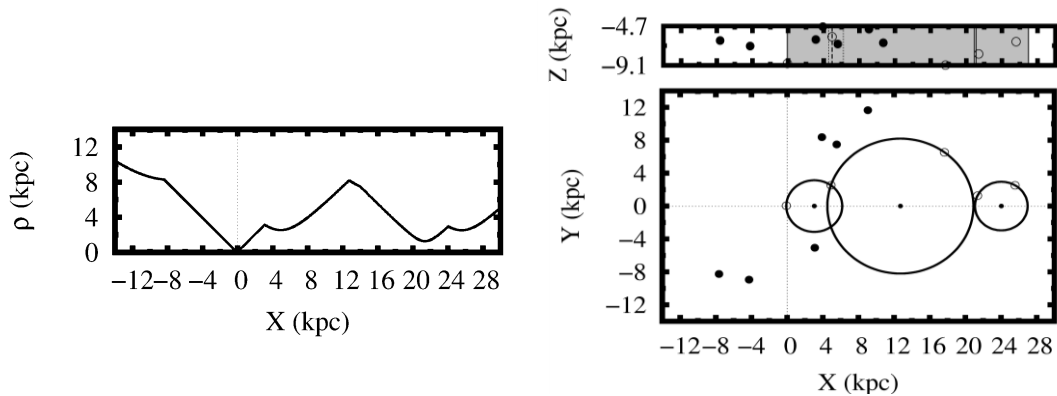


Рис. 3.

Таким образом была построена общая схема ЦВ. Ясно, однако, что часть ЦВ из-за дискретности распределения ШС не принадлежит искомой *осевой* структуре. Поэтому из всей совокупности войдов надо выделить *осевые войды*, то есть те, которые образуют упорядоченную, связанную структуру, посмотрев сквозь которую «снизу» (с юга), или «сверху» (с севера), мы сможем «увидеть» ПГ, нигде не наткнувшись на «преграду» (область Z -слоя, где нет войда). Мы нашли несколько кандидатов в такие осевые структуры для северной и южной частей системы ШС по отдельности.

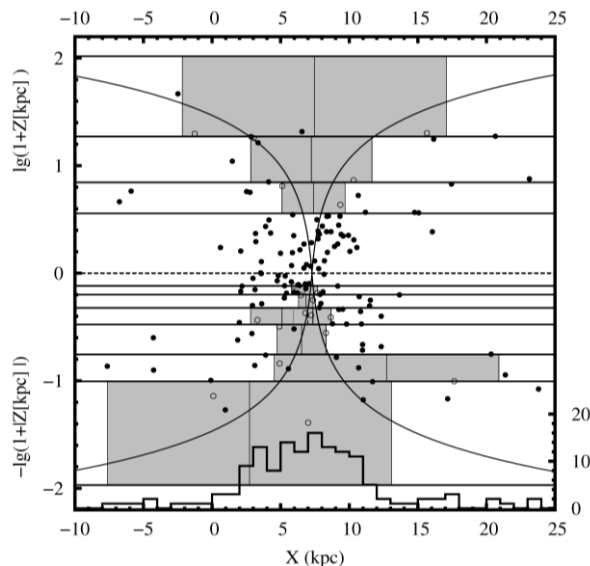


Рис. 4.

Отберем только те ЦВ, которые являются *общими* для всех северных или всех южных кандидатов. Только для этих ЦВ мы можем определенно утверждать, что они образуют *осевую* структуру. Полученная так зона избегания системы ШС показана на рис. 4. Она имеет форму близкую к двойной конической поверхности, контур которой

приведен на рис. 4 для итогового результата ($\alpha_0 = 14.^\circ 4$, $R_0 = 7.28$ кпк). Очевидных систематических отклонений от этой формы мы не видим, лишь в южной части граница имеет повышенную дисперсию относительно конической модели. Также нет признаков какого-либо серьезного наклона оси этой зоны к ПГ, в противном случае мы бы получили сильно асимметричную картину границ.

При наложении на контур осевой зоны избегания гистограммы распределения ШС по оси X видно, что положение осей как северной, так и южной частей этой зоны близко к точке максимума плотности, который достигается при 7–8 кпк. В зонах с малыми $|Z|$ осевая структура однозначно не выделяется, но это хорошо согласуется с результатами работы [4], в которой показано, что КИ «вычищается» от ШС в первую очередь в периферийных областях, а вблизи центра Галактики ШС сохраняются в пределах фигуры конуса даже на временах порядка 20 млрд. лет.

Полученные параметры осевых войдов были обработаны двумя способами: как ряд равноточных измерений (табл.1) и как ряд неравноточных измерений с весами P , обратно пропорциональными радиусам войдов (табл. 2).

Таблица 1.

Выборка	N_v	$\bar{X}_c \pm \sigma_{\bar{X}_c}$, кпк	σ_{X_c} , кпк	$\bar{\varphi} \pm \sigma_{\bar{\varphi}}$, град.	σ_{φ} , град	φ_0 , град.
Все	10	7.00 ± 0.78	2.48	59.3 ± 4.17	13.20	76.2
$b < 0^\circ$	7	5.88 ± 1.20	3.18	48.3 ± 5.91	15.64	68.0
$b > 0^\circ$	3	7.12 ± 0.20	0.34	69.7 ± 3.52	6.10	75.8

Таблица 2.

Выборка	N_v	$\bar{X}_c \pm \sigma_{\bar{X}_c}$, кпк	$(\sigma_0)_{X_c}$	$\sigma^*_{X_c}$, кпк	$\bar{\varphi} \pm \sigma_{\bar{\varphi}}$, град.	σ_{φ} , град	φ_0 , град.
Все	10	6.84 ± 0.39	0.92	1.16	57.8 ± 4.54	14.34	76.7
$b < 0^\circ$	7	6.76 ± 0.56	1.11	1.39	51.1 ± 5.07	13.41	68.2
$b > 0^\circ$	3	6.97 ± 0.21	0.27	0.29	70.4 ± 3.57	6.18	76.3

Обозначения в табл. 1 и 2: \bar{X}_c – среднее значение X_c ; σ_{X_c} – стандарт отклонения от \bar{X}_c ; $(\sigma_0)_{X_c}$ – средняя ошибка единицы веса; $\sigma^*_{X_c}$ – взвешенный стандарт отклонения от \bar{X}_c ; $\bar{\varphi}$ – среднее значение $|\varphi|$ для N_{vgc} войдообразующих ШС; σ_{φ} – стандарт отклонения $|\varphi|$ от $\bar{\varphi}$; $\varphi_0 = \max|\varphi_i|$, $i = 1, \dots, N_{vgc}$; N_v – объем выборки войдов.

Табл. 1 и 2 показывают, что значения \bar{X}_c (~7 кпк) совпадают в пределах ошибок для всех выборок. Значения $\bar{\varphi}$ (с учетом ошибок) и φ_0 также получаются сходными.

5. Моделирование распределения галактоцентрических широт

Была рассмотрена двухкомпонентная модель функции распределения φ , учитывающая возможность наличия центральных ШС в формальном КИ:

$$f(\varphi; \varphi_0, C, R_0) = f_b(\varphi; C, R_0) + f_c(\varphi; \varphi_0, C, R_0), \quad (3)$$

$$f_c(\varphi; \varphi_0, C, R_0) = \begin{cases} \frac{C \cos \varphi}{2 \sin \varphi_0}, & |\varphi| \leq \varphi_0 \\ 0, & |\varphi| > \varphi_0, \end{cases} \quad f_b(\varphi; C, R_0) = \frac{(1-C) \cos \varphi}{2}, \quad (4)$$

где f_b – составляющая балджа, не имеющая КИ; f_c – составляющая, имеющая КИ; C – доля ШС, приходящаяся на составляющую f_c ($0 \leq C < 1$). Для моделирования рас-

пределения φ были использованы два метода: метод Пирсона (МП) и метод наибольшего правдоподобия (МНП). Доверительные интервалы для оценок R_0 и φ_0 этими методами находились при помощи стандартных уравнений [9, 10]:

$$\chi_k^2(a_m) = \chi_0^2 + k^2, \quad L_k(a_m) = L_0 + \frac{k^2}{2}, \quad m = 1, \dots, M. \quad (5)$$

Так как $C \rightarrow 1$ [см. примеры зависимостей $\chi^2(R_0)$ и $\chi^2(\varphi_0)$ для полной выборки ШС на рис. 5], мы зафиксировали $C = 0.99$. В табл. 3 приведены результаты для МП.

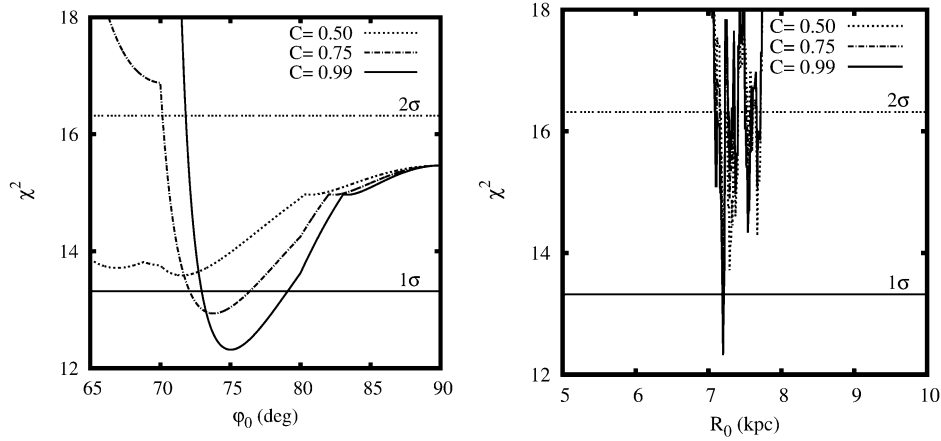


Рис. 5.

Таблица 3.

Выборка	N	Решения для R_0 , кпк		Результаты для φ_0			χ_0^2
		Формальн.	2σ - интер.	φ_0 , град.	k	P_k	
Все	157	7.20 ^{+0.02} _{-0.01}	7.34 ± 0.12	75.0 ^{+4.1} _{-2.1}	$k_+ = 1.77$	92.3%	12.32
$b > 0^\circ$	76	7.31 ^{+0.04} _{-0.03}	7.21 ± 0.19	77.9 ^{+7.3} _{-4.0}	$k_+ = 1.13$	74.1%	1.87
$b < 0^\circ$	81	7.20 ^{+0.02} _{-0.01}	7.41 ± 0.16	71.9 ^{+3.7} _{-1.3}	$k_- = 1.48$ $k_+ = 1.92$	86.1% 94.5%	6.76
[Fe/H] < -0.9	110	7.22 ^{+0.01} _{-0.03}	7.37 ± 0.09	77.9 ^{+4.9} _{-3.4}	$k_- = 1.00$ $k_+ = 0.82$	68.3% 58.8%	10.54
[Fe/H] < -0.9, $b > 0^\circ$	57	7.32 ^{+0.10} _{-0.04}	6.87 ± 0.36	80.0 ^{+10.0} _{-4.6}	$k_+ = 0.95$	65.8%	1.75

Из всей совокупности оценок R_0 и φ_0 мы исключили явно ненадежные. Исключение было проведено по нескольким формальным критериям. В частности, в случае R_0 исключались оценки, для которых целевая функция не достигала уровня 2σ (по этой причине исключены все оценки R_0 МНП, поэтому мы их не приводим). Для каждого варианта вычислений по зависимости целевой функции от φ_0 была найдена доверительная вероятность P_k . Были исключены оценки параметров, имеющие низкое значение $P_k < 80\%$. Оставшиеся оценки выделены в табл. 3 жирным шрифтом. По ним было выполнено усреднение (находилось среднее взвешенное значение с весами обратно пропорциональными квадратам длин доверительных интервалов). Итоговая оценка

$\varphi_0 = 75.^\circ 6_{-1.^\circ 2}^{+2.^\circ 9}$, или $\alpha_0 = 14.^\circ 4_{-2.^\circ 9}^{+1.^\circ 2}$, найдена путем усреднения четырех результатов [два получены МП (см. табл. 3), два – МНП ($77.^\circ 4_{-1.^\circ 7}^{+2.^\circ 5}$, $76.^\circ 8_{-1.^\circ 0}^{+3.^\circ 3}$)]. Итоговая оценка $R_0 = 7.28 \pm 0.10$ кпк является усреднением восьми результатов, полученных МП (табл. 3). Четыре из них являются формальными оценками R_0 , а четыре – 2σ -интервальными. В последнем случае за точечную оценку принималась середина доверительного интервала на уровне 2σ , а за ее неопределенность – четверть длины этого интервала. Статистические ошибки, приведенные для итоговых оценок, являются корнем квадратным из среднего взвешенного значения дисперсий оценок, которые были использованы для нахождения среднего значения.

6. Выводы

1. Картирование зон избегания в системе шаровых скоплений нашей Галактики подтверждает наличие в этой системе *осевого конуса избегания*.
2. Процедура использования КИ для оценивания R_0 , примененная Sasaki, Ishizawa [4], является некорректной из-за игнорирования вторичных внеосевых КИ, обусловленных дискретностью системы ШС.
3. Моделирование распределения галактоцентрических широт ШС с учетом существования осевого КИ дает оценки параметров $\alpha_0 = 14.^\circ 4_{-2.^\circ 9}^{+1.^\circ 2}$, $R_0 = 7.3 \pm 0.1_{/stat-0.3/sys}^{+0.6}$ кпк. Статистически точная оценка R_0 может быть занижена из-за неполной выявленности ШС в области за центром Галактики. Систематическая ошибка учитывает это, как и ошибку калибровки шкалы.

Литература

1. Oort J.H. Stars & Stellar Systems. 1965. V. 484; ссылка приведена по работе [2].
2. Wright A.E., Innanen K.A. Astron. and Astrophys. 1972a. V. 21. P. 151.
3. Wright A.E., Innanen K.A. Bull. Amer. Astron. Soc. 1972b. V. 4. P. 267.
4. Sasaki T., Ishizawa T. Astron. and Astrophys. 1978. V. 69. P. 381.
5. Kerr F. J., Lynden-Bell D. Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1986. V. 278. P. 191.
6. Reid M.J. Annular Rev. Astron. and Astrophys. 1993. V. 31. P. 345.
7. Harris W.E. Astron. J. 1996. V. 112. P. 1487; 2010 edition [arXiv:1012.3224].
8. Nikiforov I.I., Smirnova O.V. Baltic Astronomy. 2012. V. 20, in press.
9. Худсон Д. Статистика для физиков. М: Мир, 1970, 295 с.
10. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Second Edition. Cambridge University Press, 1997. XXVI+994 p.

INVESTIGATION OF THE AXIAL ZONE OF AVOIDANCE IN THE SYSTEM OF GLOBULAR CLUSTERS OF OUR GALAXY

Nikiforov I.I., Agladze E.V.

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

We have examined the existence of a cone of avoidance (COA) along the Galactic rotation axis in the system of globular clusters (GCs) of our Galaxy. The data from the 2010 edition of the Harris catalogue [7] were used to analyse voids in the space distribution of GCs. Our results evidence the presence of an axial zone of avoidance, which is near double cone in shape, in the Galactic GC system. It is shown that an estimate of the distance to the Galactic center $R_0 = 9.2 \pm 1.3$ kpc found by Sasaki, Ishizawa [4] from maximizing the COA is incorrect because of the presence of formal off-axis CsOA caused by the discreteness of GC system. Our modeling results in the following estimates: the opening angle of the COA is $\alpha = 14.^\circ 4_{-2.^\circ 9}^{+1.^\circ 2}$, the distance to the vertex of the COA is $R_0 = 7.3 \pm 0.1_{/stat-0.3/sys}^{+0.6}$ kpc (the systematic uncertainty allows for a probable GC selection effect).

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗАРОВ

Панищев О.Ю.^{1,2}, Дёмин С.А.^{1,2}, Тимашев С.Ф.^{3,4}, Нефедьев Ю.А.^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

²Астрономическая обсерватория им. В.П.Энгельгардта

Казанского федерального университета, г. Казань, Россия

³Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, г. Москва, Россия

⁴Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Троицк, Россия

В работе обсуждается использование фликкер-шумовой спектроскопии для исследования поведения астрофизических объектов на примере анализа динамики радиоизлучения квазаров в разных диапазонах частот. Этот метод позволяет провести параметризацию изучаемой динамики с помощью небольшого набора характеристик. Рассмотренные в работе квазары 0420t014.AED и 2251p158.AED обладают существенно различным характером динамики, степенью проявления в ней эффектов нестационарности и динамической перемежаемости, а также величиной частотно-фазовой синхронизации. Полученные результаты показывают, что применение фликкер-шумовой спектроскопии к исследованию астрофизических объектов позволяет более подробно исследовать их поведение и эволюцию.

1. Введение

Важнейшими факторами, формирующими эволюцию аккрецирующих астрофизических систем являются нелинейность, нестационарность, перемежаемость динамики, а также коллективные эффекты. Этот вывод очевиден, если учесть что динамика аккреционного диска во многом определяется процессами в горячей плазме [1]. Огромное разнообразие аккрецирующих объектов, большое количество эффектов, возникающих в плазме аккреционного диска, требуют использования всех доступных методов анализа для более глубокого понимания особенностей динамики этих систем и процессов протекающих в них.

В настоящей работе используется метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [2] – полуфеноменологический подход к изучению динамики авто- и кросскорреляций временных сигналов. В качестве примера рассматривается изменение во времени спектральной плотности потока радиоизлучения квазаров, фиксируемых одновременно на частотах 2,7 ГГц и 8,1 ГГц [3]. Квазары были открыты в 60-х гг. XX века как источники радиоизлучения с очень малыми угловыми размерами (меньше 10") и затем отождествлены со звездообразными объектами. На сегодняшний день, согласно наиболее распространенным представлениям являются активными ядра далеких галактик, находящихся на стадии формирования, в которых сверхмассивная черная дыра поглощает вещество из газопылевого диска. При движении слоев падающего вещества возникают коллективные эффекты и резонансные явления, которые в конечном итоге отражаются на динамике излучения квазара.

Перспективность применения ФШС для исследования поведения астрофизических объектов обусловлена введением информационных параметров, характеризующих составляющие исследуемых хаотических сигналов в разных диапазонах частот. Для этого сформулированы соответствующие процедуры и алгоритмы извлечения информации, которые реализуются при сопоставлении общих феноменологических выражений для разностных моментов и спектров мощности с соответствующими зависимостями, построенными на основе измеряемых сигналов. В дополнение к этому, двухпараметрические ФШС кросскорреляторы позволяют установить динамическую взаимосвязь сигналов, продуцируемых распределенными системами.

Экспериментальные данные по радиоизлучению квазаров были любезно предоставлены Dr. Noboru Tanizuka, (Laboratory for Complex Systems Analysis, Osaka Prefecture University). Регистрация данных осуществлялась в период с 1979 г. по 1988 г. (всего 3309 дней) [3].

2. Принципы фликкер-шумовой спектроскопии: основные соотношения

Вводимые в ФШС параметры вычисляются, используя базовое для статистической физики понятие автокорреляционной функции:

$$\psi(\tau) = \langle V(t)V(t+\tau) \rangle_{T-\tau}, \quad \langle (\dots) \rangle_{T-\tau} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} (\dots) dt, \quad (1)$$

где τ – параметр временной задержки, полагаем $0 \leq \tau \leq T_M$ ($T_M \leq T/2$). Вводимая процедура усреднения означает, что все характеристики, которые можно будет извлечь при анализе зависимостей $\psi(\tau)$, следует рассматривать как средние по указанному интервалу. Для выявления информации, заключенной в $\psi(\tau)$ (полагаем $\langle V(t) \rangle = 0$), удобнее анализировать некоторые преобразования («проекции») этой функции, а именно, косинус-преобразование $S(f)$ (f – частота):

$$S(f) = 2 \int_0^{T_M} \langle V(t)V(t+t_1) \rangle_{T-\tau} \cos(2\pi f t_1) dt_1 \quad (2)$$

и разностные моменты (переходные «структурные» функции Колмогорова) $\Phi^{(2)}(\tau)$ 2-го порядка:

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t+\tau)]^2 \rangle_{T-\tau}, \quad (3)$$

полагаем $0 \leq \tau \leq \tau_{\max} \leq T/2$. На характер зависимости $V(t)$ не налагается никаких ограничений, кроме существования вводимых средних величин (1).

Необходимость введения в ФШС помимо $\Phi^{(2)}(\tau)$ зависимости $S(f)$ обусловлена особенностью «перемежаемой» эволюционной динамики, когда участки относительно небольших изменений динамической переменной $V(t)$ перемежаются кратковременными резкими и значительными изменениями переменной. Рассчитываемые для такого процесса хаотические составляющие $\Phi_c^{(2)}(\tau)$ зависимости $\Phi^{(2)}(\tau)$ определяются алгебраической суммой разностей произошедших на интервале τ смещений – «нерегулярностей-скачков». В то же время зависимости $S_c(f)$, характеризующие общую «энергетику» хаотического процесса, будут определяться двумя факторами – «нерегулярностями-скачками» и «нерегулярностями-всплесками» [2].

В простейшем случае, когда вводится лишь один характерный масштаб для каждой из последовательности «нерегулярностей-скачков» и «нерегулярностей-всплесков», имеем [2]:

$$\Phi_c^{(2)}(\tau) \approx 2\sigma^2 \cdot [1 - \Gamma^{-1}(H_1) \cdot \Gamma(H_1, \tau/T_1)]^2, \quad \Gamma(s, x) = \int_x^\infty \exp(-t) \cdot t^{s-1} dt, \quad \Gamma(s) = \Gamma(s, 0), \quad (4)$$

где $\Gamma(s)$ и $\Gamma(s, x)$ – соответственно, гамма-функция и неполная гамма-функция ($x \geq 0$ и $s > 0$); σ – среднеквадратичное отклонение измеряемой динамической переменной как мера нерегулярностей-скачков хаотической составляющей сигнала; H_1 – показатель Херста, характеризующий скорость, с которой динамическая переменная теряет «память» о своей величине на временных интервалах, меньших времени T_1 полной потери памяти о значении динамической переменной, полученной при измерении в некоторый момент времени.

Для оценки суммарного хаотического вклада в спектр мощности, определяемого нерегулярностями-скачками и нерегулярностями-всплесками удобно использовать следующее интерполяционное выражение [2]:

$$S_c(f) \approx \frac{S_c(0)}{1 + (2\pi f T_0)^n}, \quad (5)$$

здесь $S_c(0)$, T_0 и n – феноменологические параметры, которые вводятся для описания спектров мощности при обработке экспериментально получаемых временных рядов. В качестве меры хаотической составляющей сигнала, формируемой нерегулярностями-всплесками и нерегулярностями-скачками в области высоких частот, используем параметр $S_c(T_0^{-1})$, определяемый как «фактор остроты».

Учитывая монотонный характер $S_c(f)$, можно разложить, используя (5) и нелинейный метод наименьших квадратов, рассчитанную на основе измеряемых сигналов зависимость $S(f)$ на «высокочастотную» хаотическую составляющую $S_c(f)$ и «резонансный» вклад $S_r(f)$:

$$S(f) = S_c(f) + S_r(f). \quad (6)$$

Определяем «резонансную» составляющую рассматриваемого автокоррелятора $\psi_r(\tau)$ с использованием «неполного» обратного косинус-преобразования от «резонансного» вклада $S_r(f)$, учитывая, как только что было указано, стационарный характер резонансной составляющей сигнала [2]:

$$\psi_r(\tau) \approx 2 \int_{1/T}^{f_{LF}} S_r(f) \cos(2\pi f \tau) df, \quad (7)$$

где интервал интегрирования ($1/T$, f_{LF}) определяет область «резонансных» частот. Основной вклад в (7) формирует указанная выше область частот, $f_{LF} \leq 0.1 \div 0.2 f_d$, и формальное увеличение верхнего предела в (7) до значения $f_{max} = 0.5 f_d$ практически не изменяет зависимости $\psi_r(\tau)$. На основе (7) находим «резонансную» составляющую $\Phi_r^{(2)}(\tau)$:

$$\Phi_r^{(2)}(\tau) = 2[\psi_r(0) - \psi_r(\tau)]. \quad (8)$$

ФШС подход позволяет получать прямую информацию о динамике корреляционных взаимосвязей между одновременно измеряемыми сигналами – динамическими переменными $V_i(t)$ и $V_j(t)$ одной сущности, измеряемыми в пространственно разнесенных точках i и j исследуемой системы, либо сигналами разной природы. Соответствующее выражение для 3D «двухточечных» корреляторов или кросскорреляторов представляется в виде [2]:

$$q_{ij}(\tau, \theta_{ij}) = \left\langle \left[\frac{V_i(t) - V_i(t + \tau)}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \left[\frac{V_j(t + \theta_{ij}) - V_j(t + \theta_{ij} + \tau)}{\sqrt{2}\sigma_j} \right] \right\rangle_{\tau - \tau - |\theta_{ij}|}, \quad (9)$$

$$\sigma_i(\tau) = \left\{ \left\langle [V_i(t) - V_i(t + \tau)]^2 \right\rangle_{\tau - \tau - |\theta_{ij}|} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где τ – «время задержки» (полагаем $\tau > 0$), θ_{ij} – параметр «смещения во времени». Речь идет о зависимостях значений $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ кросскорреляторов от τ и θ_{ij} как временных параметров – «пространственном» (3D) представлении сложной поверхности $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$. Очевидно, что величина и характер двухпараметрических выражений (9) могут зависеть как от выбора интервала T усреднения, так и от выбора интервалов изменения параметров τ и θ_{ij} . Для обеспечения статистической достоверности получаемых зависимостей будем требовать выполнение условия: $\tau_{max} + |\theta_{max}| \leq T/2$.

3. Анализ радиоизлучения квазаров на основе использования ФШС

3.1. Параметризация радиоизлучения квазаров

Рис. 1 демонстрирует результаты ФШС-параметризации сигналов рассматриваемых объектов (для краткости изложения представлены диаграммы только для излучения на частоте 2.1 ГГц), а значения ФШС-параметров представлены в табл. 1. В спек-

тре мощности радиоизлучения квазара 0420m014.AED обнаруживается пик, отражающий некий квазипериодический процесс, доминирующий в изучаемой динамике. В отличие от него, радиоизлучение квазара 2251p158.AED характеризуется отсутствием различных всплесков, что может говорить о проявлении сильных эффектов перемежаемости разных режимов поведения.

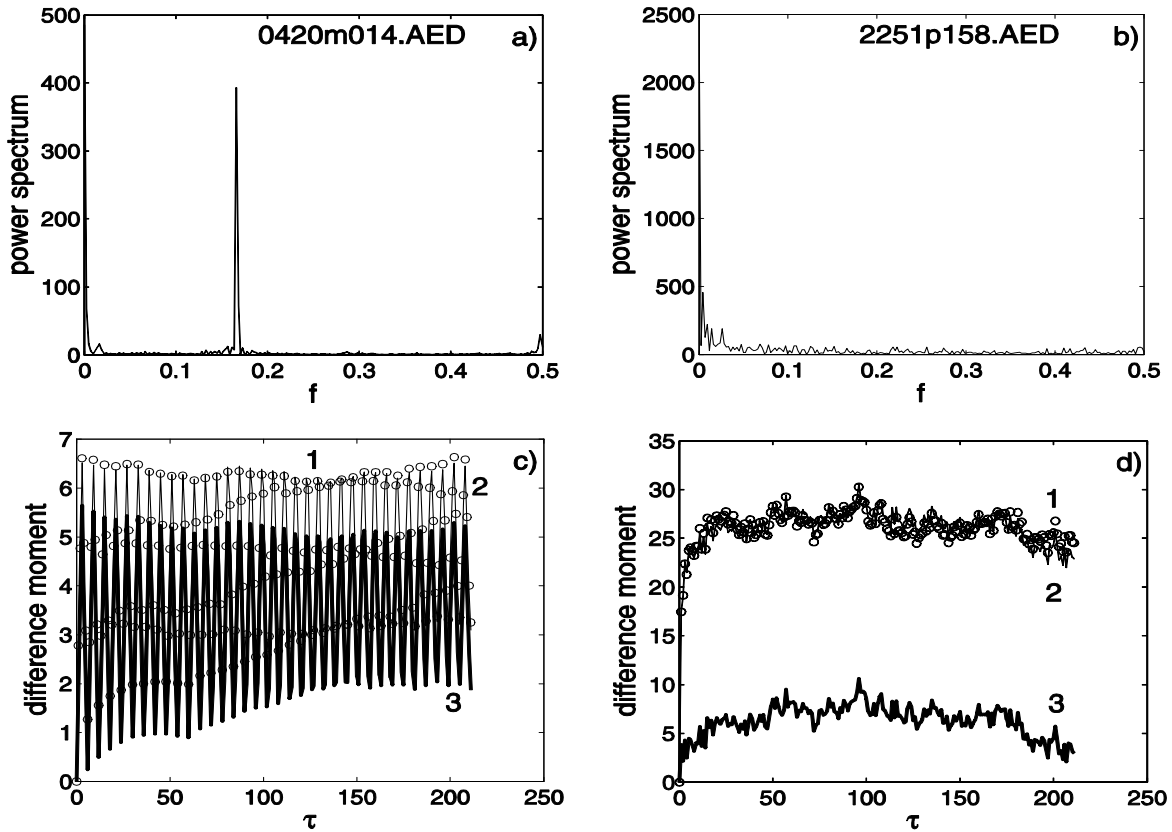


Рис. 1. ФШС-зависимости для радиоизлучения квазаров 0420m014.AED (а, с) и 2251p158.AED (b, d) на частоте 2,7 ГГц: спектр мощности $S(f)$ (а, b) и разностный момент второго порядка $\Phi^{(2)}(\tau)$ (с, d): построенный на основе экспериментальных данных (1, кружки), интерполяционная ФШС-зависимость (2, сплошная линия) и резонансная составляющая $\Phi_r^{(2)}(\tau)$ (3, жирная сплошная линия).

Таблица 1. ФШС-параметры, полученные для радиоизлучения квазаров

ФШС параметры					
Квазар	частота	$\sigma, rel. un.$	H_1	$S_c(T_{01}^{-1}), (rel.un.)^2 \cdot f_d^{-1}$	n
0420m014.AED	2.7 GHz	1.02	0.04	12.14	0.50
	8.1 GHz	1.15	0.03	19.95	0.43
2251p158.AED	2.7 GHz	3.15	0.27	63.19	0.62
	8.1 GHz	2.7	0.3	157.77	0.66

Структурная функция (разностный момент второго порядка) для радиоизлучения квазара 0420m014.AED имеет четкую осциллирующую структуру, которая отражает значительный вклад в общую динамику нерегулярностей-скачков, в то время как вклад данного типа нерегулярностей в динамику квазара 2251p158.AED является гораздо меньшим. Это следует из анализа поведения соответствующего разностного момента второго порядка $\Phi^{(2)}(\tau)$.

Значения ФШС-параметров, представленных в табл. 1, позволяют количественно описать динамику рассматриваемых сигналов. Высокие значения параметра острейности $S_c(T_{01}^{-1})$ указывают на сильную нестационарность и значительную выраженность эффектов перемежаемости в радиоизлучении квазара 2251p158.AED, в отличие от малых значений данного параметра для активности 0420m014.AED.

3.2. Кросскорреляционные взаимосвязи и частотно-фазовая синхронизация радиоизлучения квазаров

На рис. 2 представлены 3D кросскорреляторы (9) для радиоизлучения рассматриваемых квазаров на частоте 2.7 и 8.1 ГГц. Кросскорреляционные зависимости, для динамики сигналов квазара 0420m014.AED демонстрируют четкую осциллирующую структуру, отражающую доминирование в динамике определенной частоты, выявленной при анализе соответствующих зависимостей $S(f)$. Построенные зависимости позволяют изучить частотно-фазовую синхронизацию рассматриваемых сигналов. В соответствии с зависимостью (9), последовательные максимальные значения $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$, фиксируемые на рис. 2 а при $\theta_{ij} > 0$, означают, что сигнал на частоте 2.7 ГГц следует с определенной периодичностью за сигналом на частоте 8.1 ГГц. В то же время, последовательные максимальные значения $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$, фиксируемые при $\theta_{ij} < 0$, означают, что сигнал на частоте 8.1 ГГц с той же самой периодичностью предшествует сигналу на частоте 2.7 ГГц. Таким образом, протекающие на данном квазаре процессы, сопровождающиеся зарегистрированным радиоизлучением, синхронизованы по фазе и по частоте.

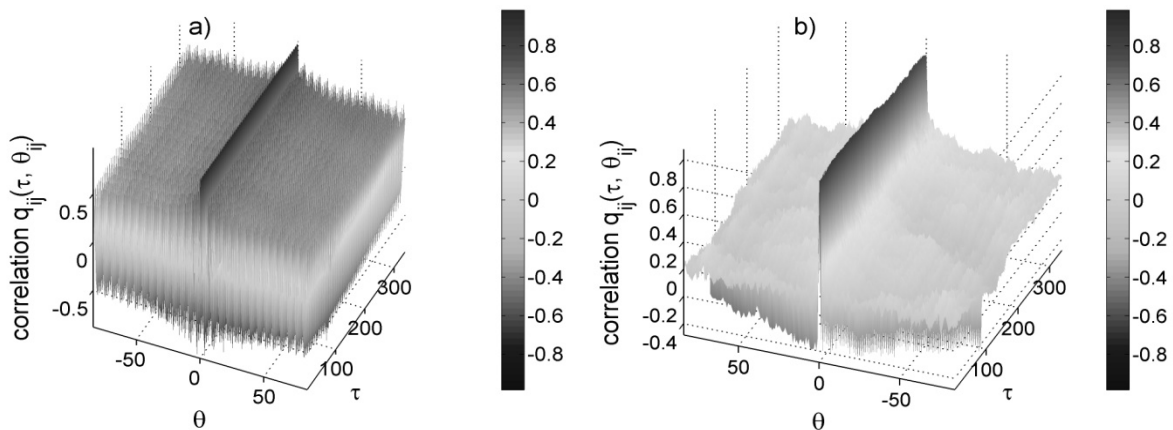


Рис. 2. 3D-зависимости кросскорреляторов $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ для радиоизлучения квазаров 0420m014.AED (а) и 2251p158.AED (б) на частотах 2,7 ГГц и 8,1 ГГц.

Зависимость $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ для излучения квазара 2251p158.AED (рис. 2б), наряду с низкочастотной размытой крупномасштабной структурой не демонстрирует ярко выраженной частотно-фазовой синхронизации. Отсутствие в динамике сигналов квазара 2251p158.AED сформированного набора собственных частот приводит к меньшему уровню синхронизации, чем это наблюдается у квазара 0420m014.AED.

4. Заключение

В работе представлена методика изучения динамики астрофизических объектов в рамках соотношений ФШС на примере двух квазаров. Основой ФШС-методологии является введение специфических соотношений для описания и параметризации различных типов нерегулярностей в рассматриваемой динамике: нерегулярностей-всплесков и нерегулярностей-скачков, отражающих резонансные и хаотические вклады в поведение изучаемой системы. Это позволяет описывать поведение изучаемой системы с помо-

щью небольшого набора информативных параметров и, таким образом выявлять специфический для каждой системы характер временной эволюции. Использование двухпараметрических кросскорреляторов позволяет исследовать явления частотно-фазовой синхронизации и детально охарактеризовать перекрестные взаимосвязи рассматриваемых сигналов.

Изученные в работе квазары, согласно полученным результатам, обладают различным типом динамики радиоизлучения, что отражает существенно разный характер процессов, протекающих на данных объектах. Квазар 0420m014.AED отличается четко выраженным набором собственных частот со слабо проявляющимися эффектами нестационарности и высоким уровнем частотно-фазовой синхронизации. Напротив, квазар 2251p158.AED характеризуется высокой нестационарностью, отсутствием различного набора резонансных частот и значительным влиянием эффектов динамической перемежаемости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-97000-р_поволжье_а.

Литература

1. *Кадо́мцев Б.Б.* Коллективные явления в плазме. Москва: Наука, 1976.
2. *Тимашев С.Ф.* Фликкер-шумовая спектроскопия: Информация в хаотических сигналах. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
3. *Tanizuka N., Khan M.R.* Dynamical structure of quasar radio wave intensity fluctuations from daily to yearly period. Noise and Fluctuations ICNF-2003, Ed. J. Sikula. Brno: Brno University of Technology, 2003, 813-816.
4. *Timashev S.F., Polyakov Yu.S et al.* Anomalous diffusion as a stochastic component in the dynamics of complex processes. Phys. Rev. E, 2010, V. 81, 041128-1-17.
5. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1967.

CROSSCORRELATIONS IN QUASAR RADIOWELLENEMISSION

Panischev O.Yu.^{1,2}, Demin S.A.^{1,2}, Timashev S.F.^{3,4}, Nefedyev Yu.A.^{1,2}

¹*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

²*Engelhard Astronomical Observatory, Kazan, Russia*

³*Karpov Institute of Physical Chemistry*

⁴*Institute of Laser and Information Technologies, Russian Academy of Science*

We discuss here the Flicker-Noise Spectroscopy approach to studying astrophysical systems on example of the quasar radio emission in different frequency ranges. The presented method allows to parameterize the study dynamics using a short set of characteristics. The consider quasars have a significant differences in manifesting the effects of nonstationarity, dynamical intermittency and value of frequency-phase synchronization. Our findings show that using the flicker-noise spectroscopy approach to studying astrophysical objects allows to carry out the more detail analysis of their behavior and evolution.

ОРБИТЫ ЧЕТЫРЕХ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПУЛКОВСКОЙ ПРОГРАММЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО КОРОТКОЙ ДУГЕ

Романенко Л.Г., Киселев А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: lrom@gao.spb.ru

Методом параметров видимого движения (ПВД) получены орбиты 4 визуально-двойных звезд, а именно: ADS 246 (GL 15), ADS 7724 (γ Leonis), ADS 14909 (1 Peg) и GL 745. Периоды обращения исследуемых звезд составляют 1200, 550, 18000 и 36000 лет соответственно. Орбиты вычислены на основе позиционных наблюдений коротких дуг в Пулковской обсерватории на 26-дюймовом рефракторе и параллакс Гиппаркос, дополненных результатами наблюдений лучевых скоростей компонент звезд в этих парах согласно данным из литературы. Учтены также все прежние визуальные и фотографические наблюдения этих звезд после 1828 года из каталога WDS. Проведено сравнение новых орбит ADS 246 и ADS 7724 с орбитами других авторов. Для ADS 14909 и GL745 орбиты определены впервые. Приведены также направления на полюса полученных орбит в галактической системе координат.

Для получения орбиты визуально-двойной звезды (ВДЗ) методом параметров видимого движения (ПВД, [1]) кроме результатов позиционных наблюдений, необходимо знать дополнительные параметры – параллакс данной звезды, разность лучевых скоростей компонент, а также оценить сумму масс двойной звезды.

В 1992 г. мы провели поиск звезд с наличием этих данных по каталогам и другим литературным источникам для включения таких звезд в программу наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове. В результате было отобрано около 15 двойных звезд и были начаты их фотографические наблюдения. Позднее были опубликованы результаты космических наблюдений спутника Гиппаркос [2] с уточненными тригонометрическими параллаксами, в том числе и двойных звезд нашей программы. Также появилась возможность получать данные общемировых позиционных наблюдений благодаря ежегодно пополняемому Вашингтонскому каталогу двойных звезд WDS [3].

Данная работа посвящена динамическому исследованию четырех близких к Солнцу визуально-двойных звезд, а именно: ADS 246 (GL 15), ADS 7724 (γ Leonis), GL 745 и ADS 14909 (1 Peg). Эти звезды давно открыты как двойные, но до сих пор не имеют надежных определений орбит в связи с медленным орбитальным движением.

Таблица 1. Общие данные об исследуемых визуально-двойных звездах.

Двойная звезда		m_V	Sp	π_{Hip}	μ_x	μ_y	V_r	ϵV_r
				arcsec	mas/yr	mas/yr	km/s	km/s
ADS 246	A	8.07 ^m	M2 V	0.279	+2860	+390	+11.97	± 0.22
(WDS00184+4401)	B	11.04	M6 V	± 0.001	+2884	+410	+10.98	± 0.16
ADS 7724	A	2.12	K1 III	0.026	+311	-153	-37.14	± 0.11
(WDS10200+1950)	B	4.23	G7 III	± 0.001	+306	-161	-37.43	± 0.17
GL745	A	10.77	M2 V	0.116	-474	-350	+32.21	± 0.26
(WDS19072+2053)	B	10.77	M2 V	± 0.002	-479	-333	+31.97	± 0.32
ADS14909	A	4.09	K1 III	0.021	+106	+063	-76.50	± 0.30
(WDS21221+1948)	B	9.14	K0 V	± 0.001	+110	+067	-76.84*	± 0.12

Примечание: * - указана средняя лучевая скорость спектрально-двойной компоненты B [4].

В табл. 1 приведены общие данные об исследуемых в данной работе двойных звездах: звездные величины, спектральные классы и собственные движения компонент

согласно каталогу WDS [3], параллаксы и их ошибки из каталога Гиппаркос [2], а также лучевые скорости компонент и их ошибки из публикаций Марси и Беница [5] (для двух звезд: ADS 246 и GL 745), Токовина [6] (для ADS 7724) и Гриффина [4] (для ADS 14909) соответственно. Таблица показывает, что компоненты всех четырех визуально-двойных звезд имеют общее для каждой пары движение как в картинной плоскости, так и по лучу зрения. Физическая связь звезд в этих парах не вызывает сомнений.

В табл. 2 даны параметры видимого движения исследуемых пар, определенные на средний момент T_0 , а также количество наблюдений n , используемых для определения этих параметров. Отметим, что для ADS 246 мы дополнили наш пулковский ряд фотографическими наблюдениями Морской обсерватории США (USNO). Для метода ПВД важно то, что ряд USNO, как и пулковский, является однородным. Для определения орбиты ADS 7724 оказалось достаточно пулковского ряда наблюдений. Для остальных двух звезд за основу (базис) мы взяли все имеющиеся наблюдения WDS+PUL, за исключением одного-двух ошибочных.

В последней колонке табл.2 мы приводим значение $\Delta\theta$ – изменение позиционного угла спутника В относительно главной звезды А за период базисных наблюдений Δt , который также приведен в этой колонке. Величина $\Delta\theta$ – характеристика короткой дуги, по которой мы определили соответствующую орбиту, она составляет от 1^0 до 4^0 .

Таблица 2. Параметры видимого (относительного) движения в исследуемых парах.

ADS	T_0 , год	ρ''	θ^0	$\mu''/\text{год}$	ψ^0	$\Delta\theta^0 / \Delta t$, лет
	n	$\epsilon\rho$	$\epsilon\theta$	$\epsilon\mu$	$\epsilon\psi$	Серия
246	1985.13	35.924	62.735	0.0733	193.3	3.8 / 43
	53	± 0.005	± 0.008	± 0.0003	± 0.3	USNO+PUL
7724	1994.06	4.619	125.083	0.0086	175.9	1.1 / 15
	20	± 0.009	± 0.066	± 0.0011	± 8.2	PUL
GL745	1952.68	114.701	110.669	0.0176	345.5	0.8 / 115
	14	± 0.028	± 0.013	± 0.0005	± 1.8	WDS+PUL
14909	1980.12	36.249	311.328	0.0045	63.2	3.0 / 232
	78	± 0.037	± 0.072	± 0.0007	± 7.7	WDS+PUL

Зная спектральные классы компонент, мы оценили их массы (в единицах массы Солнца), представленные в табл.3. В случае ADS 14909 известно [4], что компонента В - спектрально-двойная. Значения масс ее компонент мы взяли из Каталога кратных звезд Токовина [7]. Величины масс компонент из табл.3 (как и параллаксы и лучевые скорости из табл. 1) мы используем для определения ПВД-орбит исследуемых звезд.

Одним из необходимых параметров для определения орбиты методом ПВД является радиус кривизны видимой дуги орбиты вблизи точки (ρ, θ) на момент T_0 . Оказалось, что для всех четырех исследуемых в данной работе двойных звезд этот параметр не определяется. Тогда, как было показано нами в работе 1996 г. [8], прямое определение пространственного расстояния r между компонентами можно заменить оценкой (1) и получить семейство орбит, зависящее от r :

$$\frac{\rho''}{\pi_t} \leq r < \frac{8\pi^2}{V^2} \cdot M_{AB}, \quad \text{где} \quad V^2 = \left(\frac{\mu}{\pi_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_r}{4.74}\right)^2, \quad (1)$$

V – пространственная скорость в а.е./год, определяемая из позиционных и спектральных наблюдений, $\Delta V_r = V_r B - V_r A$ – относительная лучевая скорость компонент в км/с, π_t – тригонометрический параллакс в секундах дуги, а M_{AB} – сумма масс компонент в единицах массы Солнца.

Обозначим через β - угол наклона вектора \mathbf{r} к картинной плоскости на средний момент T_0 . Его величину можно определить из соотношения:

$$r \cdot \cos \beta = \frac{\rho}{\pi_i} \quad (2)$$

где r должно удовлетворять условию (1) при заданных ρ , π_i , V и M_{AB} .

В случае наличия наблюдений, достаточно удаленных от основного (базисного) ряда, можно определить единственное решение, подобрав угол β , наилучшим образом удовлетворяющий всем наблюдениям.

Двойная звезда ADS 246 – наиболее близкая пара с очень большими собственными движениями компонент (см. табл. 1), с наиболее уверенным орбитальным движением. На рис. 1 приведены: базисные наблюдения для ADS 246 (USNO+PUL), «старые» наблюдения (наблюдения от 1860 до 1959 гг.) и последнее наблюдение 2011 г. из каталога WDS [3], а также три варианта ПВД-орбит (E0, E1 и E2, соответствующие $\beta = 0^0, +28^0$ и -28^0) из семейства всех возможных. На участке 1959-2011 гг. все три орбиты совпадают. Очевидно, что «старым» наблюдениям удовлетворяет только орбита E0, она близка к круговой орбите Липпинкотт, полученной ею в 1972 г. [9], но лучше согласуется с современными наблюдениями. На рис. 2 показаны: наша ПВД-орбита E0 и орбита Липпинкотт, а также все 112 наблюдений из каталога WDS [3] и Пулковские наблюдения.

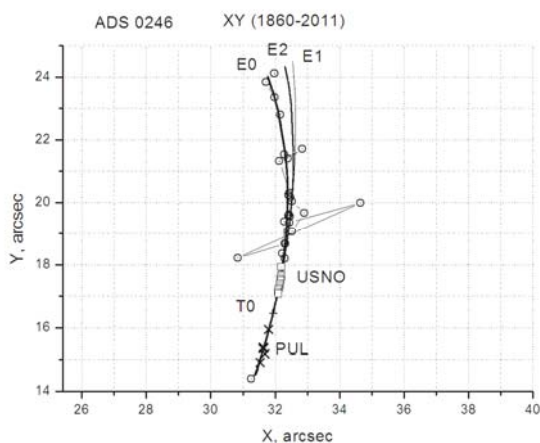


Рис. 1.

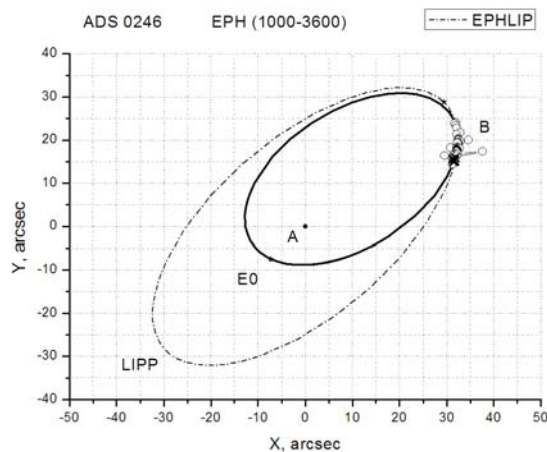


Рис. 2.

Рис. 1. Позиционные наблюдения ADS 246 в картинной плоскости XY. Ось X направлена на восток, ось Y – на север, начало координат соответствует компоненте А. Кружки – наблюдения по каталогу WDS [3], квадратики – наблюдения Морской обсерватории США (USNO) [3], T_0 – середина объединенного ряда USNO+PUL, крестики – наблюдения в Пулкове, линии E0, E1 и E2 – эфемериды ПВД-орбит на участке 1860-2011 гг., соответствующие $\beta = 0^0, +28^0$ и -28^0 .

Рис. 2. Проекция орбит ADS 246 на картинную плоскость XY. Сплошной эллипс – ПВД-орбита E0, штрих-пунктирный эллипс – орбита Липпинкотт [9], остальные обозначения см. рис. 1.

ADS 7724 – очень яркая ($m_A \sim 2^m$, $m_B \sim 4^m$) и тесная пара ($\rho \sim 5''$). В результате трудностей наблюдений позиционные наблюдения этой звезды представляют собой некоторую полосу. Для получения орбиты мы ограничились одним – пулковским – рядом.

На рис. 3 показаны все 803 наблюдения для ADS 7724 из каталога WDS [3] за период 1782-2010 гг., в том числе пять нормальных мест, полученных В.Я.Струве, а также Пулковские наблюдения и полученные нами ПВД-орбиты E0, E1 и E2, соответствующие углам $\beta = 0^0, +38^0$ и -38^0 . Орбита E0 не проходит через «старые» наблюдения. Проекция орбит E1 и E2 на картинную плоскость совпадают и хорошо описывают все

имеющиеся наблюдения. Кроме того, на рис. 3 приведены орбиты других авторов. Можно заметить, что орбита Рабе [10] плохо удовлетворяет современным наблюдениям, орбита Мейсона и др. [11] описывает их в пределах ошибок наблюдений. Дополнительные наблюдения в течение 10 лет покажут, которая из орбит ближе к истинной.

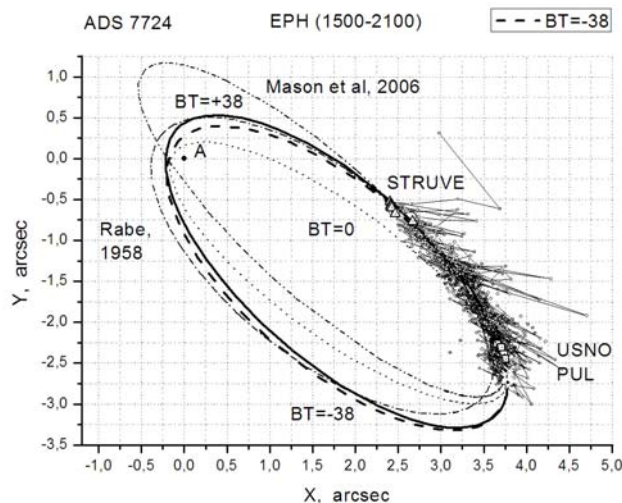


Рис. 3. Позиционные наблюдения и орбиты для ADS 7724. Треугольники – наблюдения В.Я. Струве [3], кружки – наблюдения из каталога WDS [3], белые крестики – наблюдения в Пулкове. Пунктирная, сплошная и прерывистая линии – полученные нами ПВД-орбиты E0, E1 и E2, соответствующие углам $\beta = 0^0, +38^0$ и -38^0 , тонкая прерывистая линия с одной точкой – орбита Рабе [10], тонкая прерывистая линия с двумя точками – орбита, полученная Мейсоном и др.[11].

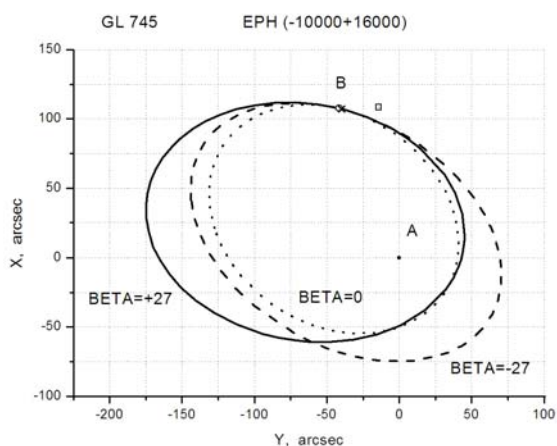


Рис. 4.

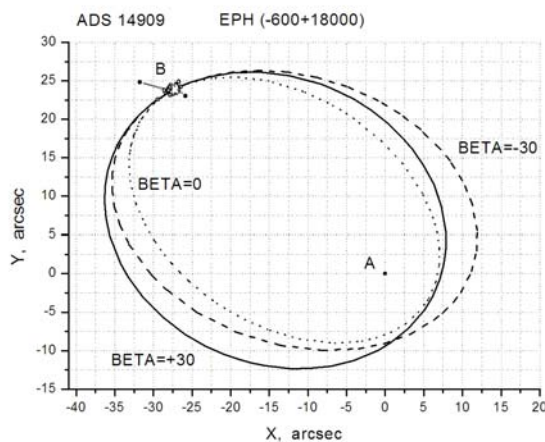


Рис. 5.

Рис. 4. и рис. 5. Характерные орбиты для GL 745 и ADS 14909. Обозначения см. рис. 3, примечания см. текст.

Двойная звезда GL 745 – очень широкая пара ($\rho \sim 115''$) с одинаковыми компонентами малой яркости ($m_A \sim 11^m, m_B \sim 11^m$), она теряется среди звезд фона, была открыта по большим собственным движениям обеих компонент.

Для определения орбиты GL 745 мы дополнили пулковский ряд наблюдениями согласно данным каталогов Astrographic Catalog, Hipparcos и 2MassCat (см. WDS [3]). В связи с малым относительным движением компонент в этой паре радиус кривизны видимой дуги орбиты не определяется, как и у предыдущих пар. Однако, все орбиты полученного нами семейства на участке 1897-2007 гг. (где расположены 14 наблюдений WDS+PUL) совпадают, выбрать единственное решение невозможно (подробнее см. [12]). На рис. 4 показаны некоторые характерные орбиты семейства, полученного для

GL 745 ($\beta = 0^0$, $+ 27^0$ и $- 27^0$). Первое и последнее наблюдения, показанные здесь кружком и крестиком, сливаются в одну точку В.

Яркая пара ADS 14909 также трудна для фотографических наблюдений (см. табл. 1): компонента А – яркая, компонента В слабее А на 5 (!) звездных величин. Т.е. подобрать оптимальную экспозицию практически невозможно. Кроме того, дополнительная трудность связана со спектральной двойственностью компоненты В с периодом 3 года. В результате мы имеем 69 наблюдений из каталога WDS [3] с большим разбросом. Однако, отбросив два наблюдения, по-видимому, ошибочных, мы получили параметры видимого движения (табл. 2) и семейство возможных ПВД-орбит (табл. 3). На участке 1780-2011 гг. все орбиты полученного семейства совпадают.

На рис. 5 мы приводим три характерные орбиты для ADS 14909 ($\beta = 0^0$, $+ 30^0$ и $- 30^0$). Здесь на фоне общемировых наблюдений отмечены пулковские наблюдения (белые крестики). Можно заметить, что короткая дуга всех наблюдений оказалась вблизи апоастра всех орбит семейства.

Таблица 3. Элементы орбит исследуемых пар.

β^0	a''	$P, лет$	e	ω^0	i^0	Ω^0	$T_{П, год}$	l_Q^0	b_Q^0	Автор
				ADS	246	($M_{AB} =$	0.56)			
0	26.73	1253	.59	331	46	243	2327	325	+60	Ром
	± 3.54	± 259	$\pm .19$	± 32	± 11	± 25	± 81	± 39	± 6	
	41.15	2600	0.00	0	61	45	1745	(259)	(-30)	Lipp
				ADS	7724	($M_{AB} =$	5.5)			
+38	3.10	554	.90	309	49	347	1750	32	-6	Ром
	$\pm .10$	± 27	$\pm .03$	± 6	± 6	± 9	± 16	± 7	± 6	
-38	3.10	554	.93	114	41	188	1769	133	-72	"
	$\pm .10$	± 27	$\pm .02$	± 10	± 5	± 14	± 13	± 28	± 6	
(-12)	2.51	618	.84	162	36	143	1743	(312)	(-79)	Rabe
(-52)	4.24	510	.85	118	76	143	1671	(242)	(-47)	Mason
				GL	745	($M_{AB} =$	0.80)			
+66	∞	∞	1.00	140	111	173	16826	351	+54	Ром
+27	117.4	36000	.64	231	153	206	8254	53	+33	"
0	95.7	26500	.57	320	158	291	7815	76	+ 8	"
-27	117.4	36000	.35	348	137	324	10640	92	-14	"
-66	∞	∞	1.00	247	108	339	338	115	-37	"
				ADS	14909	($M_{AB} =$	6.24)			
+80	∞	∞	1.00	241	81	240	10532	131	+68	Ром
+30	26.06	17500	.70	265	30	212	8212	257	+50	"
0	21.97	13500	.70	351	18	131	7315	269	+20	"
-30	26.06	17500	.61	47	38	85	9717	276	-8	"
-80	∞	∞	1.00	241	81	66	-3102	292	-51	"

В табл. 3 мы даем элементы как полученных нами ПВД-орбит, так и орбит других авторов. В заголовке для каждой звезды приведена сумма масс компонент M_{AB} в единицах массы Солнца, в первой колонке β – угол наклона вектора \mathbf{r} к картинной плоскости, в последних колонках l_Q и b_Q – галактические координаты направления на полюс орбиты Q. Величины, вычисленные нами по данным других авторов, приведены в скобках.

Для ADS 246 мы получили единственное достаточно уверенное решение при $\beta = 0$. Наша ПВД-орбита E0 имеет период вдвое меньший, чем орбита Липпинкотт, и не является круговой. Обе ПВД-орбиты для ADS 7724 имеют величины большой полуоси a , периода P и наклона i – средние по сравнению с элементами орбит других авторов, а также больший эксцентриситет e .

В табл. 3 также приведены элементы характерных ПВД-орбит для GL 745 и ADS 14909 для 5 симметричных случаев: $\beta = 0^0$, $\beta = \pm \beta_{\text{mdl}}$ и $\beta = \pm \beta_{\text{max}}$. Наиболее вероятными мы считаем орбиты при $\beta = \pm \beta_{\text{mdl}}$ (середина шарового пояса всех возможных орбит), то есть $\beta = \pm 27^0$ для GL 745 и $\beta = \pm 30^0$ для ADS 14909.

Заключение

Настоящая работа является продолжением наших предыдущих исследований (см., например, [13, 14]). Она подтверждает эффективность метода ПВД, позволяющего определить орбиту широкой или тесной визуально-двойной звезды ($\rho > 3''$) на основе короткой дуги позиционных наблюдений ($\Delta\theta \sim 1\text{-}5^0$). Необходимым условием решения этой задачи является знание относительной лучевой скорости компонент звезды и ее тригонометрического параллакса. Величина суммы масс компонент также необходима, она задается, но проверяется или уточняется в процессе вычислений.

В заключение авторы выражают благодарность наблюдателям 26"рефрактора в Пулковке, а также авторам Вашингтонского каталога двойных звезд WDS [3].

Литература

1. *A.A. Kiselev, O.B. Kiyeva*, Астрон.журн. **57**, 1227 (1980).
2. The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997) <http://vizier.u-strasbg.fr/vizbin/VizieR?-source=I/239>
3. *B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf*, Washington Double Star Catalog 2006.5. USNO Double Star CD 2006.5.
4. *R.F. Griffin*, The Observatory 107, 1 (1987).
5. *G.W. Marcy and K.J. Benitz*, Astrophys. J. **344**, 441 (1989).
6. *A.A. Tokovinin, M.G. Smekhov*, Astron. and Astrophys. 382, 118 (2002).
7. *A.A. Tokovinin*, MSC, Astron. Astrophys. Suppl.Ser. 124, 75, (1997).
8. *A.A. Kiselev, Л.Г. Романенко*, Астрон. журн. 73, 875 (1996).
9. *S.L. Lippincott*, Astron. J. 77, 165 (1972).
10. *W. Rabe*, Astrophys.Nachr. 284, 97 (1958).
11. *B.D. Mason, W.I. Hartkopf et al*, Astron. J. 132, 2219 (2006)
12. *O.B. Kiyeva, A.A. Kiselev, Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко, Т.А. Васильева*, Астрон. журн. **89**, 1045 (2012).
13. *A.A. Kiselev, Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко*, Астрон. журн., **86**, 148 (2009).
14. *A.A. Kiselev, O.B. Kiyeva, Л.Г. Романенко, Н.А. Горыня*, Астрон. журн. **89**, 581 (2012).

ORBITS OF FOUR VISUAL DOUBLE STARS OF PULKOVO PROGRAM DETERMINED BY SHORT ARC OBSERVATION

Romanenko L.G., Kiselev A.A.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

Using the apparent motion parameter (AMP) method the orbits of four visual double stars – ADS 246 (GL 15), ADS 7724 (γ Leo), ADS 14909 (1 Peg) and GL745 – are determined. The revolution periods of these stars are 1200, 550, 18 000 and 36 000 years accordingly. The orbital elements are calculated on the basis of short arcs of positional observations obtained on the 26-inch refractor at the Pulkovo Observatory added with the Hipparcos parallaxes and radial velocities of the components according to published data. All previous visual and photographic observations of these stars after 1828 published in the WDS Catalogue were also taken into account. Our new orbits of ADS 246 and ADS 7724 are compared with the orbits obtained by Lippincott for the first star and by Mason et al and by Rabe for the second star. The orbits of the double stars ADS 14909 (1 Peg) and GL745 are calculated for the first time. The galactic coordinates of the poles of the new orbit planes are also given.

О ВЛИЯНИИ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ НА ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рыльков В.П.

*Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН
Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1
E-Mail: vrylk1145@yandex.ru*

Рассматривается вопрос влияния вращения Галактики на получение положений внегалактических объектов – галактик, квазаров и внегалактических астрометрических радиосточников, формирующих систему ICRS по РСДБ наблюдениям. Делается вывод о необходимости учета галактического вращения при получении дифференциальных координат внегалактических объектов из-за изменения направлений на основные внегалактические реперы. Для фотографических наблюдений важно регистрировать точные эпохи внегалактического фона, поскольку даже за год изменения экваториальных координат внегалактических реперов в галактической плоскости приводит к изменению положений до 6 mas. Использование полученных в разные эпохи положений внегалактических объектов вполне может объяснить неустойчивость системы ICRS, выявляемую исследованиями.

Больше двух столетий изучение нашей звездной системы, называемой Галактикой Млечный путь, дало на сегодня следующие значения основных физических параметров. Используя различные методы исследования, получают и исследуют физические данные об общей структуре и строении Галактики. Кратко напомним некоторые параметры принятые на сегодня при изучении Галактики, необходимые в этой работе.

Согласно определению в учебниках астрономии, Млечный путь - это сплюснутая звездная система размером около 30 кпк, довольно симметричная относительно главной плоскости Галактики, образуемой основной массой из миллионов звезд, разреженного газа, пыли и космических лучей [1]. Пересечение этой плоскости с небесной сферой названо галактическим экватором, наше Солнце расположено примерно в половине радиуса (7.5-8 кпс) от центра Галактики на 20-25 пс севернее этой плоскости. Центр Галактики при наблюдении из Солнечной системы проектируется в созвездие Стрельца, в область с экваториальными координатами $\alpha = 265^\circ$ и $\delta = -29^\circ$. Северный галактический полюс N расположен в созвездии Волосы Вероники ($\alpha = 12^h 49^m$, $\delta = +27^\circ.4$), южный (S) - в созвездии Скульптора ($\alpha = 0^h 49^m$, $\delta = -27^\circ.4$). Точка пересечения небесного экватора с галактическим (восходящий узел Ω) имеет прямое восхождение ($\alpha = RA$) на эпоху миссии «Hipparcos» 1991.25 $\alpha_0 = 282^\circ.85948083$ ($18^h 51^m 26.2753992^s$) и галактическую долготу $L_0 = 32^\circ.931918056$, а небесный экватор наклонен к галактическому на угол $\Omega = 62^\circ.8717486$.

За последнее столетие были определены некоторые динамические характеристики Галактики. Подсчеты звезд, учет собственных движений и параллакс звезд в окрестности Солнца, изучение нейтрального водорода и привлечение результатов измерения лучевых скоростей позволили обнаружить следующие свойства Галактики.

Отметим некоторые, имеющие значение для этого исследования.

- Установлено, что Солнце движется со скоростью около 20 км/с в сторону созвездия Геркулеса (Hercules), АПЕКС его движения имеет прямое восхождение $RA=270^\circ$ (18^h) и склонение $DE=+30^\circ$.

- Вращение Галактики происходит по часовой стрелке, если смотреть на нее сверху небесной сферы со стороны северного галактического полюса, который находится в созвездии Волосы Вероники (Coma Berenices).

- Центральная часть звездного диска вращается почти как твердое тело со скоростью около 250 км/с и уменьшается до 200-220 км/с в спиральном рукаве, где находится Солнце, после чего она либо остается постоянной, либо слегка уменьшается.
- Солнце и все звезды в его окрестности совершают полный оборот вокруг центра Галактики примерно за 200-250 миллионов лет. Этот промежуток времени называется Галактическим годом. Точное значение этого года пока неизвестно, исследования продолжаются, поэтому для вычислений принимаем значение от нижней до верхней границы в 200, 220 и 250 млн. лет.

Основной постулат астрометрии – надо найти точку опоры, чтобы получать сведения о пространственных характеристиках небесных объектов. Сначала это были хрустальные небеса с неподвижными изумрудами звезд, затем система небесных координат привязывалась к слабым звездам и к Галактикам, в настоящее время она базируется на компактных внегалактических радиоисточниках (ERS), наблюдаемых радиоастрономическими методами [2]. Исследованию устойчивости принятой астрометрической системы координат в настоящее время посвящено множество работ, однако единого мнения по этому вопросу пока нет [3, 4]. Для таких исследований используют последние результаты наблюдений опорных внегалактических радиоисточников, постепенно увеличивая их число с 212 почти до 600 по всей небесной сфере и, получая их все более точные координаты, рассчитывают отклонения по трем осям прямоугольной галактической и экваториальной систем координат.

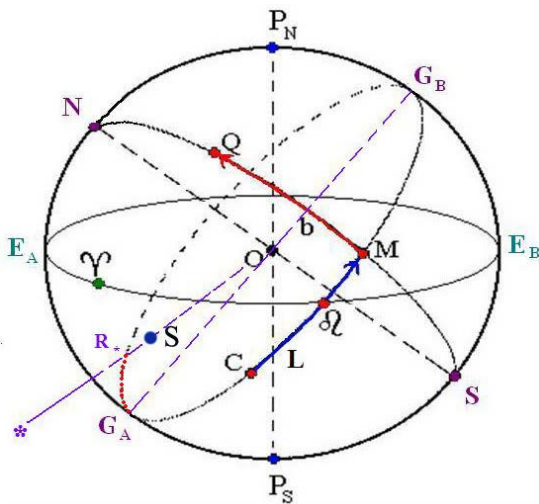


Рис. 1. Галактическая и экваториальная системы координат, S - Солнце.

Если рассматривать движение Солнца вдоль галактического экватора, то понятно, что координаты внегалактических объектов должны меняться со временем, поскольку трудно представить, что вся Вселенная вращается как наша Галактика. Изменения их координат будут естественно связаны с вращением Галактики. Поскольку Солнечная система обращается вокруг центра Галактики с периодом около 200-250 млн. лет, то нетрудно вычислить, что за 100 лет направление на галактический центр сместится всего на 0."5 вдоль галактического экватора. Сразу заметим, что направления на внегалактические объекты из движущейся вместе с Галактикой, но находящейся на периферии солнечной системы будут другие.

Цель работы – оценить влияние галактического вращения на координаты внегалактических объектов при условии невращения внегалактических объектов, т.е. условно считая их на данном этапе неподвижной системой из множества объектов, движение которых сейчас находится вне возможности регистрации нашими средствами наблюдений. Возьмем за основу диапазон принимаемых сейчас периодов вращения Галактики от 200 до 250 миллионов лет и оценим изменения экваториальных координат внегалактических объектов при движении Солнца за некоторые периоды в десятки лет.

В год при 250 млн. лет	-	$1296000 / 250\ 000\ 000 = 0.00519$ "/год
при 220 млн. лет	-	$1296000 / 220\ 000\ 000 = 0.00589$ "/год
при 200 млн. лет	-	$1296000 / 200\ 000\ 000 = 0.00648$ "/год

Таблица 1. Изменение экваториальных координат для внегалактических объектов из области центра Галактики в зависимости от периода вращения (в mas).

Δyear Лет	Оборот 200 млн. лет			Оборот 220 млн. лет			Оборот 250 млн. лет		
	ΔL arcs	ΔRA mas	ΔDE	ΔL arcs	ΔRA mas	ΔDE	ΔL arcs	ΔRA mas	ΔDE
10	0,065	35	-52	0,059	35	-51	0,052	29	-43
20	0,130	76	-112	0,118	70	-103	0,104	58	-86
30	0,195	111	-164	0,177	105	-155	0,156	93	-138
40	0,260	152	-224	0,236	140	-207	0,208	123	-181
50	0,324	187	-276	0,295	175	-259	0,260	152	-224
60	0,389	228	-336	0,354	204	-302	0,312	181	-267
100	0,648	380	-560	0,589	345	-508	0,519	304	-448

Если считать, что точность современных оптических наблюдений земными телескопами достигла тысячных долей секунды дуги, а при наблюдениях радиоисточников методами РСДБ уже до сотых и тысячных долей mas, то это уже вполне обнаруживаемые величины даже за недолгие периоды позиционных наблюдений. Если не считать, что вся Вселенная вращается вместе с нашей Галактикой, то это дает некоторые дополнительные возможности исследований.

Как мне представляется, в первую очередь это касается позиционных наблюдений внегалактических радиоисточников - ERS. Как уже отмечено, последние исследования позиционных систем, базирующихся на разных количествах астрометрических ERS ориентированных по всей небесной сфере, показывают неустойчивость этих систем.

Это может быть следствием НЕУЧЕТА вращательного движения Солнечной системы вместе с Галактикой при вычислении координат ERS, получаемых в разные годы наблюдений. Как это видно из табл.1 даже за год оптические координаты ERS в области антицентра Галактики могут изменяться на величины порядка 6-10 mas. В табл.2. приведены расчеты изменения экваториальных координат при вращении Галактики за 30 лет (смещение в $L = 0,16-0,20''$) для объектов, расположенных вдоль галактического экватора. Вычисления сделаны для уровня галактической широты $+0.1^\circ$ - практически для экватора через 10° галактической долготы L.

Период галактического вращения в 30 лет выбран не случайно – именно в последние 30 лет астрометрия активно ищет пути становления координатной системы, основанной на высокоточных наблюдениях ERS. В таблице приведены значения экваториальных координат, которые соответствуют изменению галактической долготы L через каждые 10 градусов. Значения отклонений в прямом восхождении приведены к экватору, поскольку при движении вдоль галактического экватора мы поднимаемся довольно высоко по склонению в экваториальной системе координат. На уровне галактической широты более 30° кривые изменений экваториальных координат приведены на рис. 2-3, они интересны тем, что экваториальные переходят полюсные значения склонений. Согласно этим вычислениям, максимальные разности должны быть для объектов, расположенных в районе $110-150^\circ$ по галактической долготе, что соответствует району в экваториальной системе от 23 до 04 часов в RA и в склонении около 60 градусов. Вторые максимумы находятся в противоположной стороне – по галактической долготе $280-330^\circ$, это район 10-16 часов в RA и -60° в склонении, что близко направлению на галактический центр.

Графики на рис. 2-3 показывают изменения экваториальных координат из-за вращения Галактики на уровне галактических широт $+30^\circ$ и -30° , рис. 4 для галактических широты $+10^\circ$.

Таблица 2. Изменения экваториальных координат внегалактических объектов вследствие вращения Галактики за 30 лет на уровне галактической широты 0.1° (галактический экватор) через 10° галактической долготы.

L Galact. o	RA Eqv. h m s	DE Eqv. o	RA*cosD mas	DE mas	Созвездие
0.02	17 45 02.99	-28.82077	94.0	153.5	Стрелец
10.02	18 07 12.61	-20.17977	87.6	157.2	Стрелец
20.02	18 26 59.43	-11.38148	83.8	159.3	Щит
30.02	18 45 33.23	-2.50335	82.2	160.1	Орел
40.02	19 03 50.83	6.39328	82.5	160.0	Орел
50.02	19 22 46.37	15.25049	84.9	158.7	Орел
60.02	19 43 20.75	24.00237	89.6	156.1	Лисичка
70.02	20 06 53.08	32.56052	97.0	151.6	Лебедь
80.02	20 35 17.23	40.79039	108.0	144.0	Лебедь
90.02	21 11 25.43	48.46815	123.2	131.2	Лебедь
100.02	21 59 29.59	55.20267	143.1	109.2	Цефей
110.02	23 04 14.00	60.32570	164.9	72.2	Цефей
120.02	0 25 56.98	62.89488	179.1	17.8	Кассиопея
130.02	1 52 53.88	62.18802	174.9	42.4	Кассиопея
140.02	3 08 06.44	58.42555	155.9	90.0	Кассиопея
150.02	4 05 21.60	52.52242	134.2	119.9	Персей
160.02	4 47 49.19	45.32855	116.2	137.5	Персей
170.02	5 20 16.50	37.38304	102.9	147.7	Воозничий
180.02	5 46 21.00	28.99439	93.5	153.8	Телец
190.02	6 08 27.13	20.34179	87.3	157.4	Орион
200.02	6 28 11.69	11.53657	83.7	159.4	Единорог
210.02	6 46 44.48	2.65550	82.1	160.2	Единорог
220.02	7 05 02.35	-6.24036	82.6	159.9	Единорог
230.02	7 23 59.42	-15.09300	85.1	158.6	Большой пес
240.02	7 44 36.60	-23.83610	90.0	155.9	Корма
250.02	8 08 12.86	-32.38036	97.5	151.3	Корма
260.02	8 36 41.53	-40.58993	108.5	143.6	Перуса
270.02	9 12 53.01	-48.23943	123.8	130.6	Паруса
280.02	10 00 54.10	-54.93721	143.6	108.5	Паруса
290.02	11 05 18.24	-60.02011	165.2	71.6	Киль
300.02	12 26 14.12	-62.56316	179.1	17.6	Южн.Крест
310.02	13 52 13.87	-61.86399	175.0	42.0	Центавр
320.02	15 06 50.69	-58.13645	156.3	89.2	Циркуль
330.02	16 03 54.47	-52.27332	134.8	119.3	Наугольник
340.02	16 46 22.62	-45.11276	116.8	136.9	Скорпион
350.02	17 18 54.10	-37.19200	103.4	147.3	Скорпион
360.02	17 45 02.99	-28.82077	94.0	153.5	Стрелец

* - значения в прямом восхождении приведены к экватору.

RA1 - значения приведены в форме hh mm ss.dd

DE2 - значения приведены в форме gg.ddddd

Если поставить задачу измерения периода вращения галактики, то изучать надо смещение координат внегалактических объектов в стороне антицентра Галактики.

Именно там будет наблюдаться максимальный позиционный сдвиг за минимальные периоды наблюдений. Измерения смещений таких внегалактических объектов можно проводить дифференциальным методом, а именно относительно объектов рас-

положенных в направлении АПЕКСА или АНТИАПЕКСА движения Солнечной системы. Направление апекса известно – это созвездие Геркулес, галактическая долгота около 270° .

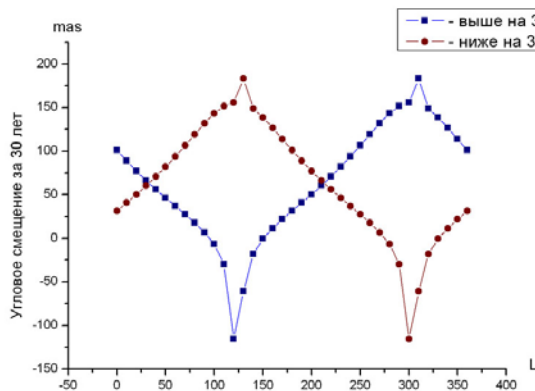


Рис.2. Изменение экваториальной координаты RA на галактической широте +30 (ш) и -30(о) по галактической долготе

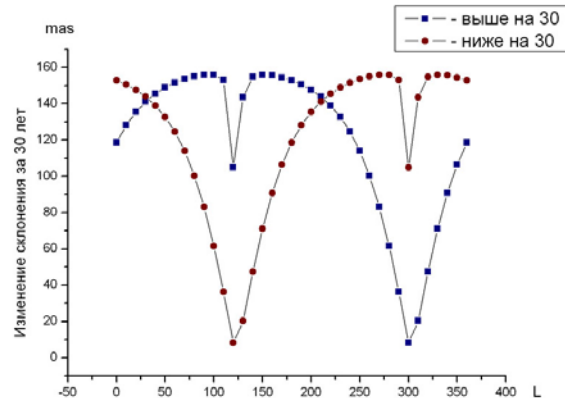


Рис.3. Изменение экваториальных склонений DE на галактической широте +30 (ш) и -30 (о) вследствие галактического вращения

Рис. 2-3. Изменения экваториальных координат объектов в RA и De, расположенных вдоль галактического экватора при перемещении объектов параллельно по широте $L = 30^\circ$.

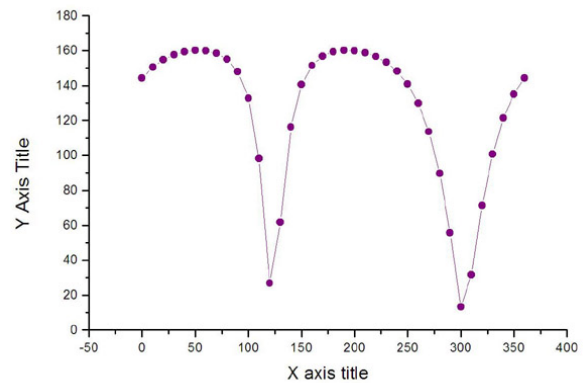
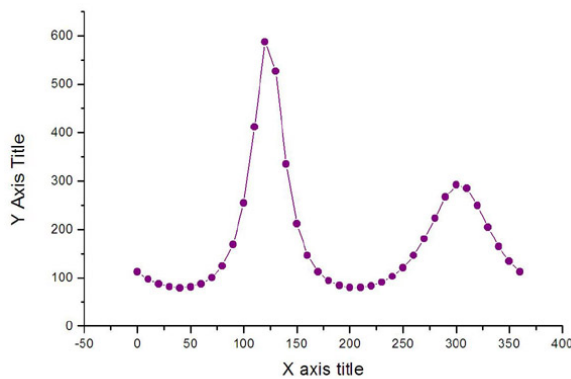


Рис. 4. Изменения экваториальных координат объектов в RA и De, расположенных над галактическим экватором на 10° при перемещении объекта вдоль этой широты.

Таблица 3. Внегалактические источники ICRS в окрестности антицентра Галактики.

Имя	ERS	mag	RA(J2000)	DE
J050145.2+135607	0458+138	18.88	05 02 33.2273	13 38 10.928
A050356.8+340328	Q13125	17.66	05 03 56.7800	34 03 28.081
J051002.3+180041	0507+179	17.97	05 10 02.369122	18 00 41.58171
J052109.8+163822	0518+165	18.15	05 21 09.886021	16 38 22.05122
A051640.5+274310	Q13149	15.20	05 16 40.4780	27 43 10.276
A051933.0+274404	Q13154	15.68	05 19 33.0311	27 44 04.447
A053615.1+173329	Q13178	18.31	05 36 15.0978	17 33 29.0151
J054734.1+272156	0544+273	19.9	05 47 34.148941	27 21 56.84240
J055932.0+235353	0556+238	19.0	05 59 32.033133	23 53 53.92620

Антицентр имеет координаты $RA=5^h46,1^m - 180^\circ$ галактической долготы, (см. табл. 3) $DE= +28^\circ51'$. В окрестности антицентра по каталогу S.M.A et all [2] астрометрических внегалактических радиоисточников системы ICRS находятся 4 ERS, которые могут быть использованы для этой цели. В таблице даны также положения квазаров для

этой области из каталога LQRF Andrei A. et all [3]. Из табл. 3 следует, что источник 0544+273 вероятно специально выбран в направлении на антицентр Галактики. Возможно для изучения проблемы вращения Галактики.

Площадки с галактиками Пулковской программы, наблюдаемые с 30-х годов 20 века, на которых есть четкие и хорошо измеряемые изображения внегалактических объектов типа галактик, также могут быть использованы для этой цели. На них могут быть обнаружены смещения галактик, расположенных вдоль галактического экватора, до 0.4”.

Таблица 4. Номера площадок Пулковской программы с галактиками в окрестности антицентра и центра Галактики с числом галактик Ga зафиксированным в поле.

№п	RA	DE	Ga	№п	RA	DE	Ga
33	07 06 25.4	+18 41 26.0	2	135	17 32 25.2	+07 04 49.9	2
35	07 09 15.8	+20 38 14.8	2	136	17 51 47.2	+23 04 13.8	2
38	07 56 47.2	+07 28 00.7	4	137	18 05 40.9	+18 33 15.8	8

Что касается получения координат радиоисточников системы ICRS. Возможно при такой точности позиционирования, которую мы видим в частности в таблице источников NASA - С.Ма, уже пора вводить поправки за галактическое вращение в получаемые координаты внегалактических радиоисточников. Все эти вопросы требуют дальнейшей проработки и детального изучения.

Литература

1. Э.В. Кононович, В.И. Мороз, *Общий курс астрономии*, 2004, изд. 2-е испр., уч. пособие под ред. В.В. Иванова, М., Едиториал УРСС, 544 с.
2. С.МА, E.F. Arias, A.M. Gontier, et all, *The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry*, *The Astronomical Journal*, 16:516-546, 1998 July.
3. Andrei A.H., Souchay J., Zacharias N., Smart R.L., et.al., *The LQRF - An optical representation of the ICRS*, *Astron. Astrophys.* 505, 385, 2009.

ABOUT THE INFLUENCE OF GALAXY ROTATION IN OBTAINED EXTRAGALACTIC OBJECTS POSITION

Ryl'kov V.P.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

There was examined for the question about the influence of galaxy rotation on the obtained extragalactic objects position – galaxy, quasars and extragalactic astrometric radio source, which are formed the ICRS system from VLBI observation. These problems concerns with investigation of stability astronomical reference system similar to ICRS based on VLBI observation.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ МАСС БЛИЗКИХ ЗВЕЗД – КАНДИДАТОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Шахт Н.А., Афанасьева А.А., Киселев А.А., Василькова О.О., Горшанов Д.Л.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Санкт-Петербург, Россия

В Пулковскую программу наблюдений входят избранные двойные и кратные звезды, расположенные в окрестностях Солнца. В настоящее время интерес к этим объектам повысился в связи с, ожидаемыми результатами запланированных космических миссий. Для некоторых из этих звезд имеются указания на наличие у них пылевых дисков, невидимых спутников, а также на возможность существования планетоподобных спутников, в том числе планет земного типа. ADS 14636 (61 Лебеда) и ADS 7251 внесены в базу данных NASA Star and Exoplanets Database как первоочередные объекты для наблюдений из космоса. Нами произведена ревизия орбит 61 Лебеда и ADS 7251 с учетом последних наземных и космических данных. Вычислены предварительные орбиты двойной звезды Stein 2051AB в зависимости от предполагаемой массы компонента В – белого карлика, который запланирован в качестве дефлектора для наблюдения эффекта микролинзирования с помощью телескопа Gaia в 2014 году. Сделаны оценки границ обитаемых зон для возможных планет у этих звезд.

Вступление

На 26" рефракторе в Пулкове в течение почти 50 лет проводились фотографические наблюдения одиночных, двойных и кратных звезд с целью получения точных положений, определений орбит, оценок масс, определения тригонометрических параллаксов. Накопленный материал и разработанная методика позволили в ряде случаев решать не только астрометрические и небесно-механические задачи, а участвовать в решении и обсуждении проблем, связанных со смежными областями астрономии и посвященными самым актуальным проблемам физики, релятивистской астрономии, космологии и т.д., см., например, [1–3]. При этом для всестороннего исследования параметров движения двойных систем нам необходимы точные значения параллаксов и лучевых скоростей, которые можно получить в результате наблюдений из космоса. В то же время, вычисляемые нами относительные координаты, скорости и направления движений этих объектов могут послужить наземной поддержкой для космических наблюдений.

Мы выбрали три двойные звезды, которые входят в списки самых перспективных объектов для космических исследований. С учетом последних данных для 61 Cyg и ADS 7251 были перевычислены орбиты этих звезд. Параметры движения и масса звезды Stein 2051 проанализированы на основе фотографических и ПЗС-наблюдений. Возможно получение новых координат и эфемериды на время ее наблюдений с помощью аппарата Gaia. Выполнена предварительная оценка обитаемых зон для возможных планет у этих звезд.

Характеристики избранных звезд

Основные сведения относительно программы наблюдений приводятся в наших работах, см., например, [4]. Фотографические наблюдения 61 Cyg велись на пулковском нормальном астрографе не менее 100 лет и около 50 лет на 26" рефракторе. ADS 7251 наблюдалась на обоих инструментах более 40 лет. Ошибки одного среднегодового нормального места этих звезд составляют 6–8 mas.

Описание методики наблюдений и определения орбит с использованием параметров видимого движения приведены в [5–6]. В таблице 2 даются основные параметры

движения звезд, полученные из наблюдений: относительное положение ρ , позиционный угол θ , их производные а также $\Delta\mu$ – видимое собственное движение В относительно А в тангенциальном направлении и ψ – позиционный угол $\Delta\mu$.

Таблица 1. Избранные звезды – основные параметры.

Название	RA	Decl	m_{vA}	m_{vB}	Sp_A	Sp_B	π_{tr}
ADS 7251	9 ^h 14 ^m .9	+52 42	7 ^m .4	7.4	M0V	M0V	0".164
ADS 14636	21 06.9	+38 45	5.4	6.1	K5V	K7V	0.287
Stein 2051	4 30.9	+58 62	12.0	13.0	M4V	DC5 VII	0.180

Таблица 2. Параметры движения избранных звезд.

Объект	T_0 , ΔT , years	ρ''	θ°	$\dot{\rho}$, "/год	$\dot{\theta}$, °/год	$\Delta\mu$, "/год	ψ°	ρ_c , "
61 Cyg	1982.73 48	29.440 ± 0.003	146.523 ± 0.008	0.0739 ± 0.0002	0.1978 ± 0.0004	0.1257 ± 0.0002	200.51 ± 0.11	22.6 ± 0.9
ADS 7251	1984.21 44	17.596 ± 0.002	88.184 ± 0.006	-0.0178 ± 0.0001	0.2973 ± 0.0003	0.09304 ± 0.00009	189.24 ± 0.06	23.7 ± 0.9
Stein 2051	1986.57 40	8.001 ± 0.008	72.503 ± 0.090	-0.0664 ± 0.0004	-0.6055 ± 0.0048	0.1080 ± 0.0006	20.47 ± 0.37	–

Во втором столбце таблицы 2 даны средние моменты и число лет наблюдений в Пулкове, используемых для параметров, приведенных в столбцах 3–6.

Уточнение орбит 61 Cyg и ADS 7251

В таблице 3 мы приводим орбиту 61 Лебеда, представленную в [7] и полученную на основе ряда наблюдений I: 1956-1997 гг. [8], дополненного положениями ряда II: 1998–2005 гг., Пластинки ряда I были измерены на машине "Фантазия", пластинки ряда II - на сканере UMAX POWER LOOK II. Всего было использовано около 400 пластинок. Для вычисления орбиты были взяты значения параллакса из базы данных RECONS.org, значение лучевой скорости В-А из [8]. Для сравнения орбит и эфемерид были взяты данные из [6,9] и ПЗС-наблюдения из работы [10] (см. рис. 1–2).

Полученные на основе нашей орбиты значения эфемериды на 2006–2008 гг. (на графике – квадраты, ряд 2) сравниваются с эфемеридой, вычисленной согласно орбитальным элементам Джостиса [9] (треугольники, ряд 4), а также с ПЗС-наблюдениями Фольмана [10] (черные кружки, ряд 3). Ряд 1, кружки – эфемерида, вычисленная по более старым пулковским наблюдениям [6]; измерения в этом случае были сделаны на Аскорекорде.

Орбита ADS 7251 также была получена по нашему пулковскому ряду [11, 7] на основе не менее 200 пластинок, использованы значения параллакса из RECONS.org и последние значения лучевой скорости из базы данных SIMBAD.

Контролем для выбора однозначной орбиты в соответствии со знаком β – углом вектора положения относительно картинной плоскости послужили наблюдения В.Я. и О.В. Струве (1828–1878 г.г.)

В дальнейшем А.А. Афанасьевой [12] для этих звезд было произведено исследование свободных параметров: суммы масс Σt и кривизны орбиты ρ_c , и получен более строгий вариант орбит 61 Cyg и ADS 7251 (см. "Труды Пулковской молодежной конференции", Изв ГАО, в печати).

Таблица 3. Параметры орбит.

Название	a , а.е.	P , год	e	i , $^{\circ}$	ω , $^{\circ}$	Ω , $^{\circ}$	Tr , год
61 Cyg	81.8	674.3	0.503	132.5	156.3	177.1	1728.5
ADS 7251	136.9	1528.0	0.080	141.0	210.4	216.6	1882.8
Stein2051 (1)	181.3	2505.2	0.588	71.6	7.5	193.8	1788.1
Stein2051 (2)	151.8	1918.3	0.57	70.2	0.5	193.2	1798.0

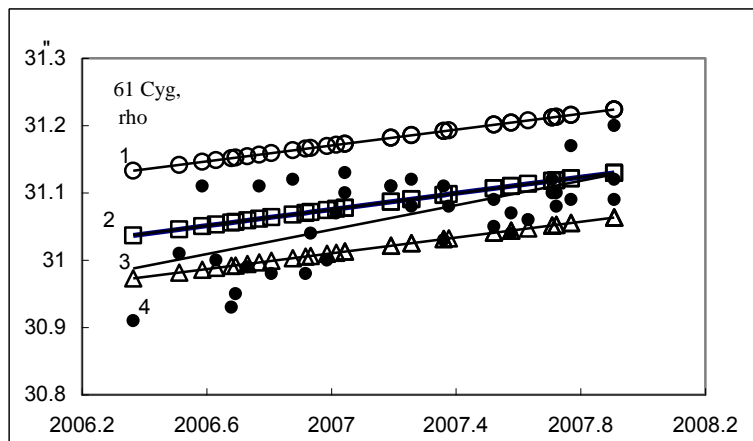


Рис. 1. Сравнение эфемерид и ПЗС-наблюдений 61 Cyg (ρ).

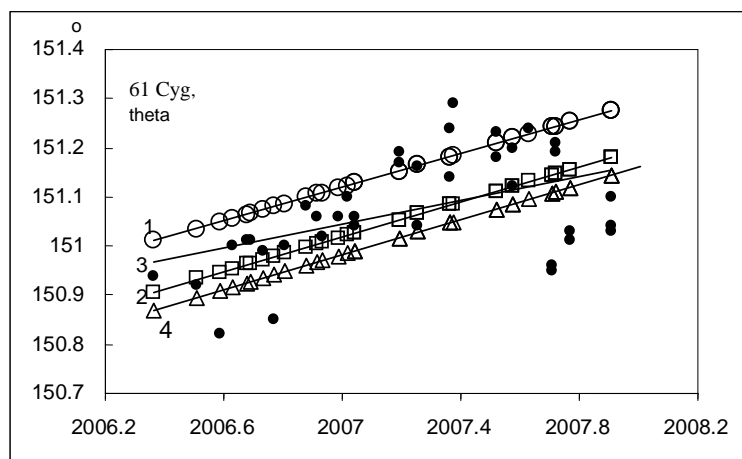


Рис. 2. Сравнение эфемерид и ПЗС-наблюдений 61 Cyg (θ).

Исследование движения звезды Stein 2051

Фотографические наблюдения двойной звезды Stein 2051, проводились в Пулкове на 26" рефракторе с 1966 до 2005 г. Всего получено 150 пластинок, ошибка одного среднегодового нормального места составила 0"024. Ранее по наблюдениям 1966–1976 гг. в Вашингтоне и Флагстаффе Стрэндом [13] был заподозрен невидимый спутник у компонента А с периодом обращения 23 года. Орбита широкой пары А и В не определялась, очевидно, из-за трудности вычисления ее кривизны. Стрэндом было высказано предположение о том, что период обращения не может быть меньше 300 лет. В настоящее время актуален анализ новых наблюдательных данных, так как в 2014 г. запланированы наблюдения с помощью телескопа Gaia компонента В – белого карлика как линзирующего объекта при сближении с выбранной звездой фона 19.^m7, см. статью Профта и др. [14].

Параметры орбиты, вычисленной по пулковскому ряду наблюдений 1966–1986 гг. с нижним пределом периода P и большой полуоси a , равными 337 лет и 43 а.е. соответственно, даны в статье А.А. Афанасьевой [12]. Анализ пулковских наблюдений с привлечением данных ПЗС за 2004–2007 гг. [15] и положения Hipparcos на 1991.25 позволил нам предположить, что период обращения этой звезды может быть значительно большим. В таблице 3 мы даем два варианта орбит, полученных при наиболее вероятной оценке суммы масс компонентов, равной $0.95 M_{\odot}$:

1) элементы орбиты, вычисленные по параметрам видимого движения с приближенной оценкой радиуса кривизны ρ , равного 91" и

2) орбиту, полученную по пространственному расстоянию между компонентами r , среднему из r_{min} и r_{max} , где r рассчитывается по формуле, характеризующей динамический критерий для возможных эллиптических орбит данной пары (см.[6]):

$$\frac{\rho}{\pi \tau} \leq r \leq \frac{2k^2}{v^2}, \quad (1)$$

где $k^2 = 4\pi^2(M_a + M_b)$, M_a , M_b – массы компонентов, v – пространственная скорость.

На рис. 3 мы приводим относительные положения В–А, полученные по нашим наблюдениям и данным Hipparcos (1991.0).

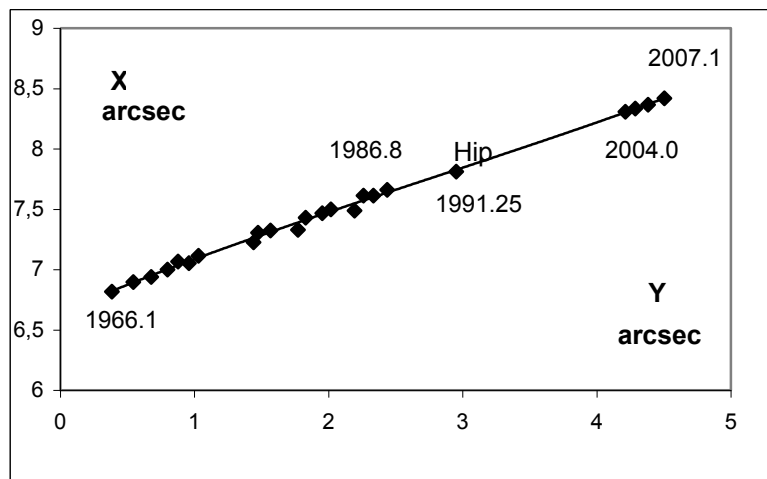


Рис. 3. Относительные положения В–А Stein 2051.

Анализ О–С показал присутствие периодической составляющей с периодом около 18 лет, но с небольшой амплитудой. Наши оценки – предварительные. Для этой звезды, как и для других наших звезд, необходимы точные параллаксы и лучевые скорости, ко-

торые можно получить с помощью космических наблюдений. Следует отметить, что для компонентов Stein 2051 нет уверенных значений лучевой скорости. По нашим наблюдениям все же можно сделать вывод о том, что масса компонента В находится ближе к ее верхней оценке: $0.72 M_{\odot}$ (см. [13]). При этом сумма масс может быть не меньше, чем $0.95 M_{\odot}$.

Вычисление границ обитаемых зон избранных звезд

Таблица 4. Границы обитаемых зон.

Название	L^*/L_{\odot}	$l_{in},$ a.e.	$l_{out},$ a.e.	R^*/R_{\odot}	$T_{eff},$ °K	L^*/L_{\odot}	$l_{in},$ a.e.	$l_{out},$ a.e.
61 Cyg A	0.245	0.37	0.95	0.72	4530	0.150	0.29	0.74
61 Cyg B	0.086	0.16	0.43	0.67	4080	0.088	0.23	0.59
ADS 7251A	0.113	0.25	0.66	0.675	3800	0.067	0.22	0.60
ADS 7251B	0.096	0.21	0.55	0.65	4400	0.089	0.19	0.50
Stein 2051A	0.0016	0.03	0.08	0.099	3200	0.0008	0.02	0.06
Stein 2051B	0.0003	0.01	0.03	0.011	7050	0.0003	0.01	0.03

$$l_{in} = (l_{in(Sun)} - a_{in} T_* - b_{in} T_*^2) \sqrt{\frac{L_*}{L(Sun)}} \quad (2)$$

$$l_{out} = (l_{out(Sun)} - a_{out} T_* - b_{out} T_*^2) \sqrt{\frac{L_*}{L(Sun)}}$$

По формулам (2), приведенным в работе Сельсиса, Кастинга и др. [17], мы оценили приближенные значения внешней l_{out} и внутренней l_{in} границ обитаемой зоны (HZ) для возможных планет у наших звезд. Здесь $T_* = T_{eff} - 5700^{\circ}$, L_* – болометрическая светимость звезды, a и b – постоянные. $l_{in(Sun)} = 0.72$ а.е. и $l_{out(Sun)} = 1.77$ а.е. – границы обитаемой зоны Солнечной системы.

В таблице 4 (в столбцах 2-4) даны значения L_* и l , вычисленные согласно оценкам масс, сделанным по пулковским данным [8,11,16] и данным RECONS.org. В столбцах 7-9 даны значения L_* , полученные по формуле Стефана-Больцмана: $L_* = 4\pi\sigma R_*^2 T_{eff}^4$ с учетом эффективной температуры T_{eff} и радиусов R_* , и соответствующие значения l .

В дальнейшем, с привлечением более подробных данных о физической природе этих звезд, можно уточнить значения HZ и сравнить их с оценками других авторов.

Мы представили некоторые результаты исследования избранных звезд и надеемся на то, что наши долговременные астрометрические наблюдения окажутся полезными при сравнении с наблюдениями из космоса.

Литература

1. Киселев А.А., Гнедин Ю.Н., Грошева Е.А., и др. Астрон.Ж., т. 84, 2, .118, 2007.
2. Shakht N.A, Kisselev A.A., Planetary Sp Sci, 2478, v.56, issue 14, p. 1903, 2008.
3. Киселев А.А., Гнедин Ю.Н. Шахт Н.А. и др. ПАЖ, т.34, вып. 8, 585, 2008.
4. Киселев А.А., Романенко Л.Г., Шахт Н.А. и др., Изв.ГАО, 219, вып.4, 135, 2010.

5. *Kiselev A.A., Romanenko L.G.*, *Астрон. Ж.* т. 32, 6, с. 875, 1996.
6. *Kiselev A.A., Kiyaeva O.V., Romanenko L.G.*, in: Workshop "Visual Double Stars", Santiago de Compostela (Spain), ASSL 223, 377, 1997.
7. *Shakht N.A., Afanasyeva A.A., Gorshanov D.L., et al.*, *Proc. IAU Symp 293*, Beijing, Aug 27-31. 2012, (Printing).
8. *Gorshanov D.L., Shakht N.A., Kiselev A.A.*, *Astrophysics*, 49, 3, 386, 2006.
9. *Josties F.J.*, *IAU Coll. 62*, *Lowel obs. Bull.*, 167, 16, 1983.
10. *Vollmann, W.*, *Univ. of South Alabama, Journ. of Double Stars Obs.* v. 4, 2, 74, 2008.
11. *Shakht N.A., Grosheva E.A., Gorshanov D.L.*, *Astrophysics*, 53, 227, 2010
12. *Афанасьева А.А.*, Труды Пулковской молодежной конф. 2012, Изв. ГАО, (в печати).
13. *Strand K.A.* *Astron. J.* 82, 9, 745, 1977.
14. *Proft S., Demleitner M., Wambsganss J.*, *Astron. Astrophys.*, 536, A50, 2011.
15. *Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Ховричева М.Л. и др.* ПАЖ, 36, 5, 2010.
16. *Плюгин Г.А.*, *Известия ГАО*, 193, 92, 1975.
17. *Selsis F., Kasting J.F., Levrard B., et al.*, *Astron. Astrophys.*, 476, 1373, 2007.

STUDY OF MOVEMENT AND MASSES ESTIMATIONS OF NEARBY STARS - CANDIDATES FOR SPACE OBSERVATIONS

Shakht N.A., Afanasyeva. A.A., Vasilkova O.O., Gorshanov D.L.

The Main (Pulkovo) astronomical observatory RAS, St-Petersburg, Russia

The double and multiple stars located nearby of the Sun have been included in Pulkovo program of observations. Now the interest to these objects increased in connection with the observations expected as a result of planned space missions. For some of these stars there are pointings out on presence of dust disks, invisible satellites, and on an opportunity of the existence of planetary satellites, including planets of terrestrial type. Stars 61 Cyg and ADS 7251 are placed in NASA Star and Exoplanets Database as the first targets objects. We have made the revision of orbits of double stars 61 Cyg and ADS 7251 on the basis of modern ground-based and space data. Orbits of double star Stein 2051AB are estimated depending on the expected mass of component B – the white dwarf, which is planned as deflector for observations of microlensing effect by means of telescope Gaia in 2014.04. The limits of habitable zones are calculated for selected stars of the program.

Секция 5

**НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА
АСТРОМЕТРИИ И ГЕОДИНАМИКИ**

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ БОЛЬШОМ ПОЛЕ ЗРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Гусева И.С.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
Санкт-Петербург

Рассматриваются некоторые специфические проблемы, возникающие при обработке наблюдений, выполненных на современных обзорно-поисковых инструментах. Использован опыт работы с ПЗС- телескопом RST-220 (Пулково), обеспечивающим поле зрения более 16 квадратных градусов. Для подобных широкоугольных инструментов основным фактором, влияющим на точность астрометрической редукции, является суммарная дисторсия инструмента (оптики и ПЗС). Ряд задач требует выполнения наблюдений на больших зенитных расстояниях при различных часовых углах (сопровождение астероидов и комет, мониторинг искусственных спутников Земли, наблюдение отдельных астрономических событий, таких как гамма-всплески, вспышки сверхновых и др.). В этом случае необходим адекватный учет дифференциальной астрономической рефракции, нелинейным образом искажающей координатную сетку снимков, и хроматической рефракции, достигающей значительных величин. При наблюдениях вблизи горизонта, вблизи Луны, при сложных погодных условиях полезна фильтрация фона неба, минимальным образом влияющая на изображения точечных объектов.

1. Дисторсия

Современные астрономические инструменты, обеспечивающие большое поле зрения, представляют собой сложные оптико-механические конструкции, оптические схемы состоят из множества разнообразных элементов. В отличие от классических астрографов с радиальной дисторсией, сложные зеркально-линзовые системы весьма чувствительны к малейшей разъюстировке, термическим и механическим деформациям, что вызывает появление дисторсии, плохо описываемой аналитическими функциями. Даже функция рассеяния точки (ФРТ = PSF) в таких системах разная для разных участков поля зрения. На Рис. 1 приведена схема В.Ю. Теребижа (Модифицированный Рихтер-Слевогт) [1], аналогичная схеме используемого нами RST-220 [2]. Видно, как изменяется ФРТ по полю.

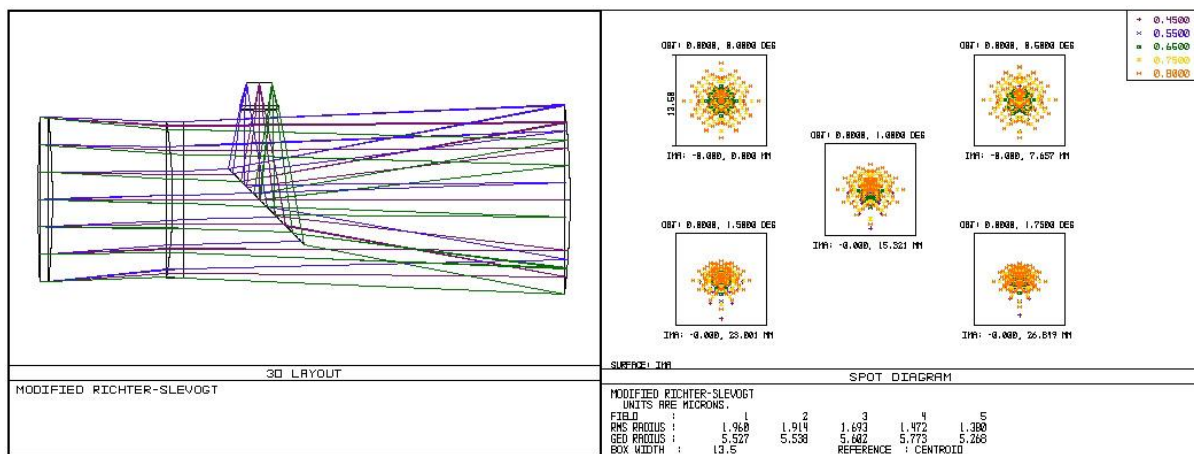


Рис. 1. Модифицированная система Рихтера-Слевогта (В.Ю. Теребиж, [1]).

Проблема учета сложных вариантов дисторсии достаточно общая, она часто встречается при модификации классических инструментов для использования их с ПЗС

путем введения в оптическую схему телескопа редуктора поля. В качестве примера на Рис. 2 приведена дисторсия телескопа, используемого в APASS [3], проекте 5-цветной глобальной фотометрии, результаты которой включены в каталог UCAC-4 [4].

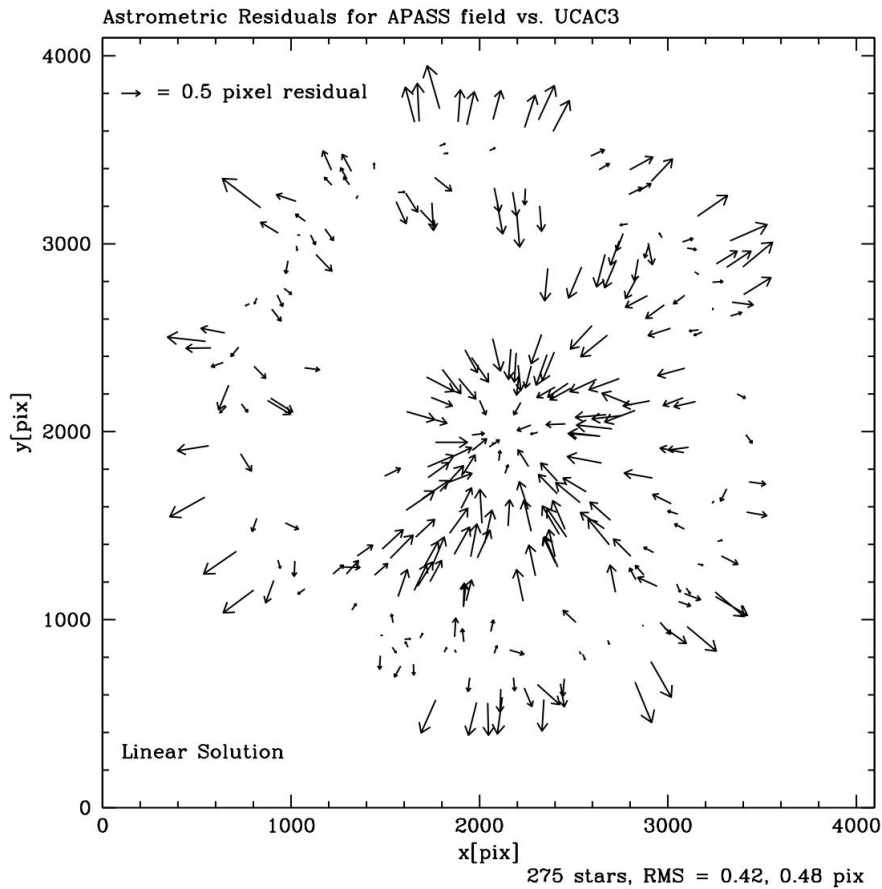


Рис. 2. APASS: невязки опорных звезд после линейной редукции [3].
Поле зрения $2.9^\circ \times 2.9^\circ$, масштаб $2.57''/\text{pixel}$ (периферия снимка не показана).

Предлагаются различные методы учета дисторсии сложных оптических систем, например, использование полиномов вплоть до 7 степени, использование представления дисторсии кубическими или B-сплайнами [5]. Любая полиномиальная модель описывает только радиальные компоненты дисторсии и может существенно отличаться от реальной. К тому же она, как и представление сплайнами, требует большого объема вычислений, и может приводить к искаженным результатам при наличии больших случайных ошибок даже небольшого количества опорных звезд.

Учитывая стабильность инструмента (телескоп + ПЗС) в течение определенного интервала времени, мы предлагаем исследовать дисторсию по серии калибровочных снимков звездного поля в зенитной зоне (с аппроксимацией невязок) и представлять ее в виде матриц поправок dX_{ij} , dY_{ij} для каждого пикселя ПЗС или, например, для блоков размером 10×10 пикселей, то есть в виде, аналогичном матрицам темнового тока и плоского поля. Преимущества такого варианта учета дисторсии в том, что не требуется сложных вычислений при обработке снимков (достаточно модели 6 постоянных) и исключается влияние случайных ошибок опорных звезд каждого отдельного снимка.

На Рис. 3а и 3б приведен пример исправления дисторсии снимков, сделанных с RST-220. Телескоп в данном случае недостаточно отъюстирован, снимки выполнены с остановленным часовым механизмом (звезды в виде треков), масштаб изображения $5''/\text{pixel}$.

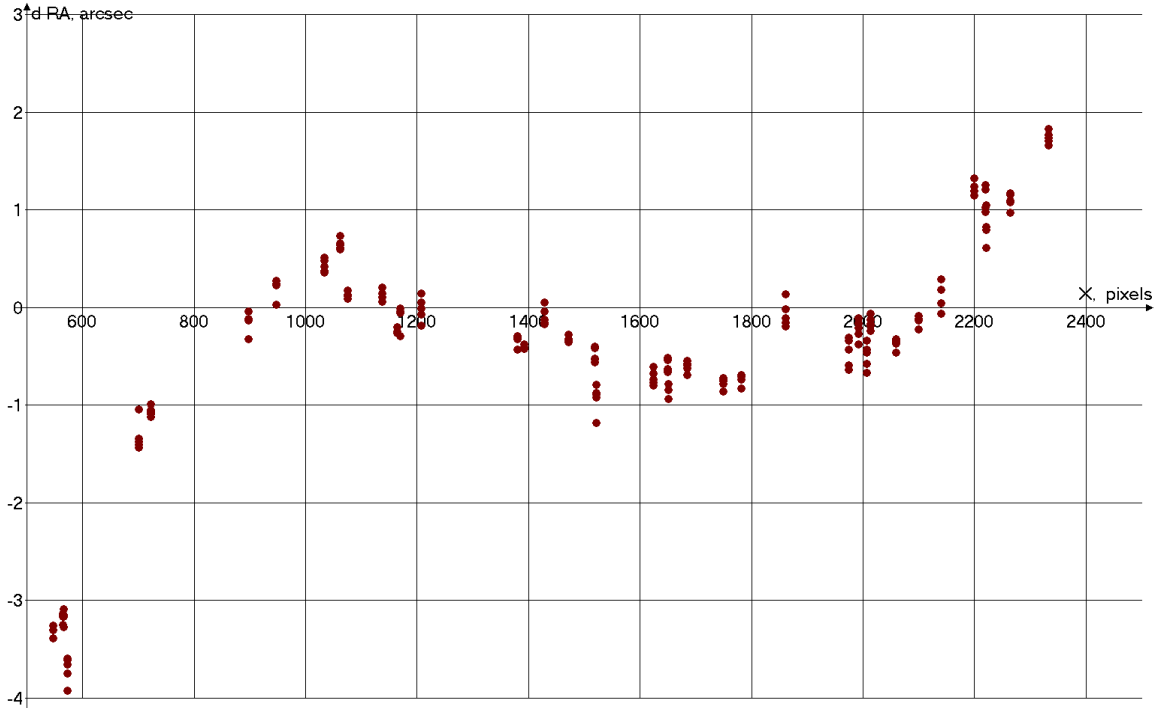


Рис. 3а. Невязки опорных звезд снимка с RST-220 до исправления дисторсии.

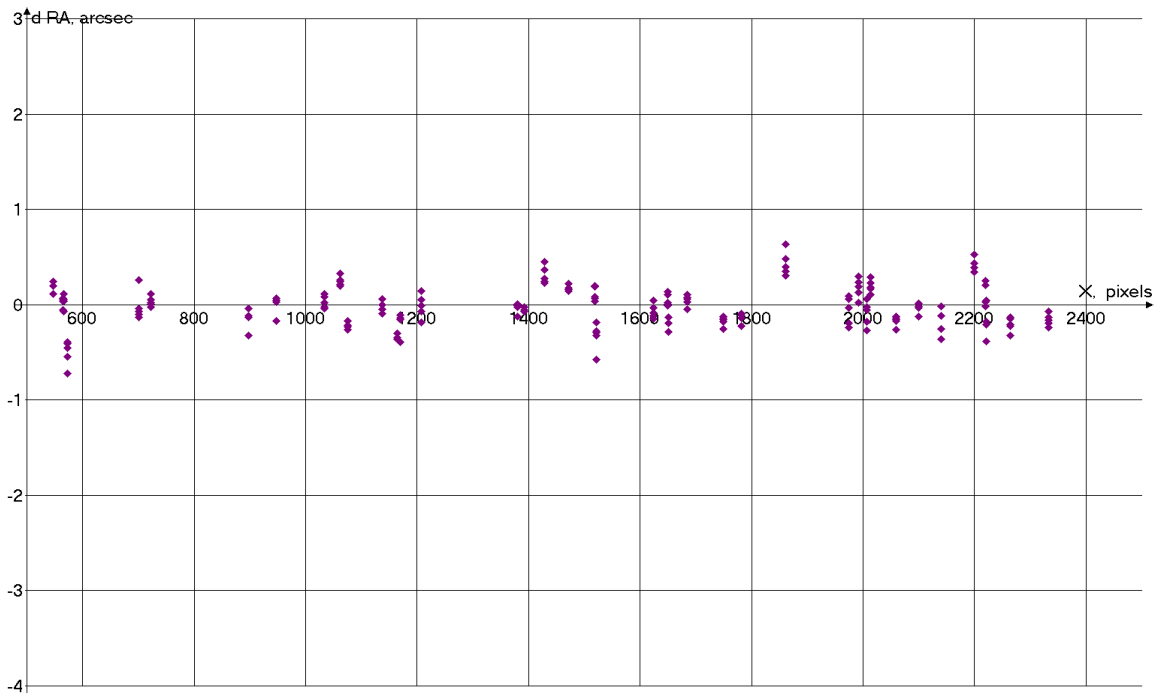


Рис. 3б. Невязки опорных звезд снимка с RST-220 после исправления дисторсии.

2. Дифференциальная и хроматическая рефракция

При наблюдениях на телескопах с большим полем зрения на больших зенитных расстояниях особое внимание следует уделять дифференциальной и хроматической рефракции. Существенно нелинейное изменение рефракции на больших зенитных расстояниях не может быть компенсировано введением большего числа параметров астрометрической редукции. При наблюдениях спутников, астероидов, комет и других

объектов наблюдения зачастую приходится вести при больших часовых углах, а в этом случае влияние рефракции сказывается на точности определений и прямых восхождений, и склонений (см. Рис. 4). Поэтому необходим достаточно адекватный учет астрономической рефракции. Отдельной проблемой является хроматическая рефракция, которая обязательно должна учитываться при наблюдениях на больших зенитных расстояниях.

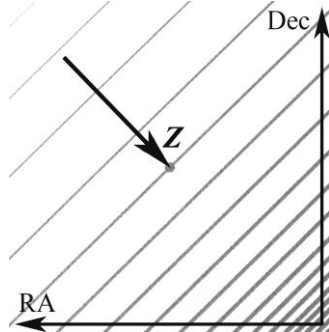


Рис. 4. Иллюстрация влияния рефракции на координатную сетку снимка.

Для более точного учета рефракции при наблюдениях с большим полем зрения на больших зенитных расстояниях необходимо пользоваться полными формулами учета рефракции (вместо традиционных упрощенных формул дифференциальной рефракции), но даже в этом случае возможны небольшие отклонения из-за отличий реальной атмосферы от принятой модели. Один из вариантов более адекватного решения проблемы – анализ невязок опорных звезд по параметру $\text{tg } Z$ и введение соответствующих поправок для всех объектов снимка.

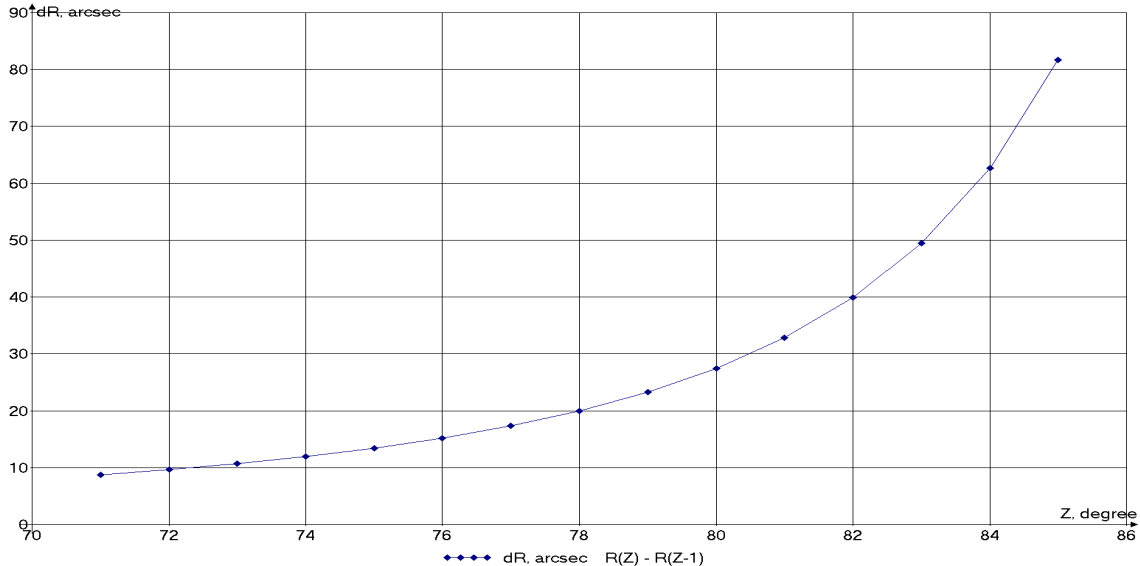


Рис. 5. Изменение рефракции с шагом 1 градус. Например, при поле зрения $4^\circ \times 4^\circ$ и $Z = 80^\circ$ «верхняя» половина снимка «сжимается» на $\sim 7''$, а «нижняя» на $\sim 13''$.

Специфика наблюдений на больших зенитных расстояниях требует адекватного учета хроматической рефракции (см. Рис. 7). Величина поправок за хроматическую рефракцию зависит не только от спектра звезды или иного объекта наблюдений, но и от спектральных характеристик оптических элементов телескопа (включая возможные фильтры, стекла), спектральной чувствительности ПЗС, атмосферной экстинкции в месте наблюдений. Это означает, что поправки за хроматическую рефракцию должны

рассчитываться индивидуально для каждого инструмента и места наблюдений. Только наблюдения с узкополосными фильтрами можно считать свободными от ошибок, обусловленных хроматической рефракцией.

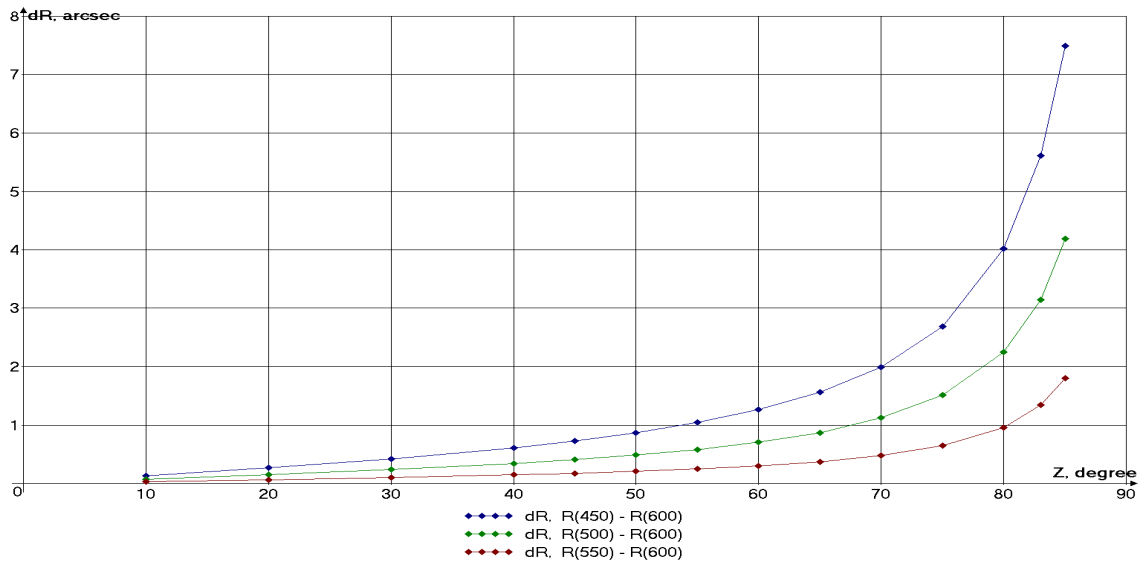


Рис. 6. «Атмосферный спектр» при разных зенитных расстояниях Z: dR – разница между рефракцией при длине волны 600 нм и других: 450, 500, 550 нм.

3. Фильтрация фона неба.

При обработке снимков с большими полями часто необходима фильтрация фона (например, засветка от Луны или иных ярких источников, полупрозрачные облака, градиент к горизонту и т.п.). Известные процедуры занимают много времени, поскольку работают с блочными фильтрами размера $N \times N$, где N – размер регистрируемой части PSF – функции рассеяния точки. Чем больше N , тем больше времени уходит на обработку (как правило, пропорционально N^2).

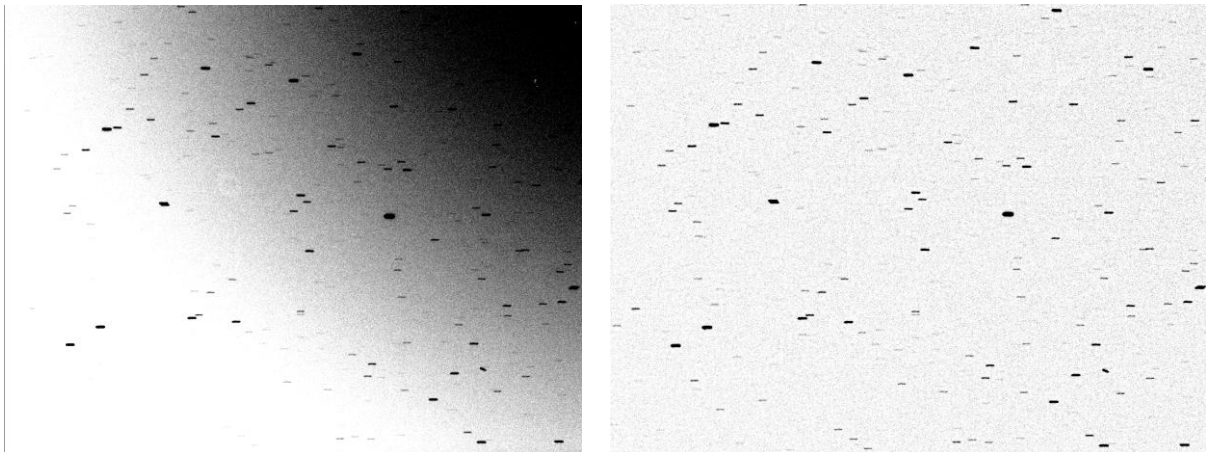


Рис. 7. Фрагмент снимка до и после фильтрации фона.

Предложен метод, использующий при любом N всего 9 точек по периметру и в центре блока $N \times N$. При незначительных вариациях по полю зрения фон неба определяется как одно из наименьших из 9 значений или взвешенное значение из нескольких наименьших (вариант выбирается с учетом шума считывания ПЗС). Для более адекватного учета фона при наличии градиентов фона используется «память» - значения фона

и градиента на предыдущем шаге. Метод работает существенно быстрее известных алгоритмов, к тому же подавляет шум считывания матрицы примерно на 10%.

Соответствующая процедура включена в программный комплекс АПЕКС II.

Литература

1. *В.Ю. Тербиж.* Широкоугольные оптические телескопы. *Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее.* <http://www.astro.spbu.ru/astro2006/present/19.ppt>
2. *Гусева И.С., Ермаков Б.К., Лух Ю.С., Литвиненко Е.А., Гребенская О.Н., Павловский С.Е.* Наблюдения искусственных спутников Земли в ГАО РАН – в настоящем сборнике
3. APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey. <http://www.aavso.org/apass>
4. *Zacharias N., Finch C.T., Girard T.M., Henden A., Bartlett J.L., Monet D.G., Zacharias M.I.* The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). - *Astron. J.* (to be published) <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/322>
5. *M.R. Calabretta, F.G. Valdes, E.W. Greisen, and S.L. Allen.* Representations of distortions in FITS world coordinate systems. *Astronomy & Astrophysics manuscript no. dcs April 27, 2004*

SPECIFICS OF PROCESSING OBSERVATIONS OBTAINED WITH THE WIDE FIELD INSTRUMENTS

Guseva I.S.

*Central Astronomical Observatory of the RAS (at Pulkovo)
St Petersburg, Russia*

Some specific problems are considered that arise during the data processing of observations obtained with the modern wide-field instruments. Our experience is based on the work with the CCD-telescope RST-220 (at Pulkovo) covering the field of view of more than 16 square degrees. The total distortion of the telescope and the CCD may be the main source of errors of the observations fulfilled with such wide field instruments. Various astronomical objects (asteroids and comets, artificial satellites of the Earth, specific astrophysical events like GRB, supernovae et al.) should be observed very often at low altitudes, at different hour angles. In this case it is necessary to take into account accurately the differential astronomical refraction (peculiar distortion of the coordinate grid of the frame) and the chromatic refraction that may be of significant value. Sometimes the sky background correction is useful when the observations are made near the horizon, near the Moon, at the bad weather conditions). Such a procedure should change the images of objects as little as possible in order to provide the correct coordinates and photometry determination.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ГАЛАКТОЦЕНТРИЧЕСКУЮ ПРОТЯЖЕННОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ДВИЖЕНИЯ

Захожай В.А.

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина

Анализируется возможность использования в качестве базы для измерения расстояния до космических объектов – путь, который проходит Солнце за определенный отрезок времени, двигаясь вокруг центра Галактики. Выведена формула для определения расстояния до космических объектов, учитывающая его галактоцентрическое движение. Приводится краткий обзор определения угловой ω_0 и линейной θ_0 галактоцентрических скоростей Солнца и его расстояния до центра Галактики R_0 , необходимые для вычисления галактоцентрической базы протяженности солнечного движения.

1. Введение

В геометрических методах вычисления расстояния используется треугольник, в вершине которого находится исследуемый объект, с которого база (с известными линейными размерами и связанная с наблюдателем), стягивается параллактическим углом. В качестве базы, как известно, используются расстояние между Солнцем и Землей, а также путь перемещения Солнца вследствие его (стандартного) движения относительно центроида звезд ярче $5-6^m$. Очевидно, что существует еще одна база, которая до настоящего времени не получила применения. Это годичный путь галактоцентрического движения Солнца при его скорости $\theta_0 = 220 \div 250$ км/с, который составляет $d \approx 50$ а.е.. Это значение примерно в 12 раз превышает базу, используемую для вычисления вековых параллаксов звезд. Поэтому, представляет интерес проанализировать эту величину с целью использования протяженности солнечного галактоцентрического движения в качестве базы для измерения расстояний до космических объектов.

Использование протяженности галактоцентрического пути движения Солнца в качестве базы для измерения геометрического параллакса сопряжено с трудностью его точного измерения на современном этапе астрометрических измерений. Такие измерения должны базироваться на высокоточных определениях значений угловой ω_0 и линейной θ_0 скоростей галактоцентрического движения Солнца, а также расстояния до центра Галактики R_0 . При наблюдении исследуемого объекта в течении времени Δt , для определения базы d необходимо знание либо линейной галактоцентрической скорости движения Солнца θ_0 ($d = \theta_0 \Delta t$), либо его угловой скорости ω_0 , и расстояния до центра Галактики R_0 ($d = R_0 \omega_0 \Delta t$). Линейная скорость θ_0 определялась только по измерениям ω_0 и R_0 в предположении о круговой галактоцентрической орбите Солнца ($\theta_0 = \omega_0 R_0$).

Первые определения значений ω_0 и R_0 были выполнены Л. Струве (из анализа собственных движений звезд, содержащих составляющую их галактоцентрического движения, в приближении твердотельного вращения Галактики [34] и Шепли (из анализа удаленностей шаровых скоплений от Солнца [33]). За первые 40 лет (1887–1927 гг.) определения угловой скорости вращения Галактики (в приближении её твердотельного вращения), как следует из анализа проведенного в [9], наиболее надежными являлись результаты Шарье, согласно которых эти значения равны $0''.0035 \text{ год}^{-1}$ [12] и $0''.0024 \text{ год}^{-1}$ [13].

С конца 1920-х гг. основным методом определения ω_0 становится метод Оорта, разработанный для исследования дифференциального галактического вращения, по постоянным A и B , носящим его имя: $\omega_0 = A - B$ [24-28]. Сводка и анализ первых постоян-

ных Оорта, выполненных до 1934 г. приведена в [9], а вычисленные по ним угловые скорости попадают в интервал значений $[\omega_0]_1 = 0''.0043-0''.00826 \text{ год}^{-1}\text{кпк}^{-1}$. 15 вычисленных и заслуживающих доверия постоянных значений A и B в период 1931–1953 гг. имеется в [8], которые попадают в интервал $[\omega_0]_2 = 0''.00485-0''.0068 \text{ год}^{-1}\text{кпк}^{-1}$. Наименьшее из них значение ω_0 было получено Оортом [24, 25], наибольшее – Линдбладом [19-21]. Интервал линейных скоростей, соответствующий приведенным значениям $[\omega_0]_1$ для расстояний $[R_0]_1 = 5.1-10.0 \text{ кпк}$, полученных в период 1927–1934 гг., есть: $[\theta_0]_1 = 104-392 \text{ км/с}$. Для $[R_0]_2 = 7.1-10.0 \text{ кпк}$ (1931–1960 гг.) и $[\omega_0]_2 - [\theta_0]_2 = 163-322 \text{ км/с}$. Отдельные значения линейных скоростей, определенные в оригинальных работах и вычисленные по конкретным значениям R_0 (приведенным в статьях), – следующие: $\theta_0 = 250 \text{ км/с}$ [27], 259 км/с [28], 275 км/с [29, 30], 300 км/с [10]. К 1960-му году МАС приняло значения $R_0 = 10.0 \text{ кпк}$ и $A - B = 25 \text{ км/(с·кпк)}$ [18, 32].

За последние 50 лет исследований прослеживается тенденция уменьшения определяемых значений R_0 , θ_0 и сужения интервала $[A - B]$. Перечень и анализ этих величин за период 1974–1986 гг. приведен в работе [18]. Их значения находятся в пределах: $[R_0]_3 = 7-11 \text{ кпк}$ и $[\theta_0]_2 = 200-230 \text{ км/с}$, $[A - B] = 21.4-29.6 \text{ км/(с·кпк)}$, а рекомендованные МАС (1986 г.) – следующие: $R_{0_1986} = 8.5 \pm 1.1 \text{ кпк}$, $\theta_{0_1986} = 222 \pm 20 \text{ км/с}$, $(A - B)_{1986} = 26.4 \pm 1.4 \text{ км/(с·кпк)}$.

В 1990–2000-е гг. продолжилась тенденция уменьшения определяемых R_0 [5-7], а измеренные значения угловой скорости или попадают в интервал $[A - B]_{1986}$ [2], или превышают его в пределах 20% [1, 3, 11]. Так, например, в работе [1] было вычислено среднее значение угловой скорости $(A - B)$, по полученным с середины 1980-х гг. до 2000 г. $[15-18, 22] - \langle A - B \rangle = 26.9 \text{ км/(с·кпк)} \approx [A - B]_{1986}$.

Значения вычисленных расстояний до центра Галактики после 2000 г., определяемые различными методами меньше 8 кпк. Такие результаты вычисления R_0 оказались следующими: по анализу галактических ОБ-ассоциаций и цефеид $R_0 = 7.1 \text{ кпк}$ [4] и $R_0 = 7.8 \pm 0.6 \text{ кпк}$ [23], соответственно. Вычисление галактоцентрической орбиты звезды S2 позволило определить ее динамический параллакс, согласно которого $R_0 = 7.94 \pm 0.42 \text{ кпк}$ [14]. Применение длиннобазовой радиоинтерферометрии к измерению тригонометрического параллакса H_2O -мазера Sgr B2 дало значение $R_0 = 7.9 \pm 0.8 \text{ кпк}$ [31]. Такие значения удаления Солнца от центра Галактики в сочетании с тенденцией увеличения определяемых значений угловой скорости, вычисляемой как $(A - B) > 26 \text{ км/(с·кпк)}$, ведут к полученному интервалу значений $[\theta_0]_3 = 185-220 \text{ км/с}$.

Остающаяся неоднозначность величин ω_0 , θ_0 , R_0 связана со многими причинами. Как следует из анализа перечисленных выше работ, получаемые значения ω_0 , θ_0 , R_0 остаются зависимыми от природы космическим объектов, выбранных в качестве выборок, параметров фигурирующих центроидов, по которым они вычисляются. Возможно, остается еще и зависимость от галактических широт, на которых находятся объекты выбираемых центроидов, как это проявилось еще в результатах Оорта [25] при исследовании выборки предварительного каталога Босса.

Таким образом, существует необходимость вычисления ω_0 , θ_0 и R_0 как хорошо разработанными старыми, так и новыми методами для установления их более точных значений. Это позволит вычислить галактоцентрическую базу протяженности солнечного движения и применить ее для определения геометрических расстояний в более значительной околосолнечной окрестности, чем представляется это сделать в настоящее время. Разработке математического алгоритма решения такой задачи и посвящена настоящая статья.

2. Расстояние между движущимися Солнцем и космическим объектом

Представим галактоцентрические движения космического объекта и Солнца в виде аксонометрической схемы, представленной на рис. 1а. Плоскости, в которых показаны орбитальные движения объекта и Солнца, – не совпадают. В начальный момент времени t_0 Солнце и объект показаны в точках T_0 и S_0 , а через время $\Delta t = t - t_0$: T и S , соответственно, так, что расстояния между ними изменяются от r_0 до r . Солнце и объект движутся с угловыми скоростями ω_0 и ω по круговым орбитам с радиусами $R_0 = T_0O = TO$ и $R = S_0O = SO$. В соответствии с определением галактических сферических координат, на интервале времени Δt галактические долгота и широта объекта изменяются от l_0 до l и от b_0 до b . Под параллактическим смещением будем понимать угол $\angle p = \angle TST_0$, стягивающий положение космического объекта в момент времени t с направлениями на точки T_0 и T – положения Солнца, разделенные интервалом времени Δt и расстоянием (базой) – $d = T_0T$. За галактоцентрическое здесь принято движение по часовой стрелке (показанное на рис. 1), если смотреть с северного полюса галактической сферической системы координат. Задача состоит в поиске зависимости расстояния между Солнцем и космическим объектом r в зависимости от базы наблюдения и параллактического смещения. Специфика задачи состоит в том, что при движении Солнца вокруг центра Галактики, изменяется система координат: в галактической системе координат нуль пункта долготы связывается с положением на центр Галактики в любой момент времени ($l = 0$). Галактические долготы удаленного квазара Q на бесконечности – l_{q_0} до l_q в моменты времени t и t_0 , соответственно.

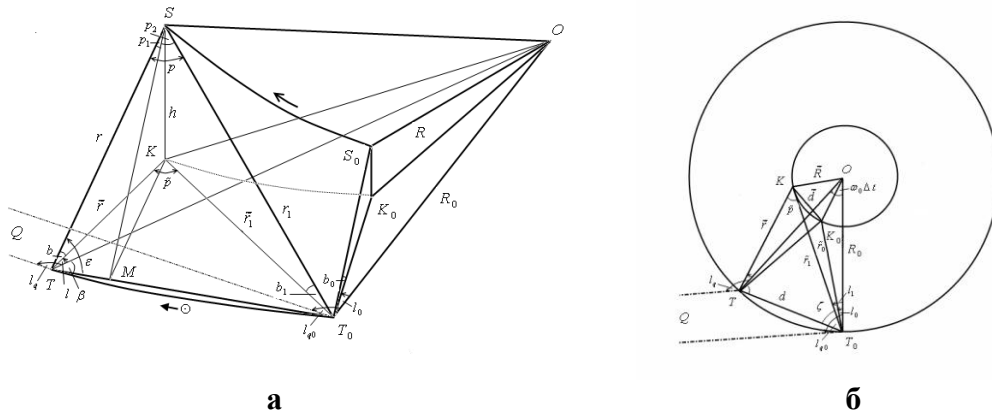


Рис. 1.

Анализ параметров пирамиды (в которой $\angle SKT = \angle SKT_0 = \angle SMT_0 = \pi/2$) позволяет связать расстояние r между Солнцем (T) и объектом (S) в момент времени t с базой d ($= T_0T$) и углами, указанными на рис. 1:

$$r = \frac{d}{(p + \operatorname{ctg} \varepsilon - \cos \varepsilon) \sin \varepsilon}, \quad (1)$$

которые, в конечном итоге можно выразить через галактические координаты объекта (l и b) и галактоцентрическую угловую скорость Солнца (ω_0):

$$\sin \varepsilon = \sqrt{\sin^2 b + \cos^2 b \sin^2 (l + \beta)}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\pi - \omega_0 \Delta t}{2}. \quad (3)$$

Вычисление параллактического угла p заслуживает отдельного исследования, поскольку технология его вычисления отличается от принятой в астрометрии. Здесь, в

процессе движения вокруг галактического центра, изменяется физическое положение Солнца относительно, например, удаленных квазаров, но положение на центр Галактики соответствует строго галактической долготе $l = 0$. Вычисление базы d также требует отдельного рассмотрения, поскольку от точности его значения зависит точность определения расстояния до космических объектов.

3. Параллактический угол и протяженность Солнечного галактического движения

Для вычисления p удобно воспользоваться проекцией движения космического объекта на плоскость, в которой вращается Солнце вокруг центра Галактики (см. рис. 1б, на котором обозначения совпадают с рис. 1а): вычислить значение угла $\angle \tilde{p}$, а затем связать его с искомым параллактическим углом p . Пунктиром с точками показано направление на произвольный квазар Q , удаленный на «бесконечность» (что подразумевает параллельность прямых $QT_0 \parallel QT$), откуда следует, что:

$$l_1 = l - \omega_o \Delta t. \quad (4)$$

Анализ треугольников ΔTKT_0 , ΔTST_0 , с учетом теорем синусов и косинусов, а также малости параллактического угла, его проекции на плоскость гелиоцентрического вращения Солнца и значения отношения $d^2/r^2 \ll 1$ позволяет связать угол $\angle \tilde{p}$ с параллактическим углом p :

$$\tilde{p} = \frac{\pi - \omega_o \Delta t}{2} - l_{qo} = p \sqrt{1 - 2 \frac{d}{r} \cos \varepsilon} \frac{\sin \zeta}{\cos b \sin \varepsilon}. \quad (5)$$

Подстановка сюда выражения (1) и последующее разложение степенной составляющей в ряд до первого слагаемого, позволяют записать формулу для параллактического угла

$$p = \Omega_{ot} \frac{\cos b}{\sin \zeta} \cdot \frac{\sin^2 \varepsilon (\sin \varepsilon + \cos^2 \varepsilon)}{1 + \sin \varepsilon \cos \varepsilon}, \quad (6)$$

где $\Omega_{ot} = \frac{\pi - \omega_o \Delta t}{2} - l_{qo}$,

$$\sin \zeta = \sin \left(\frac{\pi + \omega_o \Delta t}{2} - l \right) = \cos \left(l - \frac{\omega_o \Delta t}{2} \right).$$

Вычисление базы d параллактического смещения для определения расстояний до космических объектов можно осуществить двумя способами: по угловой ω_b и линейной θ_o галактоцентрическим скоростям движения Солнца при известном его расстоянии до центра Галактики – R_o . Ввиду малости угла $\omega_b \Delta t$, база d , являющаяся, фактически, хордой T_0T на рис. 1а и 1б, неотличима от дуги T_0T . Таким образом, очевидно, что значение базы может быть записано в следующем простом виде

$$d = \omega_o \Delta t R_o = \theta_o \Delta t. \quad (7)$$

Таким образом, формула для вычисления расстояния до космических объектов (1) полностью определена. В ее состав входят, как углы, которые необходимо измерить из наблюдений, так и величины ω_b , θ_o , R_o , которые уже давно используются в звездной астрономии при решении различных задач.

4. Выводы

1. Практическое использование полученных выражений подразумевает привлечение данных о кинематических характеристиках галактоцентрического движения Солнца, полученных методами астрометрии, звездной астрономии, длиннобазовой радиоинтерферометрии и космической астрометрии. Кроме высокоточных определений коор-

динат исследуемого объекта, в моменты наблюдений требуются аналогичные позиционные наблюдения квазаров и радиисточников для установления галактоцентрической базы наблюдения.

2. Одноразовых высокоточных позиционных наблюдений интересующих космических объектов недостаточно для определения до них расстояний предлагаемым методом. Необходимы проведения их позиционных наблюдений, как минимум, с двух положений Солнца на галактоцентрической орбите. Чем меньше Δt , тем выше должна быть точность позиционных измерений.

3. Самая высокая точность в позиционных наблюдениях была реализована в космической миссии HIPPARCOS – $0''.002 \div 0''.005$, полученной примерно по 35 измерениям каждой из звезд $6^m \div 11^m$. Такая точность является, по-видимому, предельной для выявления галактоцентрического движения Солнца $\omega_b \approx 0''.0005 \text{ год}^{-1}$ в течение $\Delta t = 20$ лет (объект сместится по небесной сфере на $\omega_b \Delta t \approx 0''.01$). Для обнаружения такого эффекта с гиппаркосовской точностью, наблюдаемый объект необходимо пронаблюдать с разностью в 20 лет.

4. Поскольку при реализации миссии HIPPARCOS производилась только одна серия усреднения наблюдений, воспользоваться такими результатами для вычисления галактических координат космических объектов и квазаров для двух временных эпох не представляется возможным. Такая возможность возникнет после реализации миссии GAIA. За ≈ 20 лет положения космических объектов должны сместятся за счет галактоцентрического движения Солнца на $\omega_b \Delta t \approx 0''.010$. Точности измерений миссии GAIA ($\approx 0''.00001 \div 0''.0002$) должно быть достаточно для реализации предложенного метода.

Литература

1. *Бобылев В.В.* Определение кривой вращения звезд пояса Гульда на основе формул Боттлингера. Письма в АЖ, 2004, т. 30, № 3, 185-195.
2. *Бобылев В.В., Байкова А.Т., Лебедева С.В.* Параметры вращения галактики по данным о рассеянных скоплениях звезд. Письма в АЖ, 2007, т. 33, № 11, 809-818.
3. *Бобылев В.В., Байкова А.Т.* Кинематика Галактики по ОБЗ-звездам с расстояниями, определенными по линиям межзвездного CaII. Письма в АЖ, 2011, т. 37, № 8, 575-585.
4. *Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С.* Тригонометрические параллаксы и кинематически согласованная шкала расстояний до ОБ-ассоциаций. Письма в АЖ, 2001, т. 27, № 1, 68-75.
5. *Никифоров И.И.* Моделирование закона вращения плоской подсистемы и определение расстояния до центра Галактики: реалистичность модели и оптимизация ее сложности. Астрофиз., 1999, № 42, вып. 3, 399-406.
6. *Никифоров И.И.* Моделирование закона вращения плоской подсистемы и определение расстояния до центра Галактики: анализ данных о газовых комплексах. Астрон. журн., 1999, т. 76, № 6, 403-418.
7. *Никифоров И.И., Петровская И.В.* Расстояние от Солнца до центра Галактики и кривая вращения по данным о кинематике нейтрального и ионизированного водорода. Астрон. журн., 1994, т. 71, № 5, 725-736.
8. *Паренаго П.П.* Курс звездной астрономии. – М.: ГИТТЛ, 1954, 476 с.
9. *Полак И.Ф.* Введение в звездную астрономию. – М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935, 256 с.
10. *Шепли Х.* Галактики. – М.-Л.: ОГИЗ ГИТТЛ, 1947, 226 с.
11. *Bobylev V.V., and Bajkova A.T.* Galactic Parameters from Masers with Trigonometric Parallaxes. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 2010, V. 408, 1788-1795.
12. *Charlier, C.V.L.* Stars, Motions and Distances, An Investigation on the Motion of the Stars. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1913, V. 73, 486-492.
13. *Charlier, C.V.L.* The Motion and the Distribution of the Stars. – Univ. of Calif. Press, Ser.: Memoirs of the University of California, 1926, V. 7.

14. *Eisenhauer F., Schodel R. Genzel R. et al.* A Geometric Determination of the Distance to the Galactic Center. *Astrophys. J.*, 2003, V. 597, 121-124.
15. *Feast M.W., Whitelock P.A.* Galactic kinematics of Cepheids from Hipparcos proper motions. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1997, V. 291, 683-693.
16. *Feast M.W., Pont F., Whitelock P.A.* The Cepheid period-luminosity zero-point from radial velocities and Hipparcos proper motions. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1998, V. 298, L43-L44.
17. *Hanson, R.B.* Lick northern proper motion program. II - Solar motion and Galactic rotation. *Astron. J.*, 1987, V. 94, No. 2, 409-415.
18. *Kerr, F. J., Lynden-Bell, D.* Review of galactic constants. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1986, V. 221, 1023-1038.
19. *Lindblad B.* On the Evolution of Stellar systems. *VJS*, 1926, V. 61, P. 265-267.
20. *Lindblad B.* On the state of motion in the Galactic System. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1927, V. 87. – P. 553.
21. *Lindblad B.* The velocity ellipsoid, galactic rotation and the dimension of the stellar system. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1930, V. 90, 503-516.
22. *Lindblad P.O.* On the rotation of Gould Belt. *Astron. Astrophys.*, 2000, V. 363, 154-158.
23. *Majaess D.J., Turner D.G., Lane D.J.* Characteristics of the Galaxy according to Cepheids. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2009, V. 398, Iss. 1, 263-270.
24. *Oort, J.H.* Observational evidence confirming Lindblad's hypothesis of rotation of the galactic system. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, 1927, V. 3, 275-282.
25. *Oort, J.H.* Investigations concerning the rotational motion of the galactic system together with new determinations of secular parallaxes, precession and motion of the equinox. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, 1927, V. 4, 79-89.
26. *Oort, J.H.* Dynamics of the Galactic System in the Vicinity of the Sun. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, 1928, V. 4, 269-284.
27. *Oort, J.H.* Stellar Motions. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1939, V. 99, 369-384.
28. *Oort, J.H.* Problems of Galactic Structure. *Astrophys. J.*, 1952, V. 116, 233-250.
29. *Plaskett J.S., Pears J.A.* The motions and distribution of interstellar matter. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1930, V. 90, 243-268.
30. *Plaskett J.S., Pears J.A.* The distance and to the gravitational Centre of the Galaxy from the motion of the O5 to B7 stars. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1934, V. 94, 679-712.
31. *Reid M.J., Menten K.M., Zheng X.W., Brunthaler A., Xu Y.* A trigonometric parallax of Sgr B2. *Astrophys. J.*, 2009, V. 705, 1548-1553.
32. *Schmidt M.* Rotation parameters and distribution of mass in the Galaxy. – In *Stars and Stellar Systems*, 1965, V. 5, Galactic Structure, ed. A. Blaauw (Chicago: Univ. Chicago Press), 513.
33. *Shapley H.* Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VII. The distances, distribution in space, and dimensions of 69 globular clusters. *Astrophys. J.*, 1918, V. 48, 154-181.
34. *Struve L.O.* Bestimmung der Constante der Präcession und der eigenen Bewegung des Sonnensystems (Memoires de l'academie Imp. Des sciences de St.-Petersbourg, VII, serie, tome XXXV, n.3). These: Scieces: Dorpat, 1887.

THE GEOMETRICAL METHOD OF THE DISTANCE DETERMINATION TOWARD THE COSMIC OBJECTS USING THE LENGTH OF SOLAR ORBITAL MOTION WITH RESPECT TO THE GALAXY CENTER

Zakhozhay V.A.

V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

The possibility to use the path that Sun passes in a definite time period with respect to the Galaxy center as a basis for the distance determination to the cosmic objects is analyzed. The formula that permit to determine the distances to cosmic objects taking into account solar galactocentric motion is derived. The short overview of the angular ω_0 and linear θ_0 galactocentric solar velocities and its distance toward the Galactic center R_0 determination is presented. All these parameters are required for the galactocentric base length of the solar motion.

ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ДЛЯ ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

Малков О.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Международная виртуальная обсерватория представляет собой мощную виртуальную среду, предназначенную для увеличения возможностей астрономических исследований и научного выхода данных. Виртуальная обсерватория интегрирует в единую систему гигантские астрономические архивы и базы данных, распределенные по всему миру, а также инструменты анализа данных и вычислительный сервис, используя при этом набор однородных стандартов и технологий. Международная виртуальная обсерватория включает в себя все значительные национальные и международные проекты по созданию виртуальных обсерваторий, основная цель которых - объединить существующие архивы наземных и космических инструментов и обеспечить исследователям и общественности удобный доступ к ним. Проект "Международная виртуальная обсерватория" появился около десяти лет назад, и основные его достижения в звездной астрономии обсуждаются в настоящей статье.

1. Введение

Международная виртуальная обсерватория представляет собой мощную виртуальную среду, предназначенную для увеличения возможностей астрономических исследований и научного выхода данных. Виртуальная обсерватория интегрирует в единую систему гигантские астрономические архивы и базы данных, распределенные по всему миру, а также инструменты анализа данных и вычислительный сервис, используя при этом набор однородных стандартов и технологий. Международная виртуальная обсерватория включает в себя все значительные национальные и международные проекты по созданию виртуальных обсерваторий, основная цель которых - объединить существующие архивы наземных и космических инструментов и обеспечить исследователям и общественности удобный доступ к ним. Эта задача представляется чрезвычайно важной не только из-за колоссального объема астрономических данных, но и их спектрального разнообразия (от рентгена до радио). Каждый спектральный диапазон предоставляет свою, уникальную информацию о небесном объекте или явлении; при этом требуется специализированная экспертиза для правильной интерпретации. Вся эта информация также интегрируется в Международной виртуальной обсерватории и позволяет синтезировать данные, чтобы использовать их в конкретных научных приложениях.

Набор однородных стандартов и технологий, необходимый для успешного функционирования виртуальной обсерватории, разрабатывает, внедряет и поддерживает Альянс "Международная Виртуальная обсерватория" – международный союз национальных виртуальных обсерваторий, призванный координировать деятельность по стандартизации описания, поиска, доступа и публикации данных. Одним из основателей и активным участником Альянса является Российская виртуальная обсерватория [1].

Проект "Международная виртуальная обсерватория" появился около десяти лет назад, и за это время успешно проэволюционировал от чисто демонстрационного уровня к набору серьезных инструментов для анализа астрономических данных и извлечения реальных научных результатов. Первыми научными успехами Виртуальной обсерватории были поиск коричневых карликов в обзорах 2MASS и SDSS [2] и идентификация большого числа оптически слабых квазаров второго типа [3]. Некоторые более современные достижения Виртуальной обсерватории в области звездной астрономии об-

суждаются в данной статье. В заключительном разделе даются некоторые практические рекомендации по использованию и созданию инструментов ВО.

2. Новые рассеянные скопления

Большие многоцветные фотометрические обзоры, такие как Two Micron All Sky Survey (2MASS), UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS), INT Photometrical H-alpha Survey (IPHAS), в изобилии содержат данные, которые могут быть использованы для изучения подсистемы рассеянных скоплений Галактики. Типичный набор инструментов исследования включает в себя диаграммы цвет-светимость, диаграммы звездной плотности, а также их комбинации в многопараметрическом пространстве координат. Виртуальная обсерватория предоставляет удобное средство для работы с такими данными, а именно протокол *ConeSearch*, который по своему замыслу абстрагирован от деталей организации конкретного каталога. Он позволяет использовать приложения для однородного и одновременного анализа нескольких каталогов, или, например, неоднократно осуществлять произвольные запросы на выборку по координатам из одного (в том числе, всенебесного) каталога.

Одновременно аппроксимируя изохроны и анализируя пространственное распределение звезд, отобранных по их цветам и блескам (см. детали метода в [4,5]), в работе [6] был сконструирован крупнейший каталог, содержащий около 200 новых рассеянных скоплений с однородными параметрами, полученными из 2MASS и UKIDSS. Каталог был опубликован как ВО-ресурс {<http://ocl.sai.msu.ru>} [7], с помощью которого любой пользователь может скомпилировать собственный каталог, содержащий, например, собственные движения или более глубокую фотометрию, с использованием собственных данных.

Мощным инструментом для открытия новых рассеянных скоплений служит также оптическая и инфракрасная фотометрия и позиционная информация из фотометрико-кинематических оптических обзоров Hipparcos, ASCC-2.5, PPMXL. Так, в [8] были представлены данные о 109 новых скоплениях.

3. Кросс-матчинг больших обзоров и параметризация звезд

Цветовые диаграммы могут служить в качестве мощного инструмента для определения распределения энергии в спектрах звезд и, следовательно, для параметризации звезд. Эта задача неразрывно связана с проблемой определения межзвездного поглощения: распределение энергии должно быть скорректировано за покраснение света. Недавно сконструированные большие астро-фотометрические обзоры (2MASS, GALEX, SDSS, DENIS, UKIDSS и др.) и ВО-инструменты для кросс-матчинга объектов в этих обзорах дают возможность получить многоцветную (до 10-15 показателей цвета) фотометрию для миллионов объектов [9]. На основании этой информации могут быть построены цветовые диаграммы, позволяющие классифицировать и параметризовать объекты. Для корректной параметризации используются, помимо каталогизированных данных, кривые реакции исследуемых обзоров, закон межзвездного поглощения и эмпирические распределения энергии в спектрах звезд различных спектральных типов. Проблемы и предварительные результаты конструирования многоцветных диаграмм и параметризации объектов обсуждаются в [10, 11].

4. Затменные двойные и База данных двойных звезд

Инструменты Виртуальной обсерватории использовались для исследования затменных двойных. Новый каталог затменных двойных был создан в [12]. В работе [13] каталог использовался для создания наиболее полного набора правил для классификации затменных двойных и, с использованием ВО-инструментов, для создания процеду-

ры классификации даже для случая неполного набора данных. Разработанная процедура была применена к большим спискам затменных двойных, в том числе, полученным из наблюдений эффектов микролинзирования. Около 5300 систем были классифицированы впервые. Эти данные могут быть использованы для последующего определения астрофизических параметров компонентов этих двойных. Новая версия каталога [14] содержит параметры и морфологические типы кривых блеска для 7200 систем, также, по возможности, дана спектральная классификация. В частности, в каталог включены недавно опубликованная информация о классификации 1352 систем. Таким образом, каталог представляет собой крупнейший список затменных двойных, классифицированных из наблюдений.

Этот, а также другие основные каталоги двойных звезд различных типов загружаются в Базу данных двойных звезд (Binary star DataBase, BDB). Создание каталогов / баз данных двойных звезд имеет длинную историю, но публиковались преимущественно, каталоги двойных одного определенного типа: визуальные, интерферометрические, спектроскопические и пр. Однако детальное исследование звездных популяций не может быть ограничено одним типом двойных: так, для определения истории звездообразования необходимо анализировать данные для всех типов двойных – от самых широких (пары с общим собственным движением) до самых тесных (спектроскопические, затменные, рентгеновские с вырожденными компонентами). Также, параметризация компонентов и орбит двойных систем не может ограничиваться одним типом двойных. Таким образом, существующие и распределенные по различным центрам данные сведения о разных типах двойных должны быть объединены. Решением этой проблемы призвана служить BDB, создаваемая поначалу в Обсерватории Безансона (Франция) и переданная в последствие для модернизации в Институт астрономии РАН. Основные цели и идеи BDB обсуждаются в [15], текущая версия базы данных описана в [16].

5. Молодые звезды и коричневые карлики

Исследование собственных движений объектов в облаках созвездия Lurus с помощью инструментов ВО были проведены в работе [17]. Используя доступные кинематические данные, авторы протестировали на членство в объекты облаков Lurus звезды, найденные в программе наблюдений телескопа Spitzer и ряда оптических обзоров. Были также исследованы соотношения между собственными движениями и другими свойствами объектов с целью получения информации об их образовании и ранней эволюции. Авторы скомпилировали список возможных членов облаков Lurus, содержащий всю доступную информацию об их спектральной классификации и физических параметрах. ВО-инструменты использовались для кросс-матчинга объектов этого списка с доступной астрометрической каталогизированной информацией с целью вычисления собственных движений. Финальный набор содержит источники с блеском $I < 16$ mag и массой (по оценкам) более 0.1 масс Солнца.

В соответствии с кинематической информацией источники можно поделить на две основные группы. Первая содержит объекты с большими собственными движениями, согласующимися с данными для других населений Пояса Гулда. Кроме того, их пространственное распределение, а также оптические и ближние-ИК показатели цвета согласуются с данными, имеющимися для объектов, заведомо принадлежащих к облакам Lurus. Во вторую группу входят объекты с небольшими и случайно ориентированными собственными движениями, расположенные преимущественно за пределами центральных зон облаков Lurus. В работе был сделан вывод о принадлежности членов этой группы к объектам фона, не связанных с облаками Lurus. В то же время члены первой, высокоскоростной группы, представляют объекты населения облаков Lurus.

Результаты исследования суб-звездных объектов инструментами Виртуальной обсерватории были опубликованы в [18]. Здесь исследовались объекты, расположенные в 45' областях, окружающих две молодые массивные звездные системы в Поясе Ориона. Эти области являются достаточно молодыми (моложе 10 миллионов лет), имеют низкое поглощение и расположены недалеко от молодого (примерно 3 Ма) рассеянного звездного скопления σ Orionis, богатого коричневыми карликами и объектами планетных масс.

Авторы использовали инструменты ВО, астро-фотометрические обзоры Tycho-2, DENIS, 2MASS, 10 контрольных площадок на тех же галактических широтах, а также рентгеновские, инфракрасные и спектроскопические данные из литературы. Был скомпилирован исчерпывающий список известных молодых звезд и новых кандидатов в члены ассоциации Ori OB1b, а также объектов переднего и заднего фона. 136 из исследованных звезд продемонстрировали свойства чрезвычайно молодых объектов: ранний спектральный тип, наличие лития или избытка излучения в среднем-ИК. Еще два молодых коричневых карлика и 289 звезд-кандидатов были идентифицированы с помощью оптических/инфракрасных диаграмм цвет-светимость. Авторы сделали заключение, что обе исследуемые области являются аналогами скопления σ Orionis, но при этом более массивны, более протяженны, несколько более старые и в меньшей степени радиально концентрированы.

6. Внегалактические исследования

Возможности Виртуальной обсерватории также могут быть использованы для внегалактических исследований. Так, в [19] авторы используют возможности ВО-инструментов для исследования AGB-звезд высокой светимости ($M_{bol} < -6.0$ mag) с показателями цвета $J-K_s > 1.5$ mag и $H-K_s > 0.4$ mag расположенных в LMC, SMC, M 31, и M 33. При этом используются данные из обзора 2MASS All-Sky Point Source. Авторы, в частности, скомпилировали каталоги наиболее ярких AGB-звезд и обнаружили, что если в LMC такие звезды расположены преимущественно в центре, то в M31 они концентрируются в кольце активного звездообразования. Количество исследованных звезд в SMC и M31 недостаточно представительно для того, чтобы делать окончательные выводы об их пространственном расположении, хотя тенденция концентрироваться к центру определенно наблюдается. Результирующие функции светимости сходны для всех четырех изученных галактик.

Объекты с указанными показателями цвета соответствуют, преимущественно, углеродным звездам. Хотя среди обнаруженных авторами звезд содержится большое число углеродных, они не были ранее включены в каталоги, являющиеся продуктом оптических исследований, поскольку эти звезды погружены в пылевые оболочки.

7. Практические рекомендации

В данном разделе даются сведения о том, как пользоваться инструментами ВО и как принять участие в создании ВО.

Типичной задачей для ВО является получение всех сведений об одном объекте. В общем случае рекомендуется обратиться к сервису Aladin (<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>) и указать название объекта в окне Location. При этом загрузится изображение из DSS (<http://stdatu.stsci.edu/dss/>) и объекты из баз данных SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) и NED (<http://ned.ipac.caltech.edu/>). В меню File рекомендуется выбрать опцию Load from the Virtual Observatory, задать радиус и координаты, а также указать желаемые типы данных (спектры, каталоги, и т.п.). Aladin будет последовательно опрашивать сервисы ВО. Для конкретных типов объектов можно также использовать специализированные базы данных: для звезд – SIMAD, для скоплений

– WEBDA (<http://www.univie.ac.at/webda/>), для внегалактических объектов – NED. Для двойных звезд в скором будущем начнет функционировать база данных BDB. Для получения сведений об ансамбле объектов в указанных сервисах есть режимы пакетного доступа. Для всех типов объектов полезным является обращение к библиографической базе данных ADS (<http://adsabs.harvard.edu/>), которая для кросс-идентификации объектов использует системы типа “Name resolver” в SIMBAD и NED.

Другой часто встречающейся задачей является получение всех сведений о наблюдательных архивах. Для этого рекомендуется обратиться к регистрам (реестрам) архивов, самыми полными из которых являются Euro-VO registry (<http://registry.euro-vo.org/search.jsp>) и NVO directory (<http://nvo.stsci.edu/vor10/index.aspx>).

Для того чтобы предоставить международному астрономическому сообществу созданный вами новый каталог (т.е., чтобы он был включен в ресурсы ВО), требуется опубликовать каталог или его описание в рецензируемом журнале, подготовить в формате, пригодном для импорта в Vizier и отправить его авторам этого сервиса (<http://vizier.u-strasbg.fr/>).

Общего ответа на вопрос о том, как предоставить международному астрономическому сообществу новый архив наблюдений или базу данных пока нет. В качестве одной из возможностей можно использовать инструмент для создания баз данных Astronomical Database Generator SAADA (<http://saada.u-strasbg.fr/saada/>).

В сложных случаях для решения проблем, связанных с использованием и созданием ВО, рекомендуется пока обращаться к экспертам в области ВО. Полезную информацию можно также найти на сайтах Альянса «Международная виртуальная обсерватория» (<http://www.ivoa.net>) и Российской виртуальной обсерватории (<http://www.inasan.rssi.ru/rus/rvo>).

8. Заключение

Приведенные выше примеры демонстрируют достаточную зрелость ВО-инструментов для решения актуальных задач звездной астрономии и получения новых результатов с помощью использования астрономических данных. При этом применяются как классические методы анализа данных, так и современные интероперабельные ВО-механизмы для идентификации объектов и извлечения «мультиволновой» информации

По данным библиографической базы данных ADS 1770 публикаций (на сентябрь 2012 г.) упоминают Virtual Observatory в аннотации, и около 190 из них являются полноценными астрономическими исследованиями, опубликованными в международных рецензируемых журналах. Эту статистику можно уточнить, воспользовавшись сервисом «Some recent papers about VO-enabled science» по адресу <http://ivoa.net/newsletter/006/>. Первые диссертации по результатам исследований в помощью инструментов ВО были защищены в России в 2009 (кандидатская, И. Золотухин) и 2010 (докторская, И. Чилингарян) гг.

Благодарности

Автор благодарит И. Золотухина за помощь в подготовке материала.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-00426, 10-07-00342, 12-07-00528, при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант 02.740.11.0247), Программы Президиума РАН Поддержка ведущих научных школ (грант НШ-3602.2012.2), а также в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы.

Литература

1. Длужневская О.Б., Малков О.Ю. *Астрономический журнал*. 2005. Т. 82. 1148.
2. Berriman B., Kirkpatrick D., Hanisch. R. *et al.* 2003, in Large Telescopes and Virtual Observatory: Visions for the Future, 25th meeting of the IAU, Joint Discussion 8, Sydney, Jul 2003, p. 60.
3. Padovani P., Allen M. G., Rosati P., Walton N.A. 2004, *A&A* 424, 545.
4. Zolotukhin I., Kuposov S., Glushkova E. 2006, in ADASS XV Conference, eds. Carlos Gabriel, Christophe Arviset, Daniel Ponz, Enrique Solano, San Lorenzo de El Escorial, Oct 2005, ASP Conf. Ser., 351, 240, arXiv:astro-ph/0601691.
5. Kuposov S., Glushkova E., Zolotukhin I. 2008, *A&A* 486, 771.
6. Glushkova E., Kuposov S., Zolotukhin I. *et al.* 2010, *AstL*, 36, 75.
7. Zolotukhin I. 2010, in JENAM 2010, Lisbon, Sep 2010, 229.
8. Kharchenko, N.V., Piskunov, A.E., Roser, S., Schilbach, E., and Scholz, R.-D. 2005, *A&A* 440, 403.
9. Karpov S.V., Mironov A.V., Malkov O.Yu. 2012, *Astrophysical Bulletin*, 67, 82.
10. Malkov O.Yu., Mironov A.V., Sichevskij S.G. 2011, *Astrophys. Space Science*, 335, 105.
11. Sichevskij S.G. 2012, *Astronomy Reports*, 56, 710.
12. Malkov O., Oblak E., Snegireva E.A., Torra J. 2006, *A&A* 446, 785.
13. Malkov O., Oblak E., Avvakumova E.A., Torra J. 2007, *A&A* 465, 549.
14. Avvakumova E.A., Malkov O.Yu., Kniazev A.Yu. 2013, *Baltic Astronomy*, accepted.
15. Malkov O., Oblak E., Debray B. 2009, in ADASS XVIII Conference, eds. David Bohlender, Daniel Durand, Patrick Dowler, Quebec, Nov 2008, ASP Conf. Ser., 411, 442.
16. Kaygorodov P., Debray B., Kolesnikov N. *et al.* 2012, *Baltic Astronomy*, 21, 309.
17. Lopez Marti B., Jimenez-Esteban F., Solano, E. 2011, *A&A* 529A, 108.
18. Caballero J.A., Solano E. 2008, *A&A* 485, 931.
19. Tsalmantza P., Kontizas E., Cambresy L. *et al.* 2006, *A&A* 447, 89.

VIRTUAL OBSERVATORY FOR STELLAR ASTRONOMY

Malkov O.Yu.

Institute of Astronomy of RAS, Moscow, Russia

International Virtual Observatory is a collection of integrated astronomical data archives and software tools that utilize computer networks to create an environment in which research can be conducted. Several countries have initiated national virtual observatory programs that will combine existing databases from ground-based and space-born observatories and make them easily accessible to researchers. As a result, data from all the world's major observatories will be available to all users and to the public. The International Virtual Observatory project was launched about ten years ago, and its major achievements in stellar astronomy in recent years are discussed in this paper.

СОЗДАНИЕ ЦЕНТРА КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. В.П. ЭНГЕЛЬГАРДТА

**Нефедьев Ю.А., Шерстюков О.Н., Кашеев Р.А., Гусев А.В.,
Сасюк В.В., Загретдинов Р.В.**

Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

В настоящее время на основе Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта создается Центр космических исследований и технологий и Астропарк в соответствии с Программой развития Казанского федерального университета. Центр будет решать следующие задачи: образование, наука, астрономический туризм.

Научными направлениями Центра космических исследований и технологий будут:

- *Создание первой в России комплексной обсерватории в области космической астрометрии. Он будет служить для эффективного использования результатов космической и образовательной деятельности;*

- *Создание эффективной поддержки космических программ ГЛОНАСС, Луна-Глоб и т.д.;*

- *Развитие метрологического полигона для тестирования спутникового оборудования;*

Комплексная астрометрическая обсерватория будет включать в себя:

- *GPS / ГЛОНАСС системы;*

- *12 метровую антенну для РСДБ наблюдений (VLBI);*

- *Системы спутниковой лазерной локации (SLR);*

- *Сканер космического мусора и быстротекущих процессов на небесной сфере;*

- *Гравиметрическую лабораторию;*

- *Сейсмические системы, расположенные в сейсмическом подвале АОЭ на глубине 10 метров.*

В области образования Центр будет выполнять следующие задачи:

- *Создание базы геодезических и астрономических практик;*

- *Установка комплекса высокотехнологичного оборудования для работы студентов и аспирантов;*

Если все запланированные направления развития Центра будут осуществлены, то мы получим уникальную по мировым канонам научно-наблюдательную базу. Мы надеемся, что официальное открытие нового Центра космических исследований и технологий и Астропарк будут осуществлено в рамках Всемирных студенческих игр в Казани в 2013 году.

1. Введение

Развитие астрономии в Казани в новом тысячелетии происходит в традиционных для казанской астрономии направлениях. Это астрофизика, астрометрия и небесная механика, которая включает также селенодезию и метеорную астрономию, геодезия. Осуществляются два основных проекта: наблюдательная программа на телескопе РТТ-150, установленного в Турции и создание Центра исследований ближнего и дальнего космоса на базе Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта. Кратко остановимся на традиционных для казанской астрономии исследованиях.

Одним из ключевых условий повышения результативности космической деятельности является развитие наземной наблюдательной инфраструктуры, используемой для проведения многопрофильных космических исследований и обеспечения эффективного взаимодействия с летательными аппаратами и объектами орбитальных группировок. Проект развития научно-образовательного центра космических технологий на базе астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) является одной из ключевых составных частей Программы развития Казанского (Приволжского) федерального университета на 2010–2019 гг. Проект предусматривает создание уникального образовательно-научного, образовательно-просветительского и научно-технологического ком-

плекса мирового уровня в области изучения ближнего и дальнего космоса. В данный комплекс включены следующие системы: 1) радиотелескоп диаметром 12 метров для радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами наблюдений (РСДБ); 2) комплекс оптического широкопольного обзора небесной сферы и сканирования космического мусора «Мини-МегаТортора»; 3) Квантово-оптическая система (КОС) «Сажень-ТМ» для работы по уточнению элементов орбит спутников; 4) гравиметрическая лаборатория, оборудованная абсолютными и относительными гравиметрами; 5) сейсмический подвал, оборудованный наклономерами и сейсмографами. В настоящее время формируется комплекс высокотехнологического оборудования, в рамках программы обработки спутниковых навигационных технологий и услуг создан Метрологический центр, который используется совместно с Роскосмосом для тестирования навигационного оборудования по данным наблюдений спутниковой группировки ГЛОНАСС, осуществляется строительство Планетария. Планируется, что АОЭ станет центром самых современных исследований в области координатно-временного обеспечения и войдет как в российские, так и в зарубежные сети спутниковой навигации.

2. Основные задачи комплекса Центра космических исследований и технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ) является одним из ведущих российских и мировых центров в области астрономии и космической геодезии, как в сфере подготовки кадров, так и в сфере фундаментальных и прикладных исследований. В разное время его выпускники были инициаторами создания научных и образовательных центров этого направления и возглавляли крупные творческие коллективы. Научные данные, полученные казанскими астрономами, были использованы при подготовке запусков космических аппаратов к Луне и Марсу, в Казани были созданы ведущие научные школы в области астрофизики звездных атмосфер, в области космической астрономии и метеорных исследований.

Развитие казанской школы астрономии неразрывно связано с первой в России кафедрой астрономии, недавно отметившей свое 200-летие, и созданной на ее основе Астрономической обсерваторией им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) Казанского университета, которая на протяжении всей своей 112-летней истории является уникальным научно-образовательным центром общенационального и международного значения. Необходимо также отметить, что во всем мире возрастает роль радифизических методов исследования, в которых ученые университета были в числе инициаторов создания этого направления в СССР, и университет является одним из ведущих в стране центров подготовки кадров и научных и научно-технологических разработок в этой области.

Исходя из этого, интегрированный проект развития научно-образовательного центра космических технологий на базе астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта является одной из ключевых составных частей Программы развития Казанского (Приволжского) федерального университета на 2010–2019 гг., целью которой является развитие КФУ в качестве университета нового типа, соответствующего лучшим мировым стандартам образовательной, научно-исследовательской, образовательной-просветительской деятельности.

Проект предусматривает формирование и развитие на базе инфраструктуры АОЭ, двух радифизических полигонов, прилегающих к территории обсерватории с использованием имеющихся в наличии ресурсов обсерватории и кафедр астрономии, радиофизики, радиоастрономии, радиоэлектроники. Целью настоящего Проекта также является создание уникального образовательно-научного, образовательно-просветительского и научно-технологического комплекса мирового уровня в области изучения ближнего и дальнего космоса.

На базе ЕАО будет реализована образовательная деятельность в области подготовки и переподготовки специалистов, проведение учебной, учебно - производственной и научной стажировки студентов и аспирантов Казанского университета и других учебных и научных учреждений России, ближнего и дальнего зарубежья. Эти направления подготовки следующие:

- астрономия,
- геодезия и дистанционное зондирование,
- радиофизика.

Для реализации научных и научно – технологических программ созданы отделы:

- космической астрономии и геодезии,
- прикладной астрофизики,
- радиоастрономии.

Основным компонентом будет база практики в области астрономии, наземной и космической геодезии, топографии, радиофизики и радиоастрономии.

Деятельность всех отделов будет координироваться в рамках единого Центра исследования ближнего и дальнего космоса.

Научно-образовательный центр на базе Астрономической обсерватории будет первым в мире образовательно-научным комплексом, сочетающим действующую астрономическую обсерваторию с современным планетарием. Такой подход позволит дополнить функционирование планетария реальными наблюдениями, с помощью действующих телескопов, небесных тел и астрономических явлений (планет, звезд, галактик и туманностей, комет и астероидов, метеорных потоков, солнечных и лунных затмений, спутников и т.д.), обеспечив тем самым «погружение» посетителей Астропарка в профессиональную среду познания Вселенной, расширение и мотивацию интереса общества и, прежде всего, как к исторической, так и к современной научной мысли.

В 2010 году на территории АОЭ в рамках создания межрегионального центра прикладных навигационных технологий и услуг и полигона обработки спутниковых навигационных технологий и услуг построен Метрологический полигон, который используется Роскосмосом для тестирования навигационного оборудования по данным наблюдений спутниковой группировки ГЛОНАСС.

Основные цели установки радиотелескопа диаметром 12 метров, работающего до Ку-диапазона (14 ГГц) фундаментальное координатно-временное обеспечение (КВО), построение и поддержание небесной системы координат (ICRF) и ее реализация в виде каталогов координат внегалактических радиоисточников, земных систем координат (ITRF и версий ПЗ.90) и их реализация в виде каталогов координат и скоростей опорных станций, определение параметров ориентации земной системы координат относительно небесной системы координат и параметров вращения Земли; построение динамических систем отсчета и их реализация в виде эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов; определение параметров гравитационного поля Земли; построение национальной шкалы координированного времени UTC(SU) и поддержание ее в заданных пределах по отношению к шкале Всемирного координированного времени UTC. В части фундаментальных астрофизических исследований ставится цель по изучению Галактики (молекулярные линии, рентгеновские и гамма источники, микроквезары), активных ядер галактик. Будет осуществлена наземная поддержка космических аппаратов, работа в режиме одиночного зеркала, работа в сети РСДБ, включение в национальные российские и международные сети, включая ALMA, сканирование и ведение космических аппаратов (Радиоастрон, Миллиметрон и др.). В области образовательных задач установка антенны позволит поднять на более высокий уровень изучение фундаментальной и прикладной геодезии, астрофизики, СВЧ-техники, криотехники, цифровой техники и цифровой обработки сигналов.

Оптический телескоп с диаметром главного зеркала 60 см будет представлять из себя современный оптико-механический электронный комплекс, оснащенный узлом адаптивной оптики, необходимым для коррекции качества изображений с частотой до 100 Гц. Основная цель установки оптического телескопа с апертурой не менее 0,6м. – обеспечение решения широкого круга научных наблюдательных и учебных задач: обнаружение новых и исследование уже известных (стационарных и нестационарных) объектов различной природы в ближнем и дальнем космосе, реализация программ наблюдений объектов, требующих высокого углового разрешения (с применением адаптивной оптики), спектрографического фиберного оборудования, CCD-фотометров полос UBVRI и других стандартов, а так же возможность проведения исследований атмосферы, разработки и тестирования различных видов оборудования наблюдательно-го комплекса системы с применением адаптивной оптики при наблюдениях в самых различных астроклиматических (техногенных) условиях. Комплекс должен обеспечить исследования, в том числе и быстропротекающих явлений в ближнем и дальнем космическом пространстве, как по текущим наблюдательным программам, так и по сигналу об обнаружении наблюдаемых объектов космическими аппаратами или другими мониторинговыми системами.

Система оптического широкопольного мониторинга небесной сферы «Мини-МегаТОРТОРА» должна обеспечить обнаружение и исследование быстропротекающих явлений неизвестной заранее локализации в ближнем и дальнем космическом пространстве. Основным способом получения информации является широкоугольный оптический мониторинг небесной сферы с высоким временным разрешением. В процессе мониторинга реализуется основная задача – обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы и локализации. Впервые в мире будет получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением. Для проведения непрерывных наблюдений такого рода будет создан роботический многоканальный (9 объективов) оптический комплекс с общим полем зрения около 900 квадратных градусов и временным разрешением 0.1 секунды. Такой комплекс будет аккумулировать информацию обо всех стационарных и транзиентных (во времени и пространстве) источниках оптического излучения, локализованных в небесной полусфере (20 000 кв. град.), с блеском вплоть до 17.5 звездной величины. Кроме того, на базе рассматриваемой системы широкоугольного мониторинга (путем аппаратно-программной интеграции и модернизации широкопольного менискового телескопа АСТ-452 и комплекса оптических телескопов с апертурой не менее 0,6м) в АОЭ будет создан единый комплекс мониторинга и он-лайн анализа наблюдаемых событий, оснащенный соответствующим ситуационным IT-центром (с системой отображения, обработки и хранения получаемых наблюдательных данных).

Немаловажным элементом системы мониторинга является КОС «САЖЕНЬ-ТМ». Данная система станет необходимой поддержкой точности РСДБ антенны. В настоящее время такой комплекс антенна – лазерный дальномер становится повседневной практикой спутникового мониторинга.

Основным элементом образовательной компоненты Центра исследования ближнего и дальнего космоса станет строящийся в настоящее время Планетарий. В настоящее время в мире насчитывается более 2 500 планетариев, в том числе 1 200 в США, 540 – в европейских странах, 400 – в Японии (при этом планетарии, совмещенные с действующими астрономическими обсерваториями, в настоящее время отсутствуют, что ограничивает эффективность их деятельности). Россия существенно отстает от развитых стран по данным параметрам. В настоящее время в России имеется всего 32 планетария (все эти планетарии расположены в черте городов, то есть не позволяют ис-

пользовать современные технологии наблюдения реального звездного неба). Большинство из них являются технически и морально устаревшими объектами. В последнее время предпринимаются попытки модернизации сети планетариев (за последние 2 года были реконструированы планетарии в Москве и Калуге, построен современный планетарий в Ярославле), однако они не носят системного характера и не увязаны с решением научно-исследовательских задач.

Комплекс строящегося казанского Планетария состоит собственно из Планетария и Астропарка. Создание на территории АОЭ первого в мире Планетария с Астропарком технологически, методологически и территориально интегрированного с действующей астрономической обсерваторией международного класса будет способствовать развитию нового качественного уровня казанской астрономии. Планетарий позволит демонстрировать: положения и движения звезд и планет на любой географической широте и на любой момент настоящего, прошлого или будущего, звездного неба для воображаемого наблюдателя на Луне, Марсе, Венере; аудиовизуальное моделирование космического полета; путешествия по другим планетам и т.д. По сути, он является высокотехнологичной интерактивной экспериментально-образовательной лабораторией, вносящий значимый вклад в развитие инновационного потенциала, подготовку кадров и обучение.

Планетарий в АОЭ состоит из купольного помещения, лабораторного корпуса, демонстрационного телескопа с обзорной площадкой, вспомогательных помещений. В планетарии будет установлена полнокупольная проекционная система, включая фиберный аппарат и полнокупольную проекционную систему проекторов высокого разрешения (full-dome), которые позволят осуществлять демонстрацию научно-образовательных астрономических программ в панорамном режиме и проводить аудиовизуальное моделирование космических путешествий и явлений. Зал планетария рассчитан на размещение от 100 человек с возможностью его трансформации для проведения научных конференций, лекций и других мероприятий (до 150 мест).

Территория Астропарка, расположенного вокруг Планетария, будет представлять собой парково-архитектурный комплекс, состоящий из системы аллей, малых архитектурных форм, декоративной скульптуры и тематико-рекреационных зон с индивидуальным ландшафтным благоустройством.

В рамках Проекта планируется также создание производственного комплекса для размещения одновременно до 400 человек (студентов, аспирантов, стажеров, преподавателей и научных сотрудников), который по современным международным стандартам будет обеспечивать проживание, учебные занятия, проведение научных мероприятий, питание, отдых.

4. Заключение

Официальная церемония закладки первого камня президентом Республики Татарстан Р.Н. Миннихановым Планетария с Астропарком была проведена в рамках Международной астрономической конференции, приуроченной к 110-летию юбилею АОЭ 23 августа 2011 года.

Официальное открытие Планетария с Астропарка, знаменующее собой качественно новый этап развития АОЭ и Казанского университета в целом, будет проведено в рамках культурно-общественных мероприятий Универсиады в августе 2013 года.

**MAKING THE CENTER OF SPACE RESEARCHES AND TECHNOLOGIES IN
ENGELHARDT ASTRONOMICAL OBSERVATORY**

Nefedyev Y.A., Shersyukov O.N., Kascheev R.A., Gusev A.V., Sasuk V.V., Zagretdinov R.V.
Kazan Federal University, Russia

Today on the basis of Engelhardt astronomical observatory are created Centre of cosmic researches and techniques and Astropark as consistent with Program for expansion of the Kazan Federal University. The Center has the following missions: education, science, astronomical tourism.

The scientific components of the Centre of cosmic techniques are:

- Building first in Russia of the multisectoral cosmic astrometry observatory. It will serve for effective using cosmic results and education skills;

- Making the effective support for cosmic program GLONASS, Luna-Glob, etc.;

- Development of the metrological polygon for testing satellite equipment;

Multisectoral cosmic astrometry observatory will include:

- GPS/GLONASS systems;

- 12 meters antenna “Patriot” for Long Baseline Interferometry (VLBI);

- Systems of satellite laser ranging (SLR) for a global network of observation stations measure the round trip time of flight of ultrashort pulses of light to satellites equipped with retroreflectors;

- Wide-angled Space Debris Scanner;

- Gravimetric laboratory;

- Seismic Systems in 10 meters EAO seismic vault.

Education part of the Astropark:

- Making base of geodesic and astronomy practice;

- Complex high-tech equipment for working students and postgraduate;

- Education centre.

If all the planned facilities in the project will be built this center will be a unique world scientific point. We hope that the official opening of the new Centre of cosmic techniques and Astropark will be fulfilled within the bounds of World Student Games in 2013.

ФЛУКТУАЦИОННАЯ МЕТРОЛОГИЯ В РЕШЕНИИ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Тимашев С.Ф.¹, Поляков Ю.С.^{2,3}

¹*Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Москва, Россия*

²*USPolyResearch, Ashland, PA, USA*

³*Department of Computer Science, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, USA*

В данной статье предпринята попытка приложить ранее разработанные принципы «флуктуационной метрологии» к установлению астрометрических характеристик состояния сложных звездных систем. В качестве примера рассматривается Солнце, особенности динамики которого определялись на основе анализа Цюрихского ряда ежедневных чисел Вольфа с 1849 по 2009 год, а также ряда ежедневных значений суммарной энергии, излучаемой короной Солнца на длине волны 330.3 нм (данные, регистрируемые на пике Ломники в Словакии с 1939 по 2007 годы включительно)

1. Введение

Астрометрия – раздел астрономии, дающий экспериментальную информацию, необходимую для развития остальных разделов астрономии. При этом, если задачи небесной механики состоят в высокоточном определении местонахождения небесных тел и векторов их скоростей в данный момент времени, то задачи астрофизики и космологии – иные. Звездные объекты – нестационарные открытые системы, эволюционная динамика которых оказывается в высокой мере индивидуальной с неизбежным проявлением эффектов перемежаемости (*intermittency*). В такой динамике проявляются составляющие в разных диапазонах частот, как чисто специфические – резонансные составляющие с широким набором частот, так и неспецифические – хаотические составляющие. Поэтому задача использования первичной астрометрической информации при анализе сложной динамики звездных систем должна включать выявление из первичных данных общей феноменологической информации о динамике исследуемой системы, которая могла бы быть использована для последующего физического осмысления и моделирования исследуемой системы. Такая информация может быть получена в рамках фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС), специфика которой, в отличие от иных методов анализа хаотических сигналов, состоит в введении информационных параметров, характеризующих составляющие исследуемых сигналов в разных диапазонах частот [1-3]. На основе ФШС были сформулированы принципы «флуктуационной метрологии» как науки об измерениях и методах достижения единства метрологических характеристик состояния динамически изменяющихся систем с существенными хаотическими составляющими в такой динамике [4]. В данной статье предпринята попытка приложить эти принципы к установлению метрологических параметров, которые могли бы быть введены как астрометрические характеристики состояния сложных звездных систем. В качестве примера рассматривается Солнце, особенности динамики которого устанавливались на основе анализа Цюрихского ряда ежедневных чисел Вольфа с 1849 по 2009 год [4], а также ряда ежедневных значений суммарной энергии, излучаемой короной Солнца на длине волны 330.3 нм (данные, регистрируемые на пике Ломники в Словакии с 1939 по 2007 годы включительно).

2. Основные принципы фликкер-шумовой спектроскопии

Вводимые в ФШС параметры «привязываются» к базовому для статистической физики образу автокорреляционной функции:

$$\psi(\tau) = \langle V(t)V(t+\tau) \rangle_{T-\tau}, \quad \langle (\dots) \rangle_{T-\tau} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} (\dots) dt, \quad (1)$$

где τ – параметр временной задержки, полагаем $0 \leq \tau \leq T_M$ ($T_M \leq T/2$). Введенная процедура усреднения означает, что все характеристики, которые можно будет извлечь при анализе зависимостей $\psi(\tau)$, следует рассматривать как средние по указанному интервалу. Для выявления информации, заключенной в $\psi(\tau)$ (полагаем $\langle V(t) \rangle = 0$), удобнее анализировать некоторые преобразования («проекции») этой функции, а именно, косинус-преобразование $S(f)$ (f – частота):

$$S(f) = 2 \int_0^{T_M} \langle V(t)V(t+t_1) \rangle_{T-\tau} \cos(2\pi f t_1) dt_1 \quad (2)$$

и разностные моменты (переходные «структурные» функции Колмогорова) $\Phi^{(2)}(\tau)$ 2-го порядка:

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t+\tau)]^2 \rangle_{T-\tau}, \quad (3)$$

полагаем $0 \leq \tau \leq \tau_{\max} \leq T/2$. На характер зависимости $V(t)$ не налагается никаких ограничений, кроме существования вводимых средних величин (1).

Зависимости $S(f)$ для сигналов, задаваемых на ограниченных временных интервалах и нестационарных по своей сути, условно определяются как «спектры мощности», хотя для них возможно появление частотных участков, на которых $S(f) < 0$. Как известно, в $S(f)$ зависимостях наиболее выражено проявляются специфические для исследуемого сигнала частоты, которые можно связывать с присущими источникам сигналов резонансами и с интерференционными вкладами таких резонансов. Хаотические, более высокочастотные нерегулярные составляющие сигнала, дают монотонно изменяющиеся вклады в $S(f)$ зависимости [1]. При выделении таких вкладов хаотических $S_c(f)$ составляющих в $S(f)$ учитывается «перемежаемость» (*intermittency*) рассматриваемой динамики [1], когда участки относительно небольших изменений динамической переменной $V(t)$ перемежаются кратковременными резкими и значительными изменениями переменной. В этом случае выделяются две области частот – менее высокочастотные («ламинарные» фазы – нерегулярности-«скачки») и более высокочастотные (резкие «всплески»). Такой характер свойственен сигналам, продуцируемым в открытых сложных системах, в том числе, биомедицинским и астрофизическим сигналам, вследствие эффектов нелинейности, диссипативности и инерции [1], проявляющихся на каждом пространственно-временном уровне эволюционной динамики реальных процессов. Следует отметить, что необходимость введения в ФШС помимо $\Phi^{(2)}(\tau)$ зависимости $S(f)$ обусловлена именно указанной особенностью «перемежаемой» эволюционной динамики, качественно различимой ролью вводимых нерегулярностей в динамике процессов.

Если полагать, что параметры, характеризующие эволюционную динамику на каждом ее пространственно-временном уровне, одинаковы, то есть, рассматриваемый процесс является стационарным в широком смысле (предполагается существование среднеквадратичного отклонения на рассматриваемом интервале) [1], то на основе изложенных представлений о нерегулярностях-скачках и нерегулярностях-всплесках как носителях информации о хаотической составляющей сигнала могут быть получены (с использованием аппарата обобщенных функций [1]) общие интерполяционные выражения для $\Phi_c^{(2)}(\tau)$ и $S_c(f)$. В частности, в простейшем случае, когда вводится лишь один характерный масштаб для каждой из последовательности «нерегулярностей-скачков» и «нерегулярностей-всплесков», имеем [2]:

$$\Phi_c^{(2)}(\tau) \approx 2\sigma^2 \cdot \left[1 - \Gamma^{-1}(H_1) \cdot \Gamma(H_1, \tau/T_1) \right]^2, \quad \Gamma(s, x) = \int_x^\infty \exp(-t) \cdot t^{s-1} dt, \quad \Gamma(s) = \Gamma(s, 0) \quad (4)$$

где $\Gamma(s)$ и $\Gamma(s, x)$ – соответственно, гамма-функция и неполная гамма-функция ($x \geq 0$ и $s > 0$); σ – среднеквадратичное отклонение измеряемой динамической переменной как мера нерегулярностей-скачков хаотической составляющей сигнала; H_1 – показатель Херста, характеризующий скорость, с которой динамическая переменная теряет «память» о своей величине на временных интервалах, меньших времени T_1 полной потери памяти о значении динамической переменной, полученной при измерении в некоторый момент времени.

Для оценки суммарного хаотического вклада в спектр мощности, определяемого нерегулярностями-скачками и нерегулярностями-всплесками удобно использовать следующее интерполяционное выражение [2]:

$$S_c(f) \approx \frac{S_c(0)}{1 + (2\pi f T_0)^n}, \quad (5)$$

здесь $S_c(0)$, T_0 и n – феноменологические параметры, которые вводятся для описания спектров мощности при обработке экспериментально получаемых временных рядов. В качестве меры хаотической составляющей сигнала, формируемой нерегулярностями-всплесками и нерегулярностями-скачками в области высоких частот, удобно выбирать параметр $S_c(T_0^{-1})$, определяемый как «фактор острейности».

Как отмечалось выше, в хаотической динамике открытых сложных систем наряду с «неспецифической» корреляционной динамикой в последовательностях информационно значащих нерегулярностей, как правило, проявляются относительно низкочастотные резонансные частоты, совокупность которых в ходе эволюции может перестраиваться. В рамках ФШС удастся последовательно разделить вклады резонансных и хаотических составляющих с полной параметризацией исследуемых сигналов используя процедуру, изложенную в [2, 4].

Более подробное описание алгоритма ФШС параметризации представлено в работах [4, 7].

3. ФШС факторы нестационарности

Для выявления эффектов нестационарности в анализируемых процессах изучается динамика изменений функций $\Phi^{(2)}(\tau)$ при последовательном смещении пробного интервала $[t_k, t_k + T]$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ и $t_k = k\Delta T$, по всей длине T_{tot} имеющегося экспериментального ряда данных ($t_k + T < T_{\text{tot}}$). Временные интервалы T и ΔT должны выбираться, исходя из физического смысла рассматриваемой задачи, с учетом предполагаемого характерного времени процесса, наиболее важного для эволюции исследуемой системы, когда происходит перестройка ее структурной организации. Если в системе происходят какие-то второстепенные процессы с характерными временами τ_i , слабо влияющие на основной нестационарный процесс перестройки структуры, то при выборе интервала T должно соблюдаться условие: $\tau_i \ll T$.

Феномен появления «предвестника» перестройки структуры системы естественно связать с наиболее резкими изменениями зависимостей $\Phi^{(2)}(\tau)$ при приближении верхней границы временного интервала усреднения t_k к моменту t_c перестройки структуры системы на различных пространственных масштабах. Понятно, что говорить о «предвестнике» таких перестроек можно только в том случае, если время проявления «предвестника» t_k отстоит от момента t_c не менее, чем на интервал ΔT , то есть $\Delta T_{\text{sn}} = t_c - t_k \geq \Delta T$, при выполнении неравенства $\Delta T_{\text{sn}} \ll T_{\text{tot}}$.

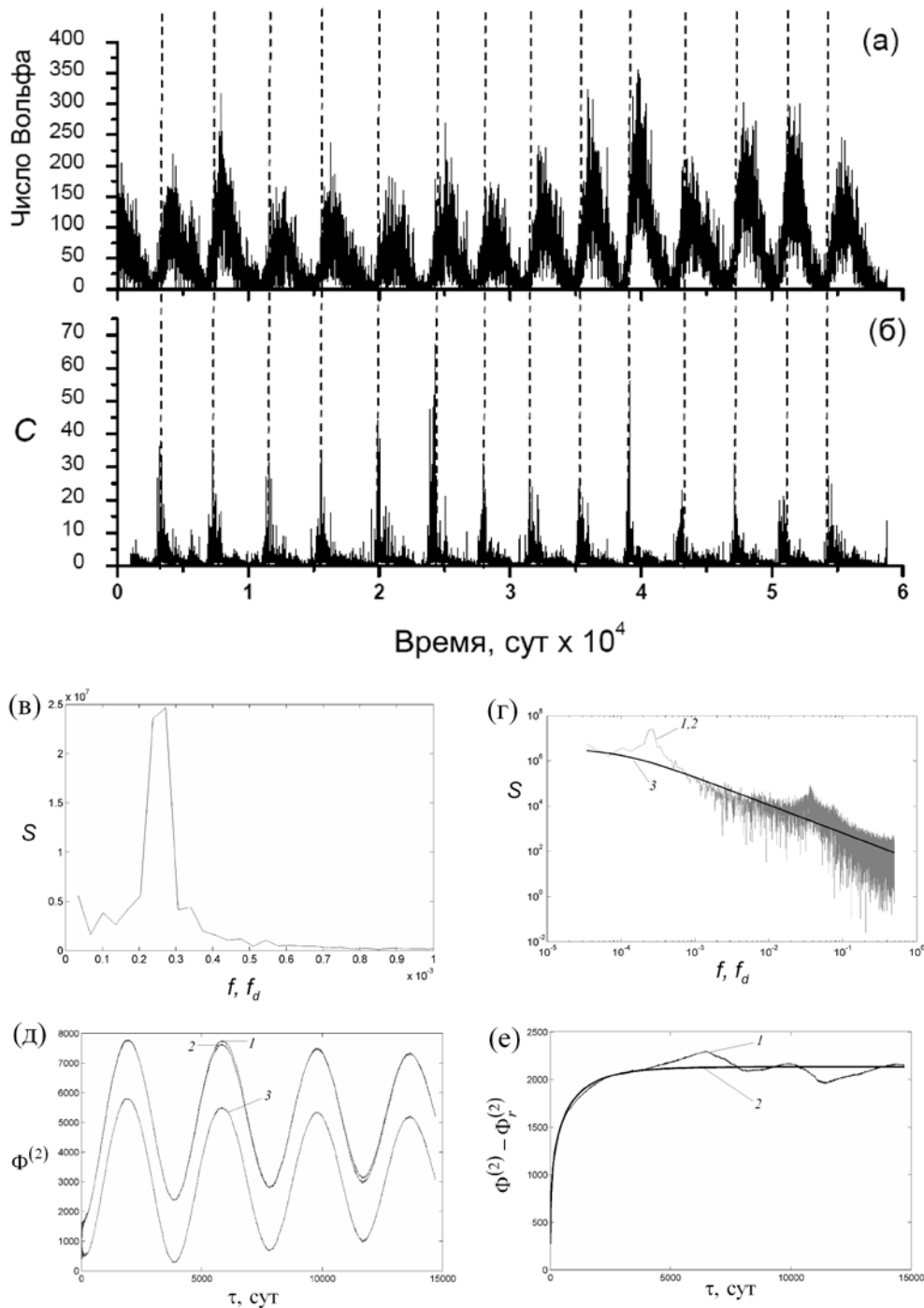


Рис. 1. ФШС параметризация ряда ежедневных чисел Вольфа с 1849 по 2009 год при $\tau_{\max} = T / 4$ и $f_{\max} = 1/4f_d$: (а) – исходный ряд (по оси абсцисс – количество суток, начиная с 1 января 1849 года); (б) фактор нестационарности для ряда ежедневных чисел Вольфа при $T = 1000$ ($\Delta T = 1$ сут); (в) низкочастотный «спектр мощности»; (г) 1 – экспериментальный «спектр мощности», 2 – суммарная ФШС интерполяция «спектра мощности», 3 – общая хаотическая интерполяция «спектра мощности»; (д) 1 – экспериментальный разностный момент, 2 – суммарная ФШС интерполяция разностного момента, 3 – «резонансная» составляющая; (е) 1 – экспериментальный разностный момент за вычетом «резонансной» составляющей, 2 – стохастическая (скачковая) интерполяция (4). Значения ФШС параметров – в табл. 1. Указанные прекурсоры (пунктир), рассчитанные при $T = 1000$ сут, проявляются накануне фиксируемых максимальных значений чисел Вольфа, начиная с крайнего левого максимума, за: 989, 663, 1216, 756, 924, 777, 605, 686, 677, 673, 726, 642, 1220, 1041 сут.

В качестве «предвестников» перестройки структуры системы в ФШС рассматриваются всплески значений индикаторов нестационарности, рассчитываемые на основе разностных моментов $\Phi^{(2)}(\tau)$:

$$C(t_k) = 2 \cdot \frac{Q_k - P_k}{Q_k + P_k} \frac{\Delta T}{T}, \quad (6)$$

$$Q_k = \frac{1}{\alpha T^2} \int_0^{\alpha T} d\tau \int_{t_k}^{t_k+T} [V(t) - V(t+\tau)]^2 dt, \quad P_k = \frac{1}{\alpha T^2} \int_0^{\alpha T} d\tau \int_{t_k}^{t_k+T-\Delta T} [V(t) - V(t+\tau)]^2 dt.$$

Здесь было учтено, что зависимости $\Phi^{(2)}(\tau)$ надежно рассчитываются лишь для области $[0, \alpha T]$, где $\alpha < 0.5$, изменения аргумента τ , составляющей менее половины интервала усреднения T . Введенные соотношения характеризуют «меру нестационарности» анализируемого процесса при перемещении интервала усреднения T по оси времени на величину ΔT . Информативность такого подхода к выявлению прекурсоров катастрофических изменений состояния систем разной природы ранее была продемонстрирована при исследовании динамики электрического пробоя в пористом кремнии и при анализе геодинамических явлений, предшествующих крупным землетрясениям [1, 2].

4. Корреляционные взаимосвязи в динамике сложных систем

ФШС подход позволяет получать прямую информацию о динамике корреляционных взаимосвязей между одновременно измеряемыми сигналами – динамическими переменными $V_i(t)$ и $V_j(t)$ одной сущности, измеряемыми в пространственно разнесенных точках i и j исследуемой системы, либо сигналами разной природы. Соответствующее выражение для 3D «двухточечных» корреляторов или кросс-корреляторов представляется в виде [1, 2]:

$$q_{ij}(\tau, \theta_{ij}) = \left\langle \left[\frac{V_i(t) - V_i(t+\tau)}{\sqrt{2\sigma_i}} \right] \left[\frac{V_j(t+\theta_{ij}) - V_j(t+\theta_{ij}+\tau)}{\sqrt{2\sigma_j}} \right] \right\rangle_{T-\tau-|\theta_{ij}|}, \quad (7)$$

$$\sigma_i(\tau) = \left\{ \left\langle [V_i(t) - V_i(t+\tau)]^2 \right\rangle_{T-\tau-|\theta_{ij}|} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где τ – «время задержки» (полагаем $\tau > 0$), θ_{ij} – параметр «смещения во времени». Речь идет о зависимостях значений $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ кросс-корреляторов от τ и θ_{ij} как временных параметров – «пространственном» (3D) представлении сложной поверхности $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$. Наибольший интерес вызывают интервалы изменения параметров τ и θ_{ij} , при которых максимально выражена корреляция $q_{ij}(\tau, \theta_{ij}) \sim 1$ или антикорреляция $q_{ij}(\tau, \theta_{ij}) \sim -1$ в изменениях значений $V_i(t)$ и $V_j(t)$. При этом знак и величина параметра θ_{ij} при максимальных величинах $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$ фактически характеризует причинно-следственную связь между сигналами $V_i(t)$ и $V_j(t)$, а также характерное время передачи информации между точками (или событиями) i и j . Очевидно, что величина и характер двухпараметрических выражений (7) могут зависеть как от выбора интервала T усреднения, так и от выбора интервалов изменения параметров τ и θ_{ij} . Для обеспечения статистической достоверности получаемых зависимостей будем требовать выполнение условия: $\tau_{\max} + |\theta_{\max}| \leq T/2$.

5. ФШС в параметризации хаотической солнечной динамики

В качестве примера ФШС параметризации сложных сигналов, представляемых временными рядами, рассмотрим известный ряд ежедневных ($f_d = 1 \text{ сут}^{-1}$) чисел Вольфа с 1849 по 2009 год включительно, публикуемый Цюрихской обсерваторией [5]. Длительность рассматриваемого ряда, не содержащего пропусков, составляет $T = 58804$ сут

(рис. 1а). Цюрихские числа Вольфа определяются как $W = n_s + 10n_g$, где n_s – количество наблюдаемых на Солнце пятен, n_g – количество наблюдаемых групп (начиная с двух пятен). Как отмечалось выше, все расчетные процедуры ориентированы на временные ряды, для которых $\langle V(t) \rangle = 0$. Укажем, что для исходного Цюрихского ряда среднее арифметическое число Вольфа составляло 55.3.

Исходные для такого анализа зависимости $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$, построенные на основе рассматриваемого временного ряда, а также рассчитываемые при $\tau_{\max} = T/4$ и $f_{\max} = 1/4f_d$ «резонансные» и «хаотические» составляющие $S_r(f)$, $S_c(f)$, $\Phi_r^{(2)}(\tau)$ и $\Phi_c^{(2)}(\tau)$ таких зависимостей [4], представлены на рис. 1в-е.

В табл. 1 приведены значения параметров Цюрихского ряда при трех различных значениях τ_{\max} и f_{\max} . В табл. 2 приведено сопоставление значений параметров рассматриваемого Цюрихского ряда, а также двух рядов, полученных на основе этого же ряда с учетом лишь каждого 2-го и каждого 4-го значений. Фактически при этом сопоставляется один и тот же сигнал, но измеренный при 3-х значениях частоты дискретизации f_d . В силу данных причин при представлении параметров анализируемых сигналов с необходимостью должна указываться соответствующая частота дискретизации f_d . Как следует из табл. 2, параметры σ , H_1 , T_1 , характеризующие динамику нерегулярностей-скачков, меняются относительно слабо при уменьшении частоты дискретизации в 4 раза. Не изменяется практически и соответствующая относительная ошибка. В то же время, параметры $S_c(T_0^{-1})$, n , T_0 , характеризующие динамику высокочастотных нерегулярностей, претерпевают более значительные изменения.

Таблица 1. Зависимость значений ФШС параметров от выбора τ_{\max} .

τ_{\max}	σ	$S_c(T_0^{-1}), \text{сут}^{-1}$	H_1	n_0	$T_1, \text{сут}$	$T_0, \text{сут}$	ε_Φ	ε_S
T/8	32.1	$1.22 \cdot 10^5$	0.10	1.09	4414	1441	0.4%	1.3%
T/4	32.6	$2.28 \cdot 10^5$	0.14	1.11	1917	2513	1.0%	1.1%
T/2	22.5	$2.02 \cdot 10^4$	0.14	1.05	287	415	2.26%	0.23%

Таблица 2. Зависимость значений ФШС параметров от частоты дискретизации f_d .

$f_d, \text{сут}^{-1}$	σ	$S_c(T_0^{-1}), \text{сут}^{-1}$	H_1	n_0	$T_1, \text{сут}$	$T_0, \text{сут}$	ε_Φ	ε_S
1	32.6	$2.28 \cdot 10^5$	0.14	1.11	1917	2513	1.01%	1.1%
0.5	31.6	$2.56 \cdot 10^5$	0.13	1.04	1963	3284	1.01%	1.3%
0.25	33.4	$2.88 \cdot 10^5$	0.12	1.01	1991	3173	1.01%	1.1%

Характер нестационарной динамики также может стать объектом стандартизации состояния сложных термодинамически-открытых систем в условиях их функционирования. Определяемые величины фактора нестационарности, характеризующие динамические изменения состояния таких систем в выявляемые при расчете таких факторов моменты времени, могут стать прекурсорами нежелательных изменений в эволюционной динамике рассматриваемой системы, если они превысят некоторый «допустимый предел».

В качестве примера рассмотрим изменение во времени фактора нестационарности, введенного в разделе 3, для Цюрихского ежедневного ряда чисел Вольфа. Зависимость фактора нестационарности от времени была построена при интервале осреднения $T = 1000$ суток. Из представленной на рис. 1б временной зависимости $C(t_k)$ (формула (10)) следует, что пиковые значения факторов нестационарности, приходящиеся на максимальные перестроения в исследуемой системе – Солнце, происходят за некоторое время до того, как числа Вольфа достигают своего максимального значения. Другими

словами, пики в факторе нестационарности на рис. (рис. 1б) являются прекурсорами моментов, когда активность Солнца, связанная с количеством появляющихся пятен, максимальна.

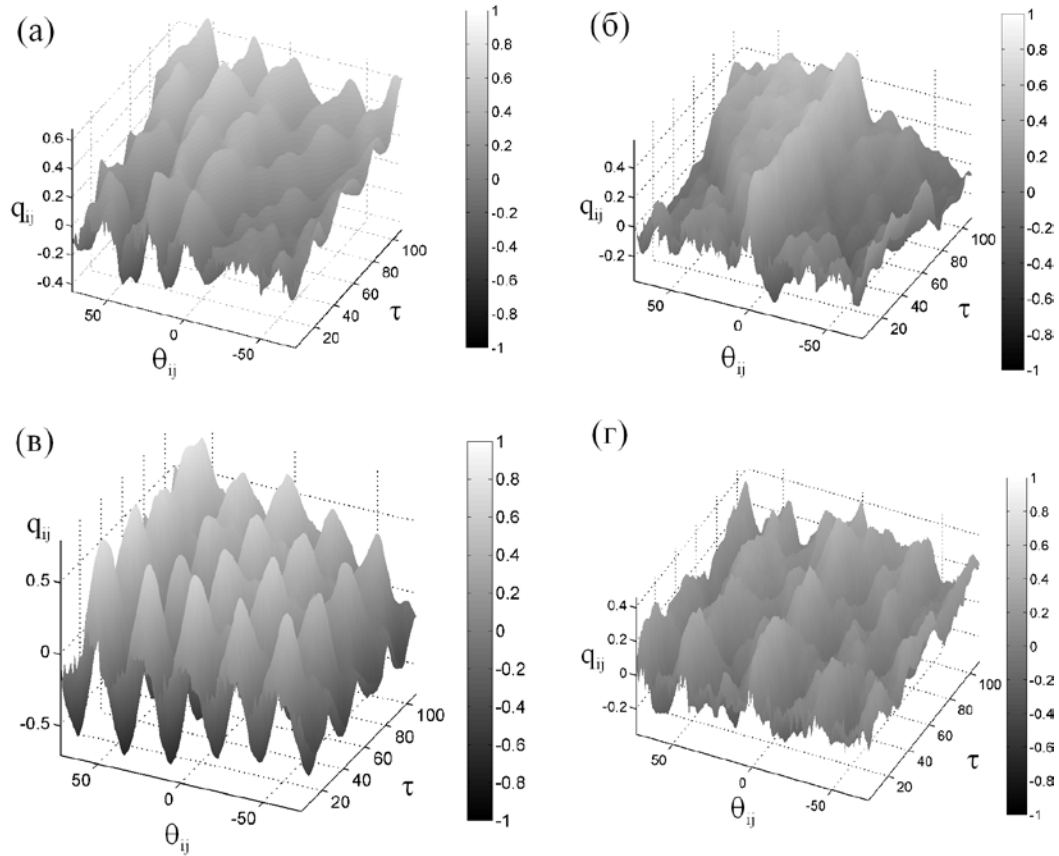


Рис. 2. Кросс-корреляционные зависимости для интервала усреднения $T = 365$ суток между солнечной активностью, представляемой Цюрихским ежедневным рядом чисел Вольфа, и ежедневным рядом для величин суммарной энергии, излучаемой короной Солнца [6], при $0 \leq \tau \leq 0.3T$ и $0 \leq \theta \leq 0.2T$ для временных интервалов (38940–39304) сут (а), (39610–39974) сут (б), (40822–41186) сут (в), (41972–42336) сут (г).

Устанавливаемые уровни кросс-корреляционных взаимосвязей в термодинамически-открытых распределенных системах также могут стать объектом стандартизации. Здесь можно иметь в виду установление контроля за состоянием взаимосвязанных подсистем в устройствах микро- и нанoeлектроники, в химико-технологических аппаратах (установки кипящего слоя, турбулентный реактор) при интенсификации режимов теплопереноса.

В качестве примера кросс-корреляционных взаимосвязей, реализующихся между разными показателями солнечной активности, рассмотрим кросс-корреляционную зависимость (7) между солнечной активностью, представляемой Цюрихским ежедневным рядом чисел Вольфа, и ежедневным рядом для величин суммарной энергии, излучаемой короной Солнца (данные, регистрируемые на пике Ломники в Словакии с 1939 по 2007 годы включительно, представлены в [6]). Соответствующие кросс-корреляторы, характеризующие возможные взаимосвязи между указанными зависимостями, были построены (рис. 2) для одного и того же интервала усреднения, $T = 365$ сут, но при «привязке» этого интервала к разному времени – к 11-му циклу рассматриваемого Цю-

рихского ряда, начиная от 01.01.1849 года. Рассматриваемые интервалы относятся к самой крутой области возрастания активности, к области максимума, к самой крутой области падения активности и к области последующего минимума, соответственно. Явно выраженная асимметрия $q_{12}(\tau, \theta_{12})$ -зависимостей относительно плоскости $\theta_{12}=0$ с большей степенью коррелированности при $\tau > 0$ указывает однозначно на то, что ведущая роль в формирующихся причинно-следственных связях фиксируемых сигналов принадлежит числам Вольфа, то есть процессам, их формирующим. Периодичности корреляций и антикорреляций в зависимостях $q_{12}(\tau, \theta_{12})$ обуславливаются 27-дневным периодом вращения Солнца.

4. Заключительные замечания

Развитая методология была реализована в работе [7] при решении другой астрометрической проблемы – параметризации динамики микроквара GRS 1915+105 (удаленность 40 000 св. лет), представляющего собой черную дыру ($M_{bh} = 14 \pm 4 M_{\odot}$) и звезду-донор ($M_d = 1.2 \pm 0.2 M_{\odot}$). Анализ эволюционной динамики рентгеновского излучения при аккреции позволил модифицировать существующую классификацию состояний этой двойной системы по характеру проявления «хаоса» в ее эволюции на разных временных интервалах.

Литература

1. С.Ф. Тимашев, Фликкер-шумовая спектроскопия: Информация в хаотических сигналах, М.: Физматлит, 2007, 248 с.
2. Timashev S.F., Polyakov Yu.S. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry. *Fluct. Noise Lett.* 2007. V. 7. N. 2. P. R15-R47; <http://arxiv.org/abs/0812.0030>
3. Timashev S.F., Polyakov Yu.S., Misurkin P.I., Lakeev S.G. Anomalous diffusion as a stochastic component in the dynamics of complex processes // *Physical Rev. E.* 2010. V. 81. No 4. P. 041128.
4. Тимашев С.Ф., Поляков Ю.С., Лакеев С.Г., Мисуркин П.И., Данилов А.И. Принципы флуктуационной метрологии // *ЖФХ.* 2010. Т. 84. № 10. С. 1980-2000.
5. <http://sidc.oma.be/sunspot-data/dailyssn.php>
6. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/corona.html>
7. Polyakov Yu.S., Neilsen J., Timashev S.F. Stochastic variability in X-ray emission from the black hole binary GRS 1915+105 // *Astron. J.* 2012. V. 143. N. 6. 148-157 [arXiv:1204.3690v1].

FLUCTUATION METROLOGY IN ASTROMETRIC PROBLEMS

Timashev S.F.¹, Polyakov Yu.S.^{2,3}

¹*Karpov Institute of Physical Chemistry, Moscow, Russia*

²*USPolyResearch, Ashland, PA, USA*

³*Department of Computer Science, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, USA*

We use the previously formulated principles of “fluctuation metrology” to develop the astrometric parameters characterizing the state of complex stellar systems. As an example, we examine the dynamics of the Sun by analyzing the International sunspot (Wolf) number in the timeframe from 1849 to 2009 and the daily full disk values of the total energy emitted by the Sun's outermost atmospheric layer (the corona) at a wavelength of 530.3 nanometers from 1939 to 2007 (measured from Lomnický Peak).

Секция 6

**ОБРАБОТКА, ХРАНЕНИЕ
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

О ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ КАТАЛОГА UCAC

Ермаков Б.К., Гусева И.С.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
Санкт-Петербург, Россия

Необходимость создания каталогов, содержащих одновременно и астрометрические, и фотометрические данные, очевидна. В то же время современные астрометрические каталоги вынужденно дополняются фотометрическими данными, полученными из других проектов. Анализ этих дополнительных данных показывает наличие больших проблем современной фотометрии.

В работе, доложенной на ВАК-2010 [1], были представлены некоторые странные особенности фотометрических данных, присоединенных к современному астрометрическому каталогу UCAC3 [2] из проекта SuperCosmos [3]. В качестве примера – Рис. 1. Помимо низкой точности самих фотометрических данных, полученных по измерениям фотографических пластинок, предполагается значительная доля ошибочных отождествлений звезд UCAC3 и звезд из SuperCosmos.

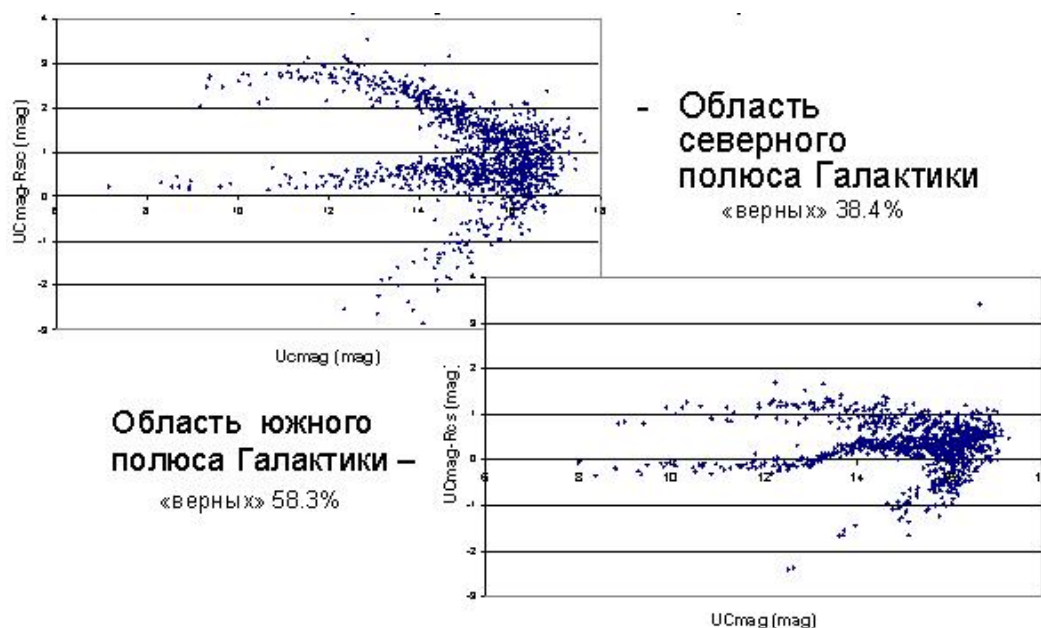


Рис. 1. Пример разностей фотометрических величин UCmag – собственных измерений проекта UCAC и присоединенных R_{SC} из проекта SuperCosmos.

Представленная в августе 2012 г. версия UCAC4 [4] содержит иные, новые фотометрические данные, полученные в результате реализации проекта APASS - The AAVSO Photometric All-Sky Survey [5]. The American Association of Variable Star Observers (AAVSO) – всемирная ассоциация наблюдателей переменных звезд, объединяющая и профессиональных астрономов, и любителей. Проект APASS был начат в 2009 году с целью обеспечить однородные фотометрические измерения в 5 полосах – стандартных В и V Джонсона, и полосах g, r, i тех же, что и в проекте SDSS. Используются два идентичных 20 см телескопа, установленных на общую монтировку и работающие одновременно. В каталог UCAC4 включены фотометрические данные только для 50 млн. звезд из общего числа 113 млн.

	Telescope	Camera	Filter Wheel	Filters	Pixel Size	Field of View	Exposure Time
		<i>Apogee U16m</i>	<i>Apogee AFW50-7S</i>	<i>Astrodon</i>	<i>9x9 micron</i>		
APASS 1a	ASA N8; 20cm f/3.6	KAF16803 4kx4k ABG	7 50mm square slots	u', B, g', z', clear	2.57 arcsec	2.9x2.9 degrees	180 seconds
APASS 1b	ASA N8; 20cm f/3.6	KAF16803 4kx4k ABG	7 50mm square slots	V, r', i', clear	2.57 arcsec	2.9x2.9 degrees	90 seconds

APASS 1/2	
<i>Location</i>	DRO; Weed, NM(1) and CTIO(2)
<i>Mount</i>	Paramount ME
<i>Camera software</i>	Diffraction Limited
<i>Scheduler</i>	DC3 Dreams
<i>Control computer</i>	Virtual Windows XP
<i>Access/pipeline computer</i>	Linux
<i>Image storage</i>	1.5TB external drive

Рис. 2. Параметры инструмента для обзора APASS [5].

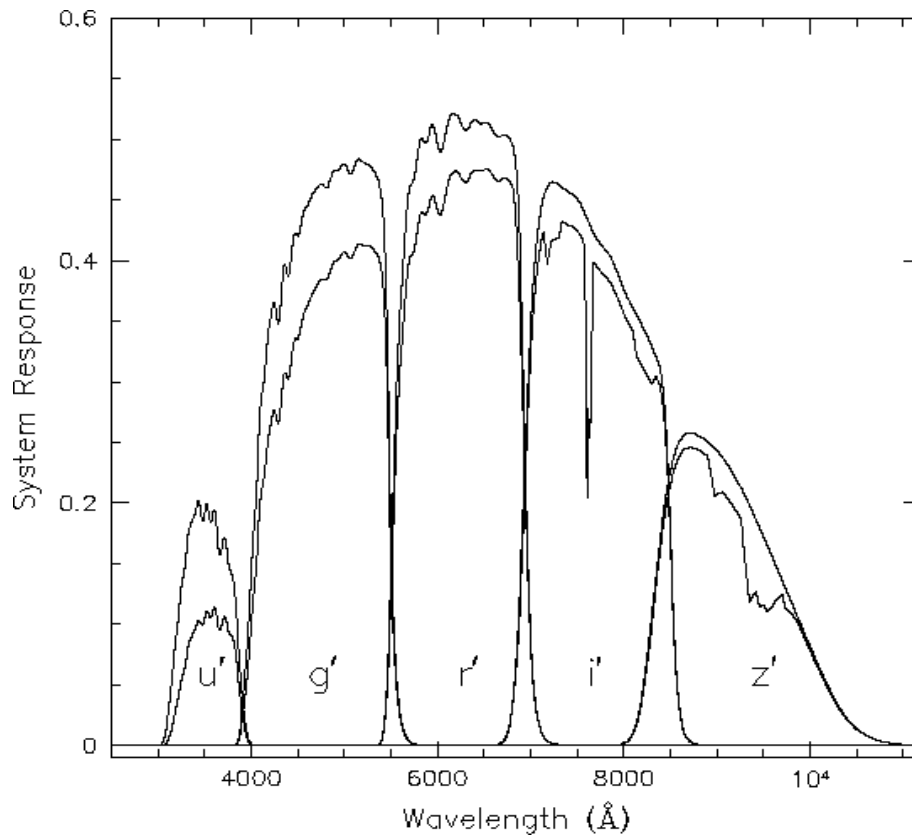


Рис. 3. Фотометрические полосы проекта SDSS [6], в проекте APASS используются идентичные фильтры g, r, i.

На следующих рисунках приведены результаты сравнения данных UCAC4/APASS с соответствующими данными из других каталогов, прежде всего, с каталогом Tycho-2, к которому были привязаны измерения проекта APASS в полосах B и V.

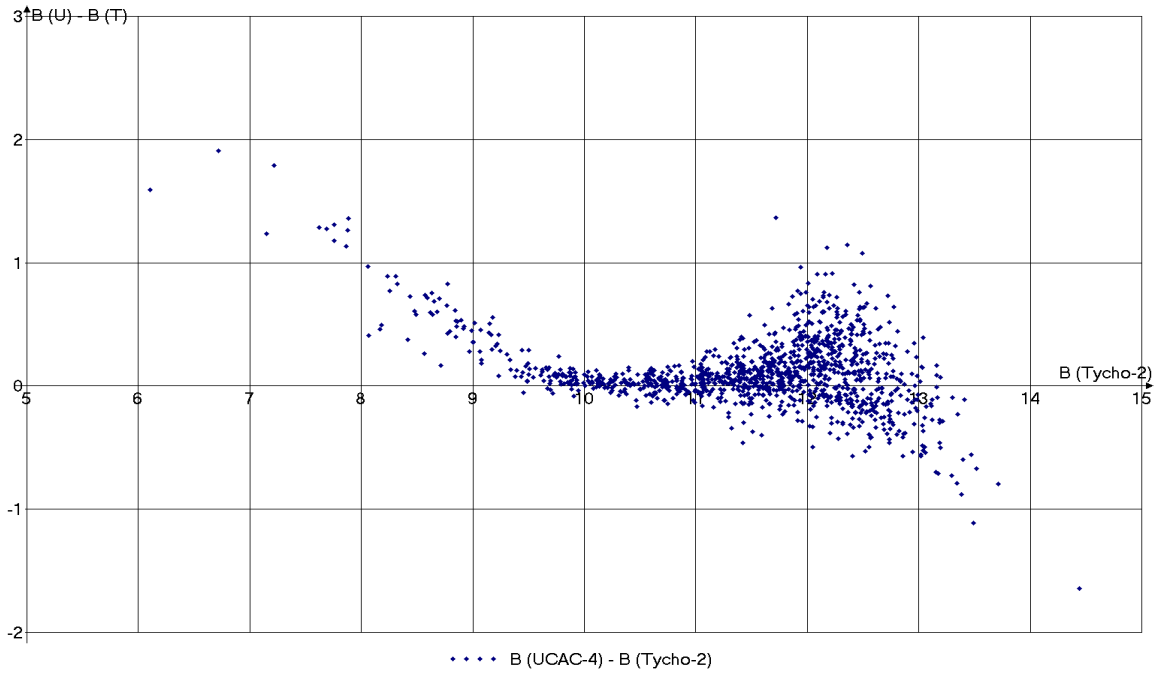


Рис. 4. Разность B величин из UCAC4 / APASS и из Tycho-2.

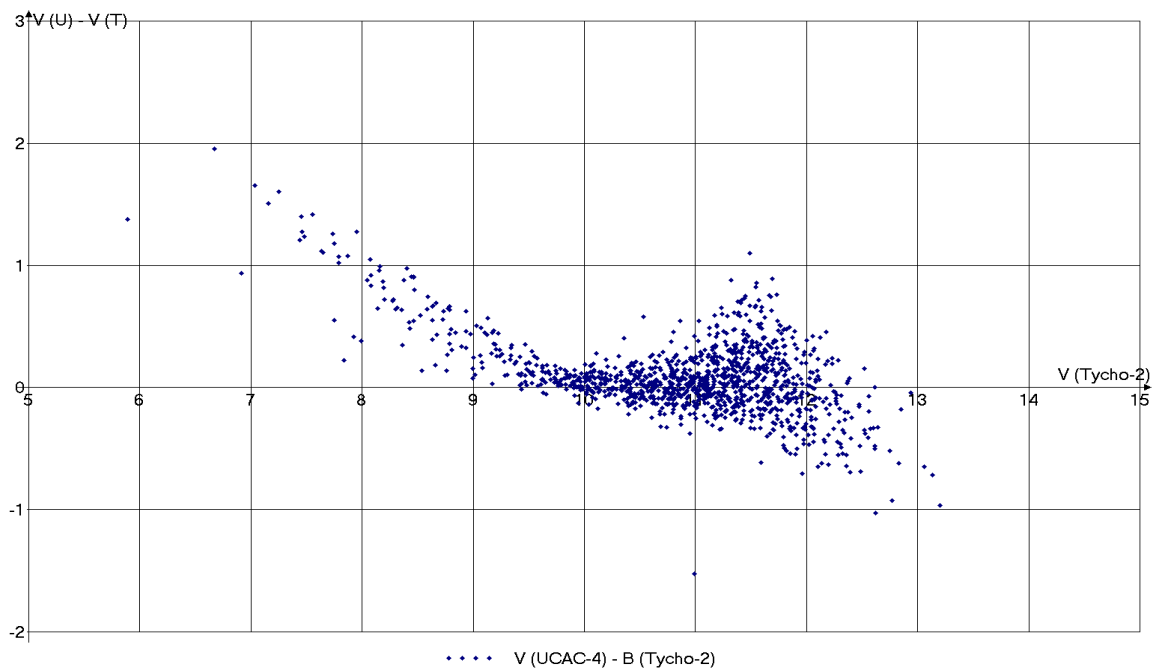


Рис. 5. Разность V величин из UCAC4 / APASS и из Tycho-2.

Значительная систематическая разность обеих величин B и V для звезд ярче 10 величины может быть объяснена только систематическими ошибками обработки наблюдений APASS, причем авторы APASS сами указывали, что их рабочая область - от 10 до 17 звездной величины, поэтому включение в UCAC4 фотометрических данных для звезд ярче 10-й величины объяснить трудно.

Наличие систематических ошибок для ярких звезд до 10^m подтверждается сравнением величин V из UCAC4/APASS с величинами V из обзора TASS4 [7] (Рис. 6).

В то же время сравнение V из обзора TASS4 с V из Tycho-2 показывает полное отсутствие систематики. Разброс значений на Рис. 4, 5 и 7 для звезд слабее 11-й величины может быть объяснен большими случайными ошибками Tycho-2. Аномальное отклонение на Рис. 6 для звезд слабее 13 величины является, вероятнее всего, ошибками TASS4 для слабых звезд.

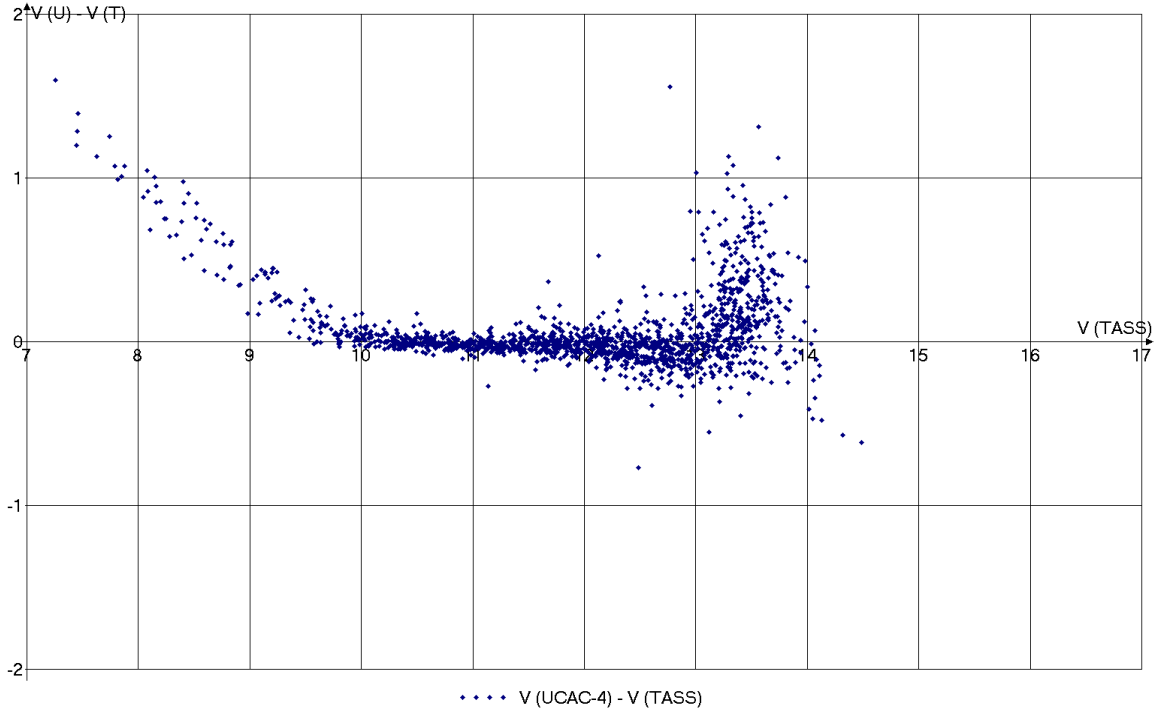


Рис. 6. Разность V величин из UCAC4 / APASS и из TASS [7].

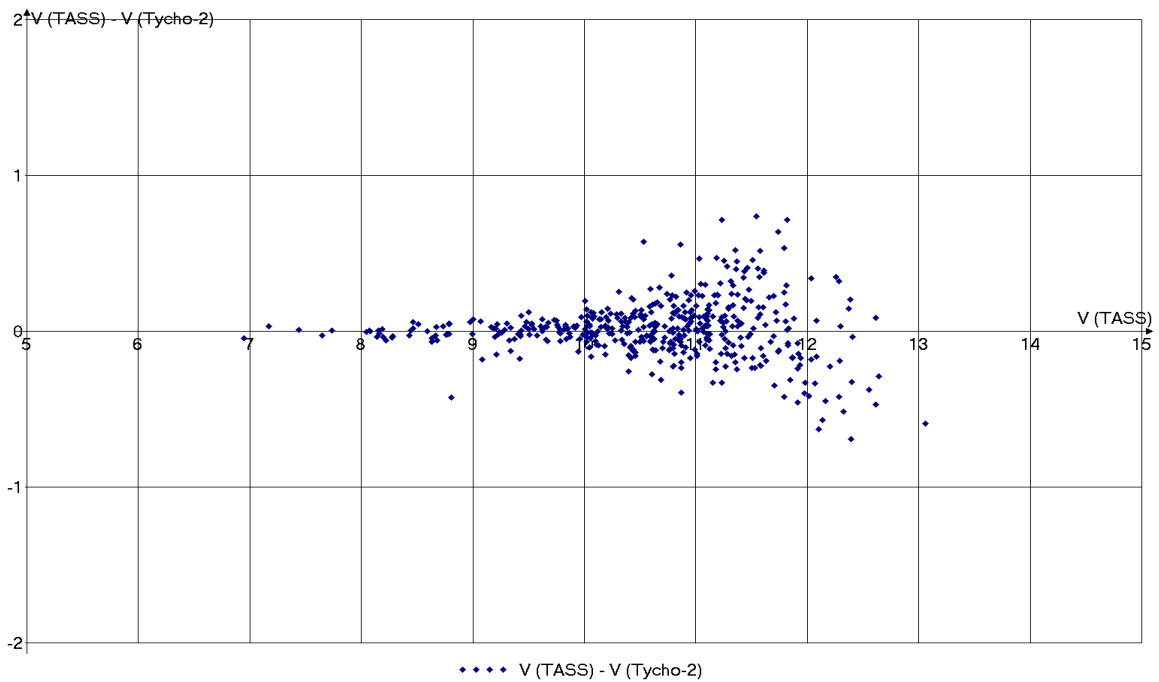


Рис. 7. Разность V величин из Tycho-2 и из TASS [7].

Сравнение величин g , r , i (см. Рис. 3), включенных в UCAC4/APASS, возможно в настоящее время только с соответствующими величинами обзора SDSS [8]. Все три полосы показывают похожие результаты: подтверждается наличие систематических ошибок UCAC4/APASS для звезд ярче 10^m , имеется необъяснимый скачок в окрестности 13-14 звездной величины, и «шлейф» в нижних частях графиков. Детальный анализ больших отрицательных разностей показал, что это случайные ошибки измерений SDSS.

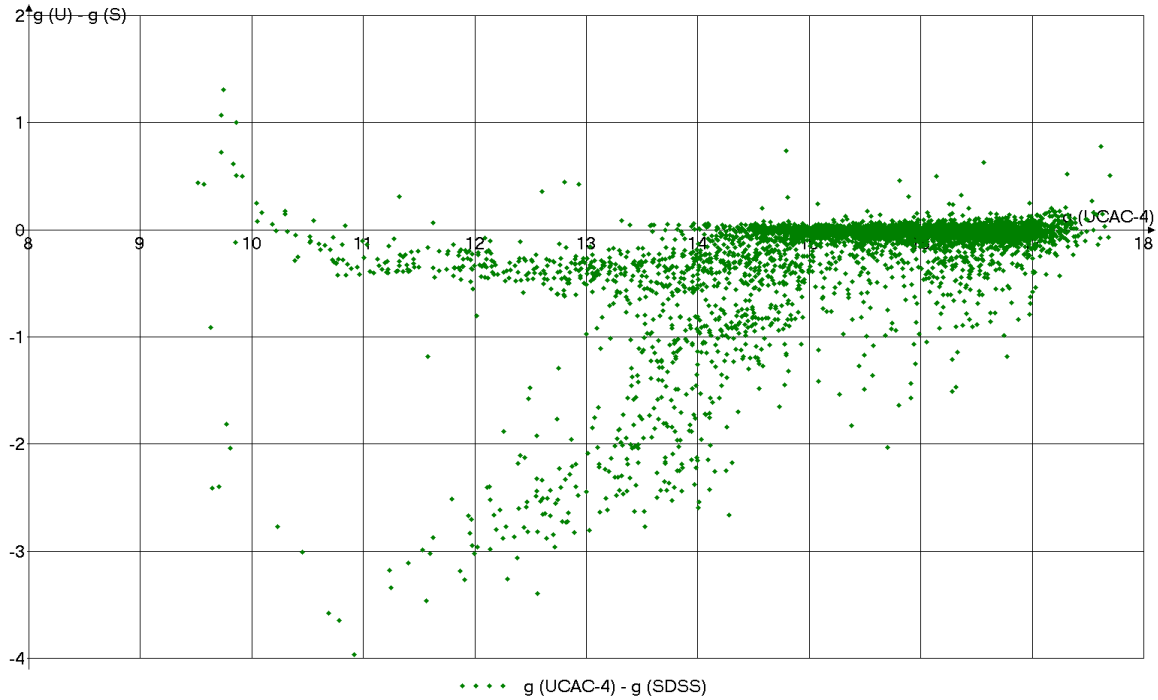


Рис. 8. Разность g величин из UCAC4 / APASS и g из SDSS.

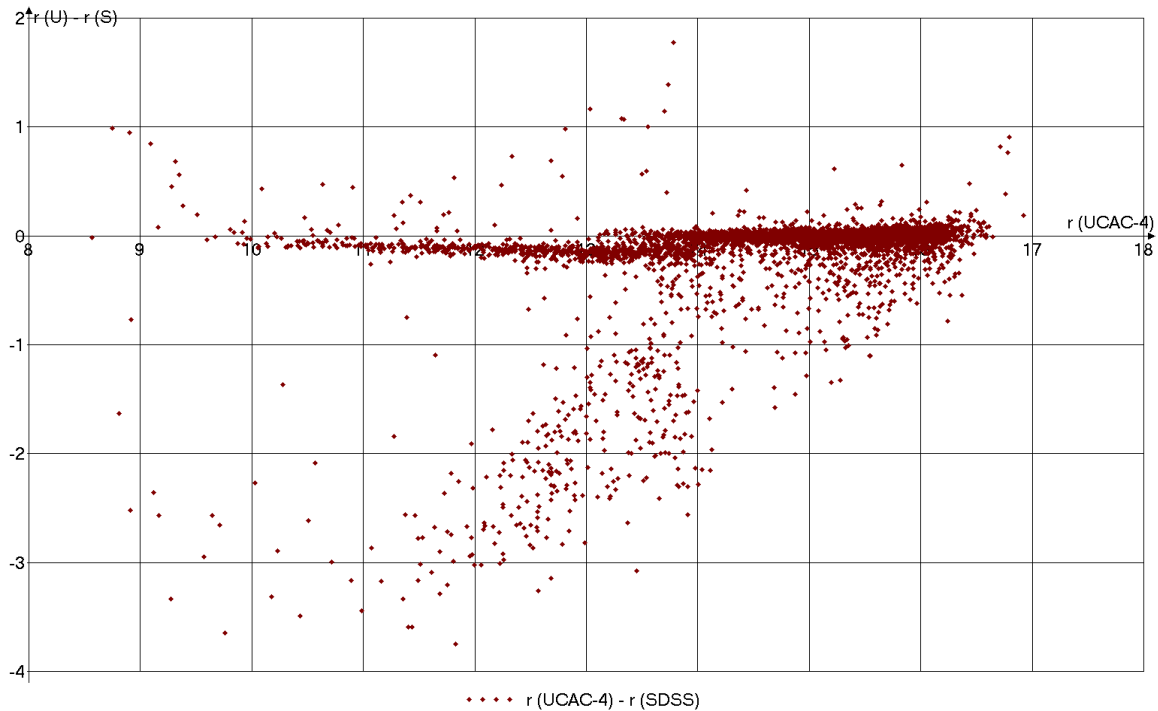


Рис. 9. Разность r величин из UCAC4 / APASS и r из SDSS.

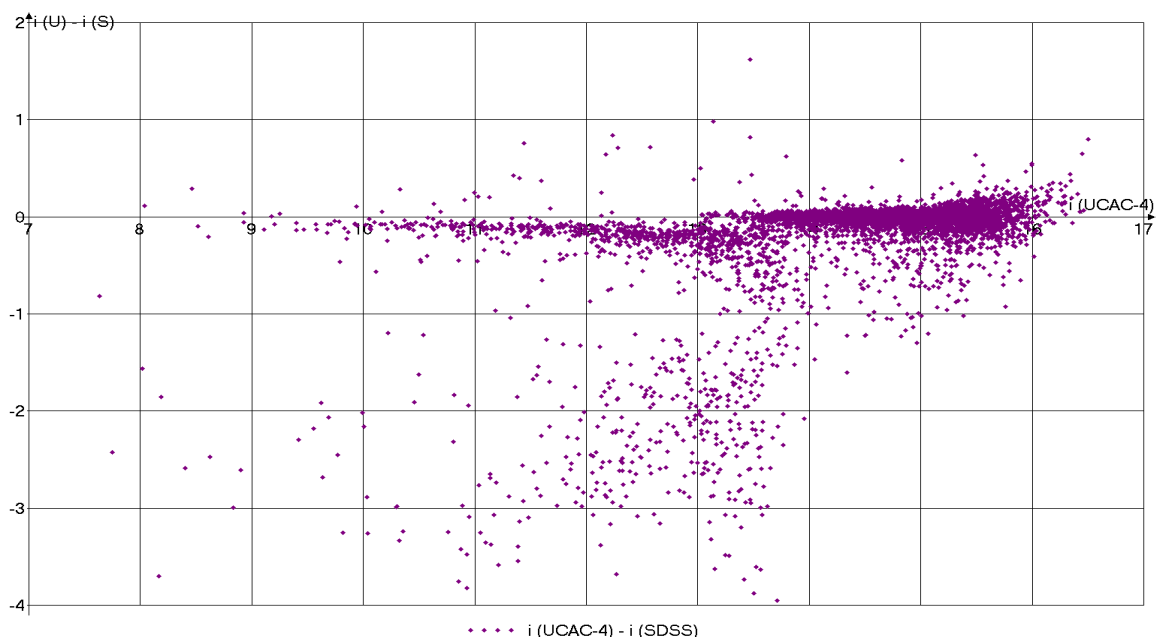


Рис. 10. Разность i величин из UCAC4 / APASS и i из SDSS.

Анализ фотометрических данных, дополняющих астрометрические каталоги, показывает наличие значительных проблем в этой области. Точность современных фотометрических измерений с ПЗС лучше 0.01^m , в то же время не существует достаточно надежной глобальной фотометрии звезд в оптическом диапазоне хотя бы до 16^m . Каталог 2MASS, содержащий фотометрические данные в инфракрасной области спектра, не обеспечивает решение всех задач современной астрономии.

Опыт APASS показывает, что в принципе задача создания глобального многополосного фотометрического каталога для оптического диапазона может быть решена с довольно скромными средствами наблюдений. Но в настоящее время фотометрическими данными, включенными в UCAC4, стоит пользоваться с осторожностью, и не рекомендуется использовать данные для звезд ярче 10^m .

Литература

1. Ермаков Б.К., Гусева И.С. О фотометрических данных в каталоге UCAC3. ВАР-2010.
2. UCAC3: obsolete
3. SuperCOSMOS Sky Surveys (SSS) <http://www-wfau.roe.ac.uk/sss/>
4. UCAC4: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/322>
5. APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey <http://www.aavso.org/apass>
6. SDSS: The Photometric System <http://www.astro.princeton.edu/PBOOK/camera/camera.htm>
7. TASS: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?II/230>
8. SDSS: The Sloan Digital Sky Survey - <http://www.sdss.org/>

ON THE PHOTOMETRIC DATA OF THE UCAC4 CATALOG

Ermakov B.K., Guseva I.S.

*Central Astronomical Observatory of the RAS (at Pulkovo)
Saint Petersburg, Russia*

It is evident that the modern astronomical catalogues should contain both astrometric and photometric precise data for all stars at least until 16^m and can be created on the base of the same observations. But now the quite reliable astrometric catalogues (UCAC) are supplied with the photometric values obtained by other projects. Analysis of these additional data reveals the serious problems of the all-sky photometry in the optical bandpass.

ЦИФРОВОЙ АРХИВ УКРВО: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИНОК С ТЕЛАМИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Иванов Г.¹, Пакуляк Л.¹, Шатохина С.¹, Ижакевич Е.¹, Казанцева Л.², Андрук В.¹

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

²Астрономическая обсерватория Киевского университета им. Т.Г. Шевченко, Киев, Украина

В ГАО НАН Украины выполнено сканирование и обработка фотографических пластинок с изображениями внешних планет и их спутников, полученных во второй половине прошлого века в ГАО НАНУ и АО Киевского университета из объединенного цифрового архива (ОЦА) УкрВО. Оцифровка пластинок ОЦА ведется на двух моделях планшетных сканеров: Microtek ScanMaker 9800XL TMA и Epson Expression 10000XL. База данных пластинок ОЦА УкрВО находится в открытом доступе на ресурсах ГАО НАНУ (<http://gua.db.ukr-vo.org>). Обработка оцифрованных изображений ведется в программном пакете LINUX-MIDAS-ROMAFOT, специально усовершенствованном для обработки больших изображений (свыше 15000 пкс по одной из сторон). Получаемые предварительные результаты и сравнение их с предыдущими измерениями позволяют поставить задачу переобработки результатов наблюдений на основе оцифрованных архивных изображений тел Солнечной системы стеклотеки ГАО НАНУ. Например, для одной пластинки с изображением Плутона получена позиционная точность 10 и 20 mas по RA, DEC соответственно и (O-C) из сравнения с JPL PLU021.DE405 составляет 140(RA) и 270(DEC) mas.

В стеклотеке ГАО НАНУ находится свыше 1800 пластинок с планетами и их спутниками, включая около 80 изображений Урана, Нептуна и Плутона, 1700 пластинок с малыми планетами и более 900 пластинок и пленок с кометами. Наблюдения выполнены в периоды 1949-1999 гг. с использованием 11 инструментов. Большая часть пластинок получены на двойном широкоугольном астрографе (F/D = 2000/400) и двойном длиннофокусном астрографе (F/D = 5500/400) ГАО НАНУ. Наблюдения проводились в Киеве, Львове, Бюракане, Абастумани, на Майданаке, в Кито (Эквадор).

База данных (БД) пластинок архива ГАО (GUA) находится в открытом доступе на сайте УкрВО, расположенном на компьютерном кластере ГАО НАНУ (<http://gua.db.ukr-vo.org>). БД аккумулирует фотографические архивы четырех украинских обсерваторий - участников национального проекта УкрВО. С системой управления и поиска данных БД является пилотным проектом Объединенного Цифрового Архива (ОЦА) УкрВО [2].

Сканирование архива GUA начато в 2008 г. Сканирование ведется на двух моделях сканеров: Microtek ScanMaker 9800XL TMA (MSM) и Epson Expression 10000XL (EE). Оба инструмента были исследованы на предмет внутренних ошибок и максимально возможной точности. В табл. 1 приведены результаты сравнения оценок позиционной и фотометрической точности для сканов стандартных звездных полей. Результаты, полученные для пластинок ДША, обсуждались неоднократно [3, 5, 6], поэтому интересны аналогичные данные для астрографа ДДА, учитывая большое количество пластинок с телами Солнечной системы, полученных на данном телескопе. Исследовались сканы трех пластинок с изображениями спутников Урана Титании и Оберона.

Пластинки сканировались в сером диапазоне 16-bits с разрешающей способностью 1200-1600 dpi (оптимальные значения подбирались по результатам исследования). Линейные размеры пластинок до 8 тыс. пкс (24×24 см). Астрометрическая и фотометрическая редукция выполнена в пакете LINUX-MIDAS-ROMAFOT с каталогом Tusch-2 в качестве опорного. Процедура обработки сканов больших линейных размеров на основе данных самого изображения описана в [3, 7].

Таблица 1. Сравнение позиционной и фотометрической точности, полученной по сканам пластинок ДДА и ДША для сканера MSM.

телескоп	цвет	экспозиция	масштаб, s /mm	поле	σ_{ra} mas	σ_{dec} , mas	σ_m
ДША	B	18 min	103	$8^\circ \times 8^\circ$	170	180	0.20
ДДА	B _{ph}	20 min	38	$2^\circ \times 2^\circ$	60	80	0.13

Результаты для сканера MSM приведены в табл. 2. На рис. 1а показаны разности каталожных и вычисленных координат, не исправленные за ошибки механики сканера, на рис. 1б - те же разности после внесения исправлений. Фотометрические зависимости построены по данным Tycho (точки) и фотоэлектрическим стандартам (кружки).

Таблица 2. Результаты, полученные со сканером MSM.

№	N_T	σ_α	σ_δ	N_p	$\sigma_{B,m}$	N_T	$\sigma_{B,m}$	n_s	Δ_α	Δ_δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
356	149	39	87	10	0.13	120	0.27	(3) (4)	-190 +20	+90 -80
407	136	53	69	8	0.07	107	0.27	(3) (4)	+600 +470	-600 -100
2693	136	73	76	9	0.24	101	0.29	(3) (4)	+60 +360	+770 +740

В табл. 2 колонка 1 - номер пластинки, 2 - количество опорных звезд, 3,4 - позиционная точность, mas, 5,7 - число звезд для фотометрии (фотоэлектрического стандарта, Tycho), 6,8 - фотометрическая точность (Johnson B, Tycho), 9 – (3) - Titania, (4) – Oberon, 10, 11 - (O-C), mas. Результаты показывают, что оцифрованные пластинки ДДА могут обеспечить позиционную точность 40-90 mas и фотометрическую 0.13^m.

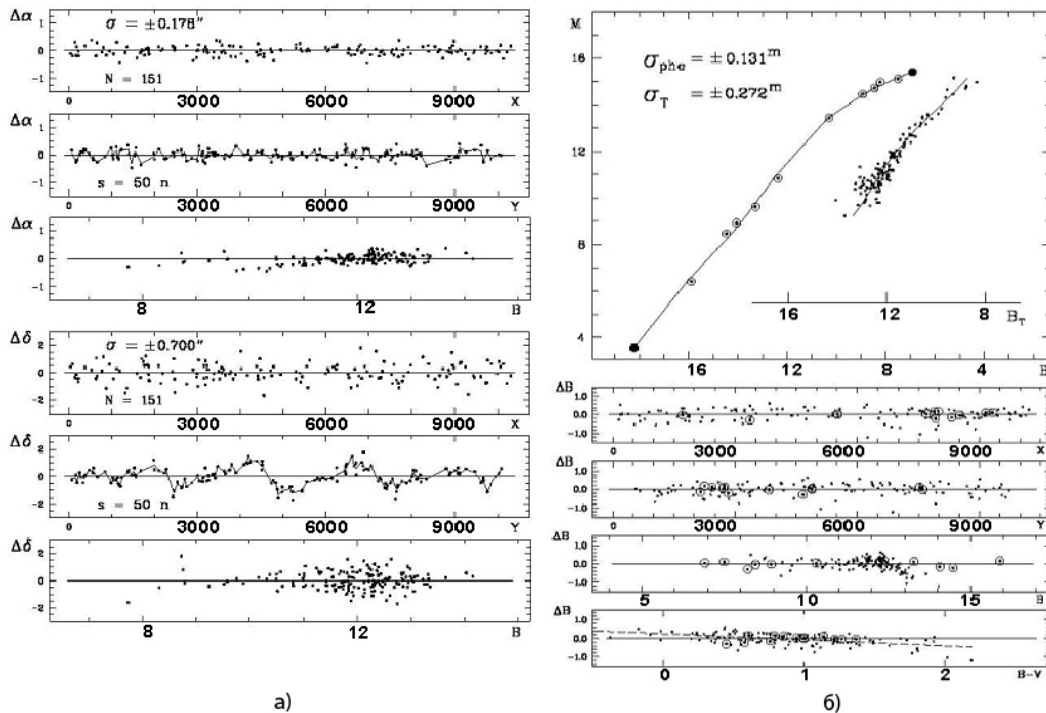


Рис. 1. Разности вычисленных и каталожных координат звезд Tycho и фотометрические кривые для Microtek ScanMaker 9800XL TMA.

Чтобы установить пригодность сканера ЕЕ для позиционных определений тел Солнечной системы на сканированных изображениях, были выбраны пластинки ДДА с изображением Плутона, полученные в 1979-1980 гг. Кривые зависимостей разностей координат по осям координат и звездным величинам приведены на рис. 2а и 2б (не исправленные и исправленные соответственно). Фотометрические кривые строились только по звездам Тучо, поскольку на исследуемую область отсутствуют фотоэлектрические стандарты. Результирующая кривая идентична аналогичной кривой, приведенной на рис. 1б. Окончательная оценка точности по интервалам звездных величин приведена в табл. 3. В табл. 4 приведены координаты всех трех объектов, упомянутых выше, вместе с их (О-С), а в табл. 5 для сравнения приведены данные о точности, полученной ранее из обработки измерений этих же пластинок на машинах с ирисовой диафрагмой.

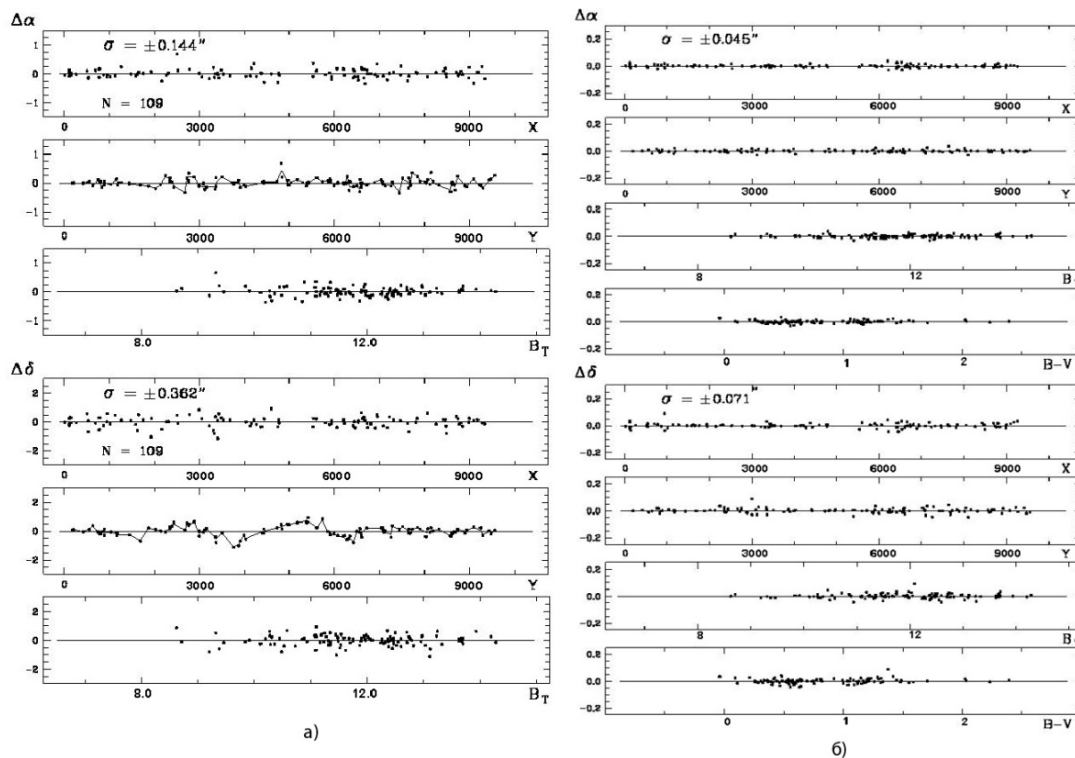


Рис. 2. Разности вычисленных и каталожных координат звезд Тучо для Epson Expression 10000XL.

Поскольку обширными рядами наблюдений тел Солнечной системы обладает также обсерватория Киевского университета, было интересно получить аналогичные данные по пластинкам архива КАО. Обработывались две пластинки с изображением Плутона: одна получена на двойном астрографе Репсольда (масштаб 1.058 "/пкс), вторая на АЗТ8 (масштаб 0.377"/пкс). Результаты также приведены в табл.4.

Таблица 3. СКО по интервалам звездных величин.

#	1	2	3	4	5	6	7	среднее
B_{Tycho}	8.66	9.51	10.48	11.52	12.5	13.46	14.24	11.81
σ_{ra} mas	38	56	49	39	53	38	15	45
σ_{dec} mas	43	69	60	72	89	46	11	71
N of stars	2	6	15	36	35	13	2	

Таблица 4. Геоцентрические координаты и сравнение с эфемеридой
(Horizons On-line Ephemeris System, JPL, sources: URA083.DE405, PLU021.DE405)

PL	Date, UT	σ_α “	σ_δ “	N _{Тyc}	RA, ICRF J2000.0	DEC, ICRF J2000.0	(O-C) _{α} “	(O-C) _{δ} “
U3.Titania (mV=13.5)								
356	1963 2 24.959422	.039	.087	149	10 23 28.568	+10 54 16.14	-.03	.04
2693	1963 4 18.842792	.073	.076	136	10 16 32.965	+11 32 36.35	.22	.72
407	1963 4 25.914368	.053	.069	136	10 16 08.051	+11 34 50.40	.77	-.64
U4.Oberon (mV=13.7)								
356	1963 2 24.959422	.039	.087	149	10 23 30.031	+10 55 33.12	.22	-.15
2693	1963 4 18.842792	.073	.076	136	10 16 34.336	+11 33 43.25	.55	.66
407	1963 4 25.914368	.053	.069	136	10 16 07.863	+11 34 31.00	.62	-.14
Pluto(mV=13.8) архив ГАО НАНУ								
5937	1979 2 21.067770	.045	.071	109	13 37 33.608	+08 40 57.86	-.19	-.27
1717	1980 4 15.969857	.086	.084	1296	13 42 20.404	+08 25 06.89	-.89	.27
1727	1980 4 17.904472	.074	.078	1378	13 42 08.675	+08 26 09.99	-.37	.42
Pluto(mV=13.8) архив АО КНУ								
257011	1986 6 17.847442	.040	.052	38	14 32 55.063	+02 45 14.25	.30	.25
272009	1987 7 09.864201	.059	.057	10	14 41 10.107	+01 38 20.31	.00	-.50

Из табл. 5 видно, что сканер ЕЕ дает несколько лучшие результаты по позиционной точности, чем MSM. Из этой же таблицы следует, что результаты, полученные по оцифрованным пластинкам, имеют меньшие позиционные ошибки, чем те, которые были получены ранее по измерениям на координатометрах. Последнее дает возможность поставить задачу переобработки архивных данных ГАО НАНУ с лучшей точностью. Обнадеживают также результаты, полученные для пластинок архива АО КНУ (табл. 4). Они тоже могут быть использованы для постановки аналогичных задач.

Таблица 5. Данные о точности оцифрованных изображений в сравнении с аналогичными данными, полученными по измерениям на координатометре с ирисовой диафрагмой.

PL	Microtek, *Epson Expression				координатометр			
	σ_{ra} mas	σ_{dec} mas	N of stars		σ_{ra} mas	σ_{dec} mas	N of stars	
356	39	87	149	Тyc	110	120	34	ACT
2693	73	76	136	Тyc	90	120	15	ACT
407	53	69	136	Тyc	120	110	27	ACT
5937*	45	71	109	Тyc	160	200	19	ACT
1717*	86	84	1296	Тyc	290	280	38	ACT
1727*	74	78	1378	Тyc	210	230	36	ACT

Пластинки с изображениями спутников Юпитера были отсканированы на сканере EE. Обработка сканов выполнялась по той же методике. Поскольку отобранные пластинки относятся к разным наблюдательным архивам, в частности пластинки архива MAJ060 (Майданак) имеют меньшие линейные размеры (28'×28'), то окончательная редукция выполнялась по-разному. Для пластинок MAJ060 из-за отсутствия достаточного количества опорных звезд редукция делалась двойной привязкой. Полученный разброс значений (O-C) для некоторых из пластинок показал необходимость корректного подбора редукционных моделей. Вопрос требует дальнейшего исследования как с точки зрения аккуратного подхода к модели окончательной редукции, так и алгоритма обработки отсканированных изображений, поскольку наблюдения велись по методу Меткофа и изображения звезд на пластинке вытянуты.

Учитывая приведенные выше результаты, мы можем говорить о постановке задачи переобработки данных фотографических наблюдений тел Солнечной Системы по оцифрованным архивам ГАО НАНУ и АО КНУ. Наиболее интересными являются пластинки с далекими планетами и их спутниками, особенно в плане сравнения результатов с современными CCD наблюдениями.

Кроме двух использованных в данной работе наблюдательных архивов в рамках проекта УкрВО могут быть использованы архивы и других украинских обсерваторий, например АО Львовского университета им. И. Франко (около 8 000 пластинок, полученных в первой половине XX века), особенно с учетом того, что оцифровка этих архивов идет полным ходом [1].

Литература

1. *Pakuliak L.K., Andruk V.M., Kazantseva L.V., Virun N.V.* Photographic Archives of Ukrainian Observatories: Digitizing a Heritage. IAU Symp. No.285 "New Horizons in Time- Domain Astronomy", Oxford, UK, Sept. 19-23, 2011: Proc. / Eds. R.E. Griffin et al.- Cambr.: Univer. Press. - 2012. - N .- P. 389-391.
2. *B. Vavilova, L. K. Pakulyak, Yu. I. Protsyuk, et al.,* "Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO): The Modern State and Perspectives of Development of Observation Data Generalized Archive," *Kosm. Nauka Tekhnol.* 17 (4), 88–105 (2011).
3. *Andruk V., Butenko G., Yatsenko A.,* 2010, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 26, N3, 75.
4. *Golovnya V., Andruk V., Yatsenko A.,* 2010, *Journal of Physical Studies*, 14, N2, 2902.
5. *Andruk V., Pakuliak L.,* 2007, *Journal of Physical Studies*, 11, N3, 329.
6. *Andruk V., Ivanov G., Pogoreltsev M., Yatsenko A.,* 2005, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 21, N5, 396.
7. *Andruk V., Vid'machenko A., Ivashchenko Yu.,* 2005, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*, N5, 544.

DIGITAL ARCHIVE OF UKRVO: FIRST RESULTS OF MAO NASU SOLAR SYSTEM BODIES PHOTOGRAPHIC PLATE PROCESSING

Ivanov G.¹, Pakuliak L.¹, Shatokhina S.¹, Yizhakevych E.¹, Kazantseva L.², Andruk V.¹

¹*Main astronomical observatory NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine*

²*Astronomical observatory of Taras Shevchenko Kiev National university, Kiev, Ukraine*

The digitizing and processing of photographic plates with the images of the outer planets and their satellites from the archive collections of MAO NASU and AO of Kiev university included into the UkrVO Joint Digital Archive (JDA) have been made. Plates were obtained in the last half of the 20th century. The digitizing of JDA archive plates and inclusion of plate preview images into GPA database has been under way, using two models of flatbed scanners: Microtek ScanMaker 9800XL TMA and Epson Expression 10000XL. The database with metadata of plates is allocated on the computational resources of MAO NASU (<http://gua.db.ukr-vo.org>).

Plates have been scanned at 16-bits grey dynamic range, with a resolution of 1200-1600 dpi, and saved in TIFF format. Linear dimensions of images are up to 13 thousand pixels (for plates 30×30 cm). The astrometric and photometric calibration procedures have been done in the LINUX-MIDAS-ROMAFOT environment and Tycho-2 as reference with the image processing procedure specially developed for digitized images of huge linear dimensions on the basis of the image inherent traits. First results of digitized plate processing give the rms errors of 10 and 20 mas for RA, DEC respectively. (O-C) for plates with Pluto in comparison to JPL PLU021.DE405 has been derived of 140(RA) and 270(DEC) mas.

КАТАЛОГ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ OCARS

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В. Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено текущее состояние каталога оптических характеристик астрометрических радиоисточников OCARS. В каталог включены радиоисточники, наблюдавшиеся в астрометрических и геодезических РСДБ-программах в 1979–2012 гг. Оптические характеристики включают тип объекта, красные смещения и визуальные или инфракрасные звездные величины. С момента выхода первой версии OCARS в декабре 2007 г. каталог непрерывно развивается в отношении включения новых источников и добавления новых астрофизических данных. Для пополнения каталога используются базы данных NED и SIMBAD, а также результаты, публикуемые в нескольких астрономических журналах и в arXiv. Кроме использования литературных данных, красные смещения для около 150 радиоисточников получены из специально организованных наблюдательных программ на больших оптических телескопах. На ноябрь 2012 г. каталог OCARS содержит 7173 радиоисточника, из которых для 3898 известно красное смещение и для 4860 визуальная или инфракрасная величина. Каталог обновляется каждые несколько недель и доступен на http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/ocars.txt.

Введение

Каталог OCARS (Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources) включает радиоисточники, наблюдавшиеся в астрометрических и геодезических РСДБ-программах в 1979–2012 гг., для которых приводятся, когда доступны, физический тип, визуальная или инфракрасная звездная величина и красное смещение (z). С момента выхода первой версии OCARS в декабре 2007 г. [1] каталог непрерывно развивается за счет увеличения числа источников, а также добавления новых и уточнения имеющихся наблюдательных данных. Последняя опубликованная версия каталога относится к апрелю 2009 г. [2]. В настоящей работе описано текущее состояние каталога.

На первом этапе работы над каталогом оптические характеристики брались преимущественно из базы NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>), которая содержит большое число астрофизических данных с детальным описанием и комментариями. Недостатком NED является задержка в обработке литературных источников до 2 лет. В настоящее время для обновления OCARS дополнительно активно используется база SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>), которая содержит меньше объектов, но данные по ним появляются более оперативно. Кроме того, с 2011 г. регулярно отслеживаются публикации в основных астрономических журналах и arXiv, и все новейшие данные сразу вводятся в OCARS. Но данные NED по-прежнему рассматриваются как основные и используются, когда становятся доступными.

Кроме использования баз данных, красные смещения части источников получены из специально организованных программ оптических спектральных наблюдений, как было предложено в [1,2]. Первые наблюдения на БТА были организованы в Пулковской обсерватории [4]. По разным причинам эта программа оказалась неэффективной. За три года удалось отнаблюдать только около 10 источников. Намного более плодотворными оказались наблюдения на зарубежных телескопах NTT (Чили), Gemini (Гавайские острова, Чили), NOT (Канарские острова), организованные О.А.Титовым в 2010–2011 гг. [5,6]. Из этих наблюдений были определены красные смещения для примерно 150 радиоисточников. Важно, что большая их часть расположена в южном полушарии.

Исторически, при создании OCARS основной задачей было определение и коррекция ошибочных красных смещений астрометрических радиоисточников, поскольку именно они в первую очередь важны для различных приложений. Звездные величины первоначально рассматривались как второстепенные для полноты информации и планирования спектральных наблюдений. Однако сейчас начата работа над следующей версией международной небесной системы координат ICRF3. Планируется сравнение этого каталога координат радиоисточников с высокоточным оптическим каталогом, полученным в результате миссии Gaia. Для более точного сравнения необходимо иметь как можно больше источников ICRF3 в программе наблюдений Gaia. Для планирования последних нужно знать оптическую яркость радиоисточников, которая, таким образом, становится важной информацией для решения этих задач [3]. Поэтому в последнее время полноте и аккуратности данных о визуальных или инфракрасных величинах в каталоге OCARS уделяется больше внимания, чем раньше.

Текущая версия каталога OCARS

Список объектов, включенных в OCARS, формируется из следующих астрометрических и геодезических РСДБ-программ и каталогов:

- источники, вошедшие во вторую реализацию международной небесной системы координат ICRF2, <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/icrf2/icrf2.html>;
- другие радиоисточники, наблюдавшиеся в рамках IVS, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>;
- радиоисточники из каталога РСДБ-группы Годдардского центра космических полетов НАСА, <http://gemini.gsfc.nasa.gov/solutions/astro/>;
- источники из каталога Л. Петрова, <http://astrogeo.org/> (основной источник пополнения списка OCARS в последние два-три года);
- радиоисточники из разных специальных программ, в первую очередь [3].

Общая статистика текущей версии каталога приведена в табл. 1.

Около 30% источников в OCARS не имеют информации о физических характеристиках. Тем не менее, их присутствие важно, поскольку они используются для оптического отождествления, а также для поиска их характеристик в базах данных и литературе или планирования оптических спектроскопических наблюдений.

В работе [2] был опубликован список радиоисточников, в первую очередь интересных для оптического отождествления и определения красного смещения. Это источники с большой наблюдательной историей, пригодные для уверенного определения их собственного движения. К сожалению, этот список, мало сократился за прошедшее время, поскольку он включает много лацертид, для которых красное смещение определяется с большим трудом. Поэтому специальные программы для оптических наблюдений таких объектов остаются весьма актуальными.

Заключение

Знание физических характеристик как можно большего числа радиоисточников, в первую очередь красного смещения, играет важную роль при решении ряда астрофизических и космологических задач. Кроме того, сочетание высокой точности позиционных наблюдений радиоисточников методом РСДБ с известными красными смещениями позволяет построить трехмерную картину вселенной. Эти цели были основными при создании каталога OCARS.

Одним из основных принципов работы над каталогом является непрерывное обновление с учетом новых наблюдательных данных и оперативная публикация через Интернет. В среднем, обновление происходит раз в несколько недель. Самые массовые обновления связаны с появлением радиоисточников в результате новых программ РСДБ-наблюдений.

Таблица 1. Статистика каталога OCARS.

В последней колонке дано отношение текущей статистики к версии 2009 г. [2].

Текущее состояние (ноябрь 2012 г.)		2012/2009
Все источники		
Общее число источников		7173
N	4141 (57.7%)	1.7
S	3032 (42.3%)	1.6
Число источников с известным типом		4432 (61.8%)
АЯГ	3251 (73.4%)	
galaxy	995 (22.5%)	
other	186 (4.2%)	
Число источников с известным z		3898 (54.3%)
N	2486 (63.8%)	2.1
S	1412 (36.2%)	2.2
Число источников с известной величиной		4860 (67.8%)
Источники ICRF2		
Общее число источников		3414
N	2031 (59.5%)	
S	1383 (40.5%)	
Число источников с известным типом		2338 (68.5%)
АЯГ	2065 (88.3%)	
galaxy	224 (9.6%)	
other	49 (2.1%)	
Число источников с известным z		2188 (64.1%)
N	1349 (61.7%)	
S	839 (38.3%)	
Число источников с известной величиной		2589 (75.8%)
Определяющие источники ICRF2		
Общее число источников		295
N	162 (54.9%)	
S	133 (45.1%)	
Число источников с известным типом		269 (91.2%)
АЯГ	265 (98.5%)	
galaxy	4 (1.5%)	
other	—	
Число источников с известным z		256 (86.8%)
N	144 (56.2%)	
S	112 (43.8%)	
Число источников с известной величиной		284 (96.3%)

Каталог OCARS обновляется немедленно с появлением новой информации в базах данных NED и SIMBAD или в новых публикациях. Последняя версия всегда доступна на Web-сайте ГАО РАН (http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/ocars.txt). Для заинтересованных пользователей организовано извещение об обновлениях по e-mail.

В работе над каталогом OCARS автору помогали и помогают многие коллеги. Наиболее полезными были дискуссии и обмен информацией и данными с Анне-Мари Гонтье (Парижская Обсерватория), Юрием Ковалевым (Астрокосмический центр ФИАН), Олегом Титовым (Geoscience Australia), Марион Шмитц (NED).

Литература

1. *Malkin Z., Titov O.* Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources. In: *Measuring the Future, Proc. Fifth IVS General Meeting*, A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.), 2008, 183–187.
2. *Titov O., Malkin Z.* Effect of asymmetry of the radio source distribution on the apparent proper motion kinematic analysis. *Astron. Astrophys.*, 2009, v. 506, No. 3, 1477–1485.
3. *Bourda G., Charlot P., Porcas R.W., Garrington, S.T.* VLBI observations of optically-bright extragalactic radio sources for the alignment of the radio frame with the future Gaia frame. I. Source detection. *Astron. Astrophys.*, 2010, v. 520, A113.
4. *Масленников К.Л., Болдычева А.В., Малкин З.М., Титов О.А.* Определение красных смещений избранных объектов программы IVS. I. *Астрофизика*, 2010, т. 53, № 2, 173–180.
5. *Titov O., Jauncey D.L., Johnston H.M., Hunstead R.W., Christensen L.* Optical Spectra of Candidate Southern Hemisphere International Celestial Reference Frame (ICRF) Radio Sources. *AJ*, 2011, V. 142, No. 5, 165.
6. *Titov O.* Optical identification of ICRF reference radio sources. IAU General Assembly, Commission 19 Scientific Meeting, 30 Aug 2012.

OPTICAL CHARACTERISTICS OF ASTROMETRIC RADIO SOURCES OCARS

Malkin Z. M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

In this paper, the current status of the catalog of Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources OCARS is presented. The catalog includes radio sources observed in various astrometric and geodetic VLBI programs in 1979–2012. For these sources the physical object type, redshift and visual or infrared magnitude is given when available. Detailed comments are provided when some problems with published data were encountered. Since the first version created in December 2007, the catalog is continuously developed and expanded in respect to inclusion of new radio sources and addition of new or correction of old astrophysical data. Several sources of information are used for OCARS. The main of them are the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) and SIMBAD astronomical databases. Besides several astronomical journals and arXiv depository are regularly monitored, so that new data is included in OCARS just after publication. The redshift for about 150 sources have been determined from dedicated optical spectroscopic observations. As of October 2012, OCARS catalog includes 7173 radio sources. 3898 sources have known redshift, and 4860 sources have known magnitude. In 2009, it was used as a supplement material to the ICRF2. The list of radio sources with a good observational history but lacking astrophysical information is provide for planning of optical observations of the most important astrometric sources. The OCARS catalog is updated, in average every several weeks and is available at http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/ocars.txt.

О ВЫЧИСЛЕНИИ ОШИБКИ СРЕДНЕГО ВЗВЕШЕННОГО

Малкин З.М.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В. Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В работе на примере тестовых и реальных данных исследуются два основных классических подхода к вычислению среднего взвешенного значения и его ошибки. Показано, что оба они могут давать неудовлетворительные оценки ошибки среднего при применении к реальным измерениям. Для преодоления обнаруженных проблем предложена комбинированная оценка ошибки среднего, которая дает реалистичную оценку ошибки как для согласованных, так и для несогласованных данных.

Введение

Вычисление средних значений из нескольких определений (измерений) является одной из наиболее частых и важных задач в науке и практике. Во многих случаях характерными особенностями рассматриваемой задачи являются малые выборки (начиная от двух значений) и отсутствие достаточной информации об исходных данных, которая позволила бы получить полезные оценки систематических ошибок усредняемых результатов и их корреляционные зависимости. Также приходится сталкиваться с не всегда корректно определенными случайными ошибками усредняемых данных. Поэтому применение при их решении стандартных методов, рассчитанных на достаточно представительные выборки, при довольно жестких допущениях о статистических свойствах исходных измерений (например, принадлежность к одной генеральной совокупности), оказывается теоретически необоснованным.

Поэтому было предложено много практических методов решения задачи усреднения наблюдательных данных (что уже характеризует ее сложность). На рис.1 иллюстрируются далеко не все подходы к вычислению среднего значения. Однако в астрономических работах обычно используется классический метод вычисления среднего с весами, хотя это далеко не всегда обосновано, как будет показано ниже.

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & \bar{x}_w &= \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{p} & \tilde{x} &= \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i / (s_i^2)}{\sum_{i=1}^k n_i / (s_i^2)} & \frac{|\sigma_i^2 - \sigma_j^2|}{\sigma_i^2} &: \sqrt{\frac{2}{n-1}} = k \\
 \sigma_{\bar{x}} &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} & \sigma_1 &= \frac{1}{\sqrt{p}} & \sigma_2 &= \sigma_1 \sqrt{\frac{H}{n-1}} & w_i &= \frac{1}{s_i^2 + s_b^2} & w_i &= 1/\sigma_i^2 \\
 \sigma_x &= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} & \sigma_c &= \sqrt{\frac{1}{p} \left(1 + \frac{H}{n-1}\right)} & \sigma_3 &= \begin{cases} \sigma_1, & \text{if } H \leq \chi^2(Q, n-1) \\ \sigma_2, & \text{if } H > \chi^2(Q, n-1) \end{cases} \\
 \sigma_2 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x}_w)^2}{p(n-1)}} & \text{Var}(\tilde{x}) &= \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{s_i^2}} & \text{Var}(\tilde{x}) &= \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{s_i^2}} \left(1 + \sum_{i=1}^k \frac{\hat{w}_i (1 - \hat{w}_i)}{n_i - 1}\right) \\
 \sigma_m &= \frac{1.8582}{\sqrt{n-1}} MAD & \sigma^2 &= \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \tilde{x})^2 + \frac{u_i^2}{1-\gamma_i}}{n+k} & KU &= 2\sqrt{s_w^2 + s_b^2} & \tilde{x} \pm & \frac{t_{(1-\alpha/2, nlab-1)} s}{\sqrt{nlab}} \\
 \text{Var}(\tilde{x}) &= \frac{1}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i-3}{n_i-1}\right) \left(\frac{1}{s_i^2}\right)} & \tilde{x} \pm & \Phi^{-1}(\alpha/2) \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - \tilde{x})^2 / (y + t_i^2)}}{\sum_{i=1}^k 1/(y + t_i^2)} & \hat{w}_i &= \frac{\left(\frac{n_i-3}{n_i-1}\right) (1/s_i^2)}{\sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j-3}{n_j-1}\right) (1/s_j^2)}
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Иллюстрация, показывающая выборочную сводку формул, применяемых для обработки реальных данных в соответствии с различными подходами.

При вычислении среднего большое значение имеет вычисление его адекватной ошибки. При наличии проблем в исходных данных, упомянутых выше, трудно говорить о строго статистически обоснованной ошибке среднего. Поэтому часто говорят о получении просто реалистичной ошибки, соответствующей согласию усредняемых величин. В астрономической литературе нередки примеры неудачного решения этой задачи. Настоящая работа посвящена вопросам вычисления адекватной ошибки взвешенного значения в рамках классических процедур.

Вычисление среднего взвешенного и его ошибки

Рассмотрим задачу вычисления среднего взвешенного из группы измерений. Пусть мы имеем n исходных значений x_i , $i = 1, \dots, n$ с ошибками s_i . Требуется найти их средневзвешенное значение \bar{x} и его ошибку σ . Тогда для классической оценки средневзвешенного значения имеем известные и наиболее часто применяемые формулы:

$$p_i = \frac{1}{s_i^2}, \quad p = \sum p_i, \quad \bar{x} = \frac{\sum p_i x_i}{p}, \quad \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{p}}, \quad (1)$$

где p_i – веса усредняемых значений. При применении этой оценки ошибки среднего к реальным данным мы встречаемся со следующими двумя проблемами:

– σ_1 зависит только от ошибок исходных данных, рассогласование самих исходных значений x_i на ошибку среднего не влияет;

– одно исходное значение с недооцененной ошибкой автоматически приводит к недооценке ошибки среднего, поскольку, как видно из (1), ошибка среднего всегда меньше любой из ошибок исходных величин.

Как следствие, практическое применение формул (1) может приводить к неудовлетворительным результатам.

При другом подходе можно вычислить средневзвешенное значение с применением метода наименьших квадратов к условным уравнениям вида $x_i = \bar{x} + \varepsilon_i$ с теми же весами p_i , что и раньше. В этом случае мы получим то же значение среднего \bar{x} , но другое значение его ошибки:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum p_i (x_i - \bar{x})^2}{p(n-1)}}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что оценка σ_2 зависит только от разброса исходных данных x_i и от относительной величины их ошибок s_i , но она инвариантна по отношению к абсолютной величине ошибок s_i (т.е. при их масштабировании на постоянный множитель ни среднее значение, ни его ошибка не меняются; ошибка σ_1 в этом случае изменится на этот множитель). Этот метод обычно используется для вычисления невзвешенного среднего, т.е. при $p_i = 1$.

Таким образом, два основных метода классической статистики дают одинаковые значения среднего, но разные значения его ошибки. При этом обе оценки ошибки среднего, как σ_1 , так и σ_2 , не используют всю входную информацию, содержащуюся во входных данных. Легко показать [4], что $\sigma_1 = \sigma_2$ для согласованных данных, причем степень согласованности определяется по известному критерию нормированного χ^2 :

$$\frac{\chi^2}{dof} = \frac{1}{n-1} \sum p_i (x_i - \bar{x})^2, \quad (3)$$

где dof – число степеней свободы, в нашем случае $n-1$. Для согласованных данных, для которых случайные ошибки соответствуют разбросу, должно быть $\chi^2/dof = 1$. Это эквивалентно равенству оценок σ_1 и σ_2 . Если величина χ^2/dof существенно больше единицы, это говорит о наличии в исходных данных систематических ошибок либо о недооценке ошибок исходных данных s_i .

Иногда применяется следующий прием искусственного приведения усредняемых данных к согласованному виду. Сначала вычисляются σ_1 и χ^2/dof . Если последняя величина больше единицы, исходные ошибки s_i умножаются на множитель $\sqrt{\chi^2/dof}$, в результате чего достигается выполнение равенства $\chi^2/dof = 1$ и, соответственно, равенство ошибок σ_1 и σ_2 . Представляется, что такой метод (фактически, подгонка исходных данных под заданный критерий) не дает общего решения проблемы. То же самое можно сказать про похожий способ, где выполнение критерия $\chi^2/dof = 1$ достигается сложением в квадратуре исходных ошибок s_i с подобранной для выполнения условия согласия аддитивной ошибкой.

Различные подходы к выбору одного из двух значений σ_1 или σ_2 , предложенные в работах литературе, рассмотрены в [2, 4]. Все они требуют для принятия решения произвольного выбора некоторого граничного параметра, обычно доверительной вероятности. При этом небольшие изменения этого граничного параметра иногда приводят к "переключению" между σ_1 и σ_2 , т.е. в скачке в окончательной ошибке результата. По этим причинам, по мнению автора, эти методы не могут быть рекомендованы к использованию в астрономических задачах.

Для практического применения желательно иметь оценку ошибки среднего, позволяющую учитывать как ошибки исходных усредняемых значений s_i , так и разброс самих значений x_i , без введения элементов субъективного выбора. Удовлетворяющая этим требованиям комбинированная оценка предложена в [2]:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (4)$$

Тестирование оценок ошибки среднего

Для сравнения трех методов вычисления ошибки среднего, описанных в предыдущем разделе, рассмотрим сначала тестовый пример (рис. 1). В нем вычисляется среднее значение и его ошибка для трех наборов данных, имеющих одинаковые значения усредняемых величин, но разные их ошибки. В каждом следующем наборе данных ошибки в три раза больше, чем в предыдущем. Таким образом, соотношение ошибок сохраняется, но их масштаб увеличивается от случая a к случаю c .

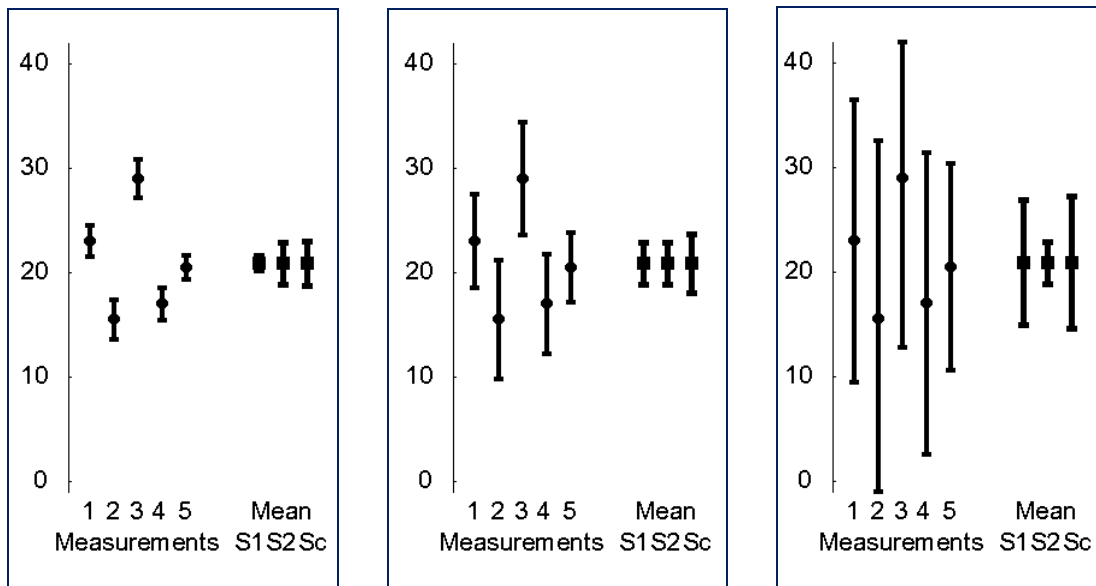


Рис. 2. Пример вычисления взвешенного среднего для трех наборов данных, состоящих из пяти одних и тех же усредняемых величин с разными ошибками. В каждом следующем случае ошибки увеличены в три раза по сравнению с предыдущим.

Приведенные на рис. 2 результаты показывают, что σ_1 растет пропорционально s_i , как и следует из (1). Однако для случая *a* эта оценка выглядит явно заниженной, поскольку не учитывает разброс данных, существенно превышающий их случайную ошибку (т.е. данные не согласованы). Поэтому оценка σ_c для этого случая определяется, практически, величиной σ_2 , зависящей как раз от разброса исходных данных, как следует из (2).

Поскольку сами усредняемые значения одинаковы во всех трех наборах данных, также как соотношение ошибок, оценка σ_2 получилась одна и та же во всех трех случаях, как следует из (2). Но это также кажется неудовлетворительным, поскольку естественно ожидать, что ошибка среднего должна расти с ошибками исходных данных. Так в случае *c* мы наблюдаем ситуацию противоположную случаю *a*, когда случайные ошибки существенно превышают разброс (т.е. данные согласованы). В этом случае уже σ_2 выглядит явно заниженной.

Оценка σ_c выглядит наиболее реалистичной во всех трех случаях, поскольку она отражает как разброс данных, так и рост ошибок от случая *a* к случаю *c*.

В табл. 1 приведено несколько примеров реальных результатов вычисления средневзвешенных значений, взятых из астрономических публикаций. Надо заметить, что авторские ошибки среднего обычно соответствуют σ_1 . В таблице приведены следующие данные: определение постоянной Оорта *A* [3], измерение показателя цвета Н–К астероида (911) [6], определение соотношения изотопов $^{12}\text{CN}/^{13}\text{CN}$ в молекулярных облаках [5], оценка нижнего предела вертикального градиента угловой скорости вращения Галактики $\partial V_\phi/\partial z$ [1].

Таблица 1. Примеры вычисления среднего из астрономической литературы.

№	Работа	Исходные данные	Авторский результат	σ_1	σ_2	σ_c
1	[3]	15.0 ± 0.8 14.4 ± 1.2 11.3 ± 1.1 14.8 ± 0.8 14.5 ± 1.5	14.2 ± 0.5	0.44	0.65	0.79
2	[6]	0.05 ± 0.05 0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.02	.018	.034	.039
3	[5]	67.0 ± 28.0 54.0 ± 15.1 48.8 ± 19.5 62.1 ± 22.2 85.0 ± 3.3 64.9 ± 35.6 70.7 ± 3.6 36.3 ± 3.5 68.7 ± 1.3	67.5 ± 1.0	1.0	3.6	3.7
		133.6 ± 33.0 68.4 ± 4.9				
4	[1]	22.0 ± 4.1 18.2 ± 4.0	20.1 ± 2.9	2.9	1.9	3.4

В первом примере разброс усредняемых значений (σ_2) существенно больше случайной ошибки (σ_1), что соответствует $\chi^2/dof > 1$. В результате авторская оценка ошибки среднего выглядит недооцененной более чем в полтора раза по сравнению с комбинированной оценкой σ_c . Второй пример иллюстрирует это еще лучше – разброс исход-

ных данных почти в два раза больше случайной ошибки, поэтому авторская оценка ошибки среднего занижена вдвое.

В примере 3 авторская величина ошибки среднего выглядит недооцененной в 3.5 раза, поскольку не учитывает большой разброс исходных данных. Здесь также наглядно видна особенность оценки σ_1 , отмеченная выше, – она всегда меньше минимальной ошибки входных величин, что способствует получению неудовлетворительного результата в данном случае.

В то же время, в примере 4 случайная ошибка оказалась вдвое больше разброса, данные согласованы, поэтому комбинированная оценка σ_c близка к авторской. В этом случае $\chi^2/dof < 1$, и применение авторами оценки σ_1 практически не приводит к недооценке ошибки среднего.

Можно привести много других примеров вычисления средневзвешенных оценок как из цитированных выше, так и из других работ, к которым применимы сделанные выводы.

В целом, можно сказать, что некритическое использование классической оценки σ_1 для ошибки средневзвешенного значения часто приводит, к существенно заниженной величине этой ошибки. Напротив, комбинированная оценка ошибки среднего σ_c во всех случаях выглядит наиболее реалистичной и соответствующей исходным данным без введения в процесс вычислений элементов произвольного выбора или искусственного изменения исходных данных.

Заключение

Хотя вычисление средневзвешенного значения является часто используемой процедурой в астрономических работах, не все возникающие при этом проблемы решены удовлетворительным для практики образом. В частности, нельзя считать оправданным формальное использование методов классической статистики к реальным данным наблюдений, которые часто имеют систематические ошибки и недооцененные случайные. Наиболее часто используемая оценка σ_1 во многих случаях дает явно заниженное значение ошибки среднего. Применяемые в ряде работ различные эмпирические приемы искусственного масштабирования ошибок исходных величин для достижения выполнения критерия согласия $\chi^2/dof = 1$, на наш взгляд, не решают проблему.

В настоящей работе проведено сравнение двух классических методов вычисления ошибки взвешенного среднего, основанных на использовании весов исходных величин обратно пропорциональных их среднеквадратическим ошибкам (σ_1) и на учете отклонения исходных величин от среднего методом наименьших квадратов (σ_2). Ни одна из рассмотренных оценок ошибки среднего не учитывает всей входной информации, что приводит к недооценке вклада в ошибку среднего или случайных ошибок входных величин или разброса их значений.

Чтобы решить эту проблему предложена комбинированная оценка σ_c , эффективность которой проверена на модельных и практических примерах. В результате тестирования показано, что предлагаемая оценка позволяет получить реалистичную ошибку среднего как для хорошо, так и для плохо согласованных усредняемых данных. К тому же она проста в использовании. Важно, что предлагаемый метод также хорошо работает для малых выборок, начиная с двух значений, что часто встречается на практике.

К сожалению, авторы не всегда критически подходят к определению ошибки среднего значения. Всегда надо иметь в виду, что малая формальная ошибка, вычисленная по стандартным формулам среднего взвешенного (1) при большом по сравнению с этой ошибкой разбросе исходных данных свидетельствует о недооценке их формальных ошибок или наличии в этих данных систематических различий. Последние, как правило, не поддаются оценке (в противном случае они были бы учтены в публику-

емых результатах). Поэтому применение классического подхода к определению ошибки среднего значения зачастую является статистически необоснованным. Напротив, предлагаемый способ автоматически учитывает как ошибки исходных данных, так и их разброс.

Более подробное изложение этой работы приведено в [4].

Литература

1. *Витязев В.В., Цветков А.С.* Кинематика звезд северного и южного галактических полушарий. Письма в Астрон. журн., 2012, т. 38, 467–485.
2. *Малкин З.М.* О вычислении средневзвешенного значения. Сообщ. ИПА РАН, 2001, № 137.
3. *Клачка J.*, Galactic tide. arXiv:0912.3112, 2009.
4. *Malkin Z.* On computation of a common mean. arXiv:1110.6639, 2011.
5. *Ritchey A.M., Federman, S.R., Lambert D.L.* Interstellar CN and CH⁺ in Diffuse Molecular Clouds: ¹²C/¹³C Ratios and CN Excitation. AJ, 2011, v. 728, 36.
6. *Smith D.W., Johnson P.E., Buckingham W.L., Shorthill R.W.* JHK photometry of selected Trojan and Hilda asteroids Icarus, 1992, v. 99, 485–488.

ON COMPUTATION OF THE ERROR OF THE WEIGHTED MEAN

Malkin Z. M.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Combining several measurements of the same physical quantity is one of the most general and important tasks in science and practical applications. Small samples, biased input estimates, not always adequate reported uncertainties, and unknown error distribution make a rigorous solution very difficult, if not impossible. For this reason, many methods to compute a common mean and its uncertainty were proposed, each with own advantages and shortcomings. Most of them are variants of the weighted average (WA) approach with different strategies to compute WA and its standard deviation. In this paper, these two methods in most widely used modifications are compared using simulated and real data. To overcome some problems of known approaches to compute the WA uncertainty, a new combined estimate has been proposed. It has been shown that the proposed method can help to obtain more robust and realistic estimate suitable for both consistent and discrepant measurements.

АСТРОМЕТРИЯ ТЕСТОВЫХ ПЛАСТИНОК, ОЦИФРОВАННЫХ СКАНЕРОМ EPSON EXPRESSION 10000XL В АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ АН РУЗ

Муминов М.М., Каххаров Б.Б., Йулдошев К.Х., Андрук В.Н., Головня В.В.

Астрономический институт АН РУЗ, Ташкент, Узбекистан

Главная Астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

Работа выполнена с целью определения возможности использования для астрометрических работ сканера Epson Expression 10000XL, с помощью которого можно оцифровывать пластинки больших размеров (например, 300×300 мм). Для оценки повторяемости астрометрических и фотометрических ошибок сканера обработано по шесть последовательных сканов двух пластинок с пространственным разрешением 1200 dpi. Получены следующие оценки ошибок для прямоугольных координат: 0.03-0.09 пкл. По результатам обработки средних сканов из шести измерений в системе каталога ГУСНО-2 получены среднеквадратичные ошибки одного измерения экваториальных координат $\sigma_{\alpha, \delta} = 0.043-0.070$ сек.

1. Архив стеклотеки обсерватории

Стеклотека Астрономического института АН РУЗ создана на основе наблюдений полученных на нормальном астрографе в Ташкенте. С момента установки астрографа в 1895 году были начаты усиленные наблюдения внегалактических туманностей, рассеянных и шаровых скоплений, а так же планетарные туманности, области звездообразования, новые и сверхновые звезды, кометы, малые планеты и др. С 1976 наблюдательные работы перенесены в г. Китаб, где был установлен Двойной астрограф Цейса (D = 400 мм, F = 3000 мм). Среди основных наблюдательных программ, проводимых на новом телескопе, была программа Фотографического Обзора Неба (ФОН) – наблюдения с четырехкратным перекрытием всего неба на пластинках 300×300 мм. На сегодняшний день в стеклотекке хранятся множество фотопластинок, для которых необходимо создание цифровых аналогов и банка данных виртуальной обсерватории.

2. Методика обработки оцифрованных пластинок в программной среде LINUX/MIDAS/ROMAFOT

В программной среде MIDAS [4] практически реализованы следующие этапы обработки оцифрованных пластинок:

Поиск и разметка передержанных изображений объектов, отдельный анализ двойных изображений переэкспонированных объектов, реставрация всех этих изображений. Реставрация верхних отсутствующих конечностей изображений производится по разработанной оригинальной методике.

Для автоматического исключения систематической фотометрической ошибки по полю пластинки как по причине виньетирования оптикой телескопа, так и за действие искажений, вносимых самим сканером, используется разработанный метод пространственного описания (расчета) плоского поля индивидуально для каждой пластинки. Плоское поле пластинки находится после предварительного удаления зарегистрированных объектов. Программно реализован итерационный метод удаления объектов и выделения пространственной (как крупномасштабной так и шумовой) огибающей собственного поля пластинки (фона пластинки). Метод апробирован и кратко описан с иллюстрациями в работах [1–3]. Плоское поле пластинки используется дважды – для коррекции фотометрической ошибки по всему полю пластинки и для предварительной оценки уровня шумов индивидуальной пластинки. Процедура вычислений по удалению

объектов и выделению пространственной огибающей собственного фотометрического поля пластинки занимает около половины времени работы программы.

Поиск и выделение объектов (звезд, галактик прочее) выше наперед заданного уровня шумов. На практике делается фотометрический срез выше какого-то уровня (как правило, это сумма вычисленного среднего значения плоского поля и трех значений его дисперсии), метаются те пиксели, которые имеют отсчеты выше заданного уровня. В проекции на плоскость меченные объекты имеют форму кругов, эллипсов прочее (дырки, диафрагмы). Для полного фотометрического описания объектов размеры диафрагм произвольной формы по радиусу увеличиваются на 2-3 пкл. В конечном изображении модифицированного фотометрического скана будем иметь неискаженные объекты, пространство между которыми заполнено средним значением плоского поля (фон неба). Иллюстрация выше изложенных этапов обработки пластинки демонстрируется на рис. 1 в работе [1].

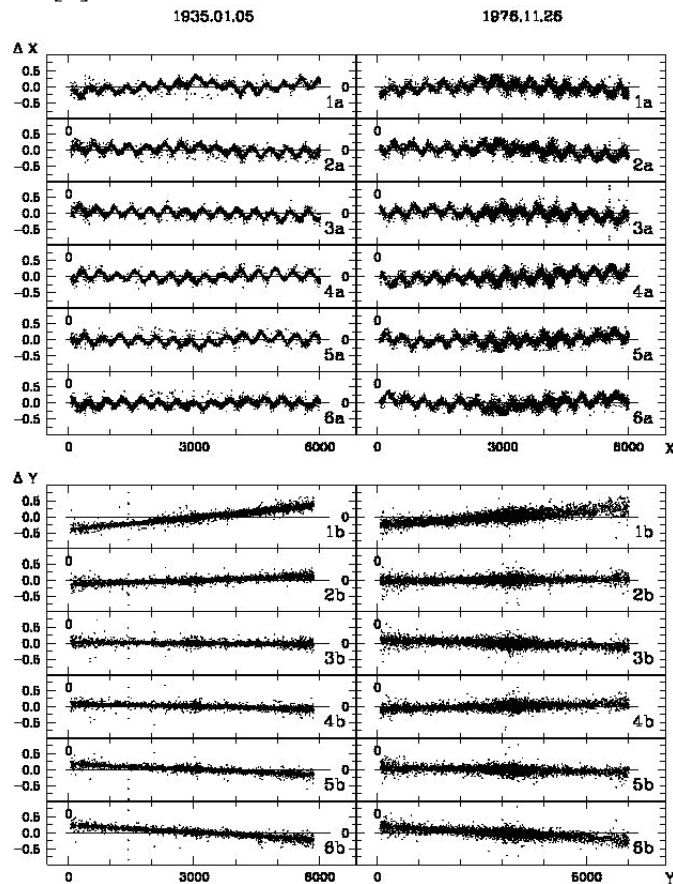


Рис. 1. Ход систематических разностей для объектов (звезд) их прямоугольных координат Δx вдоль X и Δy вдоль Y для шести последовательных сканов относительно "среднего" скана. Разности даны в пикселях для двух пластинок, экспонированных 1935.01.05 (слева) и 1976.11.25 (справа).

Преобразованный таким образом кадр изображения звездного неба в дальнейшем обрабатывается в фотометрическом пакете ROMAFOТ с подобранными параметрами для получения астрометрических и фотометрических характеристик детектированных объектов от переэкспонированных и до предельно слабых. Для всего процесса обработки в MIDAS/ROMAFOТ реализован автоматический процесс обработки последовательно пронумерованных кадров. Отметим также, что в пакете ROMAFOТ предварительно были изменены форматы обмена и регистрации данных, кадры больших размеров (до 13000×13000 пкл) на заключительном этапе обрабатываются частями, а именно с авто-

матическим разбиением на полосы относительно оси абсцисс. Зоны перекрытия вдоль этой координаты составляют 50 пкл.

3. Повторяемость результатов сканирования и внутренняя астрометрическая точность обработки

Для оценки астрометрических и фотометрических ошибок сканера обработано по шесть последовательных сканов для двух пластинок, которые экспонированы на Нормальном астрографе АИ АН РУз ($D = 330$ мм, $F = 3467$ мм, масштаб = $59.56''/\text{мм}$) 5 января 1935 г. и 26 ноября 1976 г. Оцифровка астронегативов выполнена с пространственным разрешением 1200 dpi (1 пкл $\approx 1.25''$). Для всех 12 сканов были сосчитаны прямоугольные координаты X , Y и инструментальные звездные величины m зарегистрированных объектов (звезд и артефактов, а именно, царапин, пыли, ворсинок и прочего). Затем для обеих пластинок были получены "средние" сканы из шести измерений для объектов (звезд и не только) ярче $V_T \leq 15^m$. Количество общих объектов для первой и второй пластинок соответственно равно: 4300 и 4600. На рис. 1 для двух пластинок (слева и справа) показан ход систематических разностей для объектов (звезд) их прямоугольных координат Δx вдоль оси X и Δy вдоль оси Y для шести последовательных сканов относительно "среднего" скана. Разности даны в пикселях (пкл). После коррекции полученных данных за систематические ошибки для каждого отдельного скана относительно средних значений мы имеем результаты, которые представлены на рис. 2.

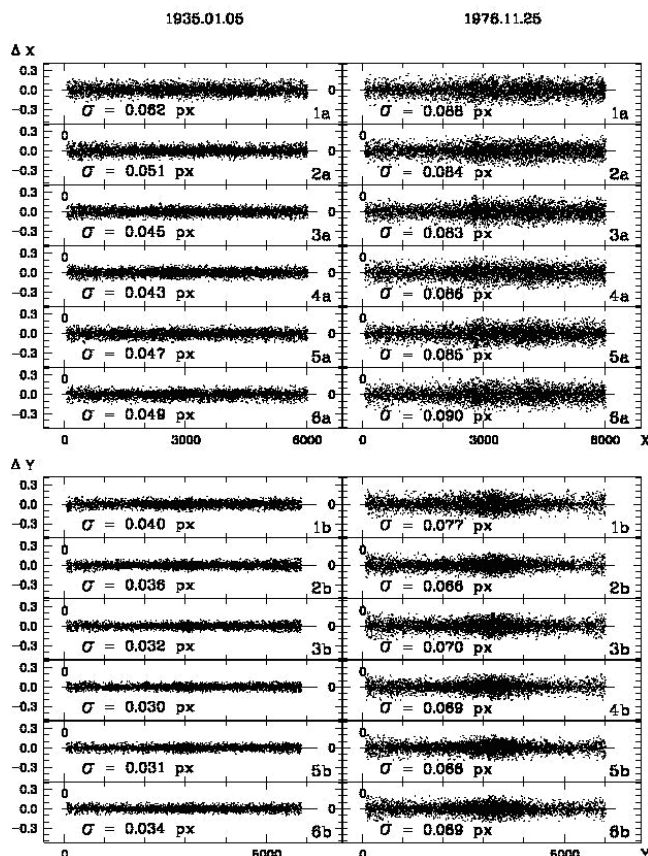


Рис. 2. Ход случайных разностей для тех же объектов их прямоугольных координат Δx вдоль X и Δy вдоль Y для шести последовательных сканов относительно "среднего" скана. Систематическая составляющая ошибок сканера для каждого скана исключена.

На этом рисунке для тех же объектов демонстрируется ход случайных разностей (в пкл) их прямоугольных координат Δx вдоль X и Δy вдоль Y для шести последова-

тельных сканов относительно "среднего" скана. Указаны также ошибки сканирования (а значит и сканера), т.е. значения с.к.о. одной разности определения прямоугольных координат X, Y объектов. Различие в величине ошибок в 1.5-2 раза для пластинок слева и справа можно объяснить более темным фоном второй пластинки. С учетом масштаба сканирования (1 пкл $\approx 1.25''$), можно сделать следующий вывод: сканер Epson Expression 10000XL совместно с разработанным программным обеспечением позволяет оцифровывать, обрабатывать пластинки и получать астрометрические характеристики объектов с внутренней точностью не хуже ± 0.1 секунды дуги. Данные, приведенные на рис. 1-2, получены для звезд, ярче $V_T \leq 15^m$.

4. Оценка точности редукции экваториальных координат

Продемонстрируем точность определения экваториальных координат на примере тех же пластинок для их "средних" сканов. На рис. 3 на панелях сверху вниз соответственно для пластинок первой (слева) и второй (справа) показан ход остаточных разностей $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ между измеренными (и соответствующим образом сосчитанными) и каталожными координатами для прямых восхождений α и склонений δ каталога ГУСНО-2 после коррекции измеренных координат за инструментальные ошибки сканеров.

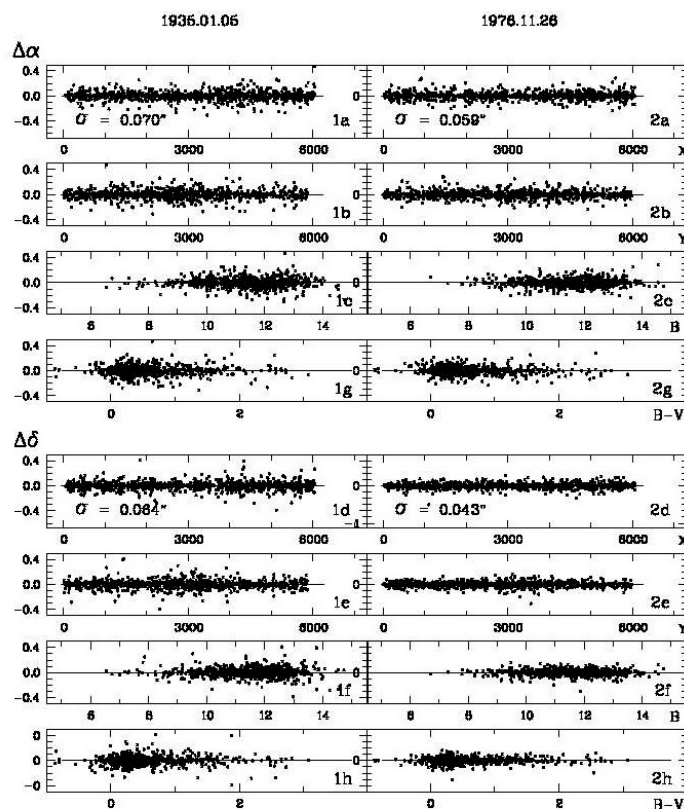


Рис. 3. На панелях сверху вниз соответственно для двух пластинок, экспонированных в 1935.01.05 и 1976.11.26 гг., для области, содержащей η и χ Персея, показан ход разностей между измеренными и каталожными координатами $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ для звезд каталога ГУСНО-2 ($V_T < 15^m$) после внесения коррекции за инструментальные ошибки сканера и aberrации оптики телескопа. В верхней и нижней частях рисунка разности $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ представлены относительно прямоугольных координат X, Y звездных величин V_T и показателей цвета $(B-V)_T$.

Для коррелированных разностей $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ добавлены панели относительно цветов звезд $B-V$ в системе каталога ГУСНО-2 (1g, 2g и 1h, 2h соответственно). Указаны с. к.

о. одного измерения u , которые для прямых восхождений составляют $\pm 0.070''$ и $\pm 0.059''$, для склонений - $\pm 0.084''$ и $\pm 0.043''$ соответственно. Разности даны относительно прямоугольных координат X и Y , звездных величин $B-V(1g,2g, 1h,2h)$ каталога ГУСНО-2.

4. Сравнение значений собственных движений звезд

Для выявления систематических ошибок при сканировании были отобраны фотопластинки со снимками рассеянных звездных скоплений h и χ Персея полученные в 1935 году на нормальном астрографе АИ А РУз. Фотопластинки были отсканированы и обработаны как на сканере Epson Expression 10000XL в Ташкенте, так и на сканере в Киеве. На исследованной площадке неба с размером $2^\circ \times 2^\circ$ определены экваториальные координаты более 29 000 объектов в системе каталога ГУСНО-2. Приняв разности координат одних и тех же звезд в обоих случаях равным нулю, по реальным отклонениям было определены ошибки сканирования для первого и второго сканеров:

$$\sigma_x = \pm 0''.02 \quad \sigma_y = \pm 0''.01$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что оба сканера дают близкие значения при астрометрических исследованиях.

Для сравнения точности определения собственных движений нами использованы полученные в 1935 и 1976 годах снимки области скопления h и χ Персея. После определения экваториальных координат на каждом из них по разности значений координат были определены собственные движения для более, чем 15 000 звезд. Затем, определенные таким образом, собственные движения этих звезд были сравнены с данными, полученными из аналогичных измерений на координатометре “Аскорекорд” (Муминов, 1996). В этом случае среднеквадратичные ошибки разностей полученных собственных движений оказались следующие:

$$\sigma_{\mu x} = \pm 0''.023 \quad \sigma_{\mu y} = \pm 0''.012$$

Таким образом, на основе проведенных нами вычислений, можно заключить, что обработка цифровых аналогов фотопластинок современными программными средствами, дает близкие значения собственных движений звезд с полученными классическими методами значениями при существенном выигрыше в трудовых и временных ресурсах.

Литература

1. Андрук В.М., Бутенко Г.З., Яценко А.И. Фотометрия платівок, оцифрованих сканером Microtek ScanMaker 9800XL TMA // Кинематика и физика небес.тел. –2010.–**26**, №3.–С.75-81.
2. Головня В., Андрук В., Яценко А. Астрометрія платівок ПША, оцифрованих сканером Microtek ScanMaker 9800XL TMA // Журнал фізичних досліджень. –2010. –**14**, №2. –С. 1-7.
3. Яценко А.И., Андрук В.Н., Головня В.В., Пакуляк Л.К., Иванов Г.А. Результаты сканирования снимков 60-й зоны программы ФОН – методика редукции измерений, характеристика выходного каталога // Кинематика и физика небес. тел. –2011. -Т.**27**, №5. –С. 49-59.
4. MIDAS User Guide. European Southern Observatory – Image Procissing Group. – Garching, ESO, - 1994. –Vol. A,B,C.
5. Muminov M., 1996, VizieR Online Data Catalog, 5027, 0

**AN ASTROMETRY OF TEST PLATES DIGITIZED
WITH EPSON EXPRESSION 10000XL SCANNER**

Muminov M.M., Kahharov B.B., Yuldoshev K.H., Andruk V.N., Golovnya V.V.

*Astronomical institute of UzAS, Tashkent, Uzbekistan
Central Astronomical Observatory of UAS, Kiev, Ukraine*

A detailed testing of the Epson Expression 10000XL scanner aimed at large-scale plates (300x300 mm and larger) digitization has been undertaken. The estimations of repeatability of positional and photometric errors of the scanner have been received from six (6) consecutive scans of the same plate obtained with 1200 dpi. The estimates of errors for rectangular coordinates were received of the order of 0.03-0.09 px. The processing of averaged scans of six measurements with TYCHO-2 as reference has given the mean square error of one measurement in position of the order of 43-70 mas.

СИСТЕМА СБОРА И ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ КООРДИНАТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Нароенков С.А.¹, Шеляков М.А.¹, Галушина Т.Ю.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Томский государственный университет, Томск, Россия*

В Институте астрономии РАН совместно с сотрудниками Томского государственного университета в рамках работ по созданию прототипа Российского Информационно-аналитического центра по проблеме АКО (ИАЦ АКО), разработан прототип Системы оперативного сбора и обработки координатной информации для малых тел Солнечной системы, в частности, для астероидов, сближающихся с Землей. Информационная система позволяет оперативно получать данные о наблюдениях астероидов, уточнять их орбиты и рассчитывать орбитальную эволюцию на несколько десятков лет.

1. Введение

При решении проблемы астероидно-кометной опасности важную роль играют системы оперативного сбора и обработки координатной информации, поступающей от наблюдателей. Быстрое определение вероятной орбиты опасного астероида или кометы и вычисление возможных тесных сближений (столкновения) этого тела с Землей позволяет определить является ли тело угрожающим, необходимо ли бросить все усилия на мониторинг данного тела или же его можно наблюдать в обычном режиме.

В настоящее время оперативный анализ наблюдений астероидов и комет сосредоточен в трех зарубежных центрах: Центре малых планет и комет (Кембридж, США), Лаборатории Реактивного Движения (ЛРД) (НАСА, США) и Центральном узле фонда Космическая стража (НЕОДиС).

В Институте астрономии РАН совместно с сотрудниками Томского государственного университета, в рамках работ по созданию прототипа Российского Информационно-аналитического центра по проблеме АКО (ИАЦ АКО), создан прототип Системы оперативного сбора и обработки координатной информации для малых тел Солнечной системы, в частности, для астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Источником информации для системы являются электронные циркуляры Центра малых планет (Minor Planet Center). В циркулярах публикуются сведения о наблюдениях малых тел Солнечной системы. На сегодняшний день прототип Системы оперативного сбора и анализа координатной информации позволяет накапливать информацию о наблюдениях АСЗ в базе данных, в автоматическом режиме уточнять орбиту астероида при поступлении новых данных, выявлять близкие сближения с планетами, публиковать результаты расчетов орбиты и близких сближений в системе распространения данных посредством веб-интерфейса.

2. Модуль обновления данных

Для хранения данных разработана база данных, в которой хранятся сведения обо всех наблюдениях астероидов, результаты уточнения их орбит, циркуляры, которые поступили в систему и были обработаны. Для первоначального заполнения базы данных с сайта Центра малых планет мы получили наблюдения всех известных околоземных астероидов. После того, как база данных была заполнена, мы приступили к регулярному пополнению каталога астероидов.

Процедура обновления данных происходит в автоматическом режиме с некоторой периодичностью, которая задается оператором системы. При поступлении нового цир-

куляра в систему, происходит его разбор на составные части – определяется наличие новых астероидов в этом циркуляре, считываются и сохраняются все наблюдения для уже открытых астероидов, изменяются параметры записей у ошибочно отождествленных объектов. Каждое наблюдение маркируется уникальным значением, а также ставится идентификатор принадлежности наблюдения к определенному астероиду. После этого в системе сбора и обработки координатной информации создается некоторое количество заданий на уточнение орбит астероидов с использованием новых наблюдений.

Задания представляют собой запись в одной из таблиц базы данных. В записи указаны исходные данные для уточнения орбиты астероида – список наблюдений, дата и время создания задания, идентификатор астероида, состояние задания (выполнено/не выполнено/в процессе обработки) и др. После того, как созданы задания для всех астероидов, работа модуля обновления данных заканчивается до тех пор, пока не появятся новые наблюдения.

3. Программный модуль автоматического улучшения орбит

После того как в Системе сбора и обработки информации сформирован список заданий на уточнение орбит астероидов, начинается процедура улучшения орбит. Программный модуль улучшения орбит, независимо от модуля сбора информации, с некоторой периодичностью проверяет наличие заданий для расчета орбиты астероида, и если такое задание находит, то начинает его выполнение. Для ускорения обработки всех заданий можно запустить несколько версий программы либо на одном персональном компьютере, либо на нескольких.

Улучшение орбиты ведется с помощью итерационного демпфированного метода Гаусса-Ньютона. Алгоритмическая и программная реализация данного метода выполнена при помощи коллег из НИИ ПММ ТГУ [1].

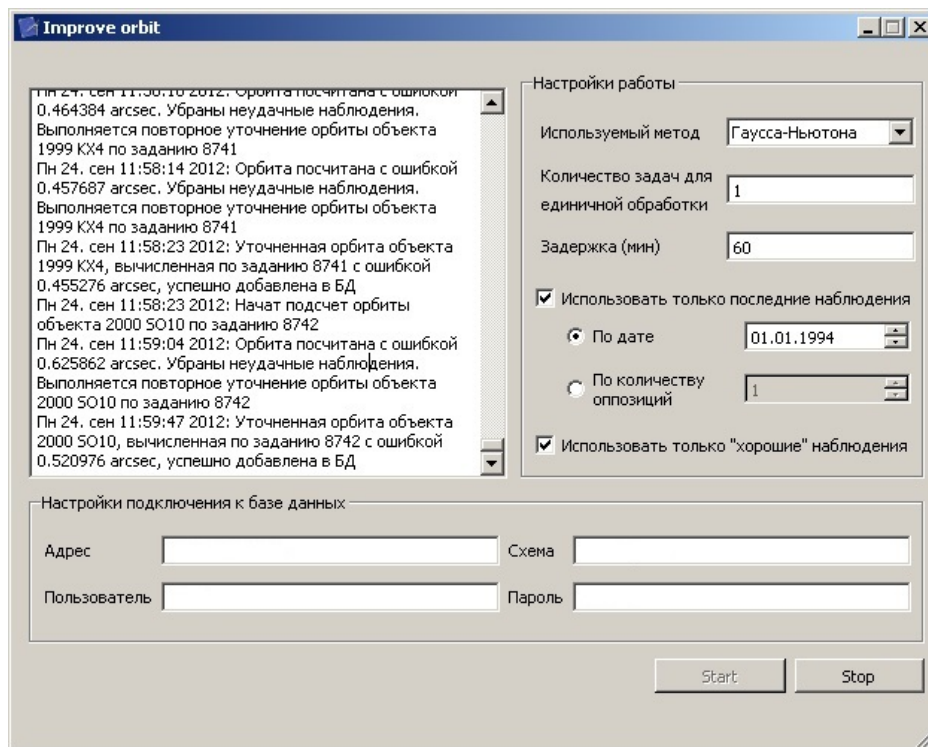


Рис. 1. Программный модуль уточнения орбит астероидов.

Для выбора начальных условий уточнения орбиты астероида можно задать несколько критериев (рис. 1). Например, можно указать, какие наблюдения будут исполь-

зоваться (начало наблюдений/количество оппозиций), для отсеивания плохих наблюдений можно воспользоваться правилом 3 σ -сигм для ошибки наблюдений. В результате успешного выполнения задания в базу данных записываются кеплеровы элементы орбиты с ошибками и набор виртуальных орбит, построенных исходя из ошибок определения орбитальных параметров. Кроме перечисленных параметров в базе данных сохраняются величины О-С для уточненной орбиты, ковариационная матрица и матрица Холецкого для построения набора виртуальных объектов.

4. Навигация в системе сбора и обработки координатной информации

Для контроля результатов, получаемых после обработки заданий, был разработан модуль навигации Системы сбора и обработки данных (рис. 2, 3). Навигационный модуль позволяет оператору системы получить информацию следующего характера: 1) для каждого астероида можно просмотреть все задания, которые были сформированы, начальные условия и конечный результат выполнения. 2) задания, которые находятся в стадии ожидания на выполнение, задания в процессе выполнения, выполненные и невыполненные задания. Оператору системы необходимо контролировать полученные результаты, поэтому был введен механизм актуализации сведений об орбитальных параметрах астероида. После того, как произведено уточнение орбиты астероида и получены его орбитальные параметры, результат расчета необходимо проверить на наличие грубых ошибок. С помощью модуля навигации оператор системы может просмотреть все параметры орбиты астероида и утвердить результат вычислений для дальнейшего использования. Под дальнейшим использованием мы понимаем операции расчета близких сближений, публикация орбитальных параметров этого астероида в собственном каталоге астероидов и т. д.

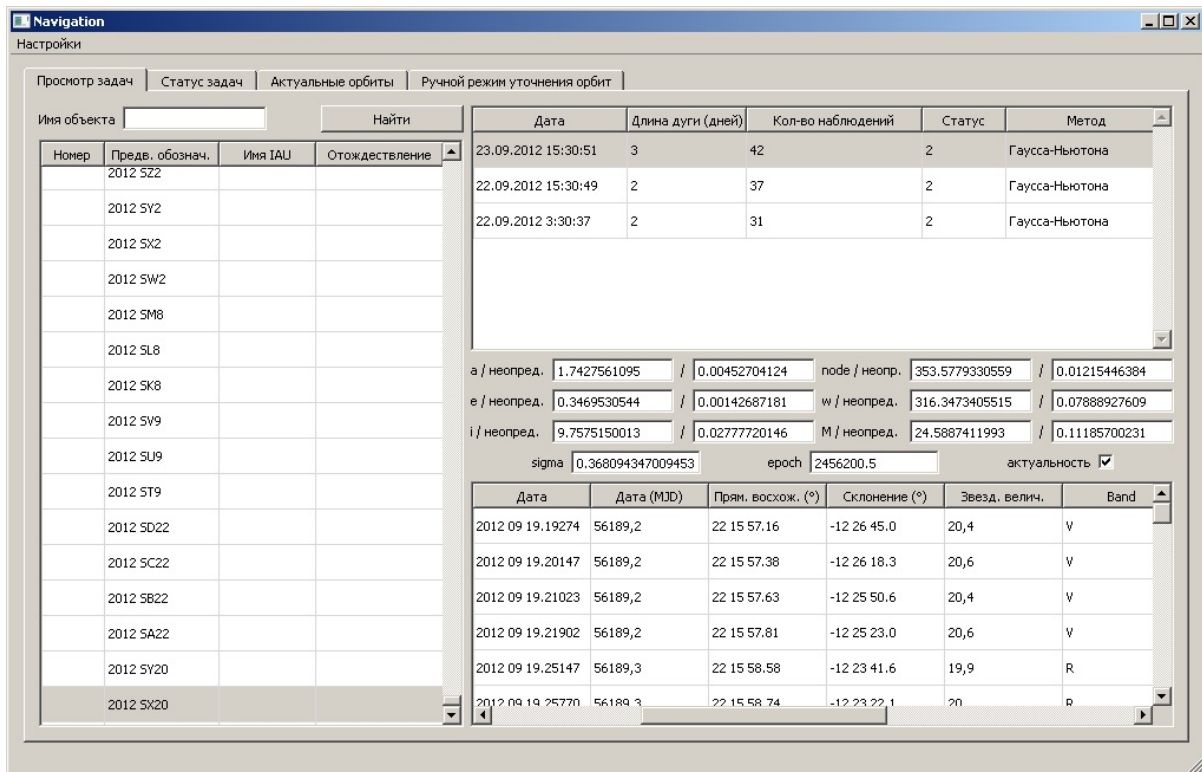


Рис. 2. Модуль навигации Системы сбора и обработки данных.

Для особенных случаев, когда необходимо улучшить орбиту, используя особые начальные условия, либо когда результат автоматического уточнения орбиты выглядит

недостовверным, в модуле навигации предусмотрен «Ручной режим уточнения орбиты». В таком режиме можно выбрать набор определенных наблюдений в качестве начального условия и др. условия, провести обработку данных и добавить полученный результат в базу данных.

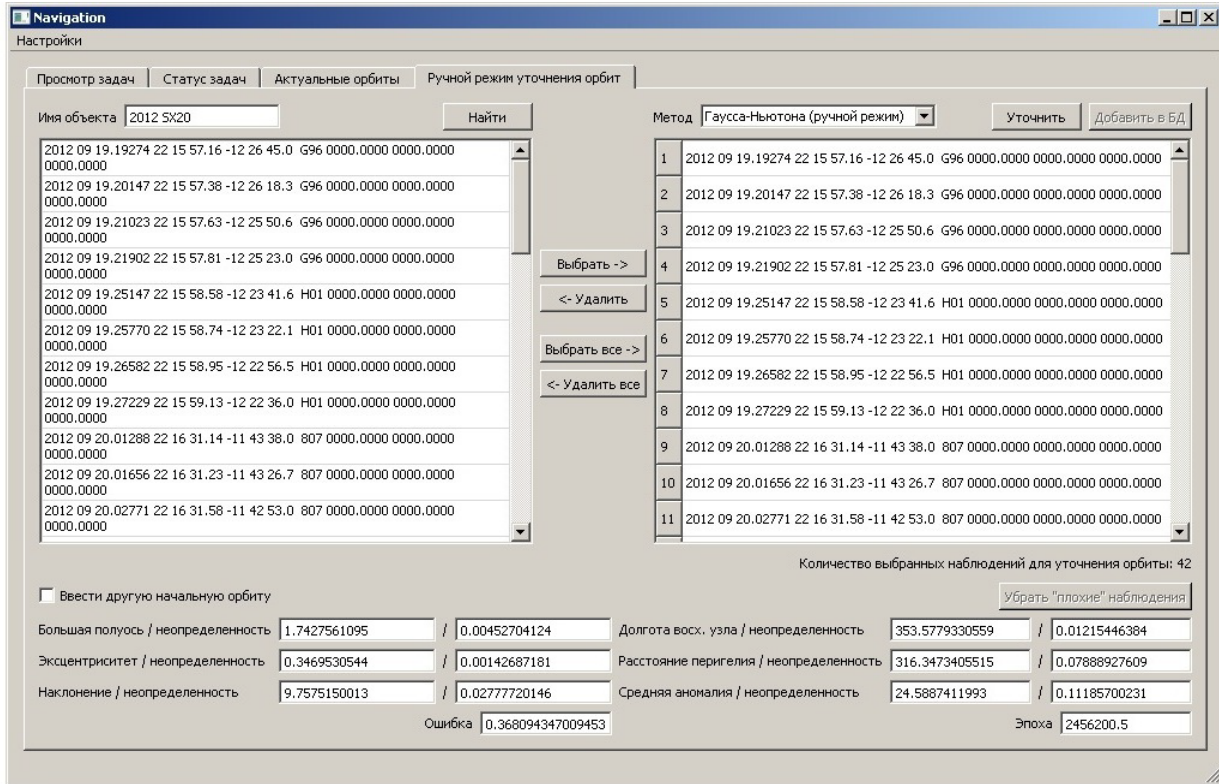


Рис. 3. Модуль навигации Системы сбора и обработки данных (режим «Ручное уточнение орбит»).

5. Модуль расчета близких сближений

Модуль расчета близких сближений позволяет провести исследование и выявить близкие сближения с планетами. Исследование проводится как для основной орбиты астероида, так и для виртуальных орбит, чтобы оценить весь разброс величин расстояния до планет. Используя настройки можно гибко задавать временной интервал исследования (в прошлое или в будущее), количество виртуальных частиц. Интегрирование уравнений движения производится методом Эверхарта с переменным шагом.

Параметры интегратора, возмущения от планет и крупных астероидов можно настраивать под определенные задачи. Хочется отметить, что для получения хороших и достоверных результатов необходимо исследовать эволюцию астероида на примере очень большого числа виртуальных частиц. На сегодняшний день эволюция рассчитывается только для 100 виртуальных объектов на интервале времени ± 50 лет от текущей даты. Такие ограничения были выбраны осознанно из-за времени, которое тратится на расчет эволюции одного объекта. Выявление близких сближений на персональном компьютере для 100 объектов занимает около 15 минут. При увеличении времени расчета будет потеряна оперативность обработки всех заданий. Выходом из такой ситуации может быть применение распараллеливания расчетов эволюции объекта на несколько процессоров или компьютеров. Вариант такой программы сейчас разрабатывается.

6. Система распространения полученных данных

Для распространения данных, полученных и обработанных с помощью Системы оперативного сбора и обработки, используется интернет-портал Информационной системы «Кластер». Подробно с интернет-порталом можно ознакомиться в работе [2]. На интернет-портале ИС «Кластер» реализованы возможности поиска астероидов по имени или части имени, а также расширенный поиск по орбитальным параметрам и физическим свойствам астероидов. Данные о близких сближениях астероида с планетами публикуются на странице «Карточка объекта». Для удобства пользователей информационной системы, в отдельную таблицу оформлены близкие сближения с планетой Земля. По такой таблице удобно отслеживать близкие сближения, которые произошли, и которые могут быть в будущем. Безусловно, система распространения данных требует улучшения и реализации очень многих дополнительных возможностей и такие работы сейчас ведутся.

Данная работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы и Программе 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Литература

1. Баныщикова М.А., Шагдурова В.О. Исследование орбит астероидов, открытых в 2010-2011 гг. космическим телескопом WISE. //Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.В. Решетнева, 2011, №6. С. 33-38.
2. Нароенков С.А., Шеляков М.А. Информационный комплекс обработки и хранения данных о малых телах Солнечной системы. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.В. Решетнева, 2011, №6. С. 56-60.

INFORMATION SYSTEM OF GATHERING AND PROCESSING A POSITION DATA FOR SMALL BODIES OF SOLAR SYSTEM

Naroenkov S.¹, Shelyakov M.¹, Galushina T.²

¹*Institute of astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

In the framework of the project of creation of asteroid–comet safety system, the Institute of Astronomy of RAS with cooperation Tomsk State University develops a prototype of information system of gathering and processing a position data for small bodies of Solar system. The system provides a receiving position data of asteroids, an improvement orbits of asteroids and calculation a dynamical evolution on few decades in automatic mode.

FORMS AND WAYS TO PROMOTE ASTRONOMICAL KNOWLEDGE AND THEIR DIDACTIC ORIENTATION

Michael Passarge

Solarobservatory Bad Salzschlirf, Germany

E-mail: michael.passarge@sonnenobservatorium.de

In this report at first will be pointed out the multipliers which can be used for the popularization of astronomical knowledge for different sections of the population: Newspapers, Weekly Papers, Monthly Magazines, Radio, TV Programs inclusive different TV Internet portals. These just called media allow to expect for their part and – in according to the media and on to the media fitted content presentation – a relatively large and interested audience, viewers and readership.

Furthermore it is indicated that the popularization of astronomical knowledge can be used especially well in the all forms of education, from the kindergarten of the elementary schools and other different school types, up to special physics achievement courses in high schools.

In both cases, my experience and thoughts about the knowledge transfer through the various media, as well as the knowledge transfer in classrooms, what is very similar to didactic preparatory work and also is the reasons in the regard to possible cooperation with the professional astronomy have been summarized in the conclusion.

First: Different Print Media

In the pre-consideration of an article intended to the general public one should keep the following question in mind: What kind of print media will be served.

In relation on newspapers: On which page appears the article – Science page, Family page, Mixed page.

In relation on weekly papers: On which page appears the article – Section Magazine, Yellow Press.

In the relation on monthly magazines: On which page appears the article – Amateur-astronomical monthly magazine, Astronomical science magazine, Mixed science magazine.

In all these different named Print media one should reflect on to the facts: To which readership the article is directed and of which Intellect is the readership?

The just performed questions should be cleared up during a serious and intensive preliminary editorial talk. As more precisely the clientèle of the suitable print media can be detected, as the readership will be better served in the transfer of astronomical knowledge.

By creating an article that brings astronomical knowledge to the readership one also should reflect about the fact: The focus on to the ability of the readership – is the readership important in reaching the intellectuality. Not the own knowledge should be the basic and main principle of the astronomical knowledge transfer, the level of the readership is important. With a serious and constant attention to this principle one can forward also topics of high complexity to a wide-diversified readership. Complex topics like: The latest knowledge in solar physics, Black holes, String theory, etc.. This counts especially in the forwarding of information to the wide range of readership in daily newspapers and weekly papers.

For articles in form of long term series, a catchy name for the series should be created. The head-line of an article should make curiosity on the topic itself and also should offer a general overview of the article. The sub-head-line should support the head-line and can increase the readers attention to a diversified topic in the article itself.

The more complex topics are leveled down to a generally comprehensible level, by being absolutely content correct, the more better it takes the readership's interest and holds the tension curve straight up. Especially in the cases of complex topics, where especially the linguistic skill and creativity of the author is demanded.

By all the necessary intensity and objectivity of an article itself, the own ambition and joy to the subject should shine through, cause that makes the article in particularly much more readable and also lifts up the attention span.

Second: Radio talks, TV talks - including TV Internet-portal

Radio and TV transmissions are up to date and in general an important medium in the matter of astronomical knowledge transfer. Besides, a great attention to the variability is to be respected between interview and namely broadcastings. No matter whether it concerns the medium radio, or television.

In interviews one is dependent on to the level of knowledge of the editor and his empathy in the topic itself as well as into the interview partner. It is essential that in front of an interview a conversation with the editor takes place in which as well the main as well as the guideline of questions are marked out. Should the editor try to insert subjects that are too much leveled down or not useful to the subject itself, or in the worst case is irritating the audience, one should raise the courage to steer the question into a direction that is useful for the knowledge transfer of the subject. In every case, not the editor should take over the leadership.



Radio – TV Transmission of the topic: Sun – Earth connection.

With own broadcastings the content stands of course in the foreground, however, also the recognition value matters. The difference between interviews and broadcastings is justified in the medium itself. While a helpful handout can be useful in activities on radio transmissions or radio interviews, so hand outs are rather limited in the activities on television in general. To avoid an unsure presentation, one should take attention on to the facts themselves by being highly concentrated in the combination of a friendly appearance in the presentation itself.

What the knowledge transfer in these two different media concerns, so the same rules in pre-preparation applies as listed in the part of the Press media: An intensive preliminary edito-

rial talk in front. Good pre-preparation of the topic itself etc.. Lifting up the audience interest by holding the tension curve straight by the topic itself and also with the different facets of the own voice as well as the facial play. The knowledge transfer in the medium television, with all the creative possibilities of graphic presentations, should be targeted out, course the todays society, in particularly the young generation are mainly visually oriented.

Even if during the past years the presentation of astronomical knowledge on television was presented in the form a science show, it today shows, that a shorter and precisely worked out transmission binds more listeners and spectators. Surveys of the viewers habit shows, that concise broadcasts between 8 to 15 minutes maximum length are accepted increasingly more than transmissions of 45 minutes of length, with the same content of 8 to 15 minutes.

Third: Different forms of education

By the closed treatment of the today's scientific world view, Astronomy has within the natural sciences a rounding and at the same time synthesizing function. Astronomy connects not only all natural sciences together, even more also with society-scientific fields like history and philosophy. One can postulate: Astronomy is a professional-covering bundle of the natural sciences, is of greatest cultural-historical meaning and uses the knowledge of other fields and joins it to a general view. So in that sense the astronomical science bumps above all of the younger generation into a wide natural interest in general. For young people it is often enough the first fertile contact with natural sciences in general and, besides, promotes strongly the motivation to deal itself with natural sciences.

In the basic requirements for teaching children in the final year of their Kindergarten career it is necessary that an intensive preliminary meeting with the teachers of the Kindergarten, as well as with the children themselves will be done in front of a teaching project. These both informal preliminary discussions are essential for leveling down the future teaching treated astronomical topics.



Theoretical and Practical Project – Elementary School.

A previously well-structured contact facilitates the project work not only in this group of age. Very basic information, such as for example the illuminated phases of the moon, the movement of the moon, building up a sundial, in practice the recognition of the planets that can be discovered by naked eye and not, at least, to locate the most prominent constellations, – all that is reasonable to learn together with their parents and grandparents. These are just some examples for projects in the Kindergarten.

One of the main attention should be given to the fact: To answer the children's questions accordingly of their age and whenever possible to solve the upcoming questions collectively by teaching the children in form of guiding the children in a playful way of didactic knowledge transfer.

Primary school:

As didactic knowledge teaches me in the past, astronomical topics should be forwarded in the age of about 9 to 10 years. Astronomical topics can be most easily embeded into areas of the curriculum themselves, such as daily and year course. Keywords: time, or for example the sun, light and heat.

To prevent quenching in any case, one should treat just basic phenomena of everyday life. First, initial simple explanations are developing collectively by later on continuing with differentiations and deepening in the first and middle part of high schools. Simple observation tasks should be made; these exercises of the students should be used to astonish. As often as possible the Students should be made curious how the future outcome of their collective work looks like.

For example, the solar system in general, the main belt in that asteroids are placed etc. As in groups of Kindergarten children, the action-oriented learning should take place also in the Primary school in the form of projects like naked eye observations shortly after sunset. To this action-orientated learning should also be invited the parents and - or grandparents.

Secondary part I - first and middle part of high schools

Here should begin the differentiation of sciences subjects, course at this age astronomy is important as a clamp of the science in general. Thinking with models and particularly called for. Especially in junior high schools the largest efforts can be made to improve the acceptance and the achievement of learning outcomes in the sciences, and especially in physics. Projects suitable to the age of the students are as especially actual and a period of four weeks, with two teaching units per week should not be fell short. The sustainable achievement of the project essentially depends on two factors.

On the one hand: By a project that is located at the top of the knowledge of the project group. – Keyword: Challenging not transferring. And on the other hand: By a deeper advance discussion with project participants, – Keyword: Knowledge check.

The existing potential of the students should be used in every case to demand employment with science among young people. I recommend the astronomical topics in a connecting to projects. *No student should leave the intermediate, main or secondary school without at least well formed fundamental knowledge in Astronomy and modern scientific world-view.*

Secondary part II: - final part of high schools

Meanwhile in the pre-mentioned schools- and teaching types good astronomical knowledge was acquired, allows this type of school, not at least through the acquired knowledge in physics, mathematics and computer science, an excellent opportunity to reflect more deeply on astronomical topics like Astrophysics and modern Cosmology.

From my experience, the treatment of different astronomical topics, such as Sun - Earth relation, the complexity of the Solar Magnetic field, Nuclear Fusion Process at the core of the

Sun, Solar oscillation – Keyword: Gong etc., falls with students of intensive courses on especially fertile ground. In collective cooperation also the different image analysis systems should be used to analyze the data that are obtained by the students practical astronomy with a CCD camera by also investigate the question if any existing image information is lost.

Even if in all types of schools, the basic statement: "Learning by teaching" should apply, this and the following key sentence is of special importance in the education of pupils with physics intensive courses. "Give instruction - encourage collective work - give necessary impetus if necessary - discuss unsuccessful solutions collectively".

Fourth: Public lectures

How do one prepare a talk for an audience that is of different backgrounds in astronomy, is of different age and has various levels of attention span?

At first, this task might seem impossible. A series of astronomical talks should be structured in the same way so that the audience feels on familiar territory, which gives them a level of comfort. All pictures that will be shown should at first be presented with classical music.

In the first third of the talk will be given explanations of the monthly night sky for naked eye, Binocular and Amateur telescopes of different size. These explanations should be presented in the form of the three W: What - When – Where. Two thirds of the lecture time should be used in addition for a monthly topic. It is the audience, their questions, their ideas and their suggestions for various topics that are of interest to them for example: Sun, Moon, Planets, Galaxies, Globular Cluster, up to cosmological question like the Standard Model or Steady - State - Theory etc.



Theoretical and Practical Project - Public Outreach Programm.

At the end of a monthly public lecture one should present all observable objects that were explained in the part „The monthly sky“ in the combination of classical music by finally inviting the public to observe the objects with the help of the observatories telescope.

Conclusion:

As identified in spotlights the astronomical knowledge offers a wide field of opportunities to popularize astronomical knowledge. Even if the performed possibilities have their own specific laws, however, the didactic approach does not differ substantially.

Especially professional astronomers at the end of their career, on the basis of their knowledge and skills are essential to popularize astronomical knowledge in the named media by also educate ambitious amateur astronomers with the help of workshops, seminars, lectures also in form of an advanced training, so that they can function as multipliers. This creates a win-win situation for both sides and in general for the benefit of the astronomical knowledge as well as of wide sections of the population.

Each of these sections in the transfer of astronomical knowledge could be addressed in the interest of the available time only as a general overview and offers enough content for theoretical and practical seminars.

As an example of lecturing in the medium Internet one should feel free to use the Link:
<http://osthessen-tv.de/spezial/sterne-sehen-und-verstehen>

ЦВЕТА РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ СВЕРХНОВЫХ С ГРАВИТАЦИОННЫМ КОЛЛАПСОМ

Полякова Г.Д.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для галактик ранних типов (E, L, S0/a) определены уравнения линейной регрессии для перевода показателей цвета (u-g), (g-r) (SDSS photometric catalog, Release 8, 2011); (NUV-B) (GALEX ultraviolet atlas of nearby galaxies, 2007); (B-Ve) и (U-Be) (General photometry of galaxies, Prugniel et al, 1998) в систему каталога RC3. Показатели цвета (B-V)_{Tc} и (U-B)_{Tc} определены для 20 родительских галактик. На диаграмме цвет – звездная величина 17 из них попадают в область красной последовательности. В область голубой последовательности попадают галактики с активными ядрами (NGC 4691, NGC 838, NGC 7803). Из 36 родительских галактик 12 являются пекулярными и 13 – членами групп галактик.

1. Введение

Известно, что сверхновые типов Ibc и II, имеющие массивные предсверхновые ($M > 8M_{\odot}$), обычно наблюдаются в спиральных и неправильных галактиках. Однако к концу 2011 года было открыто более 40 таких звезд в эллиптических, линзовидных и S0/a объектах. Объяснение этого факта в основном ошибками в морфологической классификации их родительских галактик приведено в работе (Накобыан et al, 2008, A&A, 488, 523).

Однако в литературе обсуждается другая возможность объяснить вспышки таких сверхновых наличием небольшого количества пыли и газа (и процессов остаточного звездообразования) в некоторых E, L и S0/a галактиках, население которых составляют старые звезды (Burstein et al. 1988. ApJ. 328, 440; Yi et al. 1999. ApJ. 513, 128; Rich et al. 2005. ApJ. 619, L 107; Baldry et al. 2004. ApJ. 600, 681). Изучение этого наблюдательно-го факта является существенным для понимания природы сверхновых типов Ibc и II.

Известно, что цвет является другой важной характеристикой галактик, определяющей ее доминирующее звездное население. Известно также, что для большого числа галактик существует корреляция между их морфологическими типами и показателями цвета (B-V)₀ и (U-B)₀ (Conselice, 2006, MNRAS, 373, 1389). Но в составленном нами списке из 16 SNe Ibc и 20 SNe II, открытых в E, L и S0/a галактиках согласно классификации RC3 (de Vaucouleurs et al, 1991), показатели цвета (B-V)_T и (U-B)_T приведены только для 8 и 6 родительских галактик соответственно (колонки 1–6 таблицы). Поэтому определение цветов таких галактик является актуальной задачей.

2. База данных

Данные о цветах галактик мы получили из следующих публикаций:

1. The SDSS Photometric Catalog, Release 8, (Adelman-McCarthy et al, 2011, to be published);
2. The GALEX ultraviolet atlas of nearby galaxies (Gil de Paz et al, 2007, ApJS, 173, 185);
3. The total magnitude, radius, color indices, color gradient of galaxies (Prugniel et al. 1998, A&AS, 128, 299).

Собранные по этим источникам значения показателей цвета, определенные разными методами в разных фотометрических системах, затем конвертировались в систему каталога RC3. Уравнения линейной регрессии, необходимые для этой процедуры, предварительно вычислялись отдельно для указанных морфологических типов каждого

каталога, сравниваемого с RC3. Для этого из каталога RC3 были составлены выборки из 418, 631 и 105 эллиптических, линзовидных и S0/a галактик (числовые индексы типов T от -5 до 0) с известными $(B-V)_T$ и $(U-B)_T$. Далее для каждой галактики этих выборок определялись значения показателей цвета из указанных выше каталогов 1–3 для вычисления соответствующих уравнений линейной регрессии.

3. Результаты

1. Наибольшее число отсутствующих в RC3 показателей цвета родительских галактик нами было получено из SDSS Photometric Catalog, Release 8. SDSS фотометрическая система является многоцветной широкополосной CCD системой, в которой диапазон спектра от 3 000Å до 11 000Å делится на пять широких неперекрывающихся полос (ugriz) (Fukugita et al, 1996, AJ, 111, 1748; Stoughton et al, 2002, AJ, 123, 485), более широких, чем в стандартной системе UBVR_cI_c (Johnson, Morgan, 1953, ApJ 117, 313; Cousins, 1978, MNASSA, 37,8). Она калибрована к AB системе (Oke и Gunn, 1983, ApJ, 266, 713). Из SDSS Photometric Catalog, Release 8 (для краткости SDSS–DR8) мы получили астрометрические и фотометрические данные об объектах, расположенных только в 152, 281 и 52 площадках неба, радиусом 2'. Для каждого объекта в этом каталоге приводятся экваториальные координаты α , δ (система FK5, эпоха J2000.0); SDSS–DR8 имя и классификация изображения; координаты α , δ в системе ICRS (эпоха J2000.0); красное смещение (z_{sp}); AB величины u , g , r , i , z с их ошибками.

Затем для каждой из 485 площадок было проведено отождествление галактик, для которых получались данные из SDSS–DR8 каталога. При их идентификации существенными были: классификация изображения; минимальное относительное радиальное расстояние галактики от центра площадки; минимальные разности экваториальных координат и красных смещений галактик в каталогах SDSS и RC3; величина B_T . Отметим, что z_{sp} в DR8 приведены для небольшого числа галактик из наших выборок. Поэтому объем последних сократился до 57, 104 и 26 галактик. Для них были получены звездные величины ugr и вычислены показатели цвета $(u-g)$ и $(g-r)$.

Сравнение экваториальных координат галактик из каталогов SDSS – DR7 (из-за ошибок в SDSS–DR8) и RC3 не выявило их систематического различия.

Для этих же выборок сравнение лучевых скоростей в каталогах SDSS–DR8 и RC3 также не выявило их систематического различия для E и S0/a галактик.

Небольшое значимое различие по критерию Стьюдента получилось для линзовидных объектов ($t = 2,53 > 1.98 = t_{05}$ при $f = 103$ и вероятности $P = 95\%$).

Зависимости между $(u-g)$ и $(U-B)_T$, а также между $(g-r)$ и $(B-V)_T$ для эллиптических, линзовидных и S0/a галактик оказались тесными. Полученные уравнения регрессии имеют вид:

$$y = -0.820 + 0.690 \times (u-g) \quad (1) \quad y = 0.281 + 0.824 \times (g-r) \quad (2)$$

$$\pm 0.065 \quad \pm 0.035 \quad \pm 0.045 \quad \pm 0.054$$

$$y = -0.651 + 0.590 \times (u-g) \quad (3) \quad y = 0.251 + 0.869 \times (g-r) \quad (4)$$

$$\pm 0.066 \quad \pm 0.037 \quad \pm 0.044 \quad \pm 0.055$$

$$y = -0.875 + 0.718 \times (u-g) \quad (5) \quad y = 0.190 + 0.910 \times (g-r) \quad (6)$$

$$\pm 0.094 \quad \pm 0.056 \quad \pm 0.051 \quad \pm 0.066$$

Вычисленные уравнения линейной регрессии позволяют по известным $(u-g)$ и $(g-r)$ определить их редуцированные значения $(U-B)_{Tc}$ и $(B-V)_{Tc}$. Сравнение $(u-g)$ с $(U-B)_T$ и $(g-r)$ с $(B-V)_T$ для линзовидных галактик приведены на рис. 1 и 2.

Приведенные выше уравнения (1–6) использовались для вычисления конвертированных в систему RC3 значений $(B-V)_{Tc}$ и $(U-B)_{Tc}$ для 17 родительских галактик сверхновых (колонки 7–8 таблицы). Укажем, что в галактике UGC 2836 были открыты 2

Таблица

SNe	RC3			SDSS-DR8			Jester		GALEX (NUV-B) _{TC}	Prugniel	
	hosts	m.t.	B _T	(B-V) _T	(U-B) _T	(B-V) _{TC}	(U-B) _{TC}	(B-V)		(U-B)	(B-V) _{TC}
1986M Ib	N 7499	LAS0	13.94	1.11	0.43	1.03±.07	0.57±.12	1.04	0.79		
1990T Ib	N 4650A	S..0P	13.90								
1997X Ic	N 4691	RSBS0P	11.66	0.58	-0.07	0.54±.06	-0.13±.11	0.70	-0.07	-0.06±.06	
2000ds Ib	N 2768	E6	10.84	0.97	0.46	1.01±.07	0.50±.09	1.00	0.60	0.54±.08	
2002ij Ic	I 340	DL..0	14.36*			0.83±.06	0.19±.09	0.82	0.21		
2003ih Ibc	U 2836	L	13.40			1.04±.07	0.33±.13	1.04	0.40		
2004gv Ib	N 856	PSAT0	14.13			0.89±.07	0.47±.14	1.01	0.56		
2005E Ibc	N 1032	S..0	12.64	1.00	0.47	1.01±.08	0.49±.14	1.12	0.63		
2005cz Ib	N 4589	E2	11.69	0.96						0.90±.03	0.55±.02
2006lc Ic:	N 7364	S..0P	13.56			0.98±.08	0.36±.13	1.09	0.48		
2007aw Ic	N 3072	S..0?	13.73								
2007ke Ib	N 1129	E	13.50								
2007kj Ibc	N 7803	S..0	14.60			0.90±.07	0.21±.13	1.01	0.28	1.02±.03	0.55±.02
2009dt Ic	I 5169	PLXR	13.74								
2009gf Ic	N 5525	L	13.80	0.96	0.51	0.99±.06	0.49±.11	0.98	0.58		
2010ig Ib	U 1306	RLX0	14.56			1.00±.07	0.56±.12	1.02	0.71		
1989R Iip	U 2912	S..0	16.18*								
1999eg II	I 1861	L.A.0	14.33								
1999ew II	N 3677	PSAR0	13.30			0.88±.07	0.21±.13	0.99	0.28		
2000fm II:	N 1612	SBR0	14.85*								
2001I Iin	U 2836	L	13.40			1.04±.07	0.33±.13	1.04	0.40		
2001hh II	M-2-57-22	PLB0?	14.49*								
2002aq II	M-1-7-35	LBR+P	15.71*			0.91±.06	0.42±.11	0.93	0.57		
2003hr II	N 2551	SAS0	13.10	0.93						0.15±.06	
2004gh II	E 500-34	RSBS0	14.44*								
2005H II	N 838	LAT0P	13.57	0.62	-0.08	0.75±.06	-0.11±.06	0.74	-0.20		
2005md II:	N 2274	E	13.10								

2006du II	I 1529	PLAR0P	14.49*										
2006ee Iin	N 774	L	13.97	1.02±.07	0.48±.11	1.02	0.62	0.47±.08					
2006gy Iin	N 1260	S..0	14.32	1.03±.08	0.54±.15	1.12	0.68	1.13±.03					
2008et II	E 283-4	SAR0	14.69										
2009C Iib	U 12433	SB.0	15.69*										
2009ah Iib	E 171-4	LXR0?	13.58										
2009ju IIP	U 3285	E?	15.43*										
2010ck II	M+6-31-61	L?	15.12	0.94±.06	0.39±.11	0.92	0.43						
2010jr Iib	E 362-18	SBS0P	13.81										

сверхновые SN 2001I и SN 2003ih типов II_n и Ib_c. Проведено сравнение полученных величин $(U-B)_{Tc}$, $(B-V)_{Tc}$ с величинами $(B-V)$ и $(U-B)$, вычисленных для тех же значений $(u-g)$ и $(g-r)$ по формулам преобразований $ugriz - UBVRcIc$ (Jester et al, 2005. AJ, 130, 873) (колонки 9,10 таблицы). По мнению авторов полученные ими уравнения преобразований показателей цвета могут применяться как для звезд, так и для нормальных галактик (без сильных эмиссионных линий в их спектрах). Сравнение показателей цвета показало удовлетворительное согласие величин $(B-V)_{Tc}$ и $(B-V)$, а также $(U-B)_{Tc}$ и $(U-B)$.

2. Широкополосные наблюдения близких галактик проводились на спутнике GALEX (Galaxy evolution explorer) в далекой (FUV, $\lambda_{eff} = 1516\text{A}$) и близкой (NUV, $\lambda_{eff} = 2267\text{A}$) областях ультрафиолетового спектра (Martin et al. 2005. ApJ, 619, L1). По результатам этих наблюдений был опубликован The GALEX ultraviolet atlas of nearby galaxies (Gil de Paz et al. 2007. ApJS. 173, 185). В него включены галактики из GALEX nearby galaxies survey (NGS; Gil de Paz et al. 2004.BAAS, 205, 42.01) и объекты из других GALEX обзоров, у которых оптический диаметр $D_{25} > 1'$ согласно RC3. Для каждого из 1034 объектов Атласа приведены их изображения, поверхностная яркость и цветовой профиль (FUV – NUV). Из профилей поверхностной яркости ($\mu_B = 25\text{mag/arcsec}^2$) авторами были вычислены асимптотические величины FUV и NUV (AB система), показатель цвета (FUV–NUV) и светимости ($\log FUV$, $\log NUV$). Полученные данные были дополнены оптическими (U, B, V), а также NIR (J, H, K) и FIR цветами и светимостями.

Общих галактик, приведенных в нашей таблице, и GALEX Атласе, оказалось 4: линзовидные N 774, N 2768, и N 2551, N 4691 – типа S0/a. Общих L и S0/a галактик с известной фотометрией в RC3 и GALEX Атласе оказалось 69 и 12 соответственно. Поэтому для дальнейшего анализа они были объединены в одну выборку. Зависимости между величинами NUV и U_T , а также между показателями цвета (NUV–B) и $(U-B)_T$ для L+S0/a галактик оказались достаточно тесными. Полученные уравнения линейной регрессии (7, 8) позволяют определить их редуцированные значения в системе каталога RC3:

$$NUV_{Tc} = (0.522 \pm 0.782) + (0.754 \pm 0.047) \times NUV \quad (7)$$

$$(U-B)_{Tc} = (-0.422 \pm 0.051) + (0.202 \pm 0.013) \times (NUV-B)(8)$$

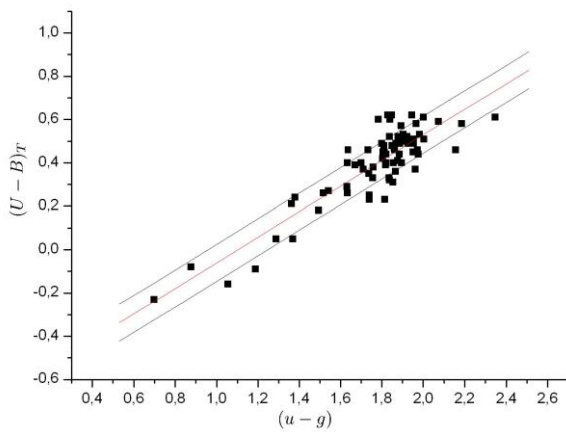


Рис. 1. Сравнение $(u-g)$ и $(U-B)_T$ для L галактик.

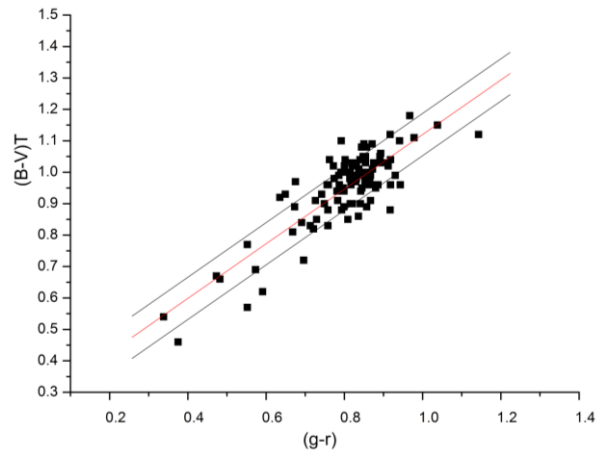


Рис. 2. Сравнение $(g-r)$ и $(B-V)_T$ для L галактик.

Конвертированные в систему каталога RC3 величины показателей цвета $(NUV-B)_T$ для галактик NGC 774, NGC 2768 (L) и NGC 2551, N 4691(S0/a) приведены в колонке 11 таблицы.

3. В опубликованном каталоге Total magnitude, radius, color indices, color gradients and photometric type of galaxies (Prugniel et al. 1998. A&AS, 128,299) приведены полные (асимптотические) величины B_e , эффективные радиусы, определенные для изофот с разными поверхностными яркостями, показатели цвета $(B-V_e)$ и $(U-B_e)$, цветовые градиенты и фотометрические типы. Общих объектов, приведенных в нашей таблице и этом каталоге, оказалось только 3 – эллиптические галактики NGC 1129, NGC 4589 и NGC 1260, для которой приведено только значение $(B-V_e)$. Общих эллиптических галактик в этом каталоге и RC3 оказалось 278. Для них были получены значения $(B-V_e)$ и $(U-B_e)$. Зависимости между $(B-V_e)$ и $(B-V)_T$, а также между $(U-B_e)$ и $(U-B)_T$ оказались тесными. Полученные уравнения регрессии имеют вид

$$y = 0.073 + 0.903 \times (B-V_e) \quad (9) \quad y = 0.057 + 0.833 \times (U-B_e) \quad (10). \\ \pm 0.022 \quad \pm 0.023 \quad \pm 0.013 \quad \pm 0.061$$

Конвертированные в систему каталога RC3 значения $(B-V_e)_c$ и $(U-B_e)_c$ для галактик NGC 1129, NGC 4589 и NGC 1260 приведены в колонках 12, 13 таблицы.

4. Заключение

Диаграмма $B_T^0 - (U-B)_T^0$ (цвет – звездная величина) (рис. 3) построена по данным из RC3 для 872 галактик ранних типов E, L и S0/a. Звездные величины и показатели цвета родительских галактик сверхновых типов Ibс и II исправлены за покраснение согласно RC3. Их положение на диаграмме показано знаком (+). Диаграмма показывает, что 16 галактик попадает в область красной последовательности. В область голубой последовательности попадают галактики NGC 4691 и NGC 838 – галактики с активными ядрами (AGN), NGC 7803 – Mrk 934 и IC 340 – галактика с низкой поверхностной яркостью. Из 36 галактик 12 являются пекулярными (AGN, LINER, галактиками Сейфорта и Маркаряна), 13 – членами групп галактик.

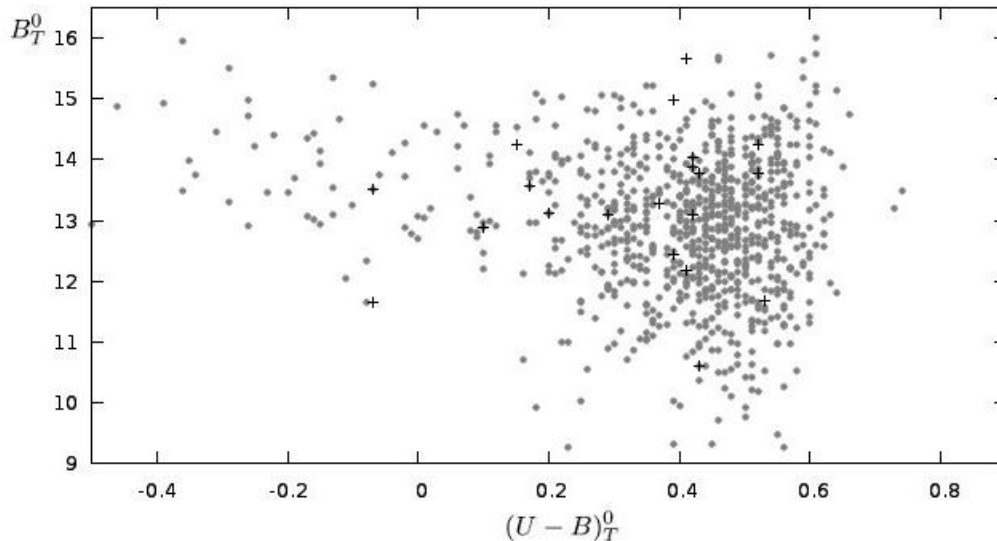


Рис. 3. Диаграмма цвет–величина для E, L и S0/a галактик.

Дальнейшие работы по наблюдениям и определениям цветов галактик в ультрафиолетовом диапазоне помогут понять природу вспышек таких сверхновых.

THE COLOR-INDICES OF EARLY-TYPE GALAXIES WITH CORE COLLAPSE SUPERNOVAE

Polyakova G.D.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

We performed least-squares fits to determine the transformation equations of the colour-indices (u-g), (g-r) (SDSS photometric catalog, Release 8, 2011); (NUV-B) (GALEX ultra-violet Atlas of nearby galaxies, Gil de Paz et al, 2007); (B-V_e), (U-B_e) (General photometry of galaxies, Prugniel et al, 1998) to the photometric system of catalogue RC3 (U-B)_T and (B-V)_T. We determined the colour – indices (U-B)_{Tc} and (B-V)_{Tc} for the 20 galaxies with SNe of types Ibc and II. The 17 of these galaxies are seen to fall in red sequence galaxies of colour- magnitude diagram for 872 of the RC3 early-type galaxies with known (U-B)_T⁰ colours. The blue galaxies are NGC 4691, NGC 838 and NGC 7803 – the galaxies with active galaxy nuclei (AGN). The 12 host galaxies are peculiar and 13 – are members of group of galaxies.

КАТАЛОГ 231043 ЗВЕЗД ДЛЯ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

**Рыльков В.П.¹, Нарижная Н.В.¹, Дементьева А.А.¹,
Пинигин Г.И.², Майгурова Н.В.²**

¹Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН,
Россия, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1, ГАО РАН,
vrylk1145@yandex.ru

²НИИ «Николаевская Астрономическая Обсерватория» НАН Украины,
Украина, 54030, Николаев, ул. Обсерваторская, 1,
pinigin@mao.nikolaev.ua

Для выполнения астрометрических редуций ПЗС-наблюдений внегалактических радиосточников (ERS) списка ICRF создан сводный каталог положений более чем 230000 звезд в диапазоне блеска от 10 до 17^m. Каталог содержит 240 полей небесной сферы размером 40' — 42' с центрами в ERS в области склонений от -30° до +89°. Для 159332 звезд при получении средних положений использовались собственные движения из каталога UCAC3. Положения этих звезд приводятся в каталоге на эпоху и равноденствие J2000.0, координаты остальных даны на эпоху наблюдения.

С 1998 г. в качестве основной реализации международной астрономической небесной опорной системы координат принят каталог ICRF (International Celestial Reference Frame) положений избранных компактных внегалактических радиосточников (ERS, [1]). Через систему звезд, радиозвезд и доступных наблюдениям ERS оптическая астрометрическая система HCRF, образованная наблюдениями космического аппарата Hipparcos, привязана к ICRF. Для связи опорных систем астрономических координат в оптическом и радио диапазонах требуется наблюдение общих объектов, что является одной из самых важных задач наземной и космической позиционной астрометрии. Малая яркость основного списка ERS требует для решения данной задачи наличия мощных телескопов, оснащенных высокочувствительными ПЗС-приемниками, имеющими сейчас, как правило, малое поле зрения. Для определения положений оптических компонентов ERS необходимо иметь высокоточную систему слабых опорных звезд (хотя бы до 16-17^m), расположенную в непосредственной близости вокруг внегалактических радиосточников. Кроме того, получение координат слабых звезд позволяет создать астрометрические стандарты (поля слабых звезд с высокоточными координатами и собственными движениями) для использования их в качестве реперов в будущих космических астрометрических миссиях.

К настоящему времени выполнено довольно много работ по определению положений звезд в областях вокруг ERS списка ICRF. Основное назначение подобных каталогов – получение с их использованием положений оптических компонентов ERS с астрометрической точностью без многоступенчатой привязки при астрометрической редуции от более ярких опорных звезд к слабым радиосточникам. В наших работах по созданию сводного каталога [2-4] приводятся довольно подробные описания всех каталогов, вошедших в сборку сводного. Цель работы – увеличение плотности и повышение точности положений опорных звезд путем создания сводного каталога звезд 10— 17^m вокруг ERS списка ICRF путем объединения нескольких существующих наземных оптических каталогов.

Входные каталоги

В нашем распоряжении накопилось 11 оригинальных позиционных каталогов звезд, полученных в последние годы. Некоторые из этих каталогов основаны на проведенных ранее фотографических наблюдениях, другие – уже в последние десятилетия – на специальных наблюдениях с ПЗС-приемниками для получения высокоточной опорной системы координат из звезд 13-18^m. Из них можно выбрать звезды специально для будущих ПЗС-наблюдений слабых астрометрических ERS, образующих фундаментальную систему координат ICRF. Из этих каталогов 9 мы использовали для объединения в сводный, а каталог USNO UCAC3 был использован только для сравнения и выборки собственных движений звезд, чтобы привести их положения в разных каталогах на одну эпоху при усреднении. Список входных каталогов и их основные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1. Каталоги, входящие в сводный каталог опорных звезд.

Место наблюдения	Имя каталога	Тип наблюдений	Размер поля, ' ,	Число полей	Число звезд в выборке	Эпоха наблюдений	Звездные величины
Пулково	Pul ERS	Фото	42x42	35	5139	1991-1995	10-17
Николаев	AMC1B	CCD	60x24	192	6539	1996-1998	12-15
Бухарест	PIRS-B	Фото	60x60	188	7395	1991-2000	12-16
Киев ГУ	PIRS-K	Фото	60x60	1115	2875	1989-1993	12-15
Николаев	N_2004	CCD	60x24	208	17074	1999-2003	10-17
Киев	KMAC1-CU	CCD	46x24	192	115000	1999-2004	12-17
N&S Obs	ERL	Фото	60x24	398	89422	1976-1991	12-14
La Palma	CMC14	CCD	60x60	206	310409	1989-2005	10-17
La Palma	CMC9	-	-	240	5155	1984-1995	9-15,4
Для выборки собственных движений звезд для выравнивания эпох наблюдений и присвоения звездных величин привлечены каталоги:							
USNO	UCAC3	CCD		240	882314	1995-2006	9-17
	XC1	Scan Ph	60x60	255	856421		< 19

Из исходных каталогов сделаны выборки звезд в пределах размеров поля до 40', после чего были исключены объекты с большими расхождениями в положениях. Поскольку все рассматриваемые каталоги имеют разную точность, им были назначены веса при включении в сводный каталог. На данном этапе в качестве значений весов было принято указанное число наблюдений каждой звезды, независимо от приемника излучения.

Сводный каталог

По аналогии с созданием фундаментальных каталогов серии FK было решено объединить выше перечисленные каталоги, полученные приблизительно в одни и те же эпохи наблюдений. Поскольку каталоги наблюдались на разных инструментах и разными методами регистрации изображения в разные эпохи, было необходимо получить разности координат одних и тех же звезд, входящих в каталоги, на предмет выявления случайных и систематических ошибок в положениях звезд. При исследовании разностей для значительной части звезд необходимые для решения этой задачи собственные движения звезд после их отождествления были взяты из каталога UCAC3.

Объединение каталогов в сводный проводилось по следующим принципам:

1. Поиск звезд в разных каталогах по совпадению координат в 3" и объединение всех найденных звезд в общий список отождествления.

2. Поиск и присвоение собственных движений из UCAC3 для звезд списка, а для наиболее слабых звезд, не найденных в UCAC3, в каталоге XC1.

3. Вычисление координат на общую эпоху и усреднение с весами, равными кратности наблюдений звезды в исходных каталогах.

4. Поиск и исключение из общего списка звезд с большими отклонениями ($>0,5''$) от средних значений вычисляемых положений.

5. При отсутствии собственных движений звездам присваивались координаты наиболее поздних наблюдений, собственные движения по RA и DE кодировались 9999.99 mas/год.

Путем взаимного отождествления и выявления совпадающих звезд для 240 областей звезд вблизи ERS были усреднены и включены в сводный каталог положения 159332 звезд имеющих собственные движения в UCAC3, а также положения 71711 звезд, полученные из объединяемых каталогов, либо не имеющие собственных движений, либо взятых из объединяемых каталогов. Для усреднения все координаты звезд, которые имеют собственные движения, переведены на эпоху и равноденствие J2000. Для них сделано сравнение с положениями звезд в каталоге UCAC3 и вычислены сравнительные характеристики. Аналогичное отождествление выявило 5604 ярких звезд $11-12^m$, совпадающих с координатами каталога Tycho-2. Для остальных более 70 тысяч звезд в каталоге приведены положения либо самых поздних наблюдений, либо они усреднялись на среднюю эпоху, если наблюдались в разных каталогах с разностью эпох не более 1,5 лет.

Таким образом, для 240 прямоугольных полей размером до $40-42'$ вокруг внегалактических радиоисточников списка ICRF получен каталог положений 231043 звезд до $16,9^m$.

Отметим, что количество K^* звезд, содержащееся в отдельных полях вокруг ERS, находится в пределах от 3 до 323 (в среднем 91 звезда в поле). Распределение звезд по звездным величинам приведено на рис. 1.

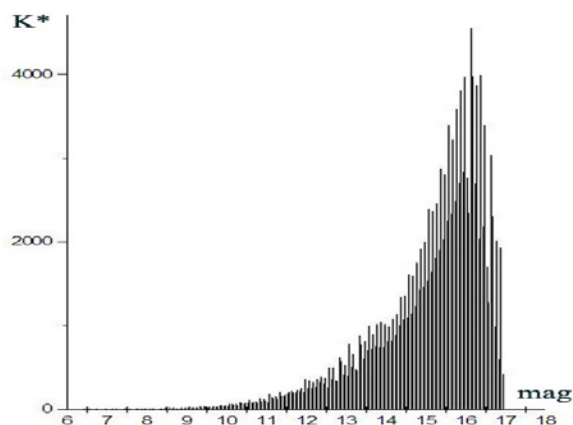


Рис. 1. Распределение числа звезд в сводном каталоге по звездным величинам.

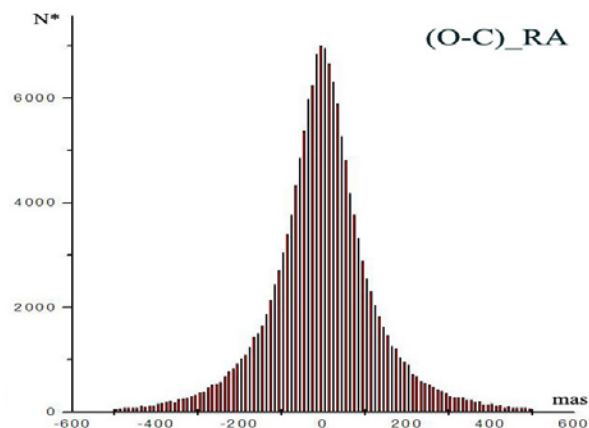


Рис. 2. Гистограмма разностей (O-C) в RA для 159332 звезд Кат – UCAC3.

Сравнение 159332 звезд, отождествленных со звездами каталога UCAC3, показало, что распределение звезд по звездным величинам носит практически экспоненциальный характер и обрывается на уровне $16,9^m$ в силу ограничения нами предельной звездной величины (рис. 1). Из гистограммы с очевидностью следует, что основная масса звезд нашего каталога находится в диапазоне от 14 до 17^m . Кроме величин, взятых из UCAC3, для остальных 70 тысяч звезд это бессистемные оценочные значения из разных входных каталогов.

Формат сводного каталога

Существующая на сегодня исследуемая версия сводного каталога содержит 231043 строк информации, длина файла 32 146 646 байт.

Позиции сводного каталога:

- 1-10 – номер звезды по каталогу;
- 12-18 – звездная величина, если она есть (по UCAC3 или получена наблюдателем);
- 20-32 – прямое восхождение в градусах на эпоху наблюдений в ICRS на J2000.0;
- 34-39 – ошибка среднего значения прямого восхождения в 0.001";
- 41-43 – количество наблюдений по прямому восхождению;
- 45-53 – эпоха прямого восхождения, год.доля года (гггг.ххх);
- 55-67 – склонение в градусах на эпоху наблюдений в ICRS для равноденствия J2000.0;
- 69-74 – ошибка среднего значения склонения в 0.001";
- 76-78 – количество наблюдений, использованных для получения склонения;
- 80-88 – эпоха склонения, год.доля года(гггг.ххх);
- 90-100 – прямое восхождение звезды в целом формате ЧЧММССДД (J2000);
- 102-111 – склонение звезды в целом формате \pm ГГММССДД (J2000);
- 113-119 – собственное движение по прямому восхождению $\text{mas/yr} * (\cos\delta)$ из UCAC3;
- 121-127 – собственное движение по склонению mas/yr из UCAC3.

Исследование каталога

Внутренняя точность координат звезд при усреднении положений сводного каталога составляет в среднем 0,044" по прямому восхождению и 0,11" по склонению для всех 231043 звезд. Полученные индивидуальные каталоги звезд для каждого поля с центром в ERS необходимо исследовать на ошибки путем сравнения хотя бы с двумя независимо полученными каталогами. Из современных каталогов, содержащих достаточное количество звезд, для сравнения выбраны два:

- Tycho-2 – каталог, полученный при переработке наблюдений космической миссии Hipparcos, включающий положения более чем 2 млн. звезд до 12^m по всему небу.
- UCAC3 – каталог, содержащий положения более чем 100 млн. звезд и, в некотором смысле, тоже являющийся сводным. По этой причине он не используется в нашем объединении. Каталог включает звезды до 17^m, распределенные по склонению от –90 до +90°.

Таким образом, проведено сравнение с каталогом Tycho-2, и полученным на его основе современным каталогом 21-го века UCAC3. Учитывая, что средние эпохи наблюдений звезд нашего сводного каталога находятся как раз между ними, получена оценка точности почти от равноудаленных по эпохам двух современных каталогов.

В настоящее время индивидуальные ошибки каждого из 240 полей вблизи ERS не исследовались. С каталогами UCAC3 и «Tycho-2» последовательно сравнивался полный сводный каталог. Сравнение проводилось путем вычисления отклонений между нашими значениями средних координат и значениями в соответствующих каталогах для общих звезд. Результаты получены в виде гистограмм разностей (O-C) в прямом восхождении (рис. 2) и склонении. Графики зависимостей (O-C) от звездной величины, а также при изменении прямого восхождения или склонения представлены на рис. 3-4.

Гистограмма разностей (O-C) по совпадающим звездам с UCAC3 показывает нормальный закон распределения со значениями до 200mas, причем основной диапазон изменений от -100 до +100 mas (рис. 2). Практически совершенно идентичная гистограмма с такими же характеристиками представляет отклонения (O-C) в DE.

Значения разностей (O-C), вычисленные для звезд сводного каталога с использованием собственных движений каталога UCAC3 относительно координат в UCAC3, имеют следующие характеристики:

- распределение разностей (O-C) по прямому восхождению и склонению следует нормальному закону, разброс значений отклонений от UCAC3 в основном до 100 mas,
- среднее значение (O-C) по прямому восхождению практически равно нулю: 4.6mas, ошибка среднего составляет +0.35mas, что говорит о том, что систематическая составляющая по прямому восхождению практически отсутствует.
- среднее значение (O-C) по склонению равно 8.4mas с ошибкой среднего +0.34mas, что говорит о наличии незначительной систематической составляющей по склонению на уровне 0.008". Эти числа характеризуют точность сводного каталога относительно UCAC3

Приведенные графики разностей (O-C) по совпадающим звездам с UCAC3 на рис. 3-4 характеризуют в основном неудовлетворительное знание собственных движений слабых звезд. Значения разностей растут при увеличении звездной величины от 14 до 17^m почти втрое, как в RA, так и в DE, достигая для звезд 16-17^m (рис. 3) величин до 200-300 mas. Практически такие же разности показывают в зависимости от RA и от DE.

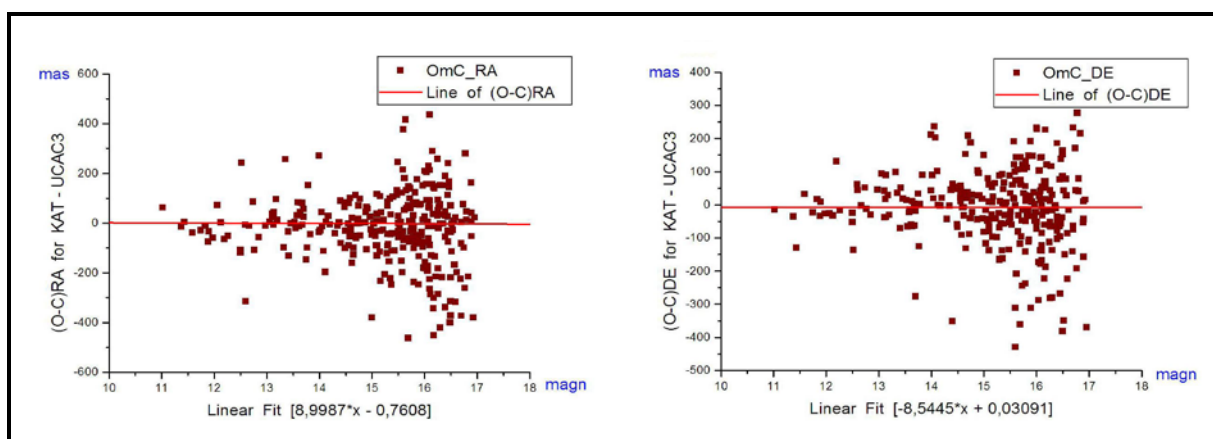


Рис. 3. Разности (O-C) в RA и в DE относительно координат в UCAC3, вычисленные для 159332 совпадающих звезд на эпоху J2000.0 в зависимости от зв. величины.

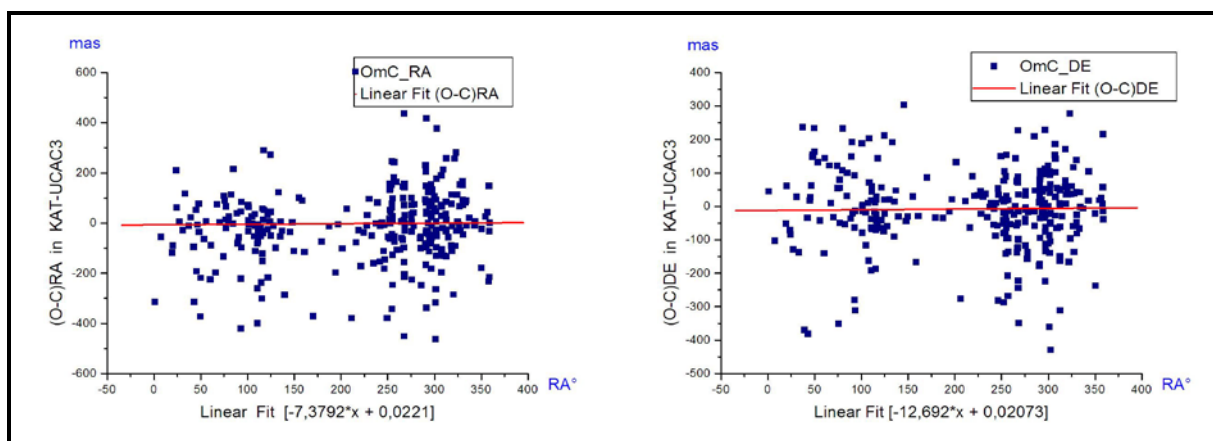


Рис. 4. Разности (O-C) в RA и в DE относительно координат в UCAC3, вычисленные для 159332 совпадающих звезд на эпоху J2000.0 в зависимости от RA.

Все это лишней раз подтверждает насущность задачи по определению положений и собственных движений звезд слабее 12^m. А это потребует не только точных определений координат, но и большой разности эпох для получения собственных движений слабых звезд, что, возможно, не смогут обеспечить кратковременные космические миссии. Кроме того, для полученных в космосе точных координат миллионов слабых звезд при

вычислении их собственных движений в качестве первой эпохи необходимо будет привлекать единственный на сегодня космический каталог Tycho-2 (всего лишь на 2,5 млн. звезд до 12^m) или земные каталоги «миллионники», создаваемые в USNO типа UCAC2-4, отягощенные негативным влиянием земной атмосферы. Земные высокоточные наблюдения слабых звезд должны помогать решению этой проблемы путем накопления результатов позиционных наблюдений с необходимой для решения этой задачи точностью.

Аналогичные характеристики получены по совпадающим с каталогом «Tycho-2» ярким звездам 9-12^m. Таких совпадающих звезд нашлось всего 5604. Картина изменений (O-C) в зависимости от RA, DE близка к показанным на рис. 4 для UCAC3.

Несмотря на то, что появление таких астрометрических обзоров неба, как UCAC2-UCAC4, CMC14 и других, на сегодняшний день позволяет иметь достаточно плотную систему опорных звезд с высокой точностью положений, привлечение дополнительных наблюдательных данных может оказаться полезным для исследования и повышения точности определения собственных движений звезд. Это диктует необходимость периодических наблюдений и уточнения положений звезд в каталогах, используемых в качестве опорных при получении оптических координат радиоисточников списка ICRF. В этом заключается основная цель наблюдений полей звезд вблизи ERS. Только имея высокоточную систему слабых опорных звезд, можно получать точные координаты оптических компонентов ERS ICRS для контроля связи оптических и радио систем координат и отслеживать динамику вращения астрометрических систем как земных, так и космических относительно ICRS.

Заключение

Сводный каталог имеет необходимые позиционные данные для контроля оптических наблюдений слабых звезд 10 — 17^m в будущих космических проектах и представляет собой один из проектов наземного обеспечения при подготовке космических миссий таких, например, как GAIA и SIM. При повторении наблюдений областей вокруг ERS, которые определяют опорную систему ICRS, избранные площадки с более точными координатами слабых звезд могут использоваться в дальнейшем в качестве астрометрических стандартов.

Литература

1. *Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M., et al.*, The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry, *Astron. J.*, 1998, v.116, pp. 516-546.
2. *Babenco Y., Daniltsev A., Pinigin G., Ryl'kov V., et al.*, Reduction of Compiled Catalogue in the Selected Extragalactic Radio Source Fields. Preliminary Estimation, *Romanian Astronomical Journal*, 2003, vol.13, № 1, pp. 77-81.
3. *Ryl'kov V., Dement'eva A., Narizhnaya N., et al.* Compiled Catalogue of Reference Stars around Extragalactic Radio Sources, Reduction Techniques and the First Results, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supl.Ser.*, 2005, № 5, pp. 328- 332
4. *Рыльков В.П., Нарижная Н.В., Деметтьева А.А., Пинигин Г.А. и др.* Сводный каталог положений звезд вокруг 227 внегалактических радиоисточников списка ICRF, *Кинематика и физика небесных тел.*, 2011, т.27, № 6, pp. 44-51.

АРХИВ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАСТИНОК ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ, ИХ ОЦИФРОВКА, НОВАЯ АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ РЕДУКЦИЯ, АНАЛИЗ ОШИБОК

Хруцкая Е.В., Бережной А.А., Калинин С.И.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Стеклянный архив Пулковской обсерватории, содержит более 51000 фотографических пластинок, полученных в период с 1898 по 2007 годы. Рассматриваются актуальные задачи современной астрономии, для решения которых оцифровка и новая редукция старых фотографических пластинок может оказаться полезной. Анализируются ошибки, связанные с различными измерительными приборами, качеством фотопластинки и астрометрической редукцией. Приводятся результаты новой редукции 167 пластинок с астероидами и 62 пластинок с Плутоном, оцифрованных на высокоточном сканере Бельгийской Королевской обсерватории.

Введение

В настоящее время более 5100 фотографических пластинок с изображениями различных небесных объектов: звезд, туманностей, скоплений, больших и малых тел Солнечной системы, хранятся в архиве Пулковской обсерватории. Наблюдения охватывают период с 1898 по 2007 год. Метаданные о пластинках, полученных на разных телескопах, собраны в базу данных. Использование FIT-формата для архивирования метаданных позволяет обращаться к базе из прикладных программ и получать информацию о наблюдениях для обработки оцифрованных пластинок. С 2008 года база данных о пластинках Нормального астрографа и 26-дюймового рефрактора открыта для широкого круга пользователей (www.pulldb.ru/db/plates) [1].

Регулярная оцифровка фотопластинок с наблюдениями двойных звезд и малых тел Солнечной системы была начата в Лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН в 2007 г. на планшетных сканерах. Для оцифровки в малых полях (в радиусе $\sim 20'$ от оптического центра пластинки) использовался сканер UMAX Power Look II, для оцифровки широких полей ($2^\circ \times 2^\circ$) – сканер Microtek ScanMaker i900 [2]. Часть пластинок была оцифрована на высокоточном сканере DAMIAN в Бельгийской Королевской обсерватории [3]. В 2012 г в лаборатории было смонтировано мобильное устройство для массовой оцифровки пластинок (MDD) [4].

Некоторые задачи современной астрономии, для решения которых старые фотографические наблюдения могут быть полезны

Архивы фотопластинок подобные пулковскому имеются во многих астрономических учреждениях всего мира. Их содержание требует специальных помещений и значительных финансовых затрат. Возникает вопрос: насколько могут быть востребованы старые фотографические наблюдения в современных астрономических исследованиях? Можно назвать несколько задач современной астрономии для решения, которых материал фотографических наблюдений может оказаться полезным.

- Изучение динамики спутников планет и астероидов, уточнение теорий движения этих объектов. Для решения этой задачи необходима высокая точность наблюдательных данных и продолжительные ряды наблюдений.

Новая редукция оцифрованных фотографических пластинок дает возможность получить ряды наблюдений продолжительностью 50-70 лет. Это существенный вклад в решение данной задачи. Точные теории движения спутников планет и астероидов необ-

ходимы для проводимых и будущих космических миссий к этим объектам, для изучения строения и эволюции Солнечной системы.

- Получение точных экваториальных координат звезд в ранние эпохи для вывода высокоточных собственных движений звезд. Особенно это актуально для звезд слабее 13.5 звездной величины.

Отсутствие высокоточных собственных движений слабых звезд - проблема всех современных каталогов. Высокоточные собственные движения звезд это материал для изучения кинематических и физических подсистем Галактики, возможность понять механизмы звездообразования в различных подсистемах Галактики, уточнить зависимость “масса-светимость” и т.п. Полученный наблюдательный материал ранних эпох может оказаться полезным при анализе собственных движений звезд каталога GAIA для выявления двойных и кратных систем среди слабых звезд.

- Изучения избранных объектов, представляющих научный интерес (визуально-двойные звезды, звезды с невидимыми спутниками, звезды с большими собственными движениями).

Для примера, при поиске кандидатов в астрометрические двойные среди карликов нам были необходимы точные собственные движения этих звезд. Помимо собственных движений, полученных для 1003 звезд, наблюдавшихся на Нормальном астрографе, на пластинках с астероидам (наблюдения 50-х годов) удалось обнаружить еще 832 звезды 14^m-16^m. Точность полученных собственных движений 832 звезд оказалась в пределах 4-6 mas/год. Это был эксперимент по использованию старых пластинок, который существенно увеличил материал для дальнейших исследований.

Основные источники ошибок при оцифровке и редукации фотопластинок

Основные источники ошибок при измерении и редукации фотографических пластинок можно разделить на три категории:

- Ошибки измерительного прибора
- Ошибки астрометрической редукации
- Ошибки, зависящие от качества фотографической пластинки.

Это очень условное разделение, так как в процессе измерений и редукации ошибки разного вида трансформируются, переходят друг в друга, и иногда компенсируются. В частности, ошибки 3-ей категории могут заметно влиять на ошибки 2-х первых категорий.

Основные ошибки различных приборов для оцифровки фотопластинок

Различные приборы для оцифровки имеют свои специфические ошибки.

Основные ошибки планшетных сканеров:

- неоднородность ширины пикселей на ПЗС-линейке (проявляется в виде систематических ошибок $\Delta x(x)$, на ошибки этого вида приходится около 90% всех систематических ошибок планшетных сканеров).
- гнутые ПЗС-линейки (проявляется в виде систематических ошибок $\Delta y(x)$).
- гнутые направляющей, по которой движется ПЗС-линейка (приводит к систематическим ошибкам вида $\Delta x(y)$).
- неоднородность скорости перемещения ПЗС-линейки вдоль направляющей (приводят к систематическим ошибкам вида $\Delta y(y)$).
- косоугольность системы координат. Возникает в связи с тем, что угол между ПЗС-линейкой и направляющей может немного отличаться от 90 градусов. Это проявляется в виде косоугольности системы координат на сканах.

Систематические ошибки недорогих планшетных сканеров связаны, главным образом, с несовершенством технологических процессов, применяемых при производстве таких сканеров.

Ошибки высокоточного сканера DAMIAN значительно меньше ошибок планшетных сканеров. Основные из них:

- дисторсия объектива,
- неортогональность осей X,Y (~10 arcsec),
- наклон оптической оси объектива к плоскости пластинки,
- шумы ПЗС-матрицы

Основная ошибка связана с дисторсией объектива.

Ошибки мобильного устройства для оцифровки пластинок:

- различные аберрации объектива,
- шумы ПЗС-матрицы.

Наиболее значимые ошибки связаны с оптикой, но они достаточно стабильны.

Такое разнообразие ошибок различных приборов требуют их обязательной калибровки перед оцифровкой пластинок. Наибольшие трудности возникли для планшетного сканера Microtek при оцифровке в полях размером $2^\circ \times 2^\circ$. Оригинальные методы были разработаны для калибровки всех перечисленных приборов [5,6,4]. В результате использования калибровочных поправок, остаточная ошибка для планшетного сканера Microtek не превышала 2 микрон, для DAMIAN – 0.3 микрона, для MDD- 0.6 микрона.

Определение измеренных координат (X,Y) оцифрованных объектов

При использовании планшетного сканера каждая пластинка сканировалась 4 раза с поворотом на 90 градусов. При использовании Дамиана пластинка сканировалась один раз. Процедура получения измеренных координат (X,Y) оцифрованных объектов включала:

- выделение экспозиций, относящихся к одному объекту, вычисление средних значений координат звезд по всем экспозициям,
- упорядочивание информации по объектам для всех четырех файлов,
- отбраковку звезд, измеренных с большими ошибками,
- введение в измеренные координаты (X,Y) полученных калибровочных поправок,
- усреднение координат звезд, полученных при 4-х кратном сканировании пластинки (только для планшетного сканера).

Реализация этих задач осуществлялась с помощью разработанного авторами пакета программ SCANSOFT [5].

Астрометрическая редукция

Астрометрическая редукция оцифрованных пластинок проводилась методом 6 постоянных с последующим учетом остаточных систематических ошибок (кома, уравнения блеска и цвета). Каталог UCAC3 был использован как опорный. Учитывая проблемы с точностью собственных движений звезд этого каталога в северном полушарии [7-8], для редукции не использовались звезды UCAC3, если они удовлетворяли следующим условиям:

- количество каталогов, использованных для вывода собственных движений, было меньше 3,
- полное собственное движение звезды было больше 150 mas/год,
- звездная величина - больше 14.5 mag.

Основной отсев опорных звезд был сделан по первому условию. Звезды, оставшиеся для редукиции, имели более высокую точность и наиболее надежные собственные движения. Для выявления систематических ошибок анализировались остаточные разности вида (О-С) опорных звезд. Разности (О-С) включают в себя различные ошибки:

- недоисключенные ошибки измерительного прибора,
- систематические и случайные ошибки опорного каталога,
- ошибки, связанные с телескопом, условиями наблюдений и состоянием эмульсии.

Анализ векторных полей остаточных разностей вида (О-С) опорных звезд показал, что систематические эффекты в плоскости измеренных координат различны как по величине, так и по структуре, для разных диапазонов звездных величин. Полученный набор векторных полей был использован для определения систематических поправок к координатам опорных звезд.

Качество фотографической пластинки

Можно продолжать усовершенствовать имеющиеся приборы для оцифровки пластинок, можно со временем иметь более точный опорный каталог (например, GAIA-каталог), единственное, что не в наших силах – изменить качество имеющихся фотографических пластинок, которое со временем может только ухудшиться. Различные факторы влияют на качество изображений на фотографической пластинке:

- состояние эмульсии и размер зерна эмульсии,
- ошибки объектива телескопа,
- атмосферные условия в период наблюдений.

Именно качество изображения объектов на фотопластинке может оказать существенное влияние на точность измеренных координат и, в конечном итоге, на точность астрометрической редукиции. Мы не проводили собственных исследований, связанных с влиянием деформации эмульсии на точность оцифрованных изображений. По имеющимся исследованиям [9-10] точность цифровых изображений не может быть лучше 0,1 - 0,4 микрона в связи с качеством эмульсии и размером зерна эмульсии.

Из опыта оцифровки пулковских пластинок, можно сказать, что примерно от 15 до 20% пластинок оцифровывать не имеет смысла из-за их плохого качества. Еще от 5 до 10% попадают в дефектные после редукиции по различным причинам:

- большие погрешности измерений,
- ошибки в метаданных,
- потеря объекта (ошибочная отбраковка реального объекта при исключении незвездных объектов) и т.д.

Новая астрометрическая редукиция фотографических пластинок, оцифрованных на сканере DAMIAN в Бельгийской Королевской обсерватории

В настоящее время астрометрическая редукиция в системе каталога UCAC3 выполнена для всех пластинок, оцифрованных на сканере DAMIAN. Среди них – 167 пластинок с избранными астероидами (NN 1,2,3,4,6,7,11,18,39,40,532, период наблюдения 1954-1983) и 62 пластинки с Плутоном (период наблюдений 1931-1960). Средняя точность астрометрической редукиции по RA и DECL лежит в пределах 85-105 mas. Ошибка одного наблюдения астероида находится в пределах 60-150 mas.

Для сравнения, точность одного наблюдения тех же самых астероидов в период 1994-1997 гг (измерения пластинок на АСКОРЕКОРДЕ, в качестве опорного был использован каталог PRM) составляла 180-200 mas. Полученная более высокая точность одного наблюдения обусловлена совокупностью нескольких факторов - более точным

измерительным прибором, точностью опорного каталога и более тщательным учетом остаточных систематических ошибок.

Наблюдения Плутона проводились в Пулкове с 1930 по 1994 год. Общее количество полученных пластинок - 275. 62 из них (период наблюдений 1931-1960) были оцифрованы на сканере DAMIAN. Ошибка одного наблюдения Плутона составила: $\varepsilon R\text{Acos}\delta=153 \text{ mas}$; $\varepsilon \text{DECL}=107 \text{ mas}$.

Для сравнения, точность одного наблюдения Плутона по пластинкам, измеренным на приборе Репсолда, и с использованием Йельского каталога в системе FK3 в качестве опорного составляла: $\varepsilon R\text{Acos}\delta = 260 \text{ mas}$, $\varepsilon \text{DECL} = 200 \text{ mas}$ [11].

Новые положения Плутона сравнивались с планетными эфемеридами INPOP10, INPOP8, INPOP6, EPM2008, DE421, DE405 для 2-х периодов наблюдений (таб.1). Для вычисления эфемерид использовалась эфемеридная служба IMCCE (<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/generateur/.htm>).

Таблица 1. Сравнение положений Плутона с планетными эфемеридами INPOP10, INPOP8, INPOP6, EPM2008, DE421, DE405.

Eph	Obs. 1931-1941 (25 plates)				Obs. 1949-1960 (37 plates)			
	(O-C) α	(O-C) δ	$\sigma\alpha$	$\sigma\delta$	(O-C) α	(O-C) δ	$\sigma\alpha$	$\sigma\delta$
INPOP10	-0".7100	0".0313	0".8168	0".1624	0".3331	0".0283	0".4341	0".1755
INPOP8	1".6502	0".1276	1".6843	0".2166	0".9083	-0".2246	0".9336	0".2863
INPOP6	-0".9910	-0".1930	1".0423	0".2480	-0".8112	-0".1401	0".8498	0".2074
EPM2008	-0".2453	-0".0717	0".4058	0".1712	-0".1448	-0".1463	0".2889	0".2191
DE421	0".0386	-0".0397	0".3250	0".1611	0".0948	-0".1603	0".2675	0".2315
DE405	-0".1769	-0".0172	0".3686	0".1574	-0".3758	-0".0751	0".4517	0".1747

Несмотря на небольшое число наблюдений, обращает на себя внимание, что все эфемериды INPOP лучше сходятся с наблюдениями во второй период, тогда как эфемериды DE – в первый. У эфемериды EPM2008 согласие с наблюдениями более ровное для двух периодов. Следует заметить, что при ее построении были использованы пулковские наблюдения Плутона (измерения на Аскорекарде, опорный каталог FK5) [12].

Заключение

- Оцифровка пулковских пластинок, их измерения и новая астрометрическая редукция показали, что сканер DAMIAN Бельгийской Королевской обсерватории может быть использован для высокоточных астрометрических работ.
- Поскольку на сегодняшний день отсутствует точная теория движения Плутона, крайне желательна оцифровка и новая редукция всех пластинок с Плутоном, имеющих в различных обсерваториях.
- Увеличение точности одного наблюдения при новой редукции обусловлено совокупностью нескольких факторов - более точным измерительным прибором, точностью опорного каталога и более тщательным учетом остаточных систематических ошибок.
- Различные систематические ошибки наблюдений и их изменения должны определяться из всего ряда наблюдений исследуемого объекта на каждом конкретном телескопе. Только в таком случае можно максимально исключить локальные ошибки

и получить однородный материал. Последнее является существенным при уточнении динамических параметров спутников планет и астероидов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН N 21 и гранта РФФИ N 12-02-00675.

Литература

1. *Е.В. Хруцкая, С.И. Калинин, Н.Г. Канаева.* База данных фотографических пластинок Пулковской обсерватории. // Изв. ГАО в Пулкове. 2009, N 219. вып.1. с. 305-309.
2. *E.V. Khrutskaya, M.Ju. Khovritshev, S.I. Kalinin, et.al.* Astrometry of asteroids with Normal Astrometry of Pulkovo observatory: from digitized plates to modern CCD-observations. // Proc. of Workshop IAU “Gaia-FUN-SSO follow-up network for Solar System Objects”, 2011. p. 131-135.
3. *E. Khrutskaya, J-P. De Cuiper, S. Kalinin, A. Berezchnoj, J. de Decer.* The Results of New Reduction of Pulkovo Photographic Plates with Selected Asteroids and Pluto Using the Damian Digitizer. // “Astronomical Research: from Near-Earth Space to the Galaxy”. International conf. Abstract book. 2011. p. 30-31.
4. *Grosheva E.A., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V.* Mobile Device to Digitize the photographic plates: first results. Proc of Intern. Workshop NAROO-GAIA “A new reduction of old observations in the Gaia era”.2012. (in press).
5. *Е.В. Хруцкая, С.И. Калинин, и др.* Использование планшетных сканеров для оцифровки фотографических пластинок: метод калибровки, измерение координат, оценки точности. // Изв. Кабар.-Балк. Научного Центра РАН. 2012. N5. С 85-101.
6. *E. Khrutskaya, A. Berezchnoy, S. Kalinin.* Old photographic plates in the Gaia era: archive plates Pulkovo observatory, digitization, results of astrometric reduction, error analysis. // Proc. of Workshop IAU “NAROO-GAIA. A new reduction of old observations in the Gaia era”, 2012 (in press).
7. *S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach.* The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey 2MASS). //Astron. J. 2010. 139, 2440.
8. *E.V. Khrutskaya, M.Ju. Khovritchev, A.A. Berezchnoy.* // Astronomy Letters. 2011. Vol. 37. N°. 6. p. 420–430.
9. *N.C. Hambly. et.al.* // MNRAS. 1998. V.298.P.897-904.
10. *J.F. Lee, W. van Altena.* // AJ. 1983. V.88. N11. p.1683-1689.
11. *В.В.Лавдовский.* Точные положения Плутона за 1930-1965 гг. по фотографическим наблюдениям в Пулкове. // Изв. ГАО. 1968. N 183.С.118-127.
12. *В.П. Рыльков.* Плутон: положения 1930-1984 гг., новые элементы орбиты и анализ разностей (О-С). // Изв. ГАО.1996. N 210. с. 52-67.

PULKOVO PHOTOGRAPHIC PLATES ARCHIVE, ITS DIGITIZATION, RESULTS OF ASTROMETRIC REDUCTION, ERROR ANALYSIS

Khrutskaya E.V, Berezchnoy A.A, Kalinin S.I.

Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo. Saint-Petersburg, Russia.

The glass archive of Pulkovo Observatory contains over 51,000 photographic plates received in the period from 1898 to 2007. The actual problems of modern astronomy for which the digitization and the new reduction of the old photographic plates can be useful are considered. The errors associated with the different digitizing devices, with the quality of the photographic plate and the astrometric reductions are analyzed. The results of the new reduction 167 plates with asteroids and 62 plates with Pluto which were digitized with using high-precision scanner in Royal Observatory of Belgium are given.

Секция 7

ИСТОРИЯ АСТРОНОМИИ

МНОГОЛЕТНЕЕ ПЛОДОТВОРНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО АСТРОНОМИЧЕСКИХ ДИНАСТИЙ СТРУВЕ И КНОРРЕ

Абалакин В.К.¹, Пинигин Г.И.², Эраль С.Ф.³

¹*Главная астрономическая (Пулковская) обсерватория РАН, Россия*

²*НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина*

³*Каноз, Франция*

Рассмотрен феномен появления двух династий астрономов – Струве (В. Струве, О. Струве, Г. Струве) и Кнорре (Э. Кнорре, К. Кнорре, В. Кнорре) в условиях развития науки и техники в XIX вв. Продемонстрировано плодотворное сотрудничество обеих династий на основе личных контактов их представителей и руководимых ими астрономов Пулковской и Николаевской обсерваторий на протяжении почти 100 лет.

Появление астрономических династий Струве и Кнорре в начале XIX века в астрономической обсерватории Дерптского университета (г. Дерпт, ныне: Тарту) совпало с развитием науки и техники в это время. В астрономии резко возрос интерес к таким важным для того времени задачам, как создание точной небесной системы координат, определение и уточнение фундаментальных астрономических постоянных, изучение закономерностей звездной вселенной и Солнечной системы, изучение поля силы тяжести и формы Земли, развитие и внедрение астрономических методов в морской навигации. В 1821 г. в Николаеве была основана Морская астрономическая обсерватория для обеспечения плавания в Черном и Азовском морях; в круг её задач входило создание мореходных карт, что обеспечивало стратегическое освоение Причерноморья - южной окраины России. Николаевская морская обсерватория при непосредственном участии академика В. Я. Струве была оснащена необходимыми астрономическими и геодезическими инструментами, включая астрономические часы и хронометры, на базе которых была организована служба точного времени. В центре таких работ оказалась и Дерптская астрономическая обсерватория, полностью обновленная к тому времени стараниями её директора В. Струве. Активными участниками астрономических и астрономо-геодезических исследований стали В. Струве и К. Кнорре, жившие и работавшие в Дерпте, Николаеве, объединённые учебой в одном университете (Дерптском), совместными наблюдениями в университетской обсерватории, научной деятельностью и сотрудничеством руководимых ими обсерваторий в Пулкове и Николаеве и личной дружбой.

Начальный период (Дерпт – Николаев, 1811–1821 гг.)

Открытие астрономической обсерватории Дерптского университета состоялось в январе 1811 г. [1]. Первым её директором был избран Й. Гут (Johann Sigismund Nuth, 1763-1818), однако, главным образом, он занимался преподаванием. Положение изменилось в 1813 г., когда на должность астронома-наблюдателя обсерватории был назначен 20-летний экстраординарный профессор астрономии Василий Яковлевич Струве (Friedrich Georg Wilhelm Struve, 1793–1864), окончивший Дерптский университет в 1811 г. 15-летний В. Струве, уроженец городка Альтона, окончил в 1808 г. гимназию и уехал в Дерпт, где, поступив на филологический факультет университета, одновременно записался слушателем лекций по физике и математике, поскольку имел большой интерес к точным наукам. Уже через два с половиной года, в 1811 г., В. Струве блестяще закончил Дерптский университет. В 1811–1813 гг. В. Струве самостоятельно занимался математикой, физикой, астрономией, работал над диссертацией, совершенствовался в

астрономических наблюдениях и геодезических измерениях – в окрестностях Дерпта В. Струве выполнял триангуляционные работы, измерив базис деревянными шестами. При помощи имеющихся в обсерватории инструментов он определил её географические координаты и подготовил диссертацию “О географическом положении Дерптской обсерватории”, после защиты которой в 1813 г. ему были присуждены учёные степени магистра и доктора философии.



Рис. 1. Э. Кнорре.



Рис. 2. Молодой В. Струве.



Рис. 3. Молодой К. Кнорре.

В 1814–1815 гг. В. Струве посетил Германию для совершенствования в астрономии и телескопостроении. В Гамбурге он ознакомился с мастерскими и обсерваторией И. Репсольда, посетил Ольберса в Бремене, Гаусса в Гёттингене и Бесселя в Кёнигсберге, а также Институт оптики и механики в Мюнхене, основанный в 1804 г. Г. Райхенбахом. Здесь он познакомился с оптиком Фраунгофером, возглавлявшим оптические мастерские института. В.Я. Струве заказал Фраунгоферу уникальный объектив диаметром 244 мм (9.5 дюйма) с фокусным расстоянием 437 см (14.3 фута), и к нему параллактический штатив, а также микрометр к 5-футовому ахромату Траутона. Все эти инструменты вместе с заказанным ранее меридианным кругом Райхенбаха, составили инструментальную базу Дерптской обсерватории. В 1816–1818 гг. В. Струве начал топографическую съёмку Лифляндии (ныне: Эстония) – полевые измерения и обработку полученных материалов. В конце 1818 г. он начал на телескопе Траутона наблюдения двойных и кратных звезд, и в 1820 г. составил каталог 795 двойных звезд. Кроме того, он наблюдал кометы, а также выполнил первые измерения параллакса звезд и определил постоянную абберации. В 1820 г. В. Струве был утвержден профессором астрономии и директором Дерптской обсерватории. В 1821 г. В. Струве приступил к проведению градусных измерений в Прибалтийских губерниях, что переросло позднее в грандиозный международный научный проект XIX века – измерение дуги меридиана от Северного Ледовитого океана до устья Дуная [2, 3].

В это же время в Дерптской обсерватории появилась еще одна династия астрономов – Кнорре. Её родоначальник, Эрнст Кнорре (Ernst Christoph Friedrich Knorre, 1759–1810), изучал богословие в университете города Галле и работал частным учителем. В 1789 г. он переехал в Дерпт и работал преподавателем, а позднее директором женской гимназии. После открытия в 1802 г. университета в Дерпте (первоначально университет был основан в 1632 г.) Э. Кнорре стал профессором математики и астрономом-наблюдателем временной обсерватории Дерптского университета. Много труда и времени потратил Э. Кнорре на подготовку строительства постоянной обсерватории, до открытия которой 2 января 1811 г. он не дожидаясь и умер в декабре 1810 г. в возрасте 51 года. Среди главных заслуг Э. Кнорре следует отметить его первые астрономические работы в Дерптском университете за 15 лет до создания постоянной астрономической

обсерватории. Эрнст Кнорре выполнил первые определения географических координат Дерпта и других пунктов Лифляндии. Он был первым учителем астрономии будущего астронома Г. Шумахера – основателя *Astronomische Nachrichten*.

Сын Эрнста Кнорре, Карл Христофорович Кнорре (Karl Friedrich Knorre, 1801–1883), наиболее яркий представитель этой династии астрономов, родился 9 апреля 1801 г. в университетском городе Дерпте [4,5]. Карлу не было и десяти лет, когда отец умер. Семье помогал родственник, Карл Зенфф (Karl August Senff), профессор изобразительных искусств. По его рекомендации Карл Кнорре начал изучать богословие, но увлечение астрономией от отца передалось ему настолько, что он посвятил ей свою жизнь. В 1817 г., будучи студентом первого курса, К. Кнорре участвовал в летних полевых работах по топографической съемке Лифляндии помощником В. Я. Струве, а со 2-го курса участвовал в астрономических наблюдениях под его руководством, составлял таблицы положений Полярной звезды, принимал участие в наблюдениях комет и покрытий звезд Луною. В 1820 г. В. Струве дал отличный отзыв о студенте 4-го курса Дерптского университета К. Кнорре и рекомендовал его на должность директора Морской обсерватории в Николаеве. Он взял на себя ответственность за 19-летнего К. Кнорре, не получившего еще диплома о законченном высшем образовании.

Деятельность и сотрудничество В. Струве и К. Кнорре в 1821–1839 гг.

В конце 1825 г. в перестроенной башне здания Дерптской обсерватории был установлен крупнейший на то время в мире телескоп-рефрактор, созданный Й. Фраунгофером и Й. Утцшнайдером по заказу В.Я. Струве. На уникальном телескопе В. Я. Струве поставил важную задачу – составить каталог положений всех двойных и кратных звезд ярче 9-й величины в северном полушарии. Наблюдения около 120 000 звезд и научные результаты принесли Струве широкую известность. В 1826 г. В. Струве был избран почетным членом Петербургской Академии наук, а в 1832 г. он стал действительным членом этой академии. В 1834 г. после аудиенции у императора Николая I В. Я. Струве был назначен директором новой Пулковской обсерватории. В июне 1834 г. В. Струве отправился в Германию для заказа инструментов. В Механическом институте в Мюнхене у механика Т. Эртеля был заказан Большой пассажный инструмент (БПИ, $D = 150$ мм, $F = 2590$ мм) для определения абсолютных прямых восхождений звезд, и Большой вертикальный круг (БВК, $D = 150$ мм, $F = 1960$ мм) для определения абсолютных склонений звезд. Меридианный круг (МКР, $D = 150$ мм, $F = 2150$ мм) для дифференциальных измерений и Пассажный инструмент в первом вертикале (ПИР, $D = 155$ мм, $F = 2350$ мм) для определения астрономических постоянных абберации и нутации, а также географической широты были заказаны фирме «А. Репсольд и сыновья». Особенно необходимо отметить заказ в Мюнхенском оптическом институте у Мерца и Малера, преемников знаменитого Фраунгофера, большого рефрактора с гигантским для того времени ахроматическим объективом ($D = 380$ мм, $F = 6900$ мм), предназначавшегося для определения положений звезд и наблюдений двойных звезд.

Открытие Главной астрономической обсерватории в Пулкове состоялось 17 августа 1839 г., на котором присутствовали все члены Академии наук, послы иностранных государств, астрономы из всех российских университетов, в числе которых был и К. Кнорре. В. Я. Струве ознакомил его с устройством главных инструментов Пулковской обсерватории. Домой Кнорре возвратился через Кронштадт, где находилась небольшая астрономическая морская обсерватория. К. Кнорре посетил адмирала А.С. Грейга в Ораниенбауме (ныне: г. Ломоносов).

В переписке (период 1820–1857 гг., 129 писем [6]) и при встречах В. Я. Струве и К. Кнорре обсуждали проблемы, связанные с оснащением Николаевской обсерватории инструментами, изучением методов исследования телескопов для выполнения более

точных наблюдений; снабжением Николаевской обсерватории книгами, каталогами, таблицами, выпусками научного журнала AN и др.; обменом результатами наблюдений двойных звезд, комет, материалами исследования аберрации, параллакса и др.; участия в известном проекте 1818–1852 гг. “Геодезическая дуга Струве” в Крыму, Измаиле, Кишинёве и др. местах. В письме от 12 января 1839 г. К. Кнорре сообщает о завершении им подготовки диссертации на степень доктора философии «De minimorum quadrator. methodo», посвящённой обсуждению и улучшению метода Гаусса, изложенного в «Theoria combinationis observationum». Однако найти подтверждения о защите диссертации в архивах пока не удалось.



Рис. 4. Главное здание Пулковской обсерватории (гравюра, первая половина 19-го века).



Рис. 5. Главное здание Николаевской обсерватории (фото, 1913 г.).

В первые годы пребывания в Николаеве К. Кнорре приступил к наблюдениям на 2-футового меридианном круге Либгерра астрономической обсерватории адмирала А.С. Грейга. Он уточнил географическую широту обсерватории; вычислил эфемериды звезд α и δ Малой Медведицы (таблицы положений на каждый день) на 1823–1830 годы, которые широко использовались в то время при производстве полевых астрономо-геодезических работ; выполнил наблюдения кометы в 1823 г., результаты которых отослал в AN. Туда же были отосланы и многочисленные наблюдения покрытий звезд Луною, произведенные в 1821–1827 гг. К. Кнорре, К. Далем и адмиралом А. Грейгом.

К. Кнорре также преподавал астрономию в Штурманском училище в Николаеве.

Заграничная поездка К. Кнорре в европейские обсерватории для изучения астрономических инструментов и астрономии в целом, фактически, началась в июне 1825 г. и продолжалась до августа 1827 г. В Дерпте В.Я. Струве ознакомил К. Кнорре с меридианном кругом Райхенбаха-Эртеля. Они вместе исследовали ошибки положений штрихов разделенного лимба меридианного круга. В Кёнигсберге Ф. Бессель показал К. Кнорре устройство меридианного круга, а 14-15 июля 1825 г. они наблюдали прохождения звезд. По просьбе Ф. Бесселя К. Кнорре согласился выполнить позднее некоторые вычисления для его известного труда *Tabulae Regiomontanae* («Кёнигсбергские таблицы») и принять участие в составлении Берлинских академических карт звездного неба, подготовив V лист (от $3^{\text{h}}56^{\text{m}}$ до $5^{\text{h}}54^{\text{m}}$ по прямому восхождению и от -15° до $+15^{\circ}$ по склонению). Летом 1827 г. на обратном пути К. Кнорре в Россию Ф. Бессель приехал к нему в Мюнхен, и они вместе посетили механика Т. Эртеля, которому Кнорре еще раньше заказал изготовление меридианного круга для Николаевской обсерватории. В дальнейшем Ф. Бессель и К. Кнорре более 10 лет обменивались между собой письмами. В Берлине у механика Пистора К. Кнорре приобрёл отсчётные микроскопы и компаратор. В Готе его принял известный астроном И.Ф. Энке, директор обсерватории в Зееберге. Они наблюдали комету, впоследствии названную «кометой Энке». В Лон-

доне К. Кнорре посетил Гринвичскую обсерваторию и измерял гнутие меридианного круга. Здесь он познакомился с механиком Э. Траутоном и астрономом Джоном Гершелем. Весной 1826 г. он посетил директора Дублинской обсерватории (Ирландия) Бринкли, который показал ему меридианный круг работы Рамсдена. В Париже К. Кнорре провел 10 месяцев (до мая 1827 г.), посетил часового мастера Бреге и оптика Кошуа, слушал лекции физика и астронома Жоржа Био, математика Жака Бинэ и директора Парижской обсерватории Франсуа Араго, с которым потом поддерживал переписку.

К. Кнорре вернулся в Николаев в августе 1827 г. Отчет К. Кнорре о результатах двухлетней стажировки в Европе получил высокую оценку адмирала А. Грейга и был отпечатан в Санкт-Петербургской Академии наук. В связи с этим Николаевской обсерватории был выделен ежегодный фонд для заказа книг и инструментов за рубежом. После возвращения К. Кнорре продолжил чтение лекций в Штурманском училище. К. Кнорре занялся также завершением строительства обсерватории, которое официально было закончено в 1829 г. Однако уже в 1827 г. К. Кнорре переехал в подготовленные для него служебные помещения. Главное здание обсерватории было построено в соответствии с проектом архитектора Ф. Вунша, отражающим функциональное назначение здания для астрономо-геодезических наблюдений, научно-исследовательских работ и преподавательской деятельности. В обсерватории были установлены астрономические инструменты: меридианный круг Райхенбаха-Эртеля, пассажный инструмент Утцшнайдера, а также рефрактор Фраунгофера с объективом Мерца ($D = 100$ мм, $F = 1500$ мм). С помощью ртутного горизонта собственной конструкции К. Кнорре получал наблюдения, свободные от «гнутия». Обсерватория имела десятки морских, геодезических, метеорологических и физических инструменты и приборов, а также чертежные, столярные, механические инструменты. В целом, обсерватория могла оснастить инструментарием не одну действующую астрономо-гидрографическую экспедицию. Что же касается научных астрономических наблюдений, то возможности их проведения были скромнее. Тем не менее, К. Кнорре считал, что даже с этим оборудованием обсерватория имела большие возможности. В конце 1827 г. К. Кнорре завершил вычисления для «Кёнигсбергских таблиц» Бесселя, опубликованных в 1830 г. В предисловии к своему труду Ф. Бессель высоко оценил его вклад К. Кнорре. К этому же времени К. Кнорре завершил составление V листа Берлинских академических карт звёздного неба, опубликованного в 1835 г. Полнота и высокая точность этого листа карты, составленного К. Кнорре по наблюдениям положений звёзд на рефракторе и на меридианном круге Рейхенбаха-Эртеля, позволили открыть 8 декабря 1845 г. малую планету 5 Астрею, а 18 октября 1847 г. – еще одну малую планету 8 Флора. В 1859 г. К. Кнорре переобработал наблюдения, положенные в основу пятого листа Берлинских карт, при выводе нового каталога *Bonner Durchmusterung* (BD, «Боннское обозрение»), опубликованного в 1863 г.

Деятельность и сотрудничество В.Я. Струве и К.Х. Кнорре после 1840 г.

В начале своей деятельности в Пулкове В.Я. Струве был автором и участником решения многих задач Пулковской обсерватории: открытие и исследование двойных звезд, определение расстояний до звезд, определение астрономических постоянных. А пулковские абсолютные каталоги положений звезд, составленные и опубликованные под руководством В.Я. Струве и его последователей, принесли Пулковской обсерватории мировую славу, что нашло отражение в её неофициальном титуле "астрономическая столица мира". Многолетняя программа наблюдений, по замыслу В.Я. Струве, предусматривала повторение всех наблюдений каждые два десятилетия. Был создан

ряд знаменитых Пулковских абсолютных каталогов на стандартные Бесселевы эпохи 1845.0, 1865.0, 1885.0 и 1905.0, продолженный позже в XX столетии.



Рис. 6. К.Х. Кнорре в форме вице-адмирала.



Рис. 7. Парадный портрет В.Я. Струве.

В 1816–1852 гг. Пулковская обсерватория приняла активное участие в международном (Русско-скандинавском) градусном измерении дуги меридиана длиной 25 градусов 20 минут дуги (свыше 2800 км) от устья Дуная (Измаил) до мыса Фугленес близ города Хаммерфест в Норвегии. В его основу была положена идея В.Я. Струве; он же обеспечил организацию и выполнение этого знаменитого проекта, заслуженно носящего имя “Геодезическая дуга Струве”. В дальнейшем В.Я. Струве организовал ряд геодезических, хронометрических, географических экспедиций в различные районы России и других стран. В 1856 г. в Пулкове были начаты занятия с военными топографами, которые вначале проводил сам В.Я. Струве.

В.Я. Струве был удостоен Золотой медали Королевского астрономического общества Англии и избран почетным членом 12 иностранных Академий. Он автор более ста научных трудов, статей, отчетов и отзывов по астрономии.

В Николаеве при участии и под руководством К.Х. Кнорре за 30 лет работы, начиная с 1822 г. была выполнена картография берегов Черного, Азовского и Мраморного морей. При этом только на побережье Черного моря в 1836–1882 гг. было определено более 350 астропунктов. Много усилий требовало обеспечение Флота точным временем, содержание в рабочем состоянии и поверка всех навигационных, геодезических и других инструментов; обучение штурманов и преподавание практической астрономии в Штурманском училище. К.Х. Кнорре продолжал также свои астрономические наблюдения (затмения Солнца, покрытия Юпитера и звезд Луной, прохождения Меркурия по диску Солнца, наблюдения положений комет, в том числе кометы Галлея и Большой кометы 1843 г., вычисления орбит комет). Свои статьи К.Х. Кнорре публиковал, в основном, в журнале АН. 22 июля 1864 г. состоялась командировка К. Кнорре в Петербург на празднование 25-летнего юбилея Пулковской обсерватории. Это была его последняя встреча с В.Я. Струве, который скончался 23 ноября того же года.

Сотрудничество астрономических династий Струве – Кнорре в 1865-1911 гг.

Вторым в династии Струве был сын В.Я. Струве – Отто Васильевич (1819–1905). В 1836–1839 гг. он обучался в Дерптском университете, а после его окончания переехал в Пулково и был назначен помощником директора Пулковской обсерватории. В 1843 г. он получил учёную степень доктора философии (PhD) в Санкт-Петербургском университете. Когда В.Я. Струве тяжело заболел в 1858 г., обязанности директора Обсерватории стал исполнять О. Струве. После ухода В.Я. Струве в отставку в 1862 г. О. Струве был назначен директором Пулковской обсерватории, пробыв на этом посту 27 лет до

1889 г. При О. Струве было продолжено составление Пулковских абсолютных каталогов на эпохи 1865.0, 1885.0. Продолжая работы отца, О. Струве измерил координаты нескольких тысяч двойных звёзд, обозначаемых известными всему мировому астрономическому сообществу сокращениями Σ и $O\Sigma$, принятыми в опубликованных В. Я. и О. В. Струве каталогах, определял звездные параллаксы. В 1885 г. в Пулковской обсерватории был установлен Большой Пулковский рефрактор с заказанным им в фирме Alvan Clark & Sons у Кларков в США объективом в 30 дюймов.



Рис. 8. В.К. Кнорре.



Рис. 9. О.В. Струве.



Рис. 10. Г.О. Струве.

После назначения О. Струве директором Пулковской обсерватории К. Х. Кнорре продолжал вести с ним научную и деловую переписку.

Виктор Карлович Кнорре (1840–1919 гг.), третий астроном в династии Кнорре, после окончания школы в 1859 г. почти два года работал ассистентом у отца в Николаевской обсерватории. Он активно участвовал в наблюдениях покрытий звезд и Юпитера Луной в 1860 г., прохождения Меркурия по диску Солнца в 1861 г. В 1862 г. В. Кнорре поступил в Берлинский университет, где изучал астрономию у известного астронома В. Фёрстера (Wilhelm Förster). После получения степени доктора философии он с 1867 г. работал астрономом-вычислителем в Пулковской обсерватории. Однако из-за неблагоприятного климата ему пришлось через два года вернуться в Николаев. В 1873 г. он был приглашен В. Фёрстером, директором Берлинской Королевской обсерватории, в качестве астронома-наблюдателя на рефрактор Фраунгофера. Активный период астрономической деятельности В. Кнорре пришёлся на время работы в Берлинской астрономической обсерватории в 1873–1906 гг. В своём научном наследии В. К. Кнорре оставил около 120 публикаций, в числе которых наблюдения и отчеты, разработки в астрономическом приборостроении, открытия 4 малых планет и исследования в области небесной механики.

При Отто Струве Пулковская обсерватория продолжала оставаться подлинной школой практической астрономии и геодезии. Большое внимание он уделял событиям в Черноморском регионе. Иван Егорович Кортацци (1837–1903), второй директор Николаевской обсерватории, прошёл практику астрономо-геодезических работ в Пулковской обсерватории и осуществлял руководство триангуляционными работами в экспедициях вдоль побережья Черного моря. О. Струве испытывал интерес к расширению «Дуги Струве» на юг, от Дуная до Греческого архипелага, включая остров Крит и далее, до мыса Доброй Надежды (юг Африки). Часть переписки О. Струве с И. Кортацци (20 писем) посвящена этой теме. Однако этот проект не удалось завершить из-за политических трений между Россией и Турцией. По инициативе О. Струве в Николаевской обсерватории был создан каталог положений 6000 звезд «Николаевской зоны» по меж-

дународной программе АГК, имевшей целью составление серии каталогов Астрономического общества (Astronomische Gesellschaft-Katalog).

Герман Оттович Струве (Karl Hermann Otto Struve, 1854-1920)

Г. Струве окончил Дерптский университет в 1877 г. До 1895 г. он работал в Пулковской обсерватории, с 1895 по 1904 гг. был директором Кёнигсбергской обсерватории и профессором университета. Научные интересы Г. Струве лежали в области небесной механики; он выполнил значительное количество позиционных наблюдений двойных звёзд на знаменитом 30-дюймовом Пулковском рефракторе. Г. Струве, профессор, в 1903 г. был удостоен золотой медали английского Королевского астрономического общества. В *Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft* (журнале Астрономического общества) за 1905 г. было опубликовано, что 1 апреля 1904 г. профессор В. Фёрстер уходит в отставку с поста директора Берлинской обсерватории и эту должность временно замещает профессор В.К. Кнорре до 1 октября, когда директором станет назначенный Г.О. Струве. Несомненно, между Г.О. Струве и В.К. Кнорре были контакты, когда В.К. Кнорре в течение полугода исполнял обязанности директора Берлинской обсерватории до вступления на должность директора Г.О. Струве, которые можно считать последними между двумя замечательными астрономическими династиями Струве и Кнорре.

В заключение, следует отметить ценность личных отношений представителей династий, вылетевших из “Дерптского гнезда” (особенно, В.Я. Струве и К.Х. Кнорре), в плане активного и длительного сотрудничества и участия в развитии и создании всемирно известных астрономических институтов – Дерптской, Николаевской и Пулковской обсерваторий - на протяжении почти 100 лет.

Литература

1. *Г.А. Желнин.* Астрономическая обсерватория Тартуского (Дерптского, Юрьевского) университета 1805-1948гг. - Публикации Тартуской астрофизической обсерватории им. В. Струве. 1969, т. 37, с. 5-169.
2. *В.К. Абалакин.* Главной (Пулковской) астрономической обсерватории АН СССР - полтора века: к истории основания. 150 лет Пулковской обсерватории. - Л.: Наука, 1989, 311 с.
3. *В.Я. Струве.* Сборник. Под ред. А.А. Михайлова. - Наука, 1964, 252 с.
4. *S.F. Héral, G.I. Pinigin.* The Dynasty of Knorre astronomers. - Irina Gudym Publishing House, Nikolaev, 2010. 176 p.
5. *Г.И. Пинигин.* Из истории династии астрономов Кнорре. - Историко-астрономические исследования, Москва, 2010, т. 35, с. 102-137.
6. Электронные копии 129 писем из переписки В.Я. Струве и К.Х. Кнорре в 1820-1857 гг. - Архив НАО, 2008-2011 гг.

THE LONG- TERM COOPERATION OF ASTRONOMERS FROM THE STRUVE AND KNORRE DYNASTIES

V. Abalakin (CAO RAS, Russia), S. Héral (Canohès, France), G. Pinigin (NAO, Ukraine)

The present paper deals with the phenomenon of appearance of the Struve (Wilhelm Struve, Otto Struve, Hermann Struve) and the Knorre (Ernst Knorre, Karl Knorre, Victor Knorre) dynasties in Astronomy in the XIXth cy. Some details of the fruitful cooperation of both astronomical dynasties as based on the personal contacts of their representatives and the long-term collaboration of Pulkovo and Nikolaev observatories during nearly 100 years have been presented.

ПЛАНЕТНЫЕ ЭФЕМЕРИДЫ ИТА И ИПА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АСТРОНОМИЧЕСКОМ ЕЖЕГОДНИКЕ И ЕГО ДОПОЛНЕНИЯХ

Глебова Н.И., Питьева Е.В., Свешников М.Л.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

До начала космической эры в «Астрономическом Ежегоднике СССР» (АЕ) использовались классические аналитические теории движения планет, основанные на оптических наблюдениях. С 1959 г. для обеспечения исследований в дальнем космосе на базе этих теорий выпускались «Дополнения к АЕ» (ДАЕ), содержащие координаты и скорости планет повышенной точности. В 1970-е годы в ИТА, ИПМ, ЦУП и ЦНИИМаш началась разработка теорий, сопоставимых по точности радарным измерениям. Согласование исследований привело в 1980 г. к созданию единой релятивистской теории движения планет, на основе которой были выпущены ДАЕ-21-а. В 1982 г. группа сотрудников этих организаций была удостоена Государственной премии СССР. С 1986 г. в АЕ использовалась эфемерида DE200/LE200 (JPL), принятая МАС в качестве стандарта. В настоящее время развитая группой Г.А. Красинского (ИПА) численная эфемерида EPM адекватна современным радиотехническим наблюдениям и сопоставима по точности эфемеридам серии DE. Из соображений технологической независимости ИПА с 2006 г. выпускает АЕ на основе EPM, которая служит также основой для проведения разнообразных исследований. Предполагается использование EPM в программах ГЛОНАСС и ЛУНА-РЕСУРС.

К середине XX в. эфемериды больших планет Солнечной системы основывались на аналитических теориях С. Ньюкома и У. -Ж. Леверрье с поправками элементов орбит по новым наблюдениям [1]. Эфемериды Луны вычислялись по теории Е. Брауна. Теории носили ньютонов характер и неплохо представляли накопленные почти за два столетия меридианные и фотографические наблюдения со средней точностью примерно 0.5". По этим теориям ежегодники, в том числе и АЕ, публиковали геоцентрические экваториальные сферические координаты объектов.

С началом космической эры для планирования исследований в дальнем космосе потребовалось создание специальных эфемерид максимально возможной точности в форме прямоугольных координат и скоростей в фиксированной системе координат. Это было сделано в «Дополнениях к АЕ» (ДАЕ), первый том которых был подготовлен в 1959 г. Д.К. Куликовым, Э.А. Митрофановой и М.А. Фурсенко [2], а в дальнейшем при участии Н.С. Субботиной (Доманской), Н.Г. Кочиной и др. Совместное интегрирование уравнений движения внутренних планет осуществлялось с начальными условиями из аналитических теорий. Начальные значения уточнялись по отклонениям интегрирования от аналитических теорий по методу Эккерта-Брауэра. Координаты Луны вычислялись М.А. Фурсенко по эфемериде Брауна; скорости получались численным дифференцированием координат. Однако в значениях скорости Луны быстро накапливались ошибки, и впоследствии для вычисления координат и скоростей Луны был применен метод, аналогичный большим планетам.

Все же быстрое развитие радиолокационных методов наблюдения планет (с 1961 г.) показало недостаточную точность этих улучшенных эфемерид, которые давали расхождения в геоцентрическом расстоянии планет, достигающие до полутора тысяч км. Д.К. Куликовым и Н.С. Субботиной [3] был проанализирован бюджет ошибок эфемерид. Оказалось, что от 30 до 60% величины общей ошибки связано с неточностью элементов орбит. Но и после внесения поправок в элементы орбит ошибки оставались все еще большими (до 800 км для Марса). Назрела необходимость разработки новой моде-

ли движения и вместе с ней уточнения астрономических постоянных и вывода начальных условий с использованием оптических и, главным образом, радарных наблюдений.

Одной из первых работ в этом направлении была работа группы И. Шапиро (США) [4], в которой впервые использовались уравнения движения в форме ОТО, автоматически учитывающих не только вековые, но и периодические релятивистские члены. Очевидно, что это легче выполнить в численной модели. (И. Шапиро также был предсказан и обнаружен в конце 1960-х годов эффект задержки распространения электромагнитного сигнала в гравитационном поле). Своеобразным итогом работ К. Оестервинтера, Р. Лаубшера и О'Хандли (США) явилась в 1976 г. работа Э.М. Стэндиша, М.С. Кизи и Ньюхола ХХ (JPL) по созданию эфемериды DE96 (Development Ephemerides) [5], ставшей образцом для разработки планетных теорий. Релятивистские уравнения движения были записаны в изотропной системе координат для ППН-параметров $\beta = \gamma = 1$. К обработке были привлечены траекторные измерения космических аппаратов (КА).

Во Франции, следуя традициям У. Леверрье, в Бюро Долгот Ж. Шапрон, П. Бретаньон, Ж.-Л. Симон продолжали разрабатывать теории планет и Луны в аналитической форме. При этом начальные данные определялись не из обработки наблюдений, а путем сравнения с эфемеридами серии DE. Созданные теории легли в основу французского ежегодника. Но при повышении точности радарных и лазерных наблюдений аналитические теории не смогли обеспечить требуемую точность, и пришлось перейти к численным теориям (серия INPOP).

В СССР новые планетные теории разрабатывались в трех учреждениях:

- в Институте прикладной математики АН СССР группой Э. Л. Акима;
- в Институте радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ) совместно с Центром управлением полетами (ЦУП) и ЦНИИМаш группой М. Д. Кислика, в состав которой входил акад. В.А. Котельников;
- в Институте теоретической астрономии АН СССР (ИТА) несколькими группами.

В.А. Извековым [6] впервые в СССР в 1968 г. были определены некоторые элементы орбит Венеры и Земли, радиус Венеры и астрономическая единица по радарным наблюдениям 1959–1964 гг. (СССР, США); эфемериды Венеры и Земли были вычислены Н.С. Доманской.

Н.И. Глебовой [7] на основе аналитической теории Марса Дж. Клеменса (1961) и обработки оптических и радарных наблюдений (1952–1972 гг.) была улучшена точность эфемериды Марса, которая вошла в ДАЕ №21, 23.

В это же время для разработки проектов мягкой посадки КА на поверхность Луны в ДАЕ, начиная с издания на 1970 г., были включены разделы с селенографическими данными: положения плоскостей динамического и среднего экватора Луны и прямоугольные геоцентрические координаты начала систем отсчета (В.К. Абалакин, М.А. Фурсенко, Л.И. Румянцева). Для этой цели использовались разложения параметров физической либрации Ф. Гайно и К. Козела. После установки на Луне светоотражателей экспедициями «Аполлон -11, -14, -15», «Луна-17, -21» началась лазерная локация Луны, в том числе и группой Ю. Л. Кокурина (ФИАН) в Крымской астрофизической обсерватории. Обработка лазерных наблюдений проводилась в ИТА М. А. Фурсенко, Л.И. Румянцевой и В.Н. Бойко с целью уточнения существующих численных и полуаналитических теорий движения Луны и ряда гео- и селенодезических параметров, включая параметры гравитационного поля и свободной либрации Луны.

В ИТА также началась разработка новых теорий движения больших планет. В.А. Брумберг в 1960-х годах впервые развил метод практического построения общей планетной теории в чисто тригонометрической форме, но, несмотря на последовавшие значительные усилия его группы, теория не была доведена до сравнения с наблюдени-

ями. Некоторые аспекты этой теории были применены Г.А. Красинским при построении аналитической теории движения внутренних планет АТ-1 [8]. Однако, хотя и были получены хорошие результаты при сравнении теории с радарными наблюдениями в 1978 г., стало ясно, что уже в ближайшем будущем аналитика не будет способна обеспечить точность, соответствующую радиолокационным наблюдениям планет и траекторным измерениям КА. Поэтому было решено обратиться к численным моделям движения планет. С этого времени началось развитие эфемерид серии ЕРМ (Ephemerides of the major Planets and the Moon).

В этот период вышли две основополагающие монографии [1, 9], сыгравшие немалую роль в создании эфемерид нового поколения. В.А. Брумбергом [9] были всесторонне разобраны вопросы релятивистской небесной механики, уравнений движения и распространения света в широком классе наиболее употребительных квазигалилеевых координат, разработаны релятивистские редукиции оптических и радиотехнических измерений в астрономии. Им был разрешен полностью острейший и запутаннейший вопрос о привилегированности тех или иных релятивистских систем координат. Было показано, если вычисление эфемерид и обработка наблюдений ведутся в одной и той же системе координат, то результаты для наблюдаемых величин ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, τ) не будут зависеть от выбранной системы координат. В 2008 г. за работы в области небесной механики В.А. Брумбергу была присуждена премия им. Д. Брауэра.

В монографии В.К. Абалакина [1] впервые в мировой литературе был дан последовательный анализ теоретических основ алгоритмов редукиций астрометрических оптических наблюдений и вычисления эфемерид в матричной форме. По сути, книга явилась расширенным объяснением к АЕ и остается незаменимым справочником для специалистов по эфемеридной астрономии уже несколько десятилетий.

Начавшийся тесный контакт между группами трех организаций в СССР, обмен данными, коллективное, подчас жесткое обсуждение результатов, привел к хорошему согласию между результатами трёх групп и к созданию единой релятивистской теории движения внутренних планет. Уравнения движения были написаны в рамках ОТО для метрики Шварцшильда в стандартной системе координат для ОТО ($\beta = \gamma = 1$). Параметры теории определялись по радарным наблюдениям Меркурия, Венеры и Марса 1962-1980 гг., оптическим наблюдениям Солнца и планет, выполненным в СССР, США и Англии в 1960–1976 гг., и траекторным измерениям КА «Венера-9, -10» (1975 г.). Предельные ошибки прямоугольных координат планет во вращающейся системе координат составили для Земли не более 5 км, для Венеры до 10 км, для Марса от 25 до 90 км и для Меркурия от 40 до 140 км. Улучшение по сравнению с классическими теориями составило от 10 до 20 (для Земли и Венеры) раз. На основе единой теории было выпущено ДАЕ №21-а (1980) [10]. За создание теории в 1982 г. 12-ти сотрудникам ИТА, ИПМ, ИРЭ, ЦУП (ЦНИИМаш) и Николаевской АО была присуждена Государственная премия СССР, среди них из ИТА В.К. Абалакин, В.А. Брумберг и Г.А. Красинский.

Середина 1980-х годов охарактеризовалась появлением эфемерид нового поколения, которые создавались совместным интегрированием уравнений движения всех больших планет и поступательно-вращательного движения Луны. Для определения динамических и астрометрических постоянных привлекались оптические, радиотехнические наблюдения планет, лазерные наблюдения Луны, траекторные измерения КА. Общее число наблюдений выросло до нескольких сотен тысяч. Уравнения движения и обработка измерений базировались на ОТО для гармонической системы координат, которая используется для всех современных планетных эфемерид. Структура релятивистских уравнений движения имела следующий вид:

$$\ddot{\vec{r}} = A + B + C + D ,$$

где

- A — ньютоновы гравитационные ускорения;
- B — релятивистские члены гармонической системы координат, содержащие параметры β и γ ППН-формализма, позволяющие описывать различные метрические теории тяготения (для ОТО $\beta = \gamma = 1$);
- C — члены, вызываемые сжатием Солнца (вводятся с DE405, EPM98);
- D — члены возмущений от 3-х (DE200) и 5-ти (EPM87) до 300 астероидов (DE403, EPM98) с учетом общего воздействия кольца астероидов (EPM2004).

Количество определяемых параметров составляло сотню и более неизвестных.

Первой теорией такого типа явилась эфемерида DE200/LE200, ставшая по рекомендации МАС международным стандартом с 1985 г. На основе DE200 были выпущены ДАЕ №25, 26 и АЕ-1986.

В 1990 г. в ЦУП было произведено уточнение параметров единой теории 1980-го года по новым радиолокационным наблюдениям Меркурия, Венеры и Марса, и на новых данных опубликованы ДАЕ №27, 28.

В 1995 г. в ИТА Г.И. Ерошкиным была закончена разработка эфемериды АЕ95, математической основой которой служила модель DE200/LE200. Но для описания вращательного движения Луны вместо обычно используемых углов Эйлера, часть которых растет линейно со временем, использовались 4 чисто периодических параметра Родрига-Гамильтона. В рамках модели АЕ95 произведена обработка оптических и радиолокационных наблюдений на интервале 1960–1990 гг. При этом использовался банк данных, имеющийся в ИТА. Эфемерида АЕ95 охватывала период 1960–2010 гг. и явилась опорной для ДАЕ №29, 30 на 1995–2000 гг. [11].

В дальнейшем в связи со свободным доступом к DE200 и практически полным прекращением в России исследований в дальнем космосе выпуск ДАЕ был прекращен.

Между тем, группа Г.А. Красинского, перешедшая в 1988 г. в ИПА, продолжала развитие теорий серии EPM. Были достигнуты столь важные результаты, что стал возможен постоянный контакт между группами исследователей ИПА и JPL. Следует отметить, что развитие эфемерид EPM опиралось на разработанный Г.А. Красинским, Ф.А. Новиковым, В.И. Скрипниченко и М.В. Васильевым многофункциональный программный комплекс ERA (**E**phemeris **R**esearch in **A**stronomy) [12].

В 1998 г. ИТА было включено в состав ИПА, и лаборатория АЕ могла теснее контактировать с разработчиками EPM. С 2006 г. ИПА выпускает АЕ и навигационные морские эфемериды на основе собственных эфемерид EPM, которые служат основой и для проведения разнообразных научных исследований. Предполагается использование EPM в программах ГЛОНАСС и ЛУНА-РЕСУРС.

В настоящее время в мире две динамические модели планетного движения, продолжающие свое развитие, DE (JPL) и EPM (ИПА) являются наиболее завершенными, имеют одинаковую точность и адекватны современным радиотехническим наблюдениям. С 2006 г. к ним присоединилась и численная теория INPOP (IMCCE, Франция) [13]. Две ветви эфемерид (EPM2004 и DE405) представлены в электронной версии АЕ — «Персональном астрономическом ежегоднике» (PersAY), позволяющем вычислять не только гео-, но и топоцентрические эфемериды [14].

Работы по совершенствованию эфемерид продолжаются, уже подготовлены версии DE424 и EPM2011 (начиная с DE405, эфемериды привязываются к ICRF, основанной на внегалактических радиоисточниках). Детальный анализ современного состояния работ этого направления может быть найден в работах Питьевой [15].

До сих пор международным стандартом фундаментальных эфемерид служат эфемериды серии DE, развиваемые в США, прежде всего, для обеспечения американской программы исследований в космосе. В связи с этим встает вопрос: «Зачем нам нужны

отечественные эфемериды, если зарубежные эфемериды, например, DE200, DE405, DE423 вполне доступны?». По нашему мнению, это необходимо по следующим причинам.

– Для независимого исследования динамики Солнечной системы и интерпретации наблюдений. Различные подходы в разных моделях и интерпретации наблюдений, например, при учете топографии планет, влияния астероидов или иных эффектов (возможно, не учитываемых в других теориях), могут существенно влиять на определение динамических параметров Солнечной системы.

– Для определения объективных оценок точности теорий сравнением по внешней сходимости, как это было, например, при сравнении нескольких теорий в ДАЕ №21-а.

– Наличие собственных высококлассных материалов существенно повышает возможность равноправного обмена наблюдательной и теоретической информацией.

– Развитие отечественных теорий важно в методических целях, так как это ведет к более глубокому пониманию исследователями динамики и физики Солнечной системы.

– Особо стоит вопрос о технологической независимости. Эфемериды обеспечивают многообразные практические применения, как гражданские, так и военные, и являются одним из важных элементов эфемеридной поддержки навигационных систем наземного, морского или космического базирования. При использовании же иностранных эфемерид (в частности, DE) возможно появление некоторых проблем.

а) Проблема лицензионной чистоты.

б) Проблема открытости эфемерид DE. Эфемериды DE не содержат достаточно подробного описания динамической модели движения Луны, что не позволяет контролировать применяемые в них алгоритмы, а также проводить их обновление. Значит, улучшение модели возможно не более чем на уровне условных уравнений, т. е. лишь в линейном приближении.

в) Проблема возможной задержки доступа к новым версиям эфемерид DE.

г) Проблема ответственности. В национальных исследовательских и прикладных программах необходимо наличие российского исполнителя, ответственного за содержание и качество используемых эфемерид.

Исключительно важное значение в развитии эфемерид имела отечественная наблюдательная база, особенно для радарных и лазерных измерений. Такой базы в настоящее время в России не существует! Это ведет к запаздыванию интересных научных результатов, поэтому, в лучшем случае, отечественные результаты будут «вечно вторыми».

Литература

1. *Абалакин В.К.*, 1979. Основы эфемеридной астрономии. - М.: Наука, 448 с.
2. Дополнение к астрономическому ежегоднику СССР на 1959 год (ред. Д. К. Куликов), 1958, №1, Л.: ИТА АН СССР, 80 с.
3. *Куликов Д.К., Доманская Н.С.* О точности эфемерид внутренних планет, публикуемых в астрономических ежегодниках. Бюлл. ИТА АН СССР, 1965, т.10, №2(115).
4. *Ash M.E., Shapiro I.I., Smith W.B.* Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations. *Astron. J.*, 1967, 72, 332-350.
5. *Standish E.M. Jr., Keesey M.S., Newhall XX.* JPL development ephemeris number 96. Technical Report 32-1603, 1976, California Inst. of Tech., Pasadena, 36 p.
6. *Извеков В.А.* Опыт определения астрономической единицы и элементов орбит Венеры и Земли по радиолокационным наблюдениям Венеры. Бюлл. ИТА, 1968, 11, N 6, 366-378.
7. *Глебова Н.И.* Уточнение координат Марса по оптическим и радарным наблюдениям. Бюлл. ИТА, 1975, 13, N 10, 612-628.
8. *Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С.* Аналитическая теория движения внутренних планет АТ-1 и ее использование для решения задач эфемеридной астрономии. Труды ИТА, 1978, XVII, 46-53.

9. Брумберг В.А., 1972. Релятивистская небесная механика. М: Наука, 382 с.
10. Глебова Н.И., Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Аким Э.Л., Степаньянц В.А., Шишков В.А., Кислик М.Д., Колюка Ю.Ф., Котельников В.А., Петров Г.М., Тихонов В.Ф. Дополнение 21-а к Астрономическому Ежегоднику СССР (ред. Абалакин В. К.), 1980, ИТА АН СССР, Ленинград, 185 с.
11. Ерошкин Г.И., Глебова Н.И., Фурсенко М.А. Дополнения N 27-28А к Астрономическому ежегоднику, 1992, ИТА РАН, С.-Петербург, 8 с.
12. Krasinsky G.A., Vasilyev M.V. Universal programming system ERA for high precision applications of dynamic and ephemeris astronomy. IAU Coll. N 165 «Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies» (eds. I. M. Wytrzyszczak, J. H. Lieske, R. A. Feldman), 1997, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 239-244.
13. Fienga A., Laskar J., Kuchynka P., Manche H., Desvignes G., Gastineau M., Cognard I., Theureau G. The INPOP10a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics. *Celest. Mech. Dynam. Astron.*, 2011, 111, 3, 363-385.
14. Глебова Н.И., Лукашова М.В., Михеева В.Д., Нецветаева Г.А., Парийская Е.Ю., Свешников М.Л., Скрипниченко В.И. Система PersAY (Персональный астрономический ежегодник). Версия 1.0. Сообщения ИПА РАН, СПб, 2010, № 185, 68 с.
15. Питьева Е.В. Высокоточные эфемериды планет – EPM и определение некоторых астрономических постоянных. *Астрон. вестн.*, 2005, 2, 1-12.

PLANETARY EPHEMERIDES OF ITA AND IAA AND THEIR USE IN THE ASTRONOMICAL YEAR-BOOK AND ITS SUPPLEMENTS

Glebova N.I., Piteva E.V., Sveshnikov M. L.

Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia

Up to the beginning of the space age the classical analytical theories of motion of the planets based on optical observations were used in “The Astronomical Year-book of the USSR” (AY). Since 1959 “The Supplement of AY” (SAY) containing coordinates and velocities of planets of the extended precision were issued on the basis of these theories for the maintenance of researches in deep space. In 1970th ITA, IAM and MCC/TsNIIMash began to work out of the theories comparable on accuracy to radar measurements. The coordination of the results of these groups led to creation of the unified relativistic theory of motion of the inner planets, and the special edition, SAY21-a, was published on its basis. In 1982 the group of researchers of these institutes was awarded the State Prize of the USSR. Since 1986 the ephemeris DE200/LE200 (JPL) accepted by IAU as the international standard was used in AY. Currently EPM numerical ephemerides developed by the G.A. Krasinsky’s group are adequate to modern radar ranging observations and have the accuracy comparable to one for DE ephemerides. Since 2006 IAA RAS has published AY on the basis of the own EPM ephemerides for the ensuring of technological independence. The EPM ephemerides are necessary for space experiments in deep space and near the Earth and for various investigations also. It is supposed that EPM will be used in programs GLONASS and the MOON-RESOURCE.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЦЕРЕРЫ

Железнов Н.Б.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

1 января 1801 г. Дж. Пиацци открыл первый астероид, названный им Церерой Фердинандовой. Приводится подробная история этого открытия, а также событий, предшествующих открытию, и его последствий.

Введение

История открытия Цереры состоит из нескольких отдельных историй, которые по сути не вытекают друг из друга, но тесным образом переплетаются. В данной статье приводится описание событий, происходивших в городе Гота (современная Германия) и связанных с первым директором обсерватории Зееберг бароном Францем Ксавьером фон Цахом. Центральной фигурой данной истории, вокруг которой и происходили основные события, является первооткрыватель Цереры, основатель обсерватории в Палермо Джузеппе Пиацци.

По-видимому, первым, кто попытался дать объяснение большому промежутку между орбитами Марса и Юпитера, был Иоганн Кеплер. В своей работе *«Mysterium Cosmographicum»* он высказал предположение, что в этой области должна находиться планета. Хотя И. Кеплер заблуждался в некоторых своих предположениях (например, дополнительную планету он помещал не только между Марсом и Юпитером, но и между орбитами Меркурия и Венеры), он оставил богатое научное наследие – свои знаменитые три закона движения. Как оказалось в будущем, предположение И. Кеплера о существовании планеты между орбитами Марса и Юпитера было небезосновательным.

И. Кеплер был не единственным, кто задумывался о происхождении большого промежутка между орбитами четвертой и пятой планет. Свои объяснения и предположения высказывали такие светила науки как Исаак Ньютон, Эммануил Кант, Иоганн Ламберт и др. [1].

В 1766 г. в своем переводе на немецкий язык книги Шарля Боннэ *«Contemplation de la Nature»* (Созерцание природы) Иоганн Тициус опубликовал замеченную им закономерность в больших полуосях орбит планет в зависимости от порядкового номера планеты. Эта закономерность была по достоинству оценена тогда еще молодым астрономом Иоганном Боде. Особенно поразительным был факт, что эта закономерность предусматривала наличие несуществующей планеты между орбитами Марса и Юпитера. Во втором издании своего учебника *«Anleitung zur Kenntnis des gestirnten Himmels»* (Руководство по знаниям о звездном небе), вышедшего в 1772 г., описывая закономерность И. Тициуса, И. Боде писал: «... Можно ли полагать, что Создатель вселенной оставил это пространство пустым? Определенно нет...» [1].

Данную закономерность можно выразить в виде формулы $a = 0.4 + 0.3 \cdot 2^i$, где a – большая полуось (радиус) орбиты, $i = -\infty, 0, 1, 2, 3, \dots$. Эта закономерность – сейчас она называется правилом Тициуса-Боде – еще не была явным доказательством существования планеты между орбитами Марса и Юпитера. Это могло быть удачным совпадением. Необходимо было подтверждение правила.

И оно вскоре пришло. 13 марта 1781 г. английский астроном Уильям Гершель, наблюдая за небом в свой 40-футовый телескоп в обсерватории Виндзорская топь, увидел среди звезд диск новой планеты, названной впоследствии Ураном. Большая полуось орбиты седьмой планеты Солнечной системы ($i = 6$) совпала со значением, предсказанным правилом Тициуса-Боде [1].

Открытие Урана подтвердило правило Тициуса-Боде, в котором есть явный намек на пропущенную планету с соответствующим ей значением $i = 3$. Именно с этого момента предположение о возможности существования планеты в этой части Солнечной системы превратилось в уверенность, и многие европейские ученые занялись поиском таинственной планеты.

Лилиентальское общество и «небесная полиция»

Поиском предполагаемой планеты озадачился и герцог Эрнст II Саксен-Гота-Альтенбургский. С этой целью к себе в город Гота он пригласил барона Ф. фон Цаха на должность придворного астронома. Барон в 1791 г. на горе Зееберг основал обсерваторию, где развернул бурную научную деятельность. С 1800 г. Ф. фон Цах стал издавать журнал *«Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde»* (Ежемесячная корреспонденция для содействия географии и астрономии).

В 1798 г. на собрании в обсерватории на горе Зееберг 15 астрономов обсуждали проблему поиска планеты между орбитами Марса и Юпитера. Проблема заключалась в том, что поиски планеты в одиночку, отдельными наблюдателями или обсерваториями, были весьма неэффективны. На собрании была поддержана идея Ж. де Лаланда о создании «небесной полиции» (*Himmels Polizei*) – команды наблюдателей, которая должна была заняться поиском недостающей планеты.

Идея заключалась в том, что небесная сфера в полосе $\pm 7^\circ$ от эклиптики разбивалась на 24 части по долготе (по 15°), которые распределялись между 24 опытными наблюдателями, рассеянными по всей Европе. Каждый наблюдатель на своем участке неба должен был тщательно искать среди звезд предполагаемую планету. В этом случае шансы обнаружить планету заметно увеличивались.

Идея была хорошей, но до ее воплощения прошло два года. Лишь 20 августа 1800 г. в пригороде Бремена – Лилиентале собрались шесть астрономов из Бремена, Лилиентала, Целле и Готы: барон Ф. фон Цах, Иоганн Шретер, Вильгельм Ольберс, Карл Хардинг, барон Фердинанд фон Энде, Иоганн Гилдемейстер. Результатом совещания было создание «Лилиентальского общества» (*Vereinigte Astronomische Gesellschaft*), цель которого состояла в координации наблюдений астрономов Европы в поиске планеты. Ими был составлен список 24 наблюдателей, в который вошли шестеро участников совещания, а также такие известные астрономы как Иоганн Боде, Уильям Гершель, Шарль Мессье, Федор Шуберт из Санкт-Петербурга и др. В списке были и два друга, итальянцы Барнаба Ориани и Джузеппе Пиаци. Председателем общества был выбран И. Шретер, а секретарем – Ф. фон Цах [1].

В Европе в начале XIX в. шли беспощадные наполеоновские войны, в огне битв горели города и обсерватории, нанося огромный вред науке и обществу. Частые боевые действия, а также пестрая, быстро меняющаяся политическая карта Европы также сильно влияли и на переписку между людьми: корреспонденция из одной страны в другую шла порой месяцами. Поэтому Дж. Пиаци так и не получил приглашение от Лилиентальского общества. Ф. фон Цах лишь в письме к Б. Ориани от 29 мая 1801 г. пригласил его и Пиаци вступить в общество [1].

Открытие Цереры

1 января 1801 г. Дж. Пиаци в своей обсерватории в Палермо в процессе составления каталога звезд занимался отслеживанием 87-й звезды в созвездии Тельца из каталога Николя де Лакайля. Примерно в 9 часов вечера он заметил маленькую звездочку 7-й звездной величины, которой не было ни в его каталоге, ни в каталоге Майера. Он решил проследить за ней. На следующий день этой звезды на месте не оказалось, она сместилась на $4'$ по прямому восхождению и на $3.5'$ по склонению. Третий день наблю-

дений показал, что ошибки нет – звезда движется. С 5 по 9 января была плохая погода, наблюдения были невозможны. 10 января Дж. Пиаци обнаружил поблизости предполагаемого места пять звезд примерно одинакового блеска. Проследив траекторию с 1 января, он нашел «беглянку».

Почти две недели движение было попятным, но 12 января произошло стояние, и звезда перешла на прямое движение. Такое перемещение по небу характерно для планет. Но не было видно ни диска (если это планета), ни комы (если это комета). Это сильно озадачило Дж. Пиаци, и он решил осторожно написать о своем открытии. 24 января Дж. Пиаци написал об открытии странной звезды и привел результаты наблюдений в письмах к Б. Ориани (дошло 5 апреля) и И. Боде (дошло 20 марта). 13 февраля Дж. Пиаци заболел, и наблюдения прекратились. За шесть недель наблюдений объект сместился на 4° и его вид остался неизменным.

Однако первым, кто узнал об открытии, по-видимому, был Ж. де Лаланд. 27 февраля он прочитал маленькую заметку в «*Journal de Paris*» об открытии странной кометы, которую опубликовал Дж. Пиаци. 11 апреля по просьбе Ж. де Лаланда Дж. Пиаци послал ему наблюдения, которые дошли лишь 1 мая. В переписке с французским астрономом наблюдения странной звезды получили И. Буркхардт, Г. Ольберс и другие астрономы [1, 2].

По наблюдениям, присланным Дж. Пиаци, И. Боде, построил круговую орбиту новой «кометы», которая легла между орбитами Марса и Юпитера. И. Боде вероятно, был первым, кто подумал о том, что эта «комета», может быть искомой планетой. О своей догадке 26 марта он дал объявление на заседании Прусской академии наук, а также сообщил об этом открытии Ф. фон Цаху, который в июне опубликовал в «*Monatliche Correspondenz...*» соответствующее сообщение и элементы круговой и эллиптической орбиты, вычисленные уже к тому времени И. Буркхартом.

Многие астрономы поверили, что искомая планета найдена. Но ближе к лету планета подошла на близкое угловое расстояние к Солнцу, и наблюдать ее стало невозможно. Встал вопрос о ее возможности переоткрытия после того, как она отдалится от Солнца. Проблема заключалась в том, что обнаружить планету до наступления неблагоприятных условий никто так и не смог – элементы орбиты, данные Дж. Пиаци, оказались неточными. Ж. де Лаланд первым высказал подозрение, что Дж. Пиаци нарочно искажил некоторые наблюдения, чтобы другие наблюдатели не могли найти его звезду. Вскоре Ж. де Лаланд поддержали и другие астрономы, а кое-кто стал сомневаться в реальности самого открытия, сделанного Дж. Пиаци [3, 14].

У Дж. Пиаци были причины так поступить. Во-первых, к тому времени покровители Дж. Пиаци в Палермо отвернулись от него, и судьба его обсерватории висела на волоске. Любая ошибка, вынесенная на публику, могла привести к закрытию обсерватории и краху всех надежд итальянского астронома. Во-вторых, планету между орбитами Марса и Юпитера жаждали открыть многие европейские астрономы. Точные наблюдения могли легко быть перехвачены каким-нибудь нечестным ученым, и с их помощью планета могла быть переоткрыта и выдана за собственное открытие. К слову сказать, ненайденной еще планете уже давали имена. Например, И. Боде называл искомую планету «Юноной», Ф. фон Цах с герцогом Эрнстом II – «Герой».

Ориани в письме от 25 июля сообщил об этом Дж. Пиаци. В ответном письме от 25 августа Дж. Пиаци написал, что назвал планету Церера Фердинандова (Cerege Ferdinanda) – в честь покровительницы Сицилии богини плодородия Цереры и короля Фердинанда: «...Если немцы думают, что у них есть право называть открытия, сделанные кем-то другим, то они могут называть мою новую звезду так, как они хотят: что касается меня, то я навсегда дал ей имя Церера и был бы очень признателен, если бы

Вы и ваши коллеги сделали бы то же самое...» [1]. По-видимому, 25 августа 1801 г. было первое письменное упоминание имени Цереры.

Лишь когда шумиха вокруг открытия достигла апогея и приоритет Дж. Пиацци стал неоспорим, он решился передать Ф. фон Цаху все 22 точных наблюдения, полученные за 41 день, которые барон опубликовал в сентябрьском выпуске «*Monatliche Correspondenz...*» [1].

Однако оставалась еще одна сложность: как построить точную орбиту по трем наблюдениям, полученным на короткой дуге. В то время умели хорошо определять лишь круговую орбиту, существовал метод определения параболических орбит, разработанный Г. Ольберсом. Разработанный в 1780 г. П.-С. Лапласом метод определения эллиптической орбиты работал лишь для наблюдений, разбросанных на большом временном интервале.

Подтверждение открытия Цереры

В сентябре 1801 г. молодой Иоганн Карл Фридрих Гаусс, еще малоизвестный математик из герцогства Брауншвейг, но считавшийся весьма талантливым ученым, решил вплотную заняться этой задачей. Имея на руках лишь наблюдения, опубликованные, в «*Monatliche Correspondenz...*» и три закона Кеплера, он блестяще справился с задачей. В ноябре 1801 г. Ф. фон Цах получил от К. Ф. Гаусса новые элементы планеты, которые он опубликовал в очередном выпуске своего журнала.

В табл. 1 приведены элементы орбиты, полученные другими астрономами (Ф. фон Цахом, Г. Ольберсом, И. Буркхардтом, Дж. Пиацци), до сентябрьского выпуска «*Monatliche Correspondenz...*», в котором были опубликованы истинные наблюдения Дж. Пиацци [2]. Поскольку удовлетворительной теории определения орбиты по короткой дуге (примерно 3°) в то время не существовало, вычислялись элементы круговой орбиты. Лишь И. Буркхардт попытался применить собственную теорию, но без большого успеха.

Таблица 1. Элементы орбиты Цереры, полученные различными авторами и с помощью программного пакета AMPLE 3

Элемент орбиты	Автор/ дата					
	Фон Цах, май 1801	Ольберс, июнь 1801	Буркхардт, июнь 1801	Пиацци, авг. 1801	Гаусс, нояб. 1801	AMPLE 3, 2011
$\pi + 180^\circ$	66°55'	67°40'	68°59'	68°46'	326°27'38"	329°17'45"
Ω	55°43'	81°55'	80°58'	80°46'	81°00'44"	83°37'47"
i	6°14'	7°14'	10°47'	10°51'	10°36'57"	10°37'55"
a , а.е.	3.071	2.94746	2.5743	2.6862	2.76728	2.76603
P , г.	5.382	5.0409	4.13	4.535	4.602	4.599
e	–	–	0.0364	–	0.0825017	0.0805411

В ноябре 1801 г. Ф. фон Цах получил от К. Ф. Гаусса новые элементы новой планеты, которые он опубликовал в «*Monatliche Correspondenz...*».

В предпоследнем столбце приведены результаты К. Ф. Гаусса, полученные по сентябрьским публикациям наблюдений, а в последнем столбце – соответствующие оскулирующие элементы Цереры на эпоху 11 января 1801 г., вычисленные на основе наблюдений Цереры с 1802 по 2011 гг. Оскулирующие элементы орбиты Цереры на эпоху 11 января 1801 г. вычислены с помощью программного пакета AMPLE 3, разработанного в ИПА РАН [3].

Сравнивая значения двух последних столбцов, можно увидеть, что К.Ф. Гаусс весьма точно определил элементы орбиты искомой планеты, что впоследствии помогло

ее отыскать. Результаты же других исследователей сильно отличаются от истинных, что не удивительно, поскольку они пользовались «неточными» наблюдениями, присланными ранее Дж. Пиацци. Поэтому отыскать Цереру на небе им никак не удавалось.

7 декабря Ф. фон Цах, используя результаты К.Ф. Гаусса, всего в полуградусе от вычисленного положения впервые увидел Цереру, но еще не был в этом уверен. В последующие ночи он не смог наблюдать – испортилась погода. Лишь 31 декабря он смог продолжить наблюдения и снова обнаружил Цереру. 1 января 1802 г. Г. Ольберс также увидел Цереру. Спустя ровно год после первого наблюдения открытие Дж. Пиацци наконец-то было подтверждено! В дальнейшем и другие астрономы тоже смогли наблюдать Цереру [2].

Имя, предложенное Дж. Пиацци, было одобрено астрономическим обществом, однако, была принята только первая часть названия. Например, в письме к Б. Ориани от 25 февраля 1802 г. Ф. фон Цах написал: «... я продолжу называть ее Церерой, но я прошу Пиацци отбросить «Фердинандова», потому что оно великовато» [1].

Последствия открытия Цереры

28 марта 1802 г. Генрих Ольберс наблюдал слабые звезды в созвездии Девы, чтобы иметь возможность определить относительно них положения Цереры. Неожиданно он обнаружил звезду 7-й величины, которой не было во время его наблюдений этой части неба в январе. Через два часа наблюдений он обнаружил, что звезда сместилась в своем положении на небе.

Через два дня Г. Ольберс уже был уверен, что это новая планета. Он назвал ее Палладой. Ф. фон Цах, получив от Г. Ольберса данные, подтвердил открытие наблюдениями 4 апреля. Хотя вторым, кто еще 30 марта увидел Палладу, был И. Шретер. Вскоре и многие другие астрономы тоже ее наблюдали [2].

Паллада удивила астрономов большим наклоном своей орбиты, более 10°. Г. Ольберс первым высказал предположение, что эти две планеты – обломки другой, более крупной. И должны последовать открытия новых планет, что вскоре и подтвердилось. Из письма Ф. фон Цаха Дж. Пиацци от 8 апреля 1802 г.: «... благодаря Вам, мы сделали все эти открытия, без Вашей Цереры не было бы Паллады. Без Паллады нет будущих открытий любого из нас. Это новая область!» [1].

После открытия Паллады Уильям Гершель предложил называть новые объекты «астероидами» (звездоподобными). Но это название закрепилось наряду с малыми планетами лишь в середине XIX в.

Наблюдая из обсерватории в Лилиентале небо в окрестности созвездий Девы и Кита, где пересекаются орбиты Цереры и Паллады, 1 сентября 1804 г. Карл Хардинг, ученик и ассистент И. Шретера, открыл 3-й астероид. Наконец имя «Юнона» обрело свою планету.

29 марта 1807 г. Г. Ольберс, наблюдая окрестности той области неба, где были обнаружены Церера, Паллада и Юнона, открыл четвертый, и свой второй, астероид. К.Ф. Гаусс дал имя четвертому астероиду – Веста.

Заключение

Многое в этой истории произошло впервые: открыт астероид, точно определена его орбита по короткой дуге, построена обсерватория с конкретной целью поиска планеты... Но самое важное заключается в том, что была организована одна из первых в истории международная научная программа, привлекающая к сотрудничеству большое число астрономов из разных стран Европы. Совместная работа Ж. де Лаланда со своим учителем Н. Лакайлем по определению параллакса Луны, по всей видимости, и подсказала светилу французской науки эту замечательную идею. Важно и то, что эта идея не

потерялась в те трудные времена войн и разрушений, а была поддержана и реализована другими учеными, в частности, Ф. фон Цахом и И. Шретером. Благодаря им было создано Лилиентальское общество, составлена научная программа наблюдений, организовано взаимодействие, разосланы письма.

Трудно сказать, что было бы, если Дж. Пиацици получил бы письмо от Лилиентальского общества до 1 января 1801 г. Если бы итальянский астроном взялся бы сразу искать планету, вполне вероятно, что ее бы нашел кто-то другой в другое время, и обязательно Цереру. К тому же наклон орбиты первого астероида более 10° , и Церера во время ее поисков, вполне могла находиться вне поисковой зоны в $\pm 7^\circ$ по эклиптической широте.

Может показаться, что У. Гершель открыл Уран случайно и Дж. Пиацици обнаружил Цереру тоже случайно. Однако развитие оптических средств и возрастающая интенсивность наблюдений рано или поздно привели бы к этим открытиям. Случайность заключается лишь в том, что открыть первый астероид мог бы кто-то другой, в другое время и в другом месте. Тот же Ф. фон Цах, например, вполне мог первым открыть свою «Геру». К слову, впоследствии обнаружилось, что Цереру фиксировали в наблюдениях задолго до Дж. Пиацици, но не придавали значение слабой звездочке. Однако именно Дж. Пиацици довел свои наблюдения до логического конца, и случайное открытие новой звезды вечером 1 января 1801 г. превратилось в целое направление в исследованиях Солнечной системы.

Подробнее с историей открытия Цереры можно ознакомиться в [4].

Литература

1. *Foderà Serio G., Manara A., Sicoli, P. Giuseppe Piazzi and the Discovery of Ceres // Asteroids III / eds. W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R.P. Binzel. – Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 2002. – P. 17–24.*
2. *Cunningham C.J. Jousting for Celestial Glory. The Discovery and Study of Ceres and Pallas. – Surside, Florida: Star Lab Press, 2004.*
3. *Железнов Н. Б., Новиков Ф. А. и др. AMPLE 3 – многоцелевой программный пакет для исследования малых планет и комет // Труды ИПА РАН. – СПб: ИПА РАН, 2011. – Вып. 21. – С. 230–235.*
4. *Железнов Н. Б. История открытия Цереры // Сообщения ИПА РАН. – СПб: ИПА РАН, 2012. – № 188.*

HISTORY OF DISCOVERY OF CERES

Zheleznov N.B.

Institute of Applied astronomy RAS, St. Petersburg

On January 1st, 1801 G. Piazzi discovered the first asteroid named as Cerere Ferdinanda (Ceres). The history of this discovery, and also the previous and consequent events is given in details.

ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ В НООСФЕРУ В ТРУДАХ В.И. ВЕРНАДСКОГО

Левитская Т.И.

*Уральский Федеральный университет
Екатеринбург, Россия*

Статья посвящена жизни и деятельности академика В.И. Вернадского. Приведены его биографические данные и этапы научной деятельности. Рассмотрена ноосферная парадигма Вернадского и ее значение для развития человеческой цивилизации.

В 2013 г. мировая научная общественность отметит важную дату – 150 лет со дня рождения Владимира Ивановича Вернадского (1863–1945) – выдающегося отечественного ученого, естествоиспытателя, философа, который внес своими трудами в научное мировоззрение человечества глубокий и разносторонний вклад. Он оставил потомкам целостное видение мира и места в нем человека. Круг научных интересов и главные вехи жизненного пути Вернадского: выдающийся природовед-мыслитель, создатель учения о биосфере и ноосфере, один из основных представителей русского космизма, автор работ по геологии, кристаллографии, минералогии, геохимии, радиогеологии, биогеохимии, философии, активный общественный деятель, академик Императорской Санкт-Петербургской Академии наук (1908), академик АН СССР, первый президент Украинской Академии наук (1918), член многочисленных международных академий.

Учение о биосфере и ноосфере Вернадского является одним из основных научных достижений XX века. Термины «биосфера» и «ноосфера» не принадлежат Вернадскому. Впервые термин «биосфера» – «область жизни» – был введен в употребление французским ученым-естествоиспытателем Ж. Ламарком (1744–1829) в начале XIX в., а в области геологии – в конце XIX в. австрийским ученым Э. Зюссом (1831–1944). Основу биосферы, как геологической оболочки Земли, составляет живое вещество, почва, минералы, радиоактивные элементы, космическое вещество. Биосфера по Вернадскому представляется как планетарное явление космического характера. «Биосфера – это среда нашей жизни, это та природа, которая нас окружает, о которой мы говорим в разговорном языке. Человек – прежде всего – своим дыханием, проявлением своих функций, неразрывно связан с этой “природой”, хотя бы он жил в городе или в уединенном доме» [1].

Термин «ноосфера» впервые стали использовать в конце 20-х гг. XX в. французские ученые Эдуард Леруа и Тейяр де Шарден. Вернадский наделил термины «биосфера» и «ноосфера» новым содержанием, часто использовал и применял их в своих работах. Он одним из первых осознал роль научной мысли человека, как новой геологической силы, меняющей облик нашей планеты. Ноосфера есть новое геологическое явление на Земле, ее отдельная оболочка – «мыслительный пласт». Это новое состояние биосферы, при котором разумная деятельность человека определяет будущее человеческой цивилизации. Огромной научной заслугой ученого является разработанная им теория неизбежного перехода биосферы в ноосферу [2, 3].

В.И. Вернадский родился 28 февраля (12 марта) 1863 г. в Петербурге, в семье профессора политической экономии Петербургского Технологического института и Александровского лицея И.В. Вернадского. Корни рода Вернадских происходят из Запорожской Сечи. Мать его – А.П. Константинович – была украинкой. У Владимира Ивановича были сестры-близнецы – Екатерина и Ольга. В 1881 г. Вернадский поступил на естественное отделение физико-математического факультета Санкт-Петербургского университета, которое окончил в 1885 году. Юноша получил блестящее образование.

Ему преподавали такие известные ученые, как В.В. Довженко, Д.И. Менделеев, О.М. Бекетов. После завершения обучения он был принят на должность хранителя Минералогического кабинета университета.

В 1888 г. Вернадский стажировался в Мюнхенском университете по кристаллографии. В письме к жене Н.Е. Старицкой от 1 августа 1888 г. он впервые высказывает мысль о связи минералогии с небесной механикой и космической химией. В том же году он принимал активное участие в работе сессии Международного Геологического конгресса в Англии [4]. В 1889 г., после стажировки по минералогии в Париже, ученый был приглашен профессором А.П. Павловым на кафедру минералогии и кристаллографии Московского университета, а в 1890 г. был утвержден приват-доцентом Московского университета. В течение нескольких лет он участвовал в почвенных экспедициях, организованных В.В. Докучаевым.

В 1891 г. Вернадским была защищена в Санкт-Петербургском университете магистерская диссертация «О группе силлиманита и роли глинозема в силикатах», а в 1897 г. – докторская диссертация «Явление скольжения кристаллического вещества» [4]. С 1895 по 1897 гг. ученый совершил несколько минералогических экспедиций на Урал со студентами и аспирантами. В этот же период он принимал активное участие в организации продовольственной помощи крестьянам, пострадавшим от голода 1891–1892 гг.

Вернадский выступал за развитие женского образования, он с 1897 г. читал лекции на Коллективных уроках Общества воспитанниц и учительниц в Москве (прообраз Высших женских курсов). В 1898 г. он был утвержден экстраординарным профессором Московского университета. Среди его научных открытий на рубеже XIX – начала XX вв. следует отметить открытие месторождения бокситов на Таманском полуострове в 1899 г., изучение нефтяных промыслов Баку, Грозного и Шемахи. В 1901 году под руководством ученого начинает работу минералогический кружок – зарождается отечественная школа геохимиков. В 1902 г. профессором были написаны лекции «Очерки по истории современного научного мировоззрения». С 1903 г. начинается активное научное сотрудничество В.И. Вернадского с А.Е. Ферсманом. В том же году вышел в свет первый том «Основ кристаллографии».

Во время первой русской революции 1905–1907 гг., Владимир Иванович принимал активное участие в земском движении и создании Конституционно-демократической партии. Его политические взгляды в это время можно охарактеризовать как либеральные. Он отстаивал идеи самоуправления, критиковал неповоротливую бюрократическую машину, выступал за необходимость реализации в жизни политической свободы, что было возможно только при ограничении власти монарха. Вернадский считал, что в основание политической реформы следует положить принцип всеобщей, прямой, равной и тайной подачи голосов. Кроме активной земской деятельности, переросшей в политическую борьбу, Вернадский вел еще одну упорную кампанию – за восстановление урезанных в конце XIX в. академических свобод. Во время первой русской революции Вернадский был избран от Академии Наук и университетов в Государственный совет – верхнюю палату законодательного органа Российской империи. В 1908 г. на общем собрании Академии наук он был избран экстраординарным академиком по минералогии. В том же году стали выходить в печати его выпуски «Опыта описательной минералогии». Находясь на отдыхе в Бретани, он в письме Я.В. Самойлову от 9 июля 1908 г. впервые формулирует идею вечности жизни: «Жизнь есть такая же часть космоса как энергия и материя» [4].

В это же время академик начинает работу над исследованием радиоактивности. Официальное начало науки геохимии следует считать с доклада Вернадского «Парагенезис химических элементов в земной коре», сделанного в Москве на XII съезде есте-

ствоиспытателей 28 декабря 1909 года. В 1910 г. на годовичном общем заседании Академии Наук он произнес доклад «Задача дня в области радия». В 1911 г. Вернадский совершил несколько радиевых экспедиций в Закавказье, Среднюю Азию, на Урал. В 1914 г. академик был назначен директором Геологического и Минералогического музея Академии Наук в Петербурге.

В 1915 г. последовало его избрание председателем Комиссии при Академии наук по изучению естественных производительных сил. В 1917 г. Вернадский был одним из четырех членов Государственного совета, пославших Николаю II телеграмму о необходимости отречения от престола и передаче власти Временному комитету Государственной думы. При власти Временного правительства (с марта по октябрь 1917 г.) в августе он был назначен заместителем министра просвещения. Большевистскую революцию 26 октября 1917 г. он воспринял негативно, объявив большевиков узурпаторами власти. После разгона Учредительного собрания Вернадский уехал на Украину, где участвовал в создании Академии наук Украины, ее научной библиотеки. 27 ноября 1918 г. на первом общем собрании Украинской Академии наук он единогласно был избран ее президентом.

Начатую в 1916 г. работу над проблемой живого вещества (биогеохимия) Вернадский продолжил и на Украине в 1919 г., на Старосельской биологической станции. В годы гражданской войны он был вынужден покинуть Киев и отправиться вместе с остатками потерпевшей поражение белой армией в Ростов, Новочеркасск, Екатеринодар, Новороссийск. В Крыму, при власти П.Н. Врангеля, ученый в 1920 г. был утвержден ректором Таврического университета.

После бегства врангелевцев из Крыма, Вернадский вернулся в Москву, а затем в Петроград, где вновь был избран директором Геологического и минералогического музея. Впервые 9 апреля 1921 г. он в лекции «Начало и вечность жизни» публично изложил идею космичности живого вещества. В декабре 1921 года ученый был назначен директором Радиевого института. В начале двадцатых годов, во время новой экономической политики, ученых еще выпускали за границу. Вернадский посетил Англию, Францию, где работал в 1924 г. в Институте Кюри с радиоактивными минералами. В том же году в Париже была издана его книга «Геохимия». В 1926 г. выводит в свет издание «Биосфера».

В 1930-е гг. Вернадский делает многочисленные доклады по самым актуальным научным проблемам: «Изучение явлений жизни и новая физика», «Об условиях появления жизни на земле» (1930), «Проблема времени в современной науке» (1931), «Значение биохимии для познания биосферы» (1932), «О количественном учете химического атомного состава биосферы» (1939). В 1940 г. Вернадский начал работу над книгой «Химическое строение биосферы Земли и ее окружение». В 1944 г. вышел журнал «Успехи современной биологии» с последней статьей академика «Несколько слов о ноосфере».

Научные труды Вернадского отличаются широтой подхода к проблемам человечества. Он призывал ученых не только сравнивать научное мировоззрение разных эпох, а изучать структуру науки в совокупности с другими формами общественного сознания – философией, религией, искусством, даже с материальной практикой и социальными условиями жизни населения той эпохи. Ученый написал блестящие статьи об открытиях М.В. Ломоносова и И. Канта. Он был блестящим популяризатором научных знаний.

Как считал Вернадский, биосфера сформировалась 500 млн. лет тому назад, когда на планете стали зарождаться первые организмы. Она проникает во всю гидросферу, верхнюю часть литосферы и нижнюю часть атмосферы, то есть населяет экосферу. Биосфера представляет совокупность всех живых организмов. В ней обитает более 3 000 000 видов растений, животных, грибов и бактерий. Человек тоже является частью

биосферы, его деятельность превосходит многие природные процессы и, как сказал Вернадский, – «Человек становится могучей геологической силой» [1].

Как человек проявляет величайшую силу ума и воли в познании тайн Земли, свидетельствует история изучения Марианской впадины в Тихом океане. В 1951 г. английское гидрографическое судно Challenger II с помощью эхолота зарегистрировало глубину впадины – 10 899 метров. Этому месту было присвоено имя «Бездна Челленджера». В 1957 г. советское научно-исследовательское судно «Витязь» зарегистрировало глубину впадины в 11034 метра. 23 января 1960 г. Дон Уолш и Жак Пикар совершили погружение на батискафе Trieste и достигли глубины 10916 метра. Исследователи из Нью-Гемпширского университета (США) 7 декабря 2011 г. опубликовали результаты погружения подводного робота, когда была зафиксирована глубина «Бездны Челленджера» 10 994 метра с точностью порядка 40 метров. Первое в мире одиночное погружение на батискафе Deepsea Challenger на дно Марианской впадины совершил 25 января 2012 г. канадский кинорежиссер Джеймс Кэмерон (James Francis Cameron). Это событие явилось научной сенсацией, поскольку было вторым в истории человеческой цивилизации пилотируемым погружением в «Бездну Челленджера». Погружение Кэмерона заняло два часа, и он достиг дна впадины на глубине 10 898 метров. Подъем продолжался чуть больше часа. На дне отважный исследователь провел шесть часов, сделал качественную запись панорамы океанского дна и получил снимки фораминифер [5].

На дне Марианской впадины живут организмы, отнесенные к царству простейших. Там обитают фораминиферы, которые умеют строить свои раковины с использованием частиц, падающих на дно из поверхностных слоев океана. Размер фораминифер не превышает 0,1 мм, тела покрыты раковинами. С окружающей средой эти организмы общаются через специальные отверстия (устье), а также многочисленные поры, которые являются отверстиями для множества тонких ножек, необходимых для перемещения и заглатывания пищи. Глубину «Бездны Челленджера» – самой глубокой точки мирового океана, где были найдены живые существа, можно считать нижней границей биосферы.

Вернадский отмечал: «Биосфера не раз переходила в новое эволюционное состояние... Это переживаем мы и сейчас, за последние 10–20 тысяч лет, когда человек, выработав в социальной среде научную мысль, создает в биосфере новую геологическую силу, в ней не бывалую. Биосфера перешла или, вернее, переходит в новое эволюционное состояние – в ноосферу – перерабатывается научной мыслью социального человека» [1]. В 1944 г. он написал статью «Несколько слов о ноосфере», которая является своего рода научным завещанием продолжателям теории ноосферы. Вот как Вернадский характеризует ноосферу: «Это сумма коллективных достижений человечества в духовной области, мысли и искусства... Ставится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободомыслящего человечества, как единого целого. Это новое состояние, к которому мы приближаемся, и есть Ноосфера». Ноосфера – сфера разума; сфера взаимодействия общества и природы, в границах которой разумная человеческая деятельность становится определяющим фактором развития.

Идея Вернадского о ноосфере неоднозначно была принята научной общественностью. В 1938 г. после доклада в Московском обществе испытателей природы он с горечью записал: «Впервые публично о ноосфере. Как будто не понимается». Между Вернадским и коллегами пролегла граница непонимания. Суть ее в разной трактовке слова «разум». «О какой разумности этой действительности можно говорить?» – удивлялся Ферсман. И не он один. Многие сокрушались: «Был ученый как ученый, и вдруг заговорил о какой-то сфере разума! Конечно, годы, годы... ». Вся глубину мысли о но-

осфере, о единстве исторического и геологического потоков, понимал и поддерживал один из его самых близких друзей – Д.И. Шаховской.

В 1938 г. была написана В.И. Вернадским книга «Научная мысль как планетарное явление». «Человек впервые реально понял, что он житель планеты и может – должен – мыслить и действовать в новом аспекте, не только в аспекте отдельной личности, семьи, государства, союзов, а и в планетарном аспекте» [2]. В этом высказывании звучат проблемы существования человеческой цивилизации в рамках учения В.И. Вернадского о ноосфере.

Современное представление о ноосфере изменилось в силу причин, связанных с негативной, неразумной деятельностью человека в отношении энергетических, минеральных, водных, лесных и других природных ресурсов, приводящих к загрязнению окружающей среды. В связи с этим ноосфера рядом ученых в настоящее время трактуется в виде экологической системы.

В конце 1960-х – начале 1970-х гг., когда стали вырисовываться негативные последствия разрушения человеком среды обитания, в мире значительно возрос общественный интерес к экологии. В 1968 г. Аурелио Печен была создана международная научная (неправительственная) организация «Римский клуб» [6]. По заданию «Римского клуба» был подготовлен доклад, содержащий неутешительные выводы о реально существующей угрозе экологической катастрофы в планетарном масштабе. В 1972 г. на стокгольмской конференции ООН была принята «Декларация об охране окружающей среды». Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992) признала природоразрушающий характер рыночной экономики и обозначила единственную возможность решения глобальных проблем – устойчивое развитие человеческого общества. В 2002 г. была предпринята попытка сформулировать новую этику отношений по использованию окружающей среды и обсудить ее основные положения на конференции ООН в Йоханнесбурге, посвященной 10-летию конференции в Рио-де-Жанейро [6]. Однако вместо конференции состоялся Всемирный саммит общественных организаций, объединяющий 60 тысяч человек. На саммите никаких решений принято не было. Это говорит о том, что выводы и рекомендации мировых экспертов, принятые на конференции в Рио-де-Жанейро, саботируются и игнорируются.

Способен ли сегодня человек управлять биосферой и новым ее состоянием – ноосферой? Однозначно ответить на этот вопрос нельзя, так как необходимо определиться с уровнем управления. Если человек хочет эффективно управлять развитием биосферы, то первый шаг к этому – коллективные методы управления. Второй шаг усложнения управляющей системы – использование опыта прошлых лет. Мировое сообщество должно перейти на путь устойчивого развития, которое подразумевает гармоничное сосуществование человека, общества и природы, что является сутью ноосферной парадигмы. В XXI в. решение глобальных экологических, энергетических проблем, изменения климата на Земле, кометно-астероидной опасности и других задач невозможно без знания трудов В.И. Вернадского.

Литература

1. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М., 2002. – 575 с.
2. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетарное явление. М.: Наука, 1991. – 272 с.
3. *Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988. – 520 с.
4. *Аксенов Г.П.* Вернадский. М.: Товарищество «Соратник», 1994. – 542 с.
5. *Путешествие в Бездну Челленджера.* Вселенная, пространство, время. № 4, 2012, С. 34-37.
6. *Комов С.В.* Введение в экологию человека. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. – 360 с.

EVOLUTION OF BIOSPHERE IN NOOSPHERE IN V.I.VERNADSKY'S WORKS

Levitskaya T.I.

The Ural Federal university

Ekaterinburg, Russia

Article is devoted to life and activity of academician V.I. Vernadsky. His biographic data and stages of scientific activity are presented. Vernadsky's paradigm of noosphere and its value for development of human civilization are surveyed.

ПУЛКОВСКИЕ ШИРОТНИЦЫ Л.Д. КОСТИНА И Н.Р. ПЕРСИЯНИНОВА

Малкин З.М., Прудникова Е.Я., Соболева Т.В., Миллер Н.О.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия



Пулковские астрометристы Лидия Дмитриевна Костина (8 декабря 1926 – 4 июня 2010) и Наталия Романовна Персиянинова (26 августа 1929 – 16 января 2003) оставили яркий след в истории Пулковской обсерватории и отечественной службы широты.

Обе они окончили математико-механический факультет Ленинградского университета и практически одновременно пришли на работу в Пулково, посвятив ей почти полвека своей жизни.

В первую очередь Лидия Дмитриевна и Наталия Романовна известны как выдающиеся наблюдатели на ЗТФ-135 (Зенит-телескоп Фрейберга с диаметром объектива 135 мм, изготовленный пулковским механиком Генрихом Андреевичем Фрейбергом в 1904 г.). Они вдвоём получили более 40% всех наблюдений на этом инструменте за его более чем вековую историю, в том числе более 60% всех послевоенных наблюдений.

Но Костина и Персиянинова внесли также очень большой вклад в исследования инструмента, в теорию и практику обработки наблюдений, интерпретацию изменений широты и изучение движения полюса Земли, определение астрономических постоянных. И здесь они пользовались большим авторитетом среди коллег.

Костина и Персиянинова 45 лет вместе работали в одной широтной группе, в одной комнате 17 Восточного корпуса ГАО. Они были коллегами, соавторами и — соперницами. Про каждую можно сказать, что она была не только ревностным, но и ревнивым наблюдателем, и это отношение к непростому, важному наблюдательскому труду всегда шло на пользу дела. В частности, такое ответственное и самоотверженное отношение к наблюдениям сделало их абсолютными лидерами среди пулковских (а скорее всего и всех отечественных) наблюдателей по числу вечеров наблюдений, также как ЗТФ-135 — лидером среди пулковских инструментов.

Известно, что ЗТФ-135 был признан лучшим в мире зенит-телескопом. Но слава этого инструмента определялась не только искусством его создателя, но и квалифицированной работой наблюдателей. Еще в 1847 г. английский королевский астроном Джордж Эри писал после визита в Пулковскую обсерваторию: «I have no doubt that one of these observations at Pulkowa is worth at least two anywhere else (Я не сомневаюсь в том, что одно наблюдение, сделанное в Пулкове, стоит по меньшей мере двух, сделанных в любом другом месте)»[1]. Плеяда замечательных наблюдателей зенит-телескопа ЗТФ-135, ярчайшими представителями которой были Персиянинова и Костина, немало способствовала тому, что такая оценка осталась близкой к истине и через сто с лишним лет, по крайней мере, в отношении этого инструмента.

В год окончания Л.Д. Костиной Ленинградского университета (1950 г.) Пулковская обсерватория еще восстанавливалась. Лидия Дмитриевна поступила на работу в Северо-Западное аэрогеодезическое предприятие, но вскоре стала аспиранткой ГАО. Три года (1952–1955) были проведены за подготовкой диссертации на тему «Определение прямых восхождений близполюсных звезд FK3», которую она защитила в 1959 г. уже будучи сотрудницей отдела Астрономических постоянных и движения полюсов Земли, куда она поступила после окончания аспирантуры в 1955 г. (и, как оказалось, на всю оставшуюся научную жизнь).



Л.Д. Костина. 1956 г.



Л.Д. Костина у ЗТФ-135. 1956 г.



Л.Д. Костина. 1958 г.

Хотя официальное открытие обсерватории состоялось только в 1954 г., регулярные наблюдения на ЗТФ-135 велись уже с сентября 1948 г., поэтому в отделе за три года сложился коллектив широтников, в который вошла и Лидия Дмитриевна. Она сразу же стала участвовать в обработке, а с апреля 1956 г. и в наблюдениях. Стоит напомнить, что в те годы электронно-вычислительных машин в обсерватории не было (первая появилась только в 1967 г.), и обработкой занимались наряду с наблюдателями и вычислители. При этом обработка велась, как это называлось, «в две руки»: сначала самим наблюдателем, затем общую сводку выполнял вычислитель. Только вычисления видимых мест можно было провести в городском вычислительном центре. Лидия Дмитриевна досконально разобралась в астрономических и вычислительных аспектах этой задачи и создала новые более точный и эффективный в вычислительном отношении алгоритм вычислений. С его помощью она обработала второй послевоенный ряд (1955.0-1961.3). Позднее эта методика применялась на всех широтных станциях страны.

Занималась Лидия Дмитриевна также и такой непростой задачей, как составление долговременных программ широтных наблюдений для зенит-телескопов, которые должны наблюдаться не менее 20 лет и обеспечивать максимальную однородность ряда за счет наблюдения одних и тех же звезд. Ею были составлена специальная программа наблюдений для новой Улан-Баторской широтной станции в Монголии, рассчитанная на наблюдения в течение 50 лет. Впоследствии она составила две программы для ЗТФ-135 (шестую и седьмую, наблюдавшуюся до конца 2006 г. – т.е. до конца работы инструмента).

Научный интерес Лидии Дмитриевны охватывал многие аспекты проблемы вращения Земли. Здесь и повышение точности вычисления широт, и определение астрономических постоянных, которым она занималась вместе с коллегами. Так, в 1969 г.

были выполнены определения постоянной аберрации, а в 1988 г. — главного члена нутации. Но в первую очередь, она интересовалась долгопериодическими изменениями в движении полюса, такими как вековое движение, период Чандлера, годовой период.

Лидия Дмитриевна, истинно ревностный наблюдатель, была не столько грозой, сколько живым укором для наблюдателя небрежного или недобросовестного. Другие сотрудники (в том числе и наблюдатели) иногда подтрунивали над нею, и даже прозвали неустойчивую погоду с быстро сменяющимися облаками «погодой Лидии Дмитриевны». Однако это добродушное подтрунивание не мешало ей много раз оказываться одним из лучших наблюдателей Пулкова. За свою наблюдательскую жизнь на ЗТФ-135 (1956–2001 гг.) Лидия Дмитриевна получила 32109 мгновенных широт.



Л.Д. Костина с монгольскими астрономами. 1958 г.



Встреча по поводу 100-летия ЗТФ-135. 2004 г.
Слева направо: И.А. Зыков, З.М. Малкин, В.А. Наумов, Л.Д. Костина, Н.В. Фомина (Витнова), Е.Я. Прудникова.

Несмотря на большую занятость, наряду с научной деятельностью Лидия Дмитриевна много занималась историческими исследованиями. Основная их тема — женщины науки, женщины-астрономы. И неудивительно — ведь перед ней был яркий пример Софьи Васильевны Романской. Именно ей и была посвящена первая биографическая статья Лидии Дмитриевны. Среди ее публикаций (а их ни много ни мало, как 70), 12 работ — по истории астрономии, созданных в зрелые годы, когда человеку свойственно интересоваться прошлым. Как специалист и человек, Лидия Дмитриевна пользовалась среди коллег большим уважением. Она была очень общительна и открыта, всегда готова ответить на вопрос, поделиться опытом, интересной информацией. Когда в Обсерватории существовала стенная печать, редкий выпуск обходился без заметки Лидии Дмитриевны об интересной поездке, командировке или экскурсии.

В 1953 г. окончила мат-мех ЛГУ и Наталия Романовна Персиянинова и пришла на работу в Пулковскую обсерваторию в этот же отдел. Как раз в это время в обсерватории началась подготовка к Международному геофизическому году, вводился в строй новый зенит-телескоп — ЗТЛ-180 (Зенит-телескоп Ленинградский с диаметром объектива 180 мм), изготовленный на ГОМЗ (ныне ЛОМО) по техническому заданию пулковских астрономов Ивана Федотовича Корбута [2] и Владимира Ивановича Сахарова (несколько таких телескопов были изготовлены также для других обсерваторий). И первые самостоятельные работы Наталии Романовны посвящены исследованию нового инструмента. Она начала вычислителем, затем с 1955 г. участвовала в наблюдениях на обоих Пулковских зенит-телескопах, но в итоге связала свою астрометрическую судьбу

со вторым — он оказался более по росту миниатюрной наблюдательнице. С ним была связана ее деятельность астронома-практика вплоть до конца жизни (и умерла она по дороге на работу, прямо на входе в Восточный корпус ГАО).

Разнообразие научных интересов Наталии Романовны демонстрирует перечень тем ее публикаций (всего она опубликовала около 40 статей): связь широтных вариаций с метеофакторами; влияние систем координат полюса на неполярные изменения широты (z -член), связь точности широт с ошибками используемого каталога, определение главного члена нутации, исследование главных составляющих в движении полюса, сравнение систем координат полюса, полученных из классических, доплеровских и лазерных наблюдений Луны; и даже такая своеобразная задача, как научная проверка известного наблюдательского мнения, что распределение ясной погоды зависит от фаз Луны. Одной из основных тем в ее работах стало применение спектрального анализа к исследованию вариаций широт. Ее диссертация, защищенная в 1969 г., была одной из первых, в которой для астрометрических задач применялся корреляционно-спектральный анализ.



Н.Р. Персиянинова. 1960-е гг.

Н.Р. Персиянинова. 1970-е гг.

Н.Р. Персиянинова у ЗТФ-135.

Наталию Романовну также привлекал широкий спектр научных проблем, и не только связанных с изменением широт. Все новое, появлявшееся в математической обработке наблюдений, она немедленно рассматривала и применяла на практике. Интересовали ее и задачи, примыкающие к геофизике — связь вариаций широт с метеорологией, солнечной активностью, вулканическими процессами. Как только в 1967 г. в обсерватории появилась первая ЭВМ, Наталия Романовна освоила ее настолько, что обеспечила программами оба зенит-телескопа. В 1969 г. она защитила кандидатскую диссертацию на тему «Исследование низкочастотных неполярных вариаций широт избранных обсерваторий». В ней на материале трех инструментов обсерватории Мицзува (визуальный и плавающий зенит-телескопы и ФЗТ) и астролябии Данжона в Париже было подробно рассмотрено влияние метеоусловий в приземном атмосферном слое и зальной рефракции на происхождение неполярных вариаций широты.

Наталию Романовну, как, собственно, и Лидию Дмитриевну, всегда отличало высокое чувство ответственности. Особенно это относилось к наблюдениям. Итог за 1954–2001 гг. — 34121 мгновенная широта (больше всех на ЗТФ-135!), многочисленные наблюдения по определению постоянного инструмента, близполюсных звезд в элонгациях, шкальных пар и шкальных рядов для определения цены оборота винта. Она неоднократно занимала первые и другие призовые места в конкурсах ГАО «Луч-

ший наблюдатель». И это не считая наблюдений на других инструментах в Благовещенске (ЗТЛ-180) и Китабе (ЗТЛ-180 и ЗТБ).

Научный авторитет Наталии Романовны был неизменно высок. Но не менее высоким был и ее общественный авторитет. Её несколько лет подряд (1981–1985 гг.) избирали народным заседателем в суде Московского района Ленинграда. Она охотно и добросовестно исполняла многочисленные общественные обязанности. Зачастую ее авторитеты научный и общественный сливались воедино: она не только обучала студентов и практикантов астрометрическим премудростям, но становилась и советчиком в делах житейских. Контакты, завязанные во время практики, продолжали существовать в переписке.

Активная, общительная, она легко становилась центром кружка собравшихся. Особенно заметным это было, когда в Пулкове проходила конференция. В ее уютном доме научные дискуссии проходили даже живее, чем в кулуарах Западного корпуса.

Хотя Л.Д. Костина и Н.Р. Персиянинова имели каждая свои собственные интересные для них темы научных исследований, будучи членами одной пулковской широтной группы, они имели, естественно, много общих публикаций и докладов на конференциях (а в те годы астрометрические и специализированные широтные конференции проходили в нашей стране намного чаще, чем теперь), основанных, в первую очередь на наблюдениях с ЗТФ-135. Практически две трети публикаций группы написаны совместно. Это статьи по изучению изменчивости широты Пулкова, исследованию инструмента, уточнению коэффициентов нутации, анализу неполярных изменений широты, уточнению каталогов координат широтных звезд.



Китаб. Октябрь 1964 г.



Полтава. 1967 г.

Особо можно выделить многолетний творческий союз Л.Д. Костиной и В.И. Сахарова, в результате которого были опубликованы 17 статей, посвященных, в первую очередь, изучению чандлеровского, годового и векового движения полюса. В 1977 г. они впервые исследовали взаимосвязь между движением полюса и солнечной активностью. Наличие общих циклов в вариациях главных компонент движения полюса и чисел Вольфа привело их к выводу о том, что некоторые из них «генерируются солнечными процессами (например, 11-летний цикл)» [3]. Исследуя чандлеровское ко-

лебание, авторы одними из первых изучали изменения фазы этого колебания, в частности, около 1925 г. и обратили внимание на то, что пренебрежение учетом вариаций фазы могло послужить причиной для построения многопараметрической модели. Полученное ими значение чандлеровского периода 1.189 ± 0.002 г. соответствует теоретическому расчету для второй модели строения Земли М.С. Молоденского (упругая мантия, жидкое ядро с твердой центральной частью) [3]. Авторы предложили теорию экстремальных циклов в вариации амплитуды чандлеровского движения полюса, По максимальным амплитудам они оценили главный низкочастотный период в вариациях чандлеровского движения как 43.8 г. Их предположение о том, что максимум третьего экстремального цикла придется на 1989 г., оказалось близким к истине (максимум наблюдался в начале 1990-х годов).

Исключительный интерес представляет совместная работа Наталии Романовны с Никленом Петровичем Годисовым. В ней для исследования главных компонент движения полюса был использован метод последовательного выделения составляющих с параболической интерполяцией в районе максимума спектральной функции, использовавшийся затем многими авторами. В спектре амплитуд чандлеровского движения полюса была выделена составляющая с периодом 44 года, что соответствовало выводам работы Сахарова и Костиной.

При этом списки научных публикаций показывают активное сотрудничество широтников отдела, выразившееся в цикле статей группы соавторов, возглавляемой Лидией Дмитриевной и Наталией Романовной. Материалом для статей служили параллельные наблюдения на двух зенит-телескопах. Тематика их первых работ была посвящена



Наблюдатели и вычислители группы ЗТФ-135. 1960-е гг.

Слева направо: Г.А. Виноградова, Н.Р. Персиянинова, Т.Д. Кудерметова, Л.Д. Костина, О.Б. Смирнова (Брюшкова).

инструментальным проблемам, уточнению масштаба и определению полярных и неполярных вариаций широты. В дальнейшем с расширением круга задач и привлечением других временных рядов расширялся и круг соавторов. Участие в конференциях или выполнение различных программ (например, программы МЕРИТ в 1983–1985 гг.) также влияли на распределение количества публикаций. Списки опубликованных работ отражают в себе событийную сторону научной деятельности.

За свои почти полувековые наблюдательские жизни Лидия Дмитриевна Костина и Наталия Романовна Персиянинова внесли вклад в работу службы широты, равный 66230 высокоточным широтам, распределившийся примерно поровну между ними. Нехитрая прикидка (четыре значения широты за час в стандартной широтной программе) показывает, что для получения такого результата каждая из них провела у инструмента около 8300 часов или около 345 суток — почти год! А если учесть другие, вспомогательные, но необходимые наблюдения, то и больше года. Но ни один наблюдатель не скажет, что провел этот год у телескопа напрасно.

Источники:

1. *Airy G.V.* Astronomische Nachrichten, 1848, V. 26, № 623.
2. *Прудникова Е.Я., Соболева Т.В., Малкин З.М.* Памяти Ивана Федотовича Корбуга. Настоящий выпуск.
3. *Костина Л.Д., Сахаров В.И.* Изучение движения географического полюса Земли в Пулковской обсерватории. В кн.: 150 лет Пулковской обсерватории. Л.: Наука, 1989, 137–152.
4. Архив ГАО РАН. Ф. 1. Оп. 2. Д. 105. Л. 112–141. (Личное дело аспиранта Л.Д. Костиной).
5. Там же. Ф. 1. Оп. 2. Д. 863. Л. 34–97. (Личное дело Л.Д. Костиной).
6. Там же. Ф. 1. Оп. 2. Д. 385. Л. 163–194. (Личное дело аспиранта Н.Р. Персияниновой).
7. Там же. Ф. 1. Оп. 2. Д. 905. Л. 178–235. (Личное дело Н.Р. Персияниновой).
8. Там же. Ф. 4. Оп. 1. Д. 105. (150 лет ГАО. Альбом фотографий).

К ИСТОРИИ ПОРТРЕТОВ И. КЕПЛЕРА И Н. КОПЕРНИКА ИЗ СОБРАНИЯ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Московченко Н.Я.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

За первые 25 лет основатель и первый директор Пулковской обсерватории В.Я. Струве украсил её залы и кабинеты двумя десятками портретов знаменитых астрономов, механиков и государственных деятелей, способствовавших созданию и развитию обсерватории. Среди них первыми В.Я. Струве в 1838 г. заказал мюнхенскому художнику М. Эхтеру портреты немецких мастеров-механиков («художников») – Т. Эртеля и Г. Мерца, создавших главные инструменты для Пулковской обсерватории и инженера-изобретателя К. Штейнгеля. Этим же художником была тогда же выполнена копия портрета выдающегося астронома И. Кеплера. В 1839-1840 годах в Обсерваторию поступили портреты других известных ученых и астрономов, в том числе и портрет Н. Коперника. Возникла уникальная портретная галерея Пулковской обсерватории, которая в настоящее время насчитывает уже более 60-ти портретов. У каждого портрета сложилась своя судьба но, к сожалению, многие из них не сохранились. В статье предпринята попытка подробно остановиться на истории двух первых портретах собрания – портретов астрономов И. Кеплера и Н. Коперника.

Пулковская обсерватория является одним из самых замечательных учреждений Академии наук благодаря своим научным достижениям. Её знаменитое здание украшает Пулковский холм более 170-ти лет.

Многие академические учреждения имеют свои музеи, мемориальные кабинеты, но ни в одном нет такого уникального собрания портретов, как в Астрономическом музее обсерватории.

Основатель и первый директор Пулковской обсерватории Василий Яковлевич Струве (1793–1864), считал необходимым украсить кабинеты и залы обсерватории портретами астрономов, которые внесли большой вклад в развитие науки астрономии, а также портретами лиц, которые способствовали строительству обсерватории и оснащению её новейшими высококлассными инструментами и приборами.

Еще до окончания строительства обсерватории В.Я. Струве заказал мюнхенскому художнику Михаэлю Эхтеру (1812-1899) портрет создателя больших астрономических меридианных инструментов Т.Л. Эртеля (1772-1856), оптика Г. Мерца (1793-1867), инженера-изобретателя К.А. Штейнгеля (1801-1870) и знаменитого математика, оптика и астронома Иоганна Кеплера (1571-1630), открывшего законы движения планет. Все четыре портрета были выполнены в 1838 году.

Необходимо отметить, что В.Я. Струве высоко ценил вклад И. Кеплера в создании новой астрономии и был знаком не только с опубликованными трудами Кеплера, но имел возможность изучать его рукописи и переписку, так как весь архив Кеплера, приобретенный Екатериной II, с 1774 года хранился в Библиотеке Академии наук (после 1839 г. архив был передан в Пулковскую обсерваторию). Струве составил список всех известных в то время опубликованных трудов И. Кеплера и поместил его в первый каталог Пулковской библиотеки 1845 г. Струве старался собрать в библиотеке возможно больше прижизненных изданий трудов Кеплера и уже к 1845 году из 41 известных названий 28 были представлены в библиотеке.

Из четырех упомянутых портретов до нас не дошел только портрет Кеплера, который уже отсутствует в списке 1889 г. [1]. В своей работе «Description de l'Observatoire Astronomique Central de Pulkova» В.Я. Струве писал, что портрет Кеплера «копия, писанная художником Эхтером из Мюнхена по оригиналу, который хранится в Ратис-

боне» [2]. Однако по современным исследованиям искусствоведов этот портрет является изображением Людвиг Баварского [3], а не Кеплера, так что сожалеть об его утрате не стоит.

Следующий портрет И. Кеплера приобрел второй директор Пулковской обсерватории Отто Васильевич Струве (1819-1905), продолживший традицию отца по собиранию картин.

Летом 1876 г. директор обсерватории в Бреслау Иоганн Готфрид Галле (1812-1910) предложил О.В. Струве купить реликвии семьи И. Кеплера, среди которых находился его портрет, Реликвии хранились в семье старшей дочери И. Кеплера Сусанны, бывшей замужем за математиком Якобом Барчем и передавались из поколения в поколение. К 70-м годам XIX в. наследницы (прямые потомки Кеплера) сестры Шнибель, жившие в Силезии в Лаубане, попали в затруднительное материальное положение и обратились к профессору И. Галле с просьбой продать реликвии в достойные руки, которые могли бы их сохранить. Галле предложил Берлинскому правительству купить реликвии (три портрета – И. Кеплера, его первой жены, зятя и несколько мелких предметов) за 300-500 гульденов, Правительство ответило, что могло бы купить один портрет Кеплера и только за более низкую цену, Сестры отказались от продажи и Галле предложил реликвии нескольким европейским обсерваториям, но ни одна не выразила желание сделать приобретение.

Тогда Галле, зная, что архив Кеплера находится в Пулковской обсерватории, написал письмо О.В. Струве. Без колебаний О.В. Струве заплатил 400 гульденов и в октябре 1876 г. реликвии прибыли в Пулково. Это событие нашло отражение в отчете директора за 1876 год: «Как известно, драгоценнейшее литературное сокровище Главной Обсерватории составляет почти полное собрание рукописей Кеплера. Это обстоятельство послужило поводом почтенному моему товарищу, директору Бреславльской обсерватории И. Галле предложить нам приобрести от последних прямых потомков Кеплера, живущих в Силезии, некоторые предметы, хранившиеся в их семействе в память бессмертного астронома. Пулковская Обсерватория с благодарностью приняла это предложение. Между приобретенными таким образом вещами в особенности следует упомянуть об оригинальных миниатюрных портретах самого Кеплера и его первой жены, представляющих их в молодом возрасте, около времени свадьбы, и о небольшой памятной книжке, принадлежавшей некогда их старшей дочери» [4].

Миниатюрные портреты написаны неизвестным художником масляными красками на медных пластинках овальной формы – портрет Кеплера размером 6,1x4,7 см, портрет Барбары 7x5,2 см., портрет Я. Барча (зятя) на квадратной медной пластинке. Портреты И. Кеплера и его первой жены Барбары датируются годом их свадьбы - 1797 годом. Все портреты хорошо сохранились. Этот первый подлинный прижизненный портрет И. Кеплера находился в Пулковской обсерватории почти 61 год (Рис.1).

В 1937 г. по распоряжению Президиума АН СССР весь архив И. Кеплера и реликвии (вместе с портретом) были переданы в Архив АН СССР (Ленинград), где всё хранится до сих пор в фонде №285 И. Кеплера [5].

Следующий (третий по счету) портрет И. Кеплера поступил в Пулково не ранее 1877 г. О.В. Струве заказал его немецкому художнику Августу Баушу (1818-?). Бауш скопировал его с портрета неизвестного художника, который Кеплер в 1620 г. подарил своему другу М. Бернегеру, профессору Страсбургского университета. Бернегер в 1627 г. оригинал портрета отдал по одним сведениям в библиотеку Университета, по другим – в монастырь Св. Фомы (Св. Томаса) в Страсбурге. В списке портретов ГАО от 1889 г. он значится как копия выполненная Баушем в 1877 г. с оригинала, хранящегося в школе Св. Фомы. Портрет был утерян в 1941-1945 гг.



Рис. 1.

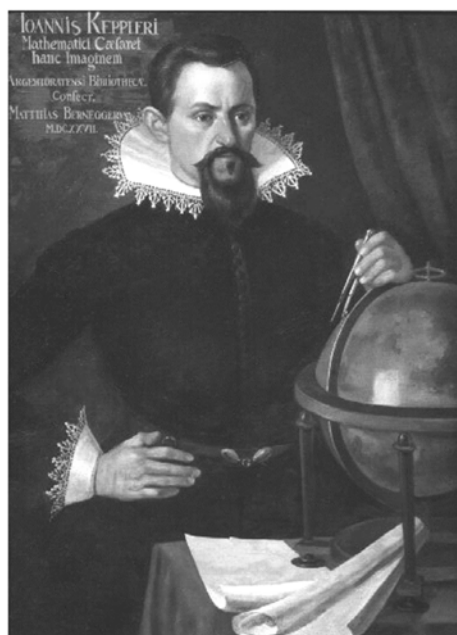


Рис. 2.

В настоящее время в Круглом зале Главного здания Пулковской обсерватории в экспозиции портретов Астрономического музея, выставлен уже четвертый портрет И. Кеплера, написанный членом Союза художников СССР художницей Ниной Петровной Нератовой (1912-2000) в 1971 году (копия с известного прижизненный портрета Иоганна Кеплера неизвестного мастера (ок. 1619 г.) Страсбург) (Рис. 2).

Первый портрет знаменитого польского (прусского) астронома, математика, экономиста, каноника эпохи Ренессанса - автора гелиоцентрической системы мира Николая Коперника (1473-1543) был подарен Пулковской обсерватории в 1840 г.

Весной этого года В.Я. Струве посетил Оружейную палату Московского Кремля и увидел там «отличной работы» портрет Н. Коперника. Струве решил, что этот портрет мог бы стать «весьма приличным украшением комнат здания Главной обсерватории» [6]. По существовавшему порядку он обратился к министру народного просвещения С.С. Уварову с просьбой передать портрет в Обсерваторию. Министр доложил просьбу императору Николаю I и уже летом 1840 г. портрет был доставлен в Пулково. В «Description» мы читаем, что портрет Коперника - «оригинал, выполненный в Италии на меди, произведение высокой ценности. Благосклонный дар Императора». [2]. В списке портретов 1889 г. этот портрет описывается так: «Списан в молодости, на меди. Подарен Обсерватории Императором Николаем I. Находился в польской коллекции. Как портрет вероятно недостоверен» [1].

Как удалось в дальнейшем выяснить «польскую коллекцию» составляли военные трофеи, вывезенные с территории Польши во время раздела Речи Посполитой и подавления польского восстания 1830-1831 гг.

При выполнении работ, связанных с историей Пулковской обсерватории, автору приходилось обращаться к разным архивным документам. В частности при описании личного фонда заместителя директора ГАО Бориса Александровича Орлова (1906-1965) была обнаружена оценочная ведомость 35 картин, передаваемых на хранение в Государственный Эрмитаж в 1941 г. Сотрудники Астрономического музея ГАО уже давно пытались разыскать материалы о судьбе музейных экспонатов во время войны 1941-1945 г., но в Архиве ГАО ничего найти не удалось. В поисках документов о передаче в Эрмитаж картин пришлось обратиться в Архив Эрмитажа, где и был обнаружен

акт передачи. В июле 1941 г. ученый секретарь ГАО АН СССР Виктор Владимирович Лавдовский (1908-1990) отвез в Эрмитаж в пяти ящиках 35 картин из собрания Пулковской обсерватории и сдал их туда для спасения на время войны. Таким образом, было документально подтверждено, что во время войны часть картин из довоенного собрания была сохранена Эрмитажем, который и вернул их все в Обсерваторию после войны.

В Архиве Эрмитажа были найдены сведения о том, что после подавления польского восстания 1830-1831 гг. трофейные картины упаковывались в ящики и морем вывозились из Польши в Кронштадт, а оттуда по Неве доставлялись к Зимнему дворцу и выставлялись в «испанском» зале для обозрения. Сначала картины отбирал для дворца император, потом члены императорской семьи.

Среди выставленных в 1836 г. двадцати картин в золоченых рамах оказался и портрет Коперника на меди «мерой в $8\frac{3}{4}$ вершка на 7 вершков». После осмотра все 20 картин по повелению императора были отправлены в Оружейную палату для украшения московских дворцов [7], где и увидел этот портрет В.Я. Струве.

В материалах по истории Пулковской обсерватории в переписке директора Обсерватории Александра Александровича Иванова (1867-1939) с руководством Академии наук и директором Эрмитажа в 1922-1926 гг. сообщалось о требовании Польского правительства возратить два портрета Коперника, которые находились в Обсерватории. После неудачного военного «похода» в Польшу М.Н. Тухачевского (1893-1937) в 1921 г. был заключен Рижский мирный договор, по которому правительство РСФСР обязывалось вернуть Польской стороне произведения искусства, книжные и архивные фонды, вывезенные царским правительством с её территории в XIX веке. В 1926 г. портрет Н. Коперника на меди был передан в Эрмитаж для передачи в Польшу. В списке портретов ГАО 1929 г. этот портрет Н. Коперника уже отсутствует.



Рис. 3.

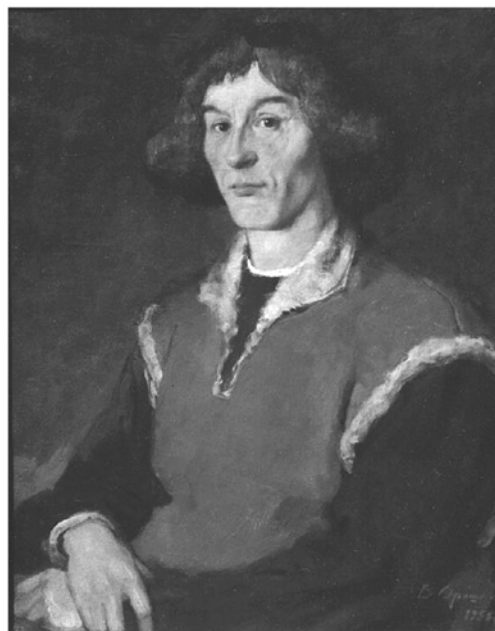


Рис. 4.

В 2001 г. во время командировки (вместе с сотрудницей ГАО В.Н. Ихсановой) в Харьковскую астрономическую обсерваторию (Украина) для выявления архивных документов по теме «Астрономическая династия Струве», среди портретов профессоров

Дерптского университета случайно была обнаружена фотокопия портрета молодого Коперника в овальной раме с надписью: «Портрет Пулковской обсерватории».

В 2007 г. польский гражданин Ян Длужевский обратился в ГАО с просьбой сообщить сведения о своем родственнике пулковском астрономе Л.Л. Маткевиче. В свою очередь на наш запрос о портрете Коперника он любезно прислал цветную его фотокопию (Рис. 3), которая оказалась идентичной черно-белой «харьковской». Пан Длужевский сообщил и сведения о портрете, что он был написан итальянским художником Марчелло Баккиарелли в 1782-1783 г. на медной пластине 88,5x71 см, и, что, по возвращении в Польшу в 1929-1930 гг., он находился в музее в Королевском замке, а потом в Народном музее в Варшаве. Портрет счастливо пережил все невзгоды войны 1939-1945 гг.

Судя по тому, что этот портрет в обсерватории считался «недостовверным», О.В. Струве пытался заказать еще одну копию портрета Коперника. В 1871-1872 годах его брат Николай Васильевич Струве находился во Флоренции и Отто Васильевич попросил его найти художника, который смог бы скопировать портрет Коперника, находящийся в галерее Уффици [8]. Судя по отчетам, копия была выполнена и поступила в Пулково в 1881 г. К сожалению, и этот портрет Коперника был утрачен в годы Великой Отечественной войны. Не сохранилось также его изображение и описание.

После войны директор ГАО АН СССР академик Александр Александрович Михайлов (1888-1983), продолжая традицию В.Я. Струве, заказал в 1954-1955 гг. несколько новых портретов астрономов, в том числе и портрет Коперника, который написал известный советский живописец, народный художник СССР, действительный член АХ СССР. В.М. Орешников (1904-1987). Сейчас этот третий по счету портрет Николая Коперника украшает экспозицию Астрономического музея ГАО РАН (Рис.4).

Традиция украшать портретами выдающихся ученых и астрономов помещения Пулковской обсерватории, заложенная В.Я. Струве, продолжается и в настоящее время - портретная галерея постоянно пополняется новыми портретами.

Считаю своим долгом поблагодарить за помощь в работе сотрудников библиотеки ГАО РАН К.А. Кандаурову, Е.Е. Козлову, сотрудников ПФА РАН И.В. Тункину, Н.В. Крапошину, Н.С. Прохоренко, сотрудников Архива Государственного Эрмитажа, польского инженера Я. Длужевского и французского филолога С. Эраль.

Особая благодарность Заведующему Астрономическим музеем ГАО С.В. Толбину за критические замечания, компьютерное оформление рукописи и подготовку иллюстраций.

Литература

1. К пятидесятилетию Николаевской Главной астрономической обсерватории... СПб. 1889. С.114
2. Description de l'Observatoire Astronomique Central de Pulkova par F.G.W. Struve. St-Petersbourg. 1845. P.99-100.
3. М.Е. Глинка. Образ Иоганна Кеплера в изобразительном искусстве. // Историко-астрономические исследования. Вып.11. М. 1972. С.168.
4. Годовой отчет, представленный Комитету Николаевской Главной астрономической обсерватории её директором. СПб. 1876.
5. ПФА РАН. Ф.285. Оп.2. Д.1.
6. ПФА РАН, Ф.4, Оп.2 (1840). Д.173. Л.1-3.
7. Архив Гос. Эрмитажа. Ф.1. Оп.2(1836), Д.9, Л.5,6,9.
8. ПФА РАН. Ф.286. Оп.1. Д.571. Л.1.

**ON THE HISTORY OF THE PORTRAITS OF I. KEPLER AND N. COPERNICUS FROM
THE COLLECTION OF PULKOVO OBSERVATORY**

Moskovchenko N.Ya.

*Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, Saint Petersburg,
Russia*

The founder and first director of Pulkovo Observatory, V.Ya. Struve, decorated its halls and offices with the portraits of famous astronomers, mechanics and government officials contributed to the foundation and development of the observatory. In 1838 he commissioned the portraits of German telescope-makers T. Ertel and G. Merz (who created the main instruments for Pulkovo Observatory) by a Munich artist M. Echter as well as the portrait of I. Kepler. In 1840 the observatory was presented with the portrait of N. Copernicus, and later on Struve commissioned the portraits of other well-known astronomers. With time the observatory became the owner of unique portrait gallery which is constantly replenished. The paper traces the history of the portraits of I. Kepler and N. Copernicus.

НИКОЛАЕВСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

Пинигин Г.И., Пожалова Ж.А.

НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

В сентябре 2013 года исполняется 100 лет с момента официального открытия южного отделения Пулковской обсерватории в г. Николаеве (Украина). Оно было организовано на базе морской обсерватории, созданной в 1821 году для астрономического обеспечения Черноморского флота. В связи с переносом центра Черноморского флота в Севастополь в начале XX века работа Николаевской морской обсерватории утратила свою роль для флота, и в 1909 году Пулковская обсерватория приняла предложение Морского ведомства передать в ее собственность обсерваторию в Николаеве с целью создания базы для астрометрических исследований на юге. Первая половина XX века была временем величайших потрясений в жизни нашего общества, и не всем планам по обустройству и развитию отделения суждено было осуществиться, однако, обсерваторию удалось сохранить и как научное учреждение, и как историко-архитектурный комплекс. Безусловно, основная заслуга в этом принадлежит двум директорам обсерватории Б.П. Остащенко-Кудрявцеву и Л.И. Семенову, которые являлись воспитанниками Пулковской обсерватории. В эти годы обсерватория принимала участие в первом крупном международном проекте по созданию карты неба. Абсолютные каталоги звезд, полученные из наблюдений на пассажном инструменте Фрейберга-Кондратьева и вертикальном круге Репсольда, вошли составной частью в известные фундаментальные каталоги серии FK. В 1931 году в обсерватории была создана Служба времени, которая являлась одной из лучших в СССР. Еще одной задачей Николаевского отделения было определение положений Солнца и тел Солнечной системы.

Б.П. Остащенко-Кудрявцев и Л.И. Семенов — директора Обсерватории в первой половине XX века

В мае 1909 года с целью решения вопросов о передаче обсерватории в Николаеве во владение Пулковской обсерватории по просьбе Начальника Главного Гидрографического Управления для временного заведования обсерваторией направляется пулковский адъютант-астроном Борис Павлович Остащенко-Кудрявцев [1]. К этому моменту он был вполне сложившимся астрономом, более 10 лет проработавшим в Пулкове, принимавшим участие в трех известных научных экспедициях того времени: по измерению Курской магнитной аномалии (1896 год), по измерению дуги земного меридиана на о. Шпицберген (1900 год), арктической экспедиции адмирала С.О. Макарова на ледоколе «Ермак». Кроме того, незадолго до переезда в Николаев он неоднократно бывал в зарубежных командировках, где имел возможность посетить и познакомиться с работой многих обсерваторий Европы и был готов свои знания применить для обустройства Николаевской обсерватории.

Б.П. Остащенко-Кудрявцев родился 28 декабря 1876 года (10 января 1877 года) в С.-Петербурге в семье архитектора. После окончания физико-математического факультета Петербургского университета в 1898 году был зачислен “сверхштатным” астрономом в Пулково. В начале 1900-х годов за наблюдения каталога 1900.0 на вертикальном круге в Одессе был награжден медалью Русского астрономического общества. Борис Павлович возглавлял Николаевскую обсерваторию до сентября 1923 года, когда он получил приглашение на должность старшего астронома в Обсерваторию Харьковского университета. Ему было присуждено звание профессора (1935 год), степень доктора физико-математических наук без защиты диссертации (1936 год), почетное звание Заслуженного деятеля науки Украинской ССР (1952 год). Умер Б.П. Остащенко-Кудрявцев в 1956 году, всего два месяца не дожив до своего восьмидесятилетия [2].



Рис. 1. Директора Обсерватории Б.П. Остащенко-Кудрявцев и Л.И. Семенов.

Преемником Б.П. Остащенко-Кудрявцева на посту директора стал пулковский астроном Леонид Иванович Семенов, получивший прекрасное астрономическое образование на физико-математическом факультете Страсбургского университета (Германия) и защитивший там же в 1911 году диссертацию на степень «доктора философии природы». Он родился 19 июня 1878 года в с. Чекане, Бугульминского уезда, Самарской губернии в семье крестьянина. В 1908 году по окончании Страсбургского университета был зачислен в штат Главной астрономической обсерватории в Пулкове. В 1910 году он был награжден премией Русского астрономического общества за работы по исследованию изменений широты, а в 1920 году получил премию Главной палаты Мер и Весов за брошюру о метрической системе мер. Леонид Иванович заведовал Николаевским Отделением с 1923 по 1951 годы. В 1935 году он был удостоен степени доктора астрономии, а в 1938 году утвержден в звании профессора. Он умер в 1965 году и похоронен в г. Николаеве [2].

Хронология основных событий в жизни Обсерватории

13 июня 1912 года вошел в силу Закон об упразднении Одесского отделения НГАО и учреждении двух новых отделений в Николаеве и Симеизе [3]. По условиям передачи Обсерватории Морским министерством в собственность Пулковской обсерватории отходили все здания с участком земли 7 десятин. В обязанность Николаевской обсерватории включалось определение точного времени и сообщение на суда, поверка и аттестация хронометров и всех астрономических инструментов. Во временное пользование обсерватории передавалась библиотека и оборудование, необходимое для выполнения работ по обслуживанию судов.

Для организации научной работы был утвержден штат обсерватории в составе 4 человек: старший астроном, адъюнкт-астроном, астроном-вычислитель, механик. Из упраздненного отделения в Одессе передавались пассажный инструмент Фрейберга-Кондратьева ($D = 108$ мм, $F = 1300$ мм), вертикальный круг Репольда ($D = 108$ мм, $F = 1400$ мм) и часы Рифлер № 12. Кроме того, для проведения астрофотографических работ был заказан фотографический рефрактор ($D = 32$ дюйма, $F = 35$ футов), а также купол башни и подъемный пол в фирме Howard Grubb в Дублине (Ирландия).

Официальное открытие Николаевского отделения ГАО состоялось 22 сентября 1913 года. К нему было приурочено торжественное освящение астрономического павильона для перевезенных инструментов, построенного в форме полуцилиндра силами сотрудников судостроительного завода «Наваль».

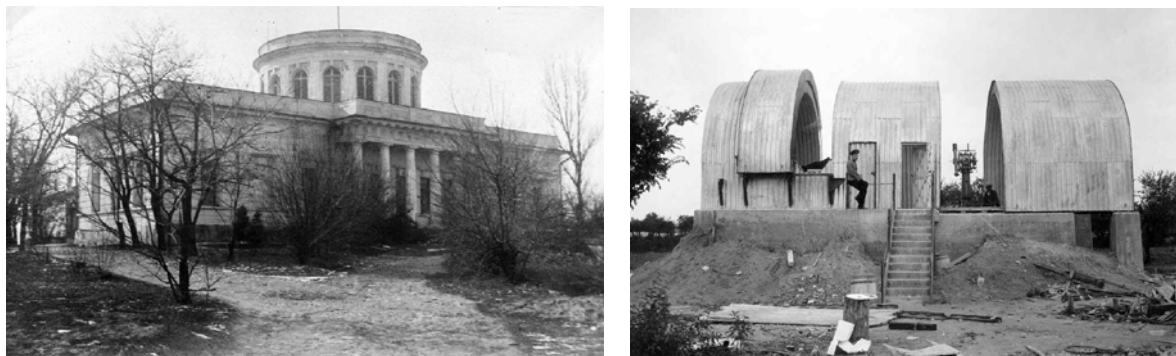


Рис. 2. Главное здание и павильон меридианных инструментов в первой половине XX века.

Потрясения в жизни общества, связанные с военными и революционными событиями, негативно сказывались на работе Обсерватории. Планы по созданию 32-дюймового рефрактора оказались неосуществленными, в связи с кадровыми перестановками и заменами были свернуты астрографические и сейсмические работы, а в 1918 году Обсерватория оказалась в зоне боевых действий Гражданской войны, в результате чего власть в г. Николаеве переходила из рук в руки несколько раз. Катастрофическое положение возникло из-за отсутствия связи с Пулковской обсерваторией, что привело к полному отсутствию финансирования обсерватории. Поставленной на грань выживания Обсерватории удалось сохраниться благодаря огромным усилиям ее заведующего Б.П. Остащенко-Кудрявцева, направленным на открытие временных кредитов со стороны Украинского правительства, а впоследствии восстановлению связи с Пулковской обсерваторией и выделению кредитов начиная с 1923 года на восстановление и развитие со стороны Советского правительства.

В 1924-25 годах были проведены ремонтно-восстановительные работы в зданиях и павильонах. В апреле 1926 года по согласованию между Правительствами Украины и Российской Федерации состоялась передача Николаевского отделения в подчинение Наркомпросу Украины, при этом Пулковская обсерватория взяла на себя обязательства по руководству научной работой Обсерватории. В 1931 году в Обсерватории была организована Служба времени, вошедшая в Объединенную сеть Служб времени СССР. Новые организационные преобразования ожидали Обсерваторию в начале 1935 года — она была включена в систему учреждений Академии наук СССР как Отделение Главной астрономической обсерватории.

В годы Великой Отечественной войны Николаевскую обсерваторию постигла печальная участь немецкой оккупации с августа 1941 года по март 1944 года. Из-за отсутствия транспорта не были осуществлены планы по эвакуации сотрудников и ценного оборудования в г. Ташкент. По приказу немецкой комендатуры была возобновлена работа и получено финансирование за счет городского управления. Части немецких войск, временно располагавшиеся на обсерватории, занимались мелким грабежом. Благодаря прекрасному владению немецким языком, директору Леониду Ивановичу Семенову удалось убедить немецкое военное командование в том, что научная работа в обсерватории служит исключительно мирным целям увеличения общечеловеческой сокровищницы знаний, после чего на дверях обсерватории появилась табличка о том, что «Обсерватория находится под особой охраной Верховного командования вооруженных сил Германии». В целом, материальный ущерб, нанесенный зданиям и территории за время оккупации, оказался незначительным. Однако, суровые испытания выпали на долю сотрудников: у Л.И. Семенова на фронте без вести пропал сын, Г.К. Циммерман, немец по происхождению, в сентябре 1943 года вынужден был бежать в Полтаву, спасая свою жену еврейской национальности и детей от гибели.

Сразу же после освобождения г. Николаева Обсерватория активно включилась в реализацию планов по развитию астрономии в СССР. В сентябре 1951 года на основании постановления Президиума АН СССР и приказа директора ГАО 73-летний Л.И. Семенов передал руководство Обсерваторией новому заведующему — сотруднику Пулковской обсерватории Якову Ефимовичу Гордону.

Научная работа и штат Обсерватории

В 1913-16 годах Обсерватория принимала участие в Международной программе по созданию карты неба (международный конгресс в Париже по карте неба, апрель 1909 год). В программу наблюдений абсолютными методами фундаментальных звезд для николаевских инструментов были включены 1426 звезд Пулковского каталога плюс еще 478 звезд в зоне склонений от -10° до -30° . Наблюдения на вертикальном круге выполнял Б.П. Остащенко-Кудрявцев, на пассажном инструменте - адъютант-астроном Петр Иванович Яшнов, выпускник химического факультета Московского высшего технического училища, который проработал в Обсерватории с конца 1912 года по середину 1917 года.

Место наблюдателя на пассажном инструменте после отъезда П.И. Яшнова занял Николай Владимирович Циммерман, выпускник Одесского университета, работавший с сентября 1915 года сверхштатным астрономом в Пулкове. Он проводил наблюдения в Обсерватории до 1924 года. В помощь заведующему отделением для наблюдений на вертикальном круге Репсольда с мая 1918 года в качестве астронома-вычислителя был принят Богдан Казимирович Залесский, который из-за политической ситуации вынужден был в 1921 году вместе с семьей покинуть страну и нелегально перебраться в Польшу.

В тяжелые годы революционного и военного времени наблюдения каталога 1915.0 велись нерегулярно и для завершения были возобновлены в 1921-23 годах. Обработка каталога в связи с уходом основных исполнителей из Обсерватории затянулась на долгие годы, так что каталог прямых восхождений был опубликован только в 1927 году, а каталог склонений увидел свет лишь в 1940 году.

Для развертывания астрографических работ в 1914 году на должность астронома-вычислителя прибыл молодой пулковский астрофизик Иннокентий Андреевич Балановский, окончивший в 1910 году Петербургский университет. Из Пулкова был перевезен 6-ти дюймовый рефрактор Репсольда и установлен в приспособленной для него башне 9-ти дюймового рефрактора, увезенного Морским ведомством. Им выполнялись наблюдения короткопериодических переменных звезд, фотометрия скоплений h и χ Персея. К сожалению, в середине 1917 года из-за тяжелого положения Обсерватории И.А. Балановский был вынужден вернуться в Пулково.

С 1913 года под руководством П.И. Яшнова выполнялись сейсмические исследования по изучению деформаций земной коры под влиянием лунно-солнечного притяжения. Для этого в подвале главного здания было установлено два горизонтальных маятника Репсольда. С августа 1915 года после наладки и модернизации оборудования проводилась непрерывная регистрация сейсмограмм, но после отъезда П.И. Яшнова сейсмические работы были свернуты.

В 1917-25 годах в Обсерватории работал пулковский механик Генрих Андреевич Фрейберг-Кондратьев, автор перевезенного из Одессы пассажного инструмента. Под его руководством в Николаеве была создана механическая мастерская. Он был механиком на два южных отделения Пулкова и в 1925 году для установки метрового рефлектора фирмы Grubb переехал в Симеиз.

Заметный след в истории Обсерватории оставил Герман Карлович Циммерман, проработавший здесь более 50 лет. С 1915 года он участвовал в обработке наблюдений,

а после получения высшего образования в Николаевском институте народного образования в 1924 году он продолжил свою научную карьеру в должности адъюнкт-астронома, став основным наблюдателем на вертикальном круге. В 20-е годы участвовал в работах по модернизации вертикального круга с целью качественных улучшений в «системе инструмента». Эти работы были завершены наблюдением каталога абсолютных склонений 1925.0 для исследования системы.

С 1929 года совместно с Пулковской обсерваторией проводились большие ряды меридианных наблюдений для уточнения положений звезд фундаментального каталога NFK. В николаевскую зону включались звезды от полюса до -30° . В 1929-34 годах помощником заведующего в наблюдениях на пассажном инструменте был пулковский астроном Иван Наумович Язев, впоследствии перешедший на работу в Полтавскую обсерваторию. Наблюдения прямых восхождений были закончены Л.И. Семеновым в 1935 году, а склонений - Г.К. Циммерманом в 1936 году.

Начиная с 1939 года, на меридианных инструментах Обсерватории были начаты наблюдения дополнительных звезд FK3, прерванные войной. Они были возобновлены сразу же после освобождения г. Николаева Л.И. Семеновым и возвратившимся на обсерваторию Г.К. Циммерманом и окончены в 1945-51 годах.

Одновременно с каталожными наблюдениями на вертикальном круге проводились наблюдения Солнца и тел Солнечной системы. Однако результаты более 500 наблюдений 1914-21 годов, увезенные Б.П. Остащенко-Кудрявцевым в Харьков, пропали во время войны. Вновь начатые в 1929 году ряды наблюдений Солнца, Луны и планет продолжались до 1985 года и включают в себя более 8 тысяч наблюдений, половина из которых принадлежит Г.К. Циммерману.

В 1931 году была создана Служба времени, возглавить которую было поручено Таисии Семеновне Семеновой (супруге Л.И. Семенова), выпускнице Петербургских Высших женских курсов, проработавшей в Обсерватории с 1923 года до своей смерти в 1958 году. С 1938 года николаевская Служба времени принимала участие во всесоюзной и международной программах определения времени. Работавший в 1938-41 годах старшим астрономом М.Н. Стоилов наладил регулярный прием радиосигналов точного времени советских и зарубежных радиостанций. В результате николаевская Служба времени была включена в Объединенную сеть служб времени Советского Союза и много лет была одной из лучших по точности наблюдений.

В 1935 году Обсерватория приняла участие в кооперативной работе пяти советских и некоторых зарубежных обсерваторий по определению координат так называемых «геодезических звезд». Наблюдения прямых восхождений проводилось Семеновыми на пассажном инструменте Аскания-Верке, склонений - Г.К. Циммерманом на вертикальном круге. Пулковский астроном Н.В. Циммерман объединил результаты наблюдений в сводном каталоге, содержащем около 3000 звезд северного неба до 6-й звездной величины, который был опубликован уже после смерти Н.В. Циммермана его коллегами в 1948 году.

Заключение

Несомненно, что своим нынешним существованием и долголетием Обсерватория обязана преобразованию в начале XX века морской обсерватории в астрономическую. Не поменяв свой статус, вряд ли ей удалось бы выжить в пучине революционных и военных событий тех лет. С другой стороны, немаловажным оказался тот факт, что Николаевская обсерватория явилась одной из «наследниц» когда-то богатого и имеющего силу в Николаеве Морского ведомства, при разделе земель ей удалось получить и юридически закрепить за собой довольно большую территорию в центральной части города. Кроме того, нельзя отрицать положительной роли «родственной связи», которая суще-

ствовала между Николаевской и Пулковской обсерваториями, начиная с первых директоров Карла Кнорре и Вильгельма Струве. Оба директора, возглавлявшие Обсерваторию в первой половине XX века, Б.П. Остащенко-Кудрявцев и Л.И. Семенов, являлись воспитанниками Пулковской школы, привнесшими в Николаев ее традиции и обычаи. Именно их высокий дух, преданность делу служения науки и человеческая мудрость позволили сохранять обсерваторию в годы тяжелых испытаний и неоднократно возродить ее после времен упадка и разрухи.

В 2011 году на основе изучения архивных материалов авторами статьи опубликована книга «Николаевская обсерватория в первой половине XX века», в которой отражены основные этапы жизни, научной и научно-организационной деятельности директоров Николаевской обсерватории этого периода — Б.П. Остащенко-Кудрявцева и Л.И. Семенова [2].

Литература

1. Отчет за 1909-1910 год представленный Комитету Николаевской Главной астрономической обсерватории ее директором. СПб, 1910 г., 3.
2. *Г.И. Пинигин, Ж.А. Пожалова*, Николаевская астрономическая обсерватория в первой половине XX века, Николаев, 2011, 148 с.
3. Главная астрономическая обсерватория в Пулкове 1839-1917 гг., отв. ред. В.К. Абалакин, СПб, "Наука", 1994, 297-301.

NIKOLAEV OBSERVATORY IN THE FIRST HALF OF XX CENTURY

Pinigin G.I., Pozhalova Zh.A.

Research Institute "Nikolaev Astronomical Observatory", Nikolaev, Ukraine

In September 2013, there will be 100 years since the official opening of the southern department of Pulkovo Observatory in Nikolaev (Ukraine). It was organized on the basis of the Nikolaev Naval Observatory, established in 1821 for astronomical needs of the Black Sea Fleet. In the beginning of twentieth century, the work of the Nikolaev Naval Observatory has lost its role for the Black Sea Fleet because Sevastopol became the center of the Black Sea Fleet. In 1909, the Navy Department had proposed to transfer Nikolaev observatory to Pulkovo Observatory ownership for organization of astrometric studies in the south. The first half of the twentieth century was a hard time for our society, and plans for the arrangement and development of the department hadn't been fully realized. However, the observatory has been preserved as a scientific institution, and as a historical and architectural complex. Obviously, most of the credit belongs to the two directors of the Observatory, graduates of Pulkovo Observatory, – B.P. Ostaschenko-Kudryavtsev and L.I. Semenov. In these years, the observatory had taken part in the first international project "Carte du Ciel". Absolute catalogs of stars from observations at the Freiberg-Kondratyev transit instrument and Repsold vertical circle became a part of well-known fundamental catalogs FK series. The Time service, one of the best in the USSR, was established in the Observatory in 1931. One more objective of the Nikolaev department was the determination of the positions for Sun and solar system bodies.

ПАМЯТИ ИВАНА ФЕДОТОВИЧА КОРБУТА

Прудникова Е.Я., Соболева Т.В., Малкин З.М.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия



25 января 2012 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Ивана Федотовича Корбута, пулковского астрометриста, одного из основных организаторов и научных лидеров послевоенной пулковской службы широты.

Родом Иван Федотович из белорусской деревни Селец, лесного края, где все привыкли делать неторопливо и основательно. Эта основательность была присуща ему во всем — в стремлении к знанию, в учебе и работе, как среди лесов, так и под звездным небом, как за письменным столом, так и на стройплощадке или у телескопа. В 18 лет он женился на Вере Ивановне Статкевич, с которой прожил всю свою дальнейшую жизнь. Вскоре после этого Иван Федотович переехал в Бобруйск, где наряду с работой на Лесокомбинате учился на вечернем рабфаке, который и окончил в 1932 г.

А дальше — учеба на астрономическом отделении математико-механического факультета ЛГУ. Окончив его в мае 1937 г., в сентябре И.Ф. Корбут становится вычислителем, а вскоре младшим научным сотрудником Главной астрономической обсерватории АН СССР в Пулкове. Первые шаги в науке он делал, работая на 15-дюймовом рефракторе, а также на Большом пассажном инструменте. Для рефрактора он составил программу наблюдений двойных звезд, которую наблюдал с сентября 1937 до сентября 1939 г. и с сентября 1940 до июня 1941 г. Перерыв в наблюдениях был вызван финской кампанией, а окончание довоенного периода работы Ивана Федотовича — Великой Отечественной войной, которые он прошел с начала до конца, и за участие в которых был награжден орденом Красной Звезды и медалями.

Пройдя две войны, И.Ф. Корбут вернулся в январе 1946 г. в родную обсерваторию. Вернее, в то, что от нее осталось. В первый послевоенный год, как следует из Отчета ГАО, «Корбут закончил обработку 300 наблюдений двойных звезд, произведенных им в 1939–1941 гг. Большое количество времени потребовало составление вспомогательных таблиц, погибших во время войны» [1]. Поэтому его первая статья, посвященная результатам обработки этих наблюдений, была опубликована только в 1948 г. Надо учесть, что научная работа в те годы не могла идти в полную силу, потому что научные сотрудники ГАО активно участвовали в восстановлении разрушенной обсерватории, которое началось, фактически, еще до окончания войны.

Иван Федотович, одновременно с обработкой своих довоенных наблюдений, занимался тем, что по поручению дирекции осуществлял контроль за постройкой павильона для зенит-телескопа ЗТФ-135 (Зенит-телескоп Фрейберга с диаметром объектива 135 мм, изготовленный пулковским механиком Генрихом Андреевичем Фрейбергом в 1904 г.). Если вспомнить, что линия фронта проходила неподалеку от южной границы Обсерватории, то становится понятно, сколь трудны были задачи строителей, и как трудно было организовать работу наилучшим образом. К тому же требовалось благоустроить довольно обширную территорию.



С женой Верой Ивановной и дочерью Ириной.
1961 г.



На благоустройстве территории,
слева – Г.М. Тимашкова. 1950-е гг.

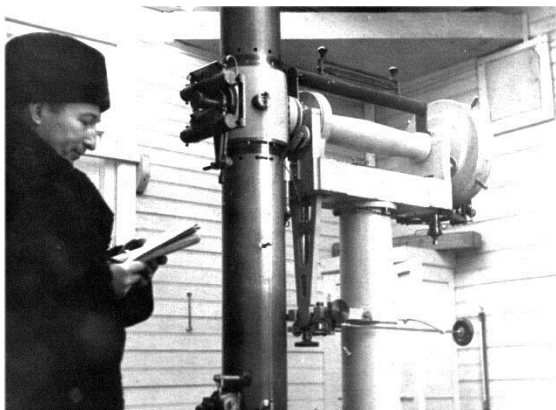
Корбуту поручалось и получение нового научного оборудования для возрождающейся обсерватории. В 1946–1947 гг. он трижды командировался для этого в Москву. А 30 апреля 1947 г. его премировали тысячей рублей «за выполнение в исключительно трудных условиях ответственного задания по доставке из Москвы ящиков с ценным трофейным оборудованием» [2]. Ивану Федотовичу помогали как его природные способности, так и военный опыт бывшего разведчика и штабиста [3] — он обладал умением ладить с людьми. Он, сам несуетливый, обстоятельный, добродушный, никого не подгонял, не распекал, но дело делалось как бы само собой. Официально обсерватория еще не открылась, а на ЗТФ-135, первом инструменте обсерватории, уже начались наблюдения. Служба широты возобновила свой — повсеместно признанный уникальным — ряд наблюдений, начатый в 1904 г. и прерванный в 1941 г. из-за войны.

Несколько лет, с осени 1947 г. Иван Федотович заведовал инструментом ЗТФ-135 и сам активно участвовал в наблюдениях. Другими наблюдателями были Софья Васильевна Романская и Владимир Иванович Сахаров. В личном активе Ивана Федотовича за это время — более 6 тысяч мгновенных широт и неофициально признанное в Пулковской обсерватории звание лучшего наблюдателя ЗТФ-135 в первый послевоенный период работы пулковской службы широты [4].

Кроме активной работы в группе ЗТФ-135, у Корбута были далеко идущие планы, результатом которых стали проект нового зенит-телескопа и организация новой широтной станции, появление которых было необходимо и взаимосвязано. Вопрос о создании отечественной службы широты для независимого определения координат полюса был поднят еще в 1917 г. на I-м Всероссийском астрономическом съезде. Инициатором обсуждения стал казанский астроном М.А. Грачев. Однако только в тридцатые годы были приняты конкретные решения о создании такой службы. Для ее полноценной работы требовалось организовать широтные наблюдения в восточной части страны. В связи с этим на Полтавскую гравиметрическую обсерваторию (ПГО) была возложена задача создания новой станции на Дальнем Востоке. Но вскоре разразилась Великая Отечественная война. Поэтому дальнейшие работы возобновились уже после Победы и возобновления наблюдений в Пулкове.

В 1953 г. началась подготовка к программе МГГ–МГС («Международный Геофизический год – Международный год Спокойного Солнца»), которая проводилась в 1957–1960 гг. В Благовещенск-на-Амуре отправились Б.А. Орлов и И.Ф. Корбут (ГАО), а также Н.И. Попов (ПГО). Позже в резолюции 12-й Астрометрической конференции (Пулково, 7-9 декабря 1955 г.) было записано: «Поручить Пулковской обсерва-

тории возглавить создание на Дальнем Востоке новой широтной станции на широте, близкой к широте Полтавской обсерватории» [5].



И.Ф. Корбут у ЗТФ-135 в Пулкове.



И.Ф. Корбут у ЗТЛ-180 в Благовещенске.
1963–1964 гг.

Но место для новой станции было выбрано еще в ноябре 1955 г., до начала конференции, поэтому на ней Корбут доложил, что станция будет располагаться в 1 км к юго-западу от г. Благовещенска. Однако, пока готовились к изданию Труды конференции, вблизи того места начали разрабатывать карьер, поэтому будущая станция попала в зону запыления. Б.А. Орлов отказался от выбранного места и подобрал другое, находящееся в 5-ти км к северу от прежнего. Эти факты были приведены в опубликованном докладе [6].

С началом МГГ–МГС новая широтная станция должна была начать наблюдения на новом широкоугольном зенит-телескопе ЗТЛ-180 (Зенит-телескоп Ленинградский с диаметром объектива 180 мм), техническое задание на который составили И.Ф. Корбут и В.И. Сахаров. В короткие сроки завод ГОМЗ (ныне ЛОМО) изготовил несколько инструментов этого типа, которые были установлены на многих обсерваториях СССР в Пулкове, Благовещенске, Москве, Киеве, Иркутске, Казани, Полтаве, Китабе, а также за границей в Тяньцзине (Китай) и Улан-Баторе (Монголия).

В Пулкове наблюдения на ЗТЛ-180 начались 1 июля 1957 г. В Благовещенске наблюдатели Н.М. Бахрах, Л.А. Бобрикова и Г.А. Панова под руководством Б.А. Орлова приступили к пробным наблюдениям в декабре 1957 г. Но вскоре произошла катастрофа: инструмент сгорел вместе с павильоном. Завод оперативно изготовил новый экземпляр ЗТЛ-180, регулярные наблюдения на котором начались 2 марта 1959 г. [7]. Заведующим Благовещенской широтной лабораторией (БШЛ) до 15 марта 1959 г., т.е. до начала регулярных наблюдений, оставался Б.А. Орлов. Затем до 16 апреля 1960 г. лабораторией заведовал В.П. Сельвинский, а во время прохождения им практики в Пулкове (25 марта – 12 июня 1959 г.) его замещал Е.И. Крейнин [8]. С 16 апреля 1960 г. заведующим БШЛ стал И.Ф. Корбут.

Это назначение состоялось после ряда событий. Возможно, Корбут считал, что выполнил свою часть задачи по созданию БШЛ, найдя место для станции. В его личном фонде есть документ, озаглавленный «В партбюро ГАО» [9]. В нем сказано: «Меня убеждали (М.С. Зверев, А.А. Михайлов, А.А. Немиро), что работа Благовещенской лаборатории является первостатейной важности, и что в случае нашей недоговоренности я после командировки возвращаюсь в отдел на прежнюю работу в той же роли». В конце концов, его убедили; состоялись три командировки, и о той работе, которая их наполняла до отказа, повествует этот документ. Вопреки приказу директора ГАО А.А. Михайлова Корбута, вернувшегося из командировки, «не включали в график

наблюдателей зенит-телескопов и в число лиц, участвующих в окончательной обработке и дискуссии наблюдений, выполненных на ЗТФ-135 по расширенной программе и за период МГТ–МГС на ЗТЛ-180 и ЗТФ-135, в которых я принимал непосредственное участие и являлся одновременно с В.И. Сахаровым руководителем этих тем».



С.В. Романская и И.Ф. Корбут
у ЗТФ-135. 1950-е гг.



И.Ф. Корбут, Г.С. Шептунов и М.С. Зверев у ЗТЛ-180
в Благовещенске. 1960-е гг.

Комиссия, созданная для проверки доли участия И.Ф. Корбута в этих темах, нашла, что его участие не меньше, чем В.И. Сахарова. В том периоде, где можно было счесть его участие меньшим, оно могло быть таковым в силу объективных причин (болезнь, командировка) [10]. Заведовал инструментом ЗТФ-135 И.Ф. Корбут, а затем С.В. Романская. Руководство же научной темой, связанной с широтными наблюдениями и изучением движения полюса, распределялось так: С.В. Романская — 1955–1957 гг., В.И. Сахаров — 1958 г., В.И. Сахаров и И.Ф. Корбут — 1959–1960 гг., В.И. Сахаров — 1961 г. В конце заявления И.Ф. Корбут просит партбюро поддержать его предложения по нормализации работы широтных групп ГАО и БШЛ, которые заключались в следующем: 1) Восстановить его права в отделе; 2) Выделить для БШЛ три штатных единицы; 3) Разделить зенит-телескопы в Пулкове по разным группам и назначить его «на одном из них заведующим».

Благодаря этому соломонову решению и была создана группа ЗТЛ-180. К тому же следует отметить и такой факт: в самый разгар этих событий, 29 июня 1961 г. Иван Федотович защитил в ЛГУ кандидатскую диссертацию на тему «Результаты новой обработки наблюдений, полученных на Большом пулковском зенит-телескопе с 1904 по 1915 гг.» Эта работа была опубликована позднее, в 1966 г.

В течение двух лет, с апреля 1960 г. по март 1962 г., И.Ф. Корбут заведовал Благовещенской лабораторией, хотя врачи запрещали ему работать при экстремальных температурах (климат в Благовещенске ярко выраженный континентальный). За это время он подготовил себе смену — Геннадия Спиридоновича Шептунова. Иван Федотович не только учил наблюдателей, но заботился о быте сотрудников.

Передав Благовещенскую станцию под начало Г.С. Шептунова, Иван Федотович продолжал оставаться ее куратором. В записке, посвященной 10-летию станции, он отмечает большую помощь, оказанную пулковскими сотрудниками Н.П. Годисовым, Е.И. Крейниным, Л.А. Бобриковой, Г.А. Пановой, Н.М. Бахрах, и заключает очень характерным для него высказыванием: «Кроме Г.С. Шептунова ведут регулярные наблю-

дения инженер В.П. Котлярчук и лаборант Л.Т. Тягло. Кроме наблюдателей следует особенно отметить Григорьевых Ефимию Ивановну и Иллариона Игнатьевича, которые добросовестно работают с момента организации лаборатории и переживают все достижения и невзгоды широтной станции» [11].



С однополчанином Фомичевым.



В Благовещенске.

Вернувшись из Благовещенска в марте 1962 г., И.Ф. Корбут возглавил вновь организованную группу наблюдателей на ЗТЛ-180, в которую вошли А.М. Шаравин и Н.Г. Стрелкова. Им были составлены две программы: основных наблюдений для определения широты и поправок к склонениям звезд и наблюдений широких шкальных пар для определения масштаба инструмента. Надо сказать, что и некоторые из других телескопов ЗТЛ-180 были привлечены к определению склонений звезд и дали обнадеживающие результаты. В Москве, в ГАИШе И.М. Калининой и в Казани, в АОЭ И.А. Урасиной были получены хорошие дифференциальные каталоги. На совещании, посвященном 25-летию БШЛ, И.А. Урасина представила сводный каталог широтных звезд, применение которого уменьшило систематические погрешности и увеличило точность получаемых результатов.

После окончания МГГ–МГС не один год прошел в попытках заменить стеклянную пластинку микрометра ЗТЛ-180 с нанесенными н штрихами-нитьями традиционной паутинной сеткой нитей — замена могла дать выигрыш примерно в 0.5 звездной величины (поглощаемых пластинкой) и, как следствие, возможность наблюдать более слабые звезды (слабее 9^m). В отчете И.Ф. Корбута за 1959–1963 гг. один из пунктов гласит: «Занимался методикой определения склонений звезд на широкоугольном зенит-телескопе» [12]. Только тот, кто имел дело с новым инструментом, может представить, сколько за этой фразой стоит времени и трудов, опасений и надежд. Но заменить пластинку сеткой паутинных нитей не удалось — во влажном ленинградском климате нити провисали. Это означало, что для обработки наблюдений кроме расстояния между нитями необходимо было определять и температурный коэффициент пластинки с наибольшей возможной точностью.

Регулярные наблюдения, начатые в 1967 г., были закончены в 1975 г. Используя наблюдения обеих программ, и зенитной в двух модификациях, и вспомогательной, дающей точное значение масштаба, как то и планировал Иван Федотович, его дипломантка и наблюдатель группы с 1967 г. Е.Я. Прудникова получила каталог звезд зенитной зоны и защитила диссертацию в 1988 г. уже под руководством В.А. Наумова.

Дважды И.Ф. Корбут был в заграничных командировках — в 1962 г. в Монголии (с 25 октября по 20 ноября) и в 1965 г. — в Китае. Особенно активна была его помощь монгольским астрономам. Не упуская ничего, он обстоятельно посвящал монгольских коллег во все детали работы широтной станции. Будущий заведующий широтной лабораторией Улан-Баторской обсерватории Д. Баасанжав защитил кандидатскую диссертацию в 1968 г. в Пулкове.

В январе 1973 г. И.Ф. Корбут, «преданный делу и упорный работник» [13], вынужден был уйти на пенсию по состоянию здоровья.

Не стало Ивана Федотовича 13 октября 1995 г. Похоронен он на Мемориальном кладбище Пулковской обсерватории, в которой он 35 лет трудился, на северном склоне холма, обращенном к городу, который он защищал.

Источники

1. Архив ГАО РАН (далее АГАО). Ф. 1. Оп. 1. Д. 98. Л. 9 об. (Отчет ГАО за 1946 г.).
2. АГАО. Ф. 1. Оп. 2. Д. 468. Л. 142. (Личное дело И.Ф. Корбута).
3. Там же. Л. 123. (Личный листок по учету кадров).
4. Там же. Л. 115, 129. (Приказ к 50-летию И.Ф.Корбута, январь 1952 г.; характеристика, 18.03.1969 г.).
5. Труды 12-й астрометрической конференции. Л., 1957. С. 426.
6. *Корбут И.Ф.* О выборе места для Широтной станции на Дальнем Востоке. Труды 12-й астрометрич. конф. СССР. Л., 1957. С. 311–313.
7. Зыков И.А., Прудникова Е.Я. Из истории становления отечественной Службы широты. Изв. ГАО. 2002. № 216. С. 597–608.
8. АГАО. Ф. 26 (И.Ф. Корбута). (И.Ф. Корбут. Доклад к 25-летию БШЛ. 1984 г.).
9. АГАО. Ф. 26. (И.Ф. Корбута). (Заявление И.Ф. Корбута в партбюро. 21.10.1961 г.).
10. АГАО. Ф. 1. Оп. 2. Д. 468. Л. 113, 114. (Заключение Комиссии. 30 06 1961).
11. АГАО. Ф. 26. (И.Ф. Корбута). (И.Ф. Корбут. «10 лет регулярных наблюдений в Благовещенской широтной лаборатории ГАО»). Доклад. 25.04.1969 г.).
12. АГАО. Ф. 1. Оп. 2. Д. 468. Л. 117. (Отчет за 1959–1963 гг.).
13. АГАО. Ф. 1. Оп. 2. Д. 50. Л. 41. (Характеристика. Март 1946 г.).

ИСТОРИЯ СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ОТЧЕТОВ ЕЁ ДИРЕКТОРОВ

Толбин С.В., Попов А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

С 60-х годов XIX века директора Пулковской обсерватории (О.В. Струве, Ф.А. Бредихин, О.А. Баклунд и др.) начали ежегодно составлять подробные отчеты о проделанных за прошедший год работах Обсерватории - наблюдениях небесных тел, исследованиях инструментов, новых приобретениях и изданиях научных трудов, в том числе в них были отражены сведения и о работе Пулковской Службы времени. С 1862 по 1889 г.г. все отчеты публиковались на немецком языке, а в дальнейшем они начали выходить и на русском языке. Передача точного времени из Пулкова для учреждений связи (Главной петербургской телеграфной конторы) и для других общегражданских целей, тесно связана с изобретением электрического проводного телеграфа и началом его широкого использования в России. В настоящей статье приведены сведения об истории работы Службы времени Пулковской обсерватории и выполнении одной из её главных задач – обеспечения точным временем нужд государства.

История службы времени Пулковской обсерватории началась фактически с момента открытия Обсерватории в 1839 г. В её Уставе были сформулированы основные цели и задачи, среди которых отмечалось также, что Обсерватория должна содействовать всеми мерами к усовершенствованию практической астрономии [1]. При этом предполагалось, что в Пулковской обсерватории будут вестись регулярные работы по определению времени (определению поправок часов из наблюдений), хранению времени и передаче точного времени всем его потребителям для общегражданских и государственных нужд. Для этих целей заказывались не только новые совершеннейшие оптические инструменты, но и другое необходимое оборудование и в первую очередь, конечно, самые точные часы. В письме председателя Комиссии по сооружению Главной обсерватории адмирала А.С. Грейга министру народного просвещения С.С. Уварову от 9 февраля 1838 г. указано, что: «господа Кессельс в Альтоне и Гаут в Санкт-Петербурге, занимающие ныне, без сомнения, первое место между мастерами часового дела, устроили для Пулковской обсерватории: первый – астрономические часы, а второй такие же часы и хронометр, в которых, по свидетельству астрономов Шумахера и Струве, достигнут верх совершенства» [2].

Подробно и полно история службы времени Пулковской обсерватории изложена в статьях известных пулковских астрономов Н.Н. Павлова (1902-1985) и В.А. Наумова (1929-2008) в юбилейных сборниках к 100-летию и 150-летию Обсерватории [3, 4]. В статье Н.Н. Павлова в частности отмечено, что: «Первые десятилетия существования Обсерватории работа службы времени заключалась главным образом в определении точных поправок часов для чисто астрономических целей». Передача времени производилась при помощи хронометров и вспомогательных часов, которые сравнивались с главными часами Обсерватории. «Но так как Пулковская обсерватория была теснейшим образом связана с русской геодезией и гидрографией, то естественно, что задача точного определения долготы, являвшаяся в то время одной из труднейших, не могла пройти мимо ее внимания. Основным вспомогательным инструментом при долготных определениях был хронометр... В среднем на Обсерватории находилось постоянно около 50 хронометров, которые ежедневно сличались с нормальными часами и между собой для изучения их хода» [3]. Необходимо отметить, что для определения долгот различных пунктов в Обсерватории постоянно организовывались также так называемые хронометрические экспедиции.

Открытие гальванизма в середине XVIII в. и изобретение проволочного электрического телеграфа (как впоследствии и появление радиосвязи) кардинально изменило методику и технологию передачи точного времени на большие расстояния, в том числе для нужд учреждений связи и общегражданских целей в России.

С 1862 г., в соответствии с Высочайше утвержденным новым Уставом Николаевской Главной Обсерватории, её Директора обязывались ежегодно представлять Комитету Николаевской Главной Обсерватории отчет о деятельности Обсерватории за минувший год и излагать меры, которые предполагается предпринять к усовершенствованию и развитию действий сего учреждения. Благодаря этому все выполненные за этот период наблюдения, основные произошедшие события, ученые путешествия, приобретения нового оборудования, перечень научных изданий и другое стали подробно описываться в этих ежегодных Отчетах. Все Отчеты вплоть до 1889 г. публиковались только на немецком языке и доступны, например, в Библиотеке ГАО. Однако в Архиве РАН сохранились Отчеты и на русском языке (с которых впоследствии делались переводы на немецкий язык). Усилиями сотрудников ГАО Н.Я. Московченко, Е.В. Полякова и др. все эти материалы были скопированы и переведены в цифровую форму, благодаря чему Отчеты стали более доступны для чтения и анализа.

В этих Отчетах Директоров Пулковской обсерватории содержится много интересной информации, в том числе и о работе службы времени Обсерватории того периода. Так в своем первом Отчете 1863 г. Отто Васильевич Струве (1819-1905), второй директор Пулковской обсерватории (Рис. 1), отмечал, что «Применение гальванизма к астрономическим наблюдениям представляет особенно важное нововведение в нашей Обсерватории. Начало тому уже положено было в 1861 году, но тогда оно едва ли вышло из пределов опытов, и ныне, только по получении более усовершенствованного регистратора Крилле, гальванизм, благодаря стараниям старшего Астронома Вагнера, приобрел у нас, так сказать, право гражданства». И далее О.В. Струве пишет: «В других статьях я еще возвращусь к этому предмету; здесь же нужно только упомянуть о приспособлениях для успешного применения гальванизма:

1. Нормальные часы Кессельса, установленные прежде в стене среднего зала, теперь переведены в подземный свод, где температура в продолжении суток не подвержена заметным переменам.
2. Прерывая и замыкая гальванический ток, нормальные часы управляют регистратором и кроме того в настоящее время двигают три циферблата, из которых один находится при меридианном круге, другой при большом рефракторе, третий обыкновенно при входе в комнату для исследования компенсации хронометров.
3. Регистратор Крилле и снаряд Морзе для телеграфических депеш установлены в теплой комнате близ пассажного инструмента.
4. При просвещенном содействии Телеграфного Управления Главная Обсерватория связана проволокою с главною телеграфною станцією в С.Петербурге.
5. Гальванические батареи, служащие для движения часов и для передачи депеш на большие расстояния, находятся частью в особом отделении подземного свода, и частью в ящике, установленном в западном коридоре».

Здесь же в разделе «Предложение о передаче времени в С.Петербург» О.В. Струве отмечает: «В заключение сего отчета имею честь представить на благоусмотрение Комитета вопросов о снабжении С.Петербурга точным пулковским временем, посредством электромагнитного телеграфа. Недосток в общедоступных часах, на показания которых можно было бы положиться с полною уверенностью, давно уже чувствовался в столице, в особенности же со времени большого развития движения по железным дорогам. Устройство телеграфической связи Главной Обсерватории с С.Петербургом даст нам теперь возможность устранить этот недостаток и тем не мало увеличить пользу

Обсерватории для общежития; но спрашивается, во-первых, соответствует ли подобный род деятельности цели учреждения Обсерватории?

На этот вопрос по первому взгляду следовало бы ответить отрицательно. Действительно подобная деятельность не подходит прямо ни под один из 4-х пунктов, выражающих в новом уставе цель учреждения Обсерватории. Но ежели не ограничимся одним общим удовлетворением публики, а расширим задачу до того, что например Флот и Генеральный Штаб могут проверить и исследовать свои часы и хронометры на месте, по сообщенному из Пулкова времени, то, несомненно, исполним возложенную на нас уставом обязанность содействовать географическим предприятиям в Империи.

Поэтому, кажется или мы должны вовсе отказаться от всякой обязанности в передаче времени, или устроить ее как можно совершеннее. Дабы иметь возможность несколько вернее судить о средствах, требуемых для исполнения сей задачи, я, по предложению Телеграфного Управления, воспользовался последним своим пребыванием на Гринвичской Обсерватории, которой деятельность в этом отношении с живейшею благодарностию признается во всей Англии, чтобы посоветоваться с г. Эри о сем предмете.

Из разговоров с почтенным моим другом я должен заключить, что для первого устройства не потребовалось бы значительных издержек со стороны Обсерватории, но что постоянный контроль не мало стеснил бы нас, а этот контроль или лучше сказать ответственность учреждения подобного нашему в точности сообщаемого времени, именно составляет главнейший повод к возложению такой обязанности на Главную Обсерваторию. Г. Эри, по моей просьбе, обязательно сообщил мне краткий обзор разных введенных им при Гринвичской Обсерватории способов передачи времени и управления часов, который может нам служить руководством при избрании удобнейшего способа к достижению различных представляющихся нам целей.

Если Комитет признает удобным, чтобы Обсерватория занималась этим предметом, то первый шаг, по моему мнению, должен состоять в приведении в известность потребностей разных прикосновенных ведомств и соглашения с ними о средствах к их удовлетворению».

Таким образом, в этом Отчете О.В. Струве обстоятельно описывает цели и побудительные мотивы снабжения С.Петербурга точным пулковским временем, посредством электромагнитного телеграфа и обсуждает вопрос об ответственности обсерватории, которая берется за это новое для неё дело.

Уже в следующем своем Отчете 1864 г. О.В. Струве констатирует, что: «С прошлого года передача времени от нас производится по электрическому телеграфу еженедельно, по воскресеньям, в Главное управление телеграфов; причем в точности передачи удостоверяются возвратным сигналом. Чтобы в промежутках между сигналами иметь время, верное до нескольких секунд, нынешним летом будут поставлены в здании телеграфного управления часы с маятником по способу Джонса (Jons) работы Ричи (Ritchie) в Эдинбурге, ходом которых будут управлять часы обсерватории [Дент I] посредством гальванического тока (Рис. 3). Такую услугу Главная обсерватория может оказать без значительного обременения для своих членов». Этими работами в основном занимался известный пулковский астроном Август Федорович Вагнер (1828-1886), ставший в дальнейшем вице-директором Обсерватории (1866 г.) (Рис. 2).

Постепенно решались все возникающие организационные и финансовые проблемы: «Постоянное наблюдение за исправностью гальванических батарей и приспособления, сделанного у регулирующих часов в Пулкове, а также возможно частое определение для этой цели времени, требует значительного труда и, конечно, никак не может входить в круг прямых обязанностей Обсерватории. Но телеграфное управление вышло уже с нами в переговоры о средствах к регулярному продолжению этого дела».

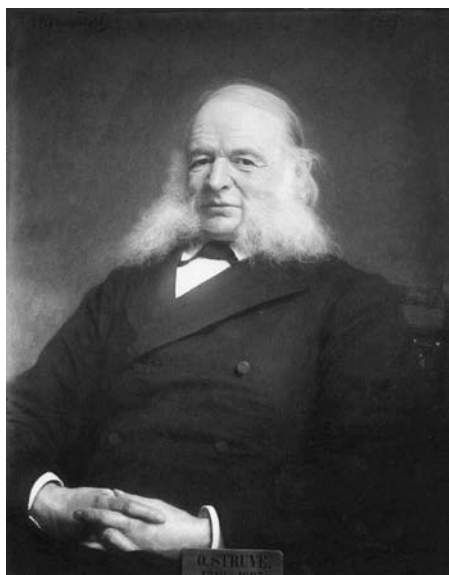


Рис. 1.



Рис. 2.

В дальнейшем работы по передаче времени из Пулкова в С.Петербург успешно продолжались и активно развивались (Отчет 1865 г.): «Дело это находилось, как и прежде, вполне в ведении г. Вагнера, при содействии конечно г. Брауэра [Георг Константинович Брауэр (1816-1882) - русский механик-оптик. С 1845 механик оптико-механической мастерской Пулковской обсерватории] для преодоления представляющихся разных технических затруднений. Упомянутые в прошлогоднем отчете часы Ричи, которые предназначены были служить в здании главного телеграфного управления для показания среднего Пулковского времени, получены из Англии уже осенью прошлого года при конце навигации. Но окончательная установка их не могла состояться ранее февраля месяца сего года, так как для того потребовались еще разные приспособления. Так, между прочим, часы Мустона в Пулкове, которые должны управлять ходом часов Ричи, находящихся в С.Петербурге, должны были быть устроены так 1) чтобы всегда можно было поставить их на среднее время, не трогая стрелок; 2) чтобы они через каждые две секунды посылали электрический ток в С.Петербург; 3) чтобы по особенному, производимому ими в начале каждой минуты, сигналу могли на телеграфной станции убедиться в полном согласии обоих часов между собою.

Кроме того, по желанию г. директора телеграфного управления, к часам Ричи прибавлено приспособление для замыкания, в известное мгновение каждого дня, гальванического тока, вследствие чего должен происходить пушечный выстрел в городе – устройство, находящееся уже с некоторого времени в правильном употреблении в большей части значительнейших английских городов.

Стоило немало труда и многих предварительных опытов, чтобы убедиться в исправном действии отдельных частей всех этих различных вспомогательных устройств; но, наконец, удалось вполне достигнуть желаемой цели. А чтобы передаваемое таким образом в С.Петербург время, всегда возможно ближе подходило к верному среднему времени по Пулковскому меридиану, необходимо почаще сравнивать часы Мустона с нормальными часами, которых поправка против местного звездного времени всегда очень точно известна, и вычислить поправку Мустона против среднего времени, держа её по возможности ближе к нулю...».

Как отмечено в Отчете 1867 г. «Работы, сопряженные с передачею времени, как в предыдущих годах, так и в последнем, производились здесь г-ном Вагнером, при содействии адъюнкта-астронома Фуса [Виктор Егорович Фус (1840–1915) – Русский аст-

роном. С 1839 г. один из четырех помощников директора Пулковской обсерватории, а с 1848 г. директор астрономической обсерватории в Вильно.]. Кроме часов, выставленных в здании Главного Телеграфного Управления, теперь регулируются и контролируются отсюда еще другие, помещенные в окне Публичной библиотеки, на углу Невского Проспекта и Большой Садовой. Контроль этот производится с помощью сигналов, передаваемых возвратно в Пулково самими часами этими, один раз в каждый час времени.



Рис. 3.



Рис. 4.

Таким образом, мы можем постоянно удостоверяться в этом, что они показывают Пулковское время верно, до малой дроби секунды; но так как на наружном циферблате этих часов находятся только часовая и минутная стрелки, то публика не в состоянии воспользоваться вполне их точностью; этого можно достигнуть только прибавлением секундной стрелки, или же введением какого-нибудь часто повторяющегося, точного сигнала. Теперь делаются приготовления к установке таких же часов в здании Окружного Суда, которые, подобным же образом, будут здесь контролироваться».

В статье Н.Н. Павлова сказано, что впоследствии контроль хода часов, посредством гальванической связи с часами Пулковской обсерватории «был распространен и на ряд других городских часовых установок: часы Петропавловской крепости, Публичной библиотеки, Электротехнического института, Главной физической обсерватории, Главной палаты мер и весов и др. управлялись часами Дент I (Рис. 3). Так как проверка времени во всех телеграфных учреждениях России производилась по часам Главной телеграфной конторы в Петербурге (Рис. 4), то можно сказать, что часы Дент I были основным стандартом времени для всей территории государства [3].

В работе службы времени Пулковской обсерватории по обеспечению точным временем всевозможных потребителей в С.Петербурге участвовали многие астрономы Обсерватории. Как отмечено в Отчете 1873 г. «Накопление других работ в последнее время побудило Г. Вагнера отказаться от дальнейшего управления работами, связанными с телеграфической передачей точного Пулковского времени в столицу. Производство этих работ передано теперь Адъюнкту-Астроному Ромбергу [Герман Яковлевич Ромбеог (1835-1898)], при содействии Г. Линдемана [Эдуард Эдуардович Линдеман (1842-1897)]».

В 1912 г. начался новый этап в работе службы времени. Изобретение радио позволило объединить обсерватории в единую службу. Осенью этого года директор Пулковской обсерватории академик О.А. Баклунд (1846-1916), участвовал в работе между-

народной конференции в Париже по вопросу о передаче времени по радио и был избран председателем Комиссии времени. При О.А. Баклунде в Пулкове были начаты наблюдения на двух переносных пассажных инструментах, которые получили название пассажных инструментов службы времени. В 1914 г. выполнено определение разности долгот Париж-Пулково по радиотелеграфу с помощью 100-киловаттной петроградской радиостанции. В течение 1914-1915 гг. радиосигналы времени Пулковской обсерватории принимались в Париже. Первая мировая и гражданская войны задержали развитие этих работ, но уже с 1 декабря 1920 г. Пулковская обсерватория начала вновь обеспечивать страну сигналами точного времени, а также ритмическими сигналами, содержащими 61 импульс в течение 60 секунд, через петроградскую радиостанцию «Новая Голландия», а с 25 мая 1921 г. и через московскую радиостанцию (Ходынскую). Этого удалось достигнуть в условиях гражданской войны и разрухи благодаря активной деятельности директора обсерватории, члена-корреспондента АН СССР А.А. Иванова (1867-1939), заведующего службой времени Н.И. Днепровского (1887-1944) и консультанта обсерватории, известного радиофизика А.П. Константинова (1895-1937). С 1921 г. моменты передач радиосигналов Пулковской службы времени публиковались в циркулярах Главной Российской астрономической обсерватории (ГРАО). Сигналы точного времени из Пулковской обсерватории передавались до 12 июля 1941 г.

Литература

1. Description de l'Observatoire Astronomique Central de Pulkova par F.G.W. Struve. St-Petersbourg, 1845.
2. Главная астрономическая обсерватория в Пулкове. 1839-1917 гг. Сборник документов – СПб: Наука, 1994. – 336 с.
3. Павлов Н.Н. Служба времени Пулковской обсерватории // 100 лет Пулковской обсерватории. – Л., 1945. – С. 135-146.
4. Наумов В.А. Изучение вращения Земли в Пулковской обсерватории // 150 лет Пулковской обсерватории. – Л.: Наука, 1989. – С. 121-136.

ON THE HISTORY OF TIME SERVICE OF THE PULKOVO OBSERVATORY FROM THE ANNUAL REPORTS OF ITS DIRECTORS

Tolbin S.V., Popov A.A.

Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, Saint Petersburg, Russia

As early as in the 60s of the 19th century the directors of Pulkovo Observatory (O.V. Struve, F.A. Bredikhin, O.A. Backlund and others) started to publish annual reports with detailed description of the work performed during the past year. They contained information about accomplishments of the Pulkovo Time Service. In 1862-1889 the reports were published in German, later they appeared in Russian as well. Our paper presents information about the history of the Time Service of Pulkovo Observatory and implementation of its most important task – to provide the state with correct time.

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИТРОФАНА СТЕПАНОВИЧА ЗВЕРЕВА

Хруцкая Е.В.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия.

16 апреля 2013 года исполняется 110 лет со дня рождения выдающегося российского астрометра, члена-корреспондента Академии наук СССР, доктора физико-математических наук, профессора М.С. Зверева. Основным этапам жизненного пути и вкладу М.С. Зверева в развитие фундаментальной астрометрии посвящена эта статья.

Митрофан Степанович Зверев родился 16 апреля 1903 г. в г. Воронеже и был шестым ребенком в семье священника Стефана Егоровича и Александры Михайловны Зверевых. Все дети в семье Зверевых получили светское образование, обучаясь в гимназиях, а иностранным языкам и музыке дома. Огромная заслуга в этом принадлежала их матери, Александре Михайловне.

Начало 20 века и послереволюционный период оказался неблагоприятным для семьи Зверевых. В 1918 г. умерла Александра Михайловна, а в 1920 г. от тифа скончался и Стефан Егорович. Из семи детей в живых остались трое младших: Ольга, Митрофан и Алексей.

Трудовая деятельность М.С. Зверева началась в Воронежском Государственном университете, куда его приняли на должность метеоролога-наблюдателя в 1919 г. Здесь Митрофан Степанович знакомится с астрономией и с университетского балкона в небольшой любительский телескоп с увлечением наблюдает Луну, планеты и звезды. Осенью 1920 г. М.С.Зверев поступает на физико-математический факультет Воронежского университета и одновременно занимается в музыкальном училище по классу рояля. В 1923 г. после успешного окончания музыкального училища Митрофан Степанович был откомандирован в Московскую консерваторию для продолжения музыкального образования.

Студенту консерватории (а обучался он у выдающегося пианиста профессора К.Н. Игумнова) приходилось самостоятельно “зарабатывать на жизнь”, давая уроки музыки и обеспечивая музыкальное сопровождение немых фильмов. В 1926 г. М.С. Зверев навсегда связал свою судьбу с Елизаветой Михайловной Быловой, с которой был знаком еще по Воронежу. В 1929 г. консерватория была успешно закончена, но карьере профессионального пианиста Митрофан Степанович предпочел астрономию и поступил на третий курс механико-математического факультета МГУ.

Еще до окончания университета М.С. Зверев устраивается на работу в Главное геодезическое управление в качестве техника второго разряда, а позже становится научным сотрудником Сектора меридианных наблюдений ГАИШ.

Первые работы М.С. Зверева в ГАИШ были связаны с наблюдениями на меридианном круге по коллективной программе “геодезические звезды” под руководством профессора Н.В. Циммермана. Не были забыты и юношеские увлечения переменными звездами. М.С. Зверев активно участвует в работах Сектора переменных звезд ГАИШ (руководитель профессор С.Н. Блажко). Благодаря тщательно выполненным наблюдениям и детальному анализу полученных результатов материал по переменным звездам приобрел научную ценность, и в 1938 г. Митрофану Степановичу была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации.

Еще одно направление довоенных работ М.С. Зверева связано с гравиметрией и геодезией. В 1936 г. М.С. Зверев организовал экспедицию на Кавказ и лично участво-

вал в определении широты и долготы на 15 пунктах триангуляции первого класса и 10 пунктах – второго класса.

В ноябре 1938 г. по инициативе М.С. Зверева и П.П. Паренаго в Пулкове было созвано совещание (3-я астрометрическая конференция СССР) по проблеме создания каталога слабых звезд (КСЗ). С основным докладом на нем выступил М.С. Зверев. В докладе был намечен общий план многолетней работы, особо подчеркивалась необходимость кооперативной работы. Обращалось внимание на необходимость подключения к работе обсерваторий Южного полушария, путем обсуждения научных проблем КСЗ по линии Международного астрономического союза. По сути, это была реанимация идеи о создании каталога слабых звезд, предложенная еще в 1932 г. на Первой астрометрической конференции в Пулкове пулковскими астрономами Б.П. Герасимовичем и Н.И. Днепровским. После этого совещания центр тяжести всех работ по КСЗ сосредоточился ГАИШ, которому было поручено составление списков звезд северного неба для будущей программы наблюдений.

С начала 1941 г. М.С. Звереву пришлось уделить значительное время вопросам реорганизации Службы времени ГАИШ, руководителем которой он был назначен. Начавшаяся в июне 1941 г. Великая Отечественная война значительно ускорила эти работы. В октябре 1941 г. основное оборудование Службы времени ГАИШ и значительная часть персонала были эвакуированы из Москвы в Свердловск, где М.С. Звереву было поручено организовать работу Службы времени. Вся работа в Свердловске была подчинена законам военного времени. Астрономы должны были обеспечивать точным временем нужды фронта и народного хозяйства. Поставленная задача была успешно выполнена. К концу 1942 г. свердловская Служба времени превзошла по точности немецкую службу “Neuen”, получив точность средней дневной вариации $0^{\prime\prime}.007$, результат очень впечатляющий по тем временам.

После возвращения из Свердловска М.С.Зверев продолжил свою работу в ГАИШ. Накопленный материал наблюдений и его глубокий анализ, стали предметом докторской диссертации Митрофана Степановича (“Исследование результатов работы Службы времени ГАИШ в 1941-1945 гг.”), которая была им успешно защищена в 1947 г.

С 1946 по 1951 гг. М.С.Зверев – заместитель директора ГАИШ. Научная деятельность Митрофана Степановича не ограничивалась только Советским Союзом. Общась с зарубежными коллегами, М.С.Зверев пропагандирует план КСЗ. Составленные в ГАИШ списки КСЗ-I (5120 звезд в зоне $+10^{\circ}\div-30^{\circ}$) и КСЗ-II (10235 звезд в зоне $+30^{\circ}\div-30^{\circ}$) были разосланы в 14 советских и 44 зарубежных обсерватории.

В ноябре 1951 г. по приглашению директора Пулковской обсерватории А.А. Михайлова М.С. Зверев переезжает в Пулково и становится заместителем директора по научной работе в Пулковской обсерватории. С тех пор жизнь Митрофана Степановича неразрывно связана с Пулковской обсерваторией. Здесь перед М.С.Зверевым открылось широкое поле деятельности, а поскольку создание звездных каталогов всегда занимали значительное место в работах Пулковской обсерватории, проблема КСЗ сразу стала приоритетной задачей. К ее решению подключились ведущие пулковские астрометристы А.А. Немиро и А.Н. Дейч. Уже в 1952 г. на VIII Генеральной Ассамблеи МАС пулковскими астрометристами были представлены два доклада: М.С. Зверева “Каталог слабых звезд как астрометрическая проблема” и А.Н. Дейча “Использование внегалактических объектов для построения абсолютной системы собственных движений”. Резолюция, принятая VIII съездом МАС, подтвердила актуальность выдвинутой проблемы, а М.С. Зверев был избран председателем комиссии N 8 МАС (на этом посту он оставался до 1958 г.). В наблюдения по программе КСЗ приняли участие все обсерватории Советского Союза, а также ряд зарубежных обсерваторий (Вроцлавская, Бухарестская, Белградская).

Идея КСЗ, выдвинутая советскими астрометристами, была весьма прогрессивной в начале 50-х годов прошлого столетия, и не удивительно, что аналогичная программа была выдвинута в 1955 г. американскими астрометристами во главе с доктором Ф. Скоттом (программа AGK3R). Конечной целью обеих проектов было распространение общепринятой фундаментальной системы на слабые звезды. Но американский проект был более легок в исполнении, а критерии отбора звезд для меридианных наблюдений были менее жесткими. После длительной дискуссии компромисс был достигнут – все звезды КСЗ были включены в наблюдательный список со значком Z (звезды Зверева) и IX съезд МАС рекомендовал обсерваториям приступить к реализации этой программы. Всего в работе было задействовано 10 обсерваторий, их советских – Николаевская и Пулковская.

М.С. Зверев принял самое активное участие в наблюдениях по этой программе на меридианном круге Тепфера в Пулкове и в последующей обработке результатов наблюдений. Итогом этой международной работы стал сводный каталог слабых звезд северного неба AGK3R, составленный в Вашингтонской обсерватории.

Уже в период создания каталога AGK3R был предложен план его распространения на южное полушарие, в результате чего возник список южных опорных звезд (SRS), составленный на Капской обсерватории (доктор R. Stoy). При подборе звезд учитывались критерии, принятые в КСЗ. Для организации этих работ была создана специальная комиссия под предводительством Д. Брауэра (США), в состав которой вошел и М.С. Зверев. Программа SRS преследовало ту же цель, что и AGK3R, а именно создание опорной системы для фотографических работ.

На конференции в Цинциннате, (май 1959 г) присутствующие там М.С. Зверев и А.А. Немиро, объявили о планируемой экспедиции советских астрометристов в южное полушарие с целью участия в наблюдательных работах по программам SRS и BS (Яркие звезды). Местом наблюдения была выбрана обсерватория Серро-Калан, вблизи города Сантьяго (Чили). Предусматривалось изготовление 2-х новых инструментов: большого пассажного инструмента классического типа и фотографического вертикального круга, конструкция которого была разработана М.С. Зверевым. Массовые дифференциальные наблюдения должны были проводиться на меридианном круге обсерватории Серро-Калан.

В октябре 1962 г. первая группа пулковских астрометристов прибыла в Чили. Митрофан Степанович оставался бессменным руководителем работ в течение 11 лет и дважды за время существования экспедиции (1962-1963 гг., 1964-1966 гг.) работал как наблюдатель на меридианном круге. По количеству выполненных наблюдений среди советских астрометристов, участвовавших в программе SRS, он занял первое место.

В 1967 г. в Чили был установлен двухменисковый телескоп системы Максудова, на котором под руководством А.Н. Дейча развернулись фотографические работы, в первую очередь – фотографирование площадок неба с галактиками.

Всего в наблюдениях по программе SRS приняли участие 13 обсерваторий (из советских – Николаевская и Пулковская экспедиция). Создание сводного каталога было поручено двум обсерваториям – Пулковской и Вашингтонской.

Благодаря работам Пулковской экспедиции в Чили, впервые пулковские методы абсолютных определений были распространены на южное полушарие. Абсолютные прямые восхождения курировались А.А. Немиро, абсолютные склонения – В.А. Науомовым и Б.К. Багильдинским.

Что касается обработки дифференциальных определений координат звезд, то выяснилось, что фундаментальная система FK4 в южном полушарии обладает значительными систематическими ошибками, которые особенно сильно проявились в прямых восхождениях (ошибки вида $\Delta\alpha_\delta$). Их наличие сделало невозможным использовать

классический способ обработки дифференциальных наблюдений. Положение спас, разработанный М.С. Зверевым, квази-абсолютный способ обработки дифференциальных наблюдений (АЖ 1969, т.46, вып.6). Метод предполагал отказ от строгого воспроизведения фундаментальной системы и позволял обрабатывать наблюдательный материал в системе, слабо зависящей от фундаментальной системы (в квази-инструментальной системе). Применение этого метода позволило обработать большой материал наблюдений по международным программам SRS, BS, DS, полученный в южном полушарии, и выявить реальные систематические ошибки фундаментальной системы FK4 (рис. 1).

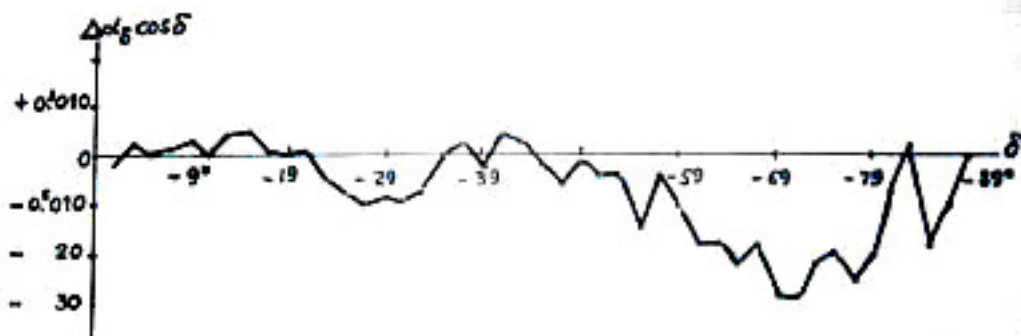


Рис. 1. Систематические ошибки вида $\Delta\alpha_\delta \cos \delta$ каталога FK4 в южном полушарии. Этот результат был опубликован в ведущих астрономических журналах всего мира.

Окончательная версия сводного каталога SRS была получена в конце 1987 г., ее авторы – вашингтонские и пулковские астрометристы. В целом, меридианные наблюдения 1956-1973 гг. по программам AGK3R и SRS, по сути, реализовали в международном масштабе идеи КСЗ, хотя и в несколько трансформированном виде.

70-е годы прошлого века ознаменовались появлением за рубежом новых полуавтоматических и полностью автоматических меридианных инструментов. Пулковская обсерватория не осталась в стороне и выступила инициатором модернизации имеющегося парка астрометрических инструментов Советского Союза. По-видимому, из-за скудности финансирования обсерватории проводили модернизацию собственными силами. Такой подход не оправдал себя, и советская астрометрия лишилась тогда почти половины своих инструментов. Потери понесла и Пулковская обсерватория.

Чтобы возродить астрометрические наблюдения в Советском Союзе, а наблюдениям Митрофан Степанович всегда придавал первостепенное значение, в середине 70-х годов им была предложена Специальная программа астрометрических наблюдений. Программа включила в себя списки звезд, представляющих интерес для звездной астрономии, а также звезды вблизи радиоисточников (DS, HLS, RRS).

В эти же годы М.С. Зверев ищет “альтернативу Чили” с целью продолжить астрометрические работы в южном полушарии. В ноябре 1977 г. на основании его доклада Бюро отделения общей физики и астрономии АН приняло решение о создании Экспедиции ГАО АН СССР в Боливию. Впоследствии по материалам этой экспедиции в ГАО был создан фотографический каталог звезд южного неба ФОКАТ-Ю, содержащий более 200 тысяч звезд.

Дальнейшее развитие наблюдательных работ М.С. Зверев связывал и с созданием высокогорной базы на территории СССР. В 1983 г. при его активной поддержке и участии была создана Астрометрическая наблюдательная база на Горной станции ГАО вблизи г. Кисловодска, которая продолжает работать и в настоящее время.

Говоря о М.С. Звереве, нельзя не упомянуть его педагогическую деятельность. Его монография “Фундаментальная астрометрия”, опубликованная в двух томах

”Успехов астрономических наук” (часть I, 1950 г., т. V; часть II, 1954 г., т. VI), известна всем астрометристам как в России, так и за ее пределами. Преподавательская работа Митрофана Степановича началась с 1939 г. в Московском Государственном университете, сначала в должности доцента, а потом и профессора по кафедре астрометрия. С 1952 по 1959 гг. и с 1970 по 1982 гг. Митрофан Степанович читает курс фундаментальной астрометрии в Ленинградском Государственном университете. С 1970 г. он заведует кафедрой астрометрии в ЛГУ. Помимо работы со студентами М.С. Зверев неизменно руководил аспирантами. Много сил и времени было отдано им и подготовке чилийских астрономов.

М.С. Зверев был страстным пропагандистом астрономических знаний. С 1955 по 1975 г. – М.С. Зверев председатель, а затем заместитель председателя общества “Знание”. С 1981 по 1986 гг. – председатель Ленинградского отделения ВАГО.

Популярность М.С. Зверева среди астрометристов была огромной. И дело здесь не только в его научном авторитете, людей привлекали его чисто человеческие качества. В нем чувствовался “размах”, он не был мелочным, не был злопамятным, он умел искренне радоваться чужому успеху. Он просто “заражал” своим энтузиазмом, находясь рядом с ним, хотелось работать. Митрофан Степанович был очень доброжелательным человеком и всегда старался помочь, когда к нему обращались с той или иной проблемой. Особенно это чувствовали на себе астрометристы из других обсерваторий. Без преувеличения можно сказать, что для астрометристов из провинции Митрофан Степанович был самым популярным и любимым пулковским астрономом. С одинаковым вниманием и уважением к мнению собеседника он общался и с маститыми учеными и со вчерашними студентами, что очень привлекало к нему молодых сотрудников.

Это был очень жизнелюбивый, эмоциональный и увлекающийся человек. Сам Митрофан Степанович часто говорил: “кроме астрометрии, у меня есть три увлечения и все на букве “Ф” – фортепьяно, филателия и фотография”. Он был профессиональным фотографом, сделавшим массу фотографий на астрономические темы. Он собрал уникальную коллекцию земских марок, а его музыкальные вечера в ГАИШ, Пулковской обсерватории и во время Чилийской экспедиции запомнились всем, кто его слышал.

Научная деятельность М.С. Зверева была отмечена рядом правительственных наград: орденом Ленина (1954 г.), орденом “Знак Почета”, двумя орденами “Трудового Красного знамени”, медалями “За оборону Москвы”, “За доблестный труд в Великой Отечественной войне”, а также несколькими юбилейными медалями. За большой вклад в развитие астрометрии астероиду N 2323 присвоено имя Митрофана Степановича – “Zverev” (рис. 2).



Рис. 2. ПЗС-кадр с изображением астероида N 2323 “ZVEREV”.

Последние годы жизни М.С. Зверева не были безоблачными. В 1985 г. ушла из жизни замечательная женщина, верный друг и помощник Митрофана Степановича – Елизавета Михайловна. Связав свою жизнь с Пулковской обсерваторией и искренне любя ее, Митрофан Степанович глубоко переживал то, что, начиная с 80-х годов, пулковская астрометрия стала терять свои лидирующие позиции. Причин было много: здесь и устаревающий парк астрометрических инструментов, и недостаточное финансирование для его обновления и, подчас, поспешные утверждения о ненужности наземной астрометрии в связи с запуском астрометрического спутника HIPPARCOS.

По прошествии времени стало очевидно, что результаты, получаемые с помощью космических аппаратов, не обесценивают полностью наземные наблюдения (по крайней мере, до получения каталога GAIA). Подтверждением этого является интерес к старым каталогам для уточнения собственных движений звезд и международные проекты, связанные с оцифровкой и новой редукцией старых фотографических наблюдений с целью получения длительных рядов наблюдений для уточнения теорий движения спутников планет и астероидов. При построении современных высокоточных каталогов, содержащих миллионы звезд, востребованными оказались и методические разработки М.С. Зверева, позволяющие выявить и уменьшить влияние локальных систематических ошибок опорных систем (каталоги в сглаженной опорной системе).

Трагическая случайность оборвала жизнь М.С. Зверева 17 ноября 1991 года. Это была яркая, насыщенная жизнь, в которой были и блестящие успехи, и отдельные неудачи, были недоброжелатели и целая плеяда единомышленников. М.С. Зверев навсегда вошел в историю Астрономического института им. П.К. Штернберга и Пулковской обсерватории. И в этом смысле, Митрофан Степанович не умер, его жизнь продолжается в его детях и внуках, многочисленных учениках и соратниках по работе.

Расширенный текст статьи можно посмотреть на сайте Лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН по адресу: www.puldb.ru/zverev. Там же можно послушать фрагменты из фортепьянного концерта М.С. Зверева, записанного в 1983 году.

THE 110th ANNIVERSARY OF MITROPHAN STEPANOVICH ZVEREV

Khruetskaya E.V.

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia.

April 16, 2013 will be 110 years since the birth of the outstanding Russian astronomer, corresponding member of the Academy of Sciences of USSR, of the doctor of the physical and mathematical sciences, of the professor of Zverev. This article is dedicated the main stages of the life of Zverev and his contribution to the development of fundamental astrometry.

The advanced text of the article can be found at site of the Laboratory of Astrometry and Stellar Astronomy of Pulkovo observatory via www.puldb.ru/zverev. Ibid you can listen the fragments from the piano concerto of Zverev M.S, recorded in 1983.

СПИСОК АВТОРОВ

- Абалакин В.К.* 555
Авдюшев В.А. 201
Авраменко А.Е. 13
Агладзе Е.В. 429
Aller H.D. 71
Aller M.F. 71
Андрук В.Н. 501, 517
Архаров А.А. 213
Афанасьева А.А. 453
Бабенко М.А. 367
Баканас Е.С. 19
Балега Ю.Ю. 189
Барабанов С.И. 19
Бахолдин А.В. 93
Бахтигараев Н.С. 47
Башакова Е.А. 29
Бережной А.А. 163, 395, 547
Бондаренко Ю.С. 169, 173
Вавилов Д.Е. 179
Вараксина Н.Ю. 23
Васильев А.А. 287
Васильева Т.А. 243, 383
Василькова О.О. 185, 383, 453
Верещагина И.А. 29, 65, 189, 329
Виноградова Т.А. 195
Volvach A.E. 71
Volvach L.N. 71
Воротков М.В. 131
Галушина Т.Ю. 201, 523
Глебова Н.И. 207, 563
Гнедин Ю.Н. 329
Головня В.В. 517
Горшанов Д.Л. 29, 65, 189, 213, 453
Горшков В.Л. 101, 105
Гребецкая О.Н. 35
Гусев А.В. 479
Гусева И.С. 35, 219, 461, 495
Девяткин А.В. 29, 65, 329
Дементьева А.А. 41, 541
Дёмин С.А. 355, 435
Дремова Г.Н. 361
Дьяченко В.В. 189
Емельяненко Н.Ю. 225, 231
Ермаков Б.К. 35, 495
Ершов В.Н. 237
Ефимова Н.В. 213
Железнов Н.Б. 569
Жучков Р.Я. 389
Заббарова Р.Р. 23
Загретдинов Р.В. 479
Замарашкина М.Д. 249
Захожай В.А. 367, 467
Зиновьев С.В. 29
Иванов А.В. 29
Иванов Г.А. 373, 501
Ижакевич Е. 501
Измайлов И.С. 311, 377
Йулдошев К.Х. 517
Казанцева Л. 501
Калинин С.И. 547
Калиниченко О.А. 243, 383
Карашевич С.В. 29
Каххаров Б.Б. 423, 517
Кащеев Р.А. 479
Киселев А.А. 383, 441
Киселева Т.П. 243, 311
Кияева О.В. 383, 389
Космодамианский Г.А. 249, 305
Кочетова О.М. 255, 259, 341, 347
Крючков С.В. 19
Кузнецов В.Б. 255
Куликова А.М. 395
Куприянов В.В. 29, 93
Кутленков М.В. 23
Ларионов В.М. 213
Левитская Т.И. 575
Левкина П.А. 47
Липовка А.А. 53
Липовка Н.М. 53
Литвиненко Е.А. 35
Лих Ю.С. 35, 219
Лосовский Б.Я. 13
Лукашова М.В. 207
Львов В.Н. 29, 65, 93, 185
Майгурова Н.В. 413, 541
Максимов А.Ф. 189
Малкин З.М. 59, 111, 115, 119, 401, 507, 511, 581, 601
Малков О.Ю. 407, 473
Малоголовец Е.В. 189, 389

- Маркелов С.В.* 93
Мартынов М.В. 413
Мартюшева А.А. 29, 329
Медведев Ю.Д. 173, 179, 255
Мельников А.В. 265, 417
Миллер Н.О. 125, 131, 581
Московченко Н.Я. 589
Муминов М.М. 423, 517
Мышев А.В. 269, 275
Нарижная Н.В. 75, 81, 541
Нароенков С.А. 523
Наумов К.Н. 29
Нефедьев Ю.А. 23, 355, 435, 479
Нецветаева Г.А. 207
Никифоров И.И. 429
Николенко И.В. 19
Орлов В.В. 389, 417
Павлов Д.А. 281
Павловский С.Е. 35
Пакуляк Л. 501
Панищев О.Ю. 355, 435
Парийская Е.Ю. 207
Passarge М. 529
Пашкевич В.В. 137
Петров Н.А. 287
Петрова С.Н. 29, 65, 329
Пинигин Г.И. 413, 541, 555, 595
Питьев Н.П. 293
Питьева Е.В. 293, 299, 563
Пожалова Ж.А. 595
Поляков Ю.С. 485
Полякова Г.Д. 535
Попов А.А. 607
Порошина А.Л. 249, 305
Прудникова Е.Я. 581, 601
Pushkarev А.В. 71
Растегаев Д.А. 189
Романенко Л.Г. 383, 441
Ромас Е.Н. 29
Рощина Е.А. 189, 311
Рыльков В.П. 75, 81, 317, 447, 541
Рыхлова Л.В. 87
Сасюк В.В. 479
Свешников М.Л. 207, 563
Сергеев А.В. 47
Сидоренков Н.С. 143
Скрипниченко В.И. 207, 281
Скурихина Е.А. 119
Слесаренко В.Ю. 29
Смирнов С.С. 101, 185
Смирнов С.С. 323
Соболева Т.В. 581, 601
Соков Е.Н. 29, 189, 329
Талалаев И.В. 275
Тимашев С.Ф. 435, 485
Тимошкова Е.И. 335
Тиссен В.М. 149
Толбин С.В. 607
Толчельникова С.А. 93
Фишков А.А. 281
Халявина Л.Я. 155
Ховричев М.Ю. 377, 395
Хруцкая Е.В. 377, 395, 547, 613
Цекмейстер С.Д. 29, 93, 185
Цуканова Г.И. 93
Чазов В.В. 47
Чантурия С.М. 243
Чернетенко Ю.А. 259, 341, 347
Чубей М.С. 93
Шатохина С. 501
Шахт Н.А. 453
Шевченко И.И. 417
Шеляков М.А. 523
Шерстюков О.Н. 479
Шор В.А. 255, 259, 347
Щербакова Н.В. 105
Эраль С.Ф. 555
Ясько П.П. 173