

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ**

№ 218

Санкт-Петербург
2006

Редакционная коллегия:

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

член-корреспондент РАН **В.К. Абалакин**
доктор физ.-мат. наук **А.С. Баранов**
доктор физ.-мат. **Ю.В. Вандакуров**
доктор физ.-мат. наук **Ю.Н. Гнедин**
кандидат физ.-мат. наук **А.В. Девяткин**
доктор физ.-мат. **В.А. Дергачев**
доктор физ.-мат. наук **Р.Н. Ихсанов**
кандидат физ.-мат. наук **В.И. Кияев**
кандидат физ.-мат. наук **Ю.А. Наговицын** (ответственный секретарь)
кандидат физ.-мат. наук **М.Л. Свешников**
доктор физ.-мат. наук **А.А. Соловьев**
доктор физ.-мат. наук **Е.В. Хруцкая**

Зав. редакцией **Е.Л. Терёхина**

Редколлегия благодарит всех рецензентов этого сборника
за проделанную работу

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

Редактор английского текста **И.Н. Воронина**

Компьютерная верстка оригинал-макета **Е.Л. Терёхиной**

ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ
№ 218

Утверждено к печати
Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН

ISBN

© Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2006



1935 – 2006

7 августа 2006 года на 72-м году жизни закончил свой жизненный путь известный российский ученый, главный научный сотрудник Пулковской обсерватории, член Международного астрономического союза и Европейского объединения солнечных обсерваторий, доктор физико-математических наук **Валентин Иванович Макаров**.

После окончания Ленинградского Государственного университета В.И.Макаров в 1959 году начал работать на Горной астрономической станции ГАО. В 1969 г. он защитил кандидатскую диссертацию, посвященную исследованию солнечных пятен, а в 1989 году - докторскую диссертацию, в которой было развито новое направление исследований солнечного цикла как глобального процесса активности на всех широтах. С 1984 года по 2000 год В.И. Макаров заведовал Кисловодской Горной станцией ГАО, а в 1985-2004 годах руководил отделом физики Солнца ГАО РАН.

В.И. Макаров широко известен в нашей стране и за рубежом как оригинальный и глубокий исследователь солнечной активности. Признание получили его работы по исследованиям солнечного цикла, полярной активности и крупномасштабного магнитного поля Солнца, а также природы солнечно-земных связей. В частности, им детально изучены процессы смены знака полярного крупномасштабного магнитного поля на основе созданных под его руководством Н-альфа магнитных карт, исследованы проявления активности в полярных зонах Солнца с 1960 по 2004 год, особенности крутильных колебаний в дифференциальном вращении короны, а также структура внутреннего магнитного поля Солнца. Всего В.И. Макаровым опубликовано более 200 научных работ по физике Солнца.

Валентин Иванович являлся инициатором создания и развития новых международных программ по использованию продолжительных временных рядов наблюдений Солнца на Горной астрономической станции ГАО, в обсерваториях Кодайканал (Индия), Медона (Франция), Китт-Пик (США).

В.И. Макаров был награжден Почетной грамотой РАН и профсоюза работников РАН, медалью в связи с 275-летием Академии. Он был лауреатом премии МАИК «Наука». В течение ряда лет В.И. Макаров входил в список выдающихся ученых России, представленных Президиумом РАН.

Светлая память о Валентине Ивановиче Макарове навсегда останется в наших сердцах.



1920 – 2006

14 августа 2006 года на 87 году жизни скончалась старший научный сотрудник Пулковской обсерватории, кандидат физико-математических наук член Международного астрономического союза, действительный член Германской академии естествоиспытателей "Леопольдина", **Зденка Ивановна Кадла**.

З.И. Кадла была зачислена в штат отдела фотографической астрометрии ГАО РАН младшим научным сотрудником в 1959 году. Фактически она работала в ГАО с 1948 г., не будучи ещё в штате обсерватории. С 1959 г. З.И. Кадла – старший научный сотрудник того же отдела, а с 1976 г. – руководитель темы по исследованию звездных скоплений в отделе физики звезд и галактик.

З.И. Кадла пришла в ГАО уже сформировавшимся научным сотрудником. За ее плечами – учеба в Горьковском Государственном университете (1937-1942), работа в спектральной лаборатории Горьковского автозавода инженером-исследователем (1941-1944), аспирантура при ГАИШ (1944-1947), работа в должности младшего научного сотрудника в Астрономическом Совете АН СССР (1947-1948), защита кандидатской диссертации (1951).

Разносторонность интересов, высокая квалификация, свойственная ей глубина проникновения в суть решаемых вопросов позволили З.И. Кадла внести важный вклад в совершенствование существующих методик обработки наблюдений, и тем самым получать результаты высокой точности

Особенно ярко эти черты проявились при исследовании звездных скоплений. Благодаря инициативе и энергии З.И. Кадла эта область исследования получила в Пулковское новое и весьма широкое направление. Многие идеи по физике звездных скоплений, которые разрабатывались в группе, руководимой З.И. Кадла, были высказаны ею раньше, чем они получили свое развитие за рубежом. Программы наблюдений выполнялись на крупнейших инструментах того времени: 6-м телескопе, 2-м телескопах Шемахинской обсерватории, обсерваторий Ондражейов в Чехии и Рожен в Болгарии.

Под руководством З.И. Кадла выполнен и защищен ряд диссертационных работ.

Работы З.И. Кадла получили международную известность. Признанием ее ведущей роли в исследовании шаровых скоплений явилось и то, что она была председателем рабочей группы по шаровым скоплениям Проблемной комиссии «Физики и эволюции звезд» по линии многостороннего сотрудничества АН социалистических стран.

З.И. Кадла награждена медалью «За доблестный труд в Великой отечественной Войне 1941-1945 гг.», медалью «Ветеран труда».

Светлая память о Зденке Ивановне Кадла навсегда останется в наших сердцах.

ИЗВЕСТИЯ

Главной астрономической обсерватории в Пулкове

СОДЕРЖАНИЕ

АСТРОМЕТРИЯ И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Алешкина Е.Ю. Захват в синхронный резонанс спутников с малой динамической асимметрией.....	13
Байкова А.Т., Бобылев В.В. Исследование поля скоростей F- и G-карликов околосолнечной окрестности в зависимости от возраста.....	22
Бирюков Е.Е. Распределение орбит дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции	30
Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематика ОВ-ассоциации Скорпиона-Центавра. Часть 1. Использование только тригонометрических параллаксов.....	41
Бронникова Н.М., Васильева Т.А. Фотографические позиционные наблюдения Урана в 2004 году на нормальном астрографе в Пулкове.....	57
Васильева Т.А. Фотографические наблюдения малой планеты Цереры (1) на нормальном астрографе в 1998-2002 годах.....	59
Верецагина И.А., Шор В.А. О динамике возможной двойной системы астероида 1220 Крокус.....	61
Девяткин А.В., Алешкина Е.Ю., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верецагина И.А., Краснокевич О.В., Баршевич К.В. Астрометрические наблюдения спутников Юпитера и Сатурна, полученные на зеркальном астрографе ЗА-320М в 2004-2006 гг.	68
Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верецагина И.А., Краснокевич О.В., Баршевич К.В. Астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы на зеркальном астрографе ЗА-320М в 2004-2006 гг.	78
Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верецагина И.А., Краснокевич О.В., Баршевич К.В. Астрометрические наблюдения Урана, Нептуна и системы Плутон-Харон на зеркальном астрографе ЗА-320М в 2004-2006 гг.	87

Ефимов А.А., Смирнов Б.Н., Шпитальная А.А. Определение скорости вращения экваториальной системы координат, используя лишь координаты общих звезд, содержащихся в двух фундаментальных каталогах с разными равноденствиями (1990.0 и 2000.0).....	94
Киселев А.А., Романенко Л.Г., Калинин С.И. Динамическое исследование пяти ярких широких визуально-двойных звезд Пулковской программы наблюдений.....	102
Киселева Т.П., Калиниченко О.А. Результаты фотографических наблюдений Сатурна и его спутников в 2004-2005 гг. на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.....	108
Мельников А.В., Шевченко И.И. О вращательной динамике двух спутников Сатурна – Прометея и Пандоры.....	117
Нарижная Н.В., Рыльков В.П. Каталог положений внегалактических звезд северного неба.....	122
Рыльков В.П., Дементьева А.А., Нарижная Н.В., Пинигин Г.И., Майгурова Н.В., Процюк Ю.И. Исследование ошибок сводного каталога опорных звезд вокруг внегалактических радиоисточников.....	126
Смирнов С.С. Новые семейства астероидов во внешней части главного пояса вблизи соизмеримости 9:5.....	135
Смирнов С.С. Семейство астероидов высокой наклонности 480 HANSA с уникальной концентрацией долгот перигелия.....	141
Соколов В.Г. О голоморфности координат эллиптического движения относительно эксцентриситетов.....	147
Соколова Ю.Р., Малкин З.М. О построении сводного каталога координат радиоисточников по РСДБ-наблюдениям.....	157
Хруцкая Е.В., Калинин С.И., Киселева Т.П. Астрометрические базы данных Пулковской обсерватории с результатами наблюдений тел Солнечной системы и избранных двойных звезд.....	171
Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бережной А.А. Результаты ПЗС-наблюдений малых тел Солнечной системы на нормальном астрографе Пулковской обсерватории в 2005-2006 гг. и планируемые наблюдения....	183
Чантурия С.М., Киселева Т.П. Фотографические позиционные наблюдения Нептуна и Тритона в Абастумани в 1985-1993 гг.	188

ГЕОДИНАМИКА

Ассиновская Б.А. Макросейсмический эффект Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года в Санкт-Петербурге.....	195
Ассиновская Б.А. О тепловой активности в очаговой зоне Калининградского землетрясения.....	201
Горшков В.Л. Об амплитуде модуляции чандлеровского движения полюса Земли.....	209
Карпинский В.В., Ассиновская Б.А., Горшков В.Л., Иванов В.Ю. Сейсмическая станция Валаам.....	216
Малова Т.И. Анализ материалов о метках высот наводнений Невы в Невских воротах Петропавловской крепости.....	220
Медведев М.Ю. Феномен блокирования и проблема солнечно-земных связей.....	233
Миллер Н.О., Литвиненко Е.А., Прудникова Е.Я., Соколова Н.В. Исследование приливных вариаций, полученных по наблюдениям широты.....	238
Наумов В.А., Прудникова Е.Я. Широта Пулковской обсерватории по наблюдениям на зенит-телескопах ЗТФ-135, ЗТЛ-180 и на Большом вертикальном круге.....	245

АСТРОФИЗИКА И ФИЗИКА СОЛНЦА

Байкова А.Т., Пушкарев А.Б. Результаты картографирования радиоисточника J0433+0521 по VLBA+ данным 2002 г. с использованием пакета программ “VLBImager”.....	251
Гриб С.А., Пушкарёв Е.А. Асимметрия нелинейных взаимодействий солнечных МГД ударных волн.....	259
Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А. Особенности долгопериодических колебаний лучевых скоростей в солнечных пятнах.....	268
Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т. О модуляции гиротронного излучения корональных петель крутильными колебаниями.....	275
Куприянова Е.Г., Степанов А.В. Пульсации радиоизлучения AD Leo и диагностика электрических токов в области вспышки.....	282
Огурицов М.Г. О возможной связи между 2400-летним климатическим ритмом и узловой прецессией кометно-метеороидного комплекса Таврида.....	289

Полякова Г.Д. Цвета галактик как дополнительный критерий их морфологической классификации.....	299
--	-----

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Байкова А.Т. Восстановление изображений по проекциям с использованием метода максимальной энтропии. Часть 1. Стандартный метод максимальной энтропии.....	315
Бережной А.А. EAssistant, программа-ассистент наблюдателя.....	323
Верещагина И.А., Бехтева А.С., Куприянов В.В. Автоматизация процесса астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА–320М. III. Новый алгоритм определения отсчета лимбов.....	327
Галкин В.Д., Ниберт Т., Никанорова И.Н., Сальников И.Б., Ляйтерер У., Алексеева Г.А., Новиков В.В., Даусс Д. Определение содержания водяного пара в Пулковской многоходовой вакуумной кювете ВКМ-100 с помощью полимерных сенсоров влажности.....	339
Галкин В.Д., Сальников И.Б., Новиков В.В., Ляйтерер У., Алексеева Г.А., Ниберт Т., Никанорова И.Н. Определение содержания водяного пара в земной атмосфере по наблюдениям Солнца и Луны.....	351
Гроздилов В.М. Многоканальный синхронный голограммный спектрофотометр.....	357
Di Varano I. Analysis of Technical Specifications of The Astronomical Dome of the Tower East in Campo Imperatore and Possible Options for Its Refurbishment.....	362
Канаев И.И., Кирьян Т.Р., Наумов К.Н., Никифоров В.В., Девяткин А.В., Тихонов А.В., Русаков О.П., Кондратенко И.Н., Куприянов В.В., Горшанов Д.Л. Пулковский меридианный инструмент МАГИС (Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент им. Л.А. Сухарева). Конструктивные особенности и принцип работы.....	374
Канаев И.И., Кирьян Т.Р., Наумов К.Н., Никифоров В.В., Девяткин А.В., Тихонов А.В., Русаков О.П., Кондратенко И.Н., Куприянов В.В., Горшанов Д.Л., Фролов В.Н. Пулковский меридианный инструмент МАГИС (Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент им. Л.А. Сухарева). Автоматическая система управления и первые результаты наблюдений.....	384
Кулиш А.П., Девяткин А.В. Модернизация узлов микрометрических подач монтировки АПШ-5 автоматизированного зеркального астрографа ЗА-320М.....	391
Малкин З.М. Некоторые вопросы статистики РСДБ-наблюдений.....	397

Молотов И.Е., Нечаева М.Б., Коноваленко А.А., Туккари Дж., Лю Ш., Дементьев А.Ф., Антипенко А.А., Дугин Н.А., Пушкарев А.Б., Агапов В.М., Титенко В.В., Шишов В.А., Степаньянц В.А., Фалькович И.С., Вольвач А.Е., Горшенков Ю.Н., Харламов Г.Ю., Орешко В.В., Языков В.П.
Развитие метода РСДБ-локации в проекте LFVN..... 402

Петерова Н.Г., Зверев Ю.К., Топчило Н.А., Борисевич Т.П., Голосова С.Я., Ильин Г.Н., Коржавин А.Н., Потапович А.В.
Большой Пулковский Радиотелескоп: модернизация и наблюдения Солнца в период 1976–2006 гг. (к 50-летию инструмента)..... 415

ИСТОРИЯ НАУКИ

Ихсанова В.Н.
Этапы создания Большого Пулковского Радиотелескопа (БПР) и первые результаты исследования Солнца (к 50-летию начала наблюдений)..... 429

Шахт Н.А.
Кирилл Николаевич Тавастшерна (к 85-летию со дня рождения)..... 439

Список авторов..... 445

АСТРОМЕТРИЯ
И
НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

ЗАХВАТ В СИНХРОННЫЙ РЕЗОНАНС СПУТНИКОВ С МАЛОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ АСИММЕТРИЕЙ

Алешкина Е.Ю.

Осуществлено численно-экспериментальное исследование хаотического вращения крупных спутников планет перед захватом в синхронный резонанс. Проведено моделирование вращательной динамики семи крупных спутников с диаметром более 1000 км — Ио, Европы, Ганимеда, Каллисто (J1-J4), Тефии (S3), Япета (S8) и Ариэля (U1) в эпоху захвата в синхронный резонанс с орбитальным движением. Все эти спутники по форме близки к сферическим. Динамическая модель включает влияние приливного трения на вращение спутника. Рассматривается плоский случай: предполагается, что ось вращения спутника ортогональна плоскости орбиты. Спутники, обладающие первоначальным быстрым вращением, в процессе приливной эволюции проходят через ряд резонансных состояний. При этом существует вероятность их захвата в эти состояния. Проведенные в настоящей работе численные эксперименты показали, что при относительно большом произволе в выборе начальных условий спутники в ходе приливной эволюции их вращательного движения проходят, не задерживаясь, через области резонансов 5:2, 2:1, 3:2 в фазовом пространстве и захватываются в резонанс 1:1.

1. Введение

Большинство спутников планет Солнечной системы, согласно наблюдениям, находятся в синхронном спин-орбитальном резонансе [20,18], при котором ось вращения спутника совпадает с нормалью к плоскости орбиты, а максимальная ось эллипсоида инерции совершает малые колебания около направления «планета – спутник». Спутники, обладавшие первоначальным быстрым вращением, в процессе приливной эволюции проходят через ряд резонансных состояний. При этом существует вероятность их захвата в резонансные состояния, отличные от 1:1; величина этой вероятности зависит как от динамических характеристик спутников, так и от их орбитальных параметров.

2. Характеристики крупных спутников

Динамические параметры спутников, представленные в таблице 1, вычислены из соотношений $A/C = (b_e^2 + c_e^2)/(a_e^2 + b_e^2)$, $B/C = (a_e^2 + c_e^2)/(a_e^2 + b_e^2)$ для трехосного эллипсоида однородной плотности [6] на основании значений полуосей эллипсоидов a_e , b_e , c_e для Япета и Тефии по данным работ [10] и [24] соответственно, для остальных спутников — по данным справочника [5]. Орбитальные параметры (эксцентриситет e , большая полуось орбиты a , орбитальный период T_{orb}) взяты из [12], период вращения T_{rot} взят из [5].

В таблице 2 радиус, гравитационная постоянная спутника и его средняя плотность R , Gm , ρ взяты из справочника Уральской [5]. Величина ускорения свободного падения g вычислена по формуле $g = Gm/R^2$. Значения жесткости μ для спутников планет практически неизвестны, теория дает величины $\mu \approx 5 \cdot 10^{11}$ дин/см² для скальных пород с $\rho \approx 2$ гр/см³ и $\mu \approx 3,5 \cdot 10^{10}$ дин/см² для льда $\rho \approx 1$ гр/см³ [11]. Согласно выводам работы [4], для спутников планет-гигантов, как и для планет земной группы, диссипативная функция Q лежит в пределах от 100 до 500, для Япета $Q \approx 150$, а для Тритона верхний предел $Q \leq 200$. Теоретическое значение Q для планеты без океанов порядка 100 [28]. Для Земли значение $Q = 13$ [4] определено достаточно надежно по величине приливного замедления Луны, полученной из лазерных наблюдений. Оценка величины $Q \approx 11$ для Луны [9] получена также на основе данных лазерной локации. Эта оценка диссипатив-

ной функции Луны сопоставима с величиной Q для Земли и соответствует нижнему пределу возможных значений Q , приведенных в работе [4].

Таблица 1. Инерционные и орбитальные параметры спутников.

Спутник	A/C	B/C	e	T_{orb} , сут	Полуоси $a_e/b_e/c_e$, км	a , тыс. км
Ио (J1)	0.99250	0.99803	0.004	1.769138	1829.4/1819.3/1815.7	422
Европа (J2)	0.99795	0.99981	0.009	3.551181	1564.13/1561.23/1560.93	671
Ганимед (J3)	0.99996	0.99998	0.002	7.154553	2632.4/2632.35/2632.29	1070
Каллисто(J4)	0.99992	0.99996	0.007	16.689018	2409.4/2409.3/2409.2	1883
Тифия (S3)	0.98162	0.99553	0.000	1.887803	535.6/528.2/525.8	295
Япет (S8)	0.92982	0.96295	0.0285	79.330954	767/742/713	3562
Ариэль (U1)	0.99413	0.99966	0.0012	2.520379	581.1/577.9/577.7	191

Таблица 2. Физические характеристики спутников.

Спутник	R , см 10^5	Gm , км ³ / с ²	ρ , г/см ³	g , см/с ²	μ , дин/см ²	k_2	Q
Ио (J1)	1818.3	5959.92	3.53[***]	179	5×10^{12}	0.035 [***]	100
Европа (J2)	1561.0	3202.74	3.03[***]	131	10^{12}	0.03 [*]	100
Ганимед (J3)	2634.0	9887.83	1.93[***]	143	5×10^{11}	0.03	100
Каллисто(J4)	2408.0	7179.29	1.79[***]	124	10^{11}	0.03	100
Тифия (S3)	529.9	41.21	1.00[**]	15	3.5×10^{10}	0.03	100
Япет (S8)	718.0	129.66	1.253	25	10^{11}	0.03	150
Ариэль (U1)	578.9	90.3	1.20[**]	27	10^{11}	0.03	100

[*] – [23]

[**] – [14]

[***] – [27]

3. Модель приливного взаимодействия

Согласно данным современных наблюдений, практически все спутники планет, для которых определены периоды вращения по вариациям их яркости в зависимости от положения на орбите, вращаются синхронно [20,18]. На космогонических временах значительные изменения первоначальных скоростей вращения всех спутников вызываются приливным трением, роль которого особенно значительна как для близких спутников планет-гигантов, так и для близких к Солнцу планет. Поэтому для решения вопроса о характере вращательной динамики спутников на больших временах необходимо учитывать приливные эффекты.

Рассмотрим спутник, движущийся по фиксированной эллиптической орбите. Орбитальное движение описывается законами Кеплера. Спутник, имеющий форму трехосного эллипсоида с моментами инерции A , B , C , вращается вокруг оси максимального момента инерции C , перпендикулярной плоскости орбиты. Таким образом, мы рассматриваем случай плоского вращения. Для представления ориентации тела при плос-

ком вращении использован угол собственного вращения ψ между осью момента инерции A и направлением «планета-спутник» в перицентре.

Численные оценки изменения скоростей вращения под действием приливов требуют знания приливных параметров Q и k_2 , зависящих от внутреннего строения спутников. Реальные значения диссипативной функции Q имеют большую степень неопределенности, поэтому в различных исследованиях величина Q выбирается произвольно.

Диссипативная функция Q связана с малым углом запаздывания приливного горба на спутнике δ [3, 4, 6] следующим соотношением:

$$Q = \frac{2\pi E}{\oint (-\frac{dE}{dt}) dt} = (tg 2\delta)^{-1} \approx \frac{1}{\sin 2\delta} \approx \frac{1}{2\delta}, \quad (1)$$

где E – максимальная энергия, запасенная приливной деформацией, $(-dE/dt)$ – скорость потери энергии, а интеграл от $(-dE/dt)$ – энергия, диссипировавшая в течение одного цикла прилива.

Качественная картина приливной эволюции быстро вращающегося спутника выглядит следующим образом (рис.1). Под действием притяжения планеты поверхность спутника деформируется — образуются два симметрично расположенных приливных горба. Если средняя скорость вращения ω отличается от среднего движения n спутника, максимум прилива на спутнике отклоняется от радиус-вектора планеты на угол δ , зависящий от разности $(\omega - n)$. При этом отклонение происходит в сторону вращения спутника, если $\omega > n$, и в обратную вращению сторону, если $\omega < n$.

Число Лява k_2 для однородного спутника [3, 6, 14] определяется формулой

$$k_2 = \frac{3}{2(1+19\mu/2g\rho R)} = \frac{3}{2(1+38\pi R^4\mu/3Gm^2)}, \quad (2)$$

где

- μ – жесткость,
- g – ускорение силы тяжести на поверхности,
- ρ – плотность,
- R – радиус спутника,
- G – гравитационная постоянная,
- m – масса спутника.

Теоретические оценки величины k_2 можно получить на основе моделей распределения плотности внутри спутника. Предельный случай жидкого однородного спутника соответствует $k_2 = 1.5$ [13].

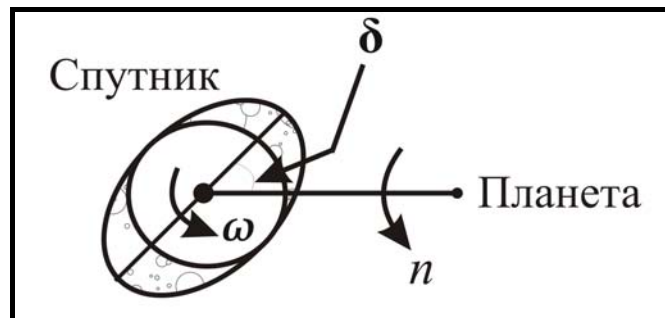


Рис. 1. Схема запаздывания приливного горба на спутнике для $\omega > n$.

Существуют две модели приливного взаимодействия – для постоянной диссипативной функции $Q = const$ и диссипативной функции, зависящей от частоты возмущений $1/Q = 2 \Delta t (\omega - n)$ [15] с постоянным временем задержки прилива Δt .

Плоское вращение спутника описывается уравнением второго порядка относительно угла собственного вращения ψ [3, 11, 16]:

$$-\frac{d^2\psi}{dt^2} = -\frac{d\omega}{dt} = \frac{N_t}{C} + \frac{N_l}{C} \quad (3)$$

где N_t, N_l – возмущающие моменты, C – максимальный момент инерции спутника. В общем случае максимальный момент инерции вращающегося сфероид (так называемое приближение Радо – Дарвина) [6] определяется формулой:

$$C = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \frac{2}{5} \sqrt{\frac{5}{k_2 + 1} - 1} \right\} mR^2 \quad (4)$$

Для сфероида Маклорена – тела с однородной плотностью – величина $C = 0.4mR^2$. Реальное значение C может быть больше или меньше 0.4 в зависимости от распределения плотности. Для Земли полученное из наблюдений значение $C/mR^2 = 0.33$, для Луны $C/mR^2 = 0.39$ [6], для Венеры C/mR^2 находится в интервале от 0.0341 до 0.331 [26]. Для спутников планет Солнечной системы используется $C/mR^2 = 0.4$ [4].

Возмущающий момент N_l определяется формулой [11, 16]:

$$N_l = \frac{3}{2} (B - A) n^2 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \sin 2(\psi - f). \quad (5)$$

Приливной момент N_t с учетом значения $C = 0.4mR^2$ может быть представлен в следующем виде [4, 19]:

$$N_t = \frac{3}{2} k_2 \frac{GM_p^2 R^5}{Q r^6} = \frac{15}{4} k_2 \frac{GM_p^2 R^3}{mQr^6} C. \quad (6)$$

После подстановки выражений (5) и (6) в уравнение (3) для изменения угловой скорости оно принимает вид:

$$-\frac{d\omega}{dt} = K_t \left(\frac{1}{r} \right)^6 + K_l \left(\frac{a}{r} \right)^3 \sin 2(\psi - f), \quad (7)$$

где

$$K_t = \frac{15}{4} \frac{GM_p^2 R^3}{mQ} k_2 - \text{приливной коэффициент,}$$

$$K_l = \frac{3}{2} \frac{B - A}{C} n^2 - \text{инерционный коэффициент,}$$

$$r = a \frac{1 - e^2}{1 + e \cos f} - \text{радиус-вектор спутника,}$$

a – большая полуось орбиты спутника,

e – эксцентриситет орбиты,

f – истинная аномалия,

G – гравитационная постоянная,

M_p – масса центральной планеты,

n – среднее движение спутника,

ω – модуль угловой скорости осевого вращения.

4. Численное моделирование

Численное интегрирование уравнения (7) вращательного движения проводилось методом Дормана-Принса [7], ранее применявшимся для задач вращательной динамики в [1,8,17,22]. Использовался программный комплекс, разработанный и описанный в [17,22], с добавлением модуля, учитывающего приливное взаимодействие (автор выражает благодарность В.В.Куприянову за разработку и предоставление этого модуля). Значения начальных данных ψ_0 , $d\psi/dt_0 = \omega_0$ варьировались в следующих пределах: $1.47 < \psi_0 < 1.67$, $0.8 < \omega_0 < 2.5$. Интегрирование уравнений вращательного движения спутников для реальных значений приливных коэффициентов K_t проведено на интервале времени $t = 10^7$, при этом время t измеряется в единицах орбитального периода спутника $T_{orb}/2\pi$; $a = n = GM_p = 1$. Использована модель приливных возмущений, пропорциональных частоте, для случая задержки приливного горба вследствие трения $2\delta = 2\Delta t (\omega - n) = 1/Q$. Значение времени запаздывания прилива Δt произвольно полагаем таким, что для частоты приливных возмущений $2(\omega - n) = n/Q = const$ [14].

Величина приливного коэффициента определяет временной масштаб динамической эволюции [14, 21, 25]. Поэтому в целях сокращения времени вычислений в некоторых случаях были использованы не реальные величины коэффициентов K_t из таблицы 3, а увеличенные на несколько порядков. Как показали численные эксперименты, в частности результаты, полученные для Ио, значение коэффициента K_t сказывается также и на характере резонансного вращения спутника.

Относительно реальных значений приливных коэффициентов следует отметить тот факт, что они имеют малые величины для современных размеров и плотностей спутников, тогда как на ранних этапах образования Солнечной системы радиусы формирующихся спутников были намного больше нынешних, и их приливная динамическая эволюция шла значительно более быстрыми темпами, чем сейчас [2].

Таблица 3. Приливные и инерционные коэффициенты спутников.

Спутник	K_t ($\times 10^{-10}$)	K_I
Ио	20000	0.00830
Европа	4000	0.00278
Ганимед	3000	0.00003
Каллисто	2000	0.00006
Тефия	10000	0.02087
Япет	2	0.04969
Ариэль	10000	0.00828

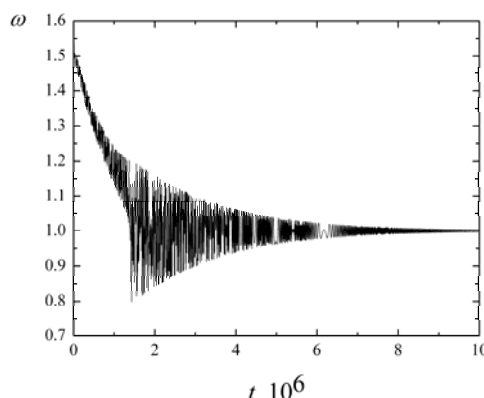


Рис. 2. Тефия. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.6$. Реальное значение K_t .

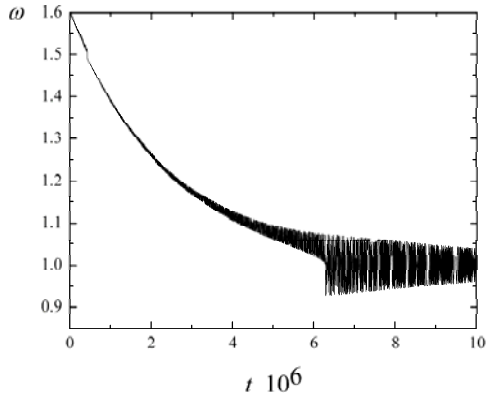


Рис. 3. Европа. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.6$. Реальное значение K_t

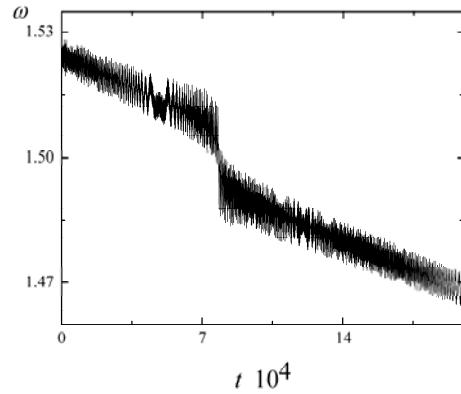


Рис. 4. Европа. Область резонанса 3/2. Значения ψ_0 , ω_0 и K_t те же, что на рис.3.

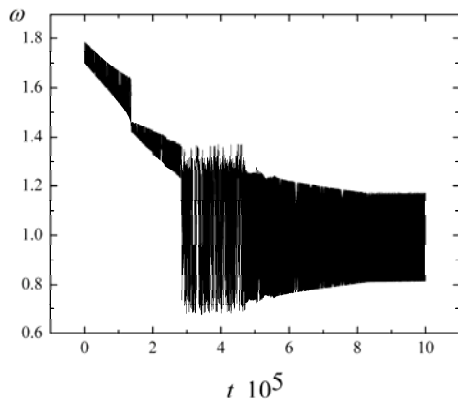


Рис. 5. Япет. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.7$. Значение приливного коэффициента $1000 K_t$

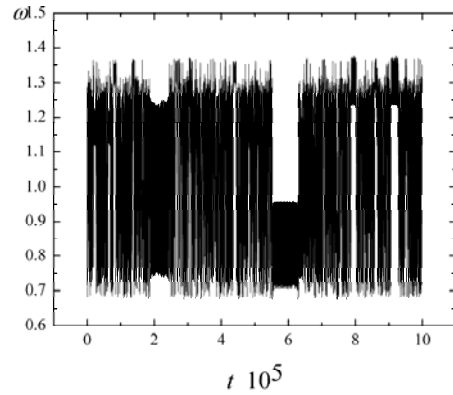


Рис. 6. Япет. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.1$. Значение приливного коэффициента $100 K_t$

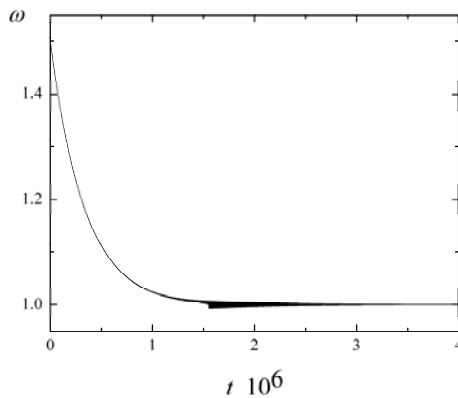


Рис. 7. Ганимед. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.5$. Значение приливного коэффициента $10 K_t$

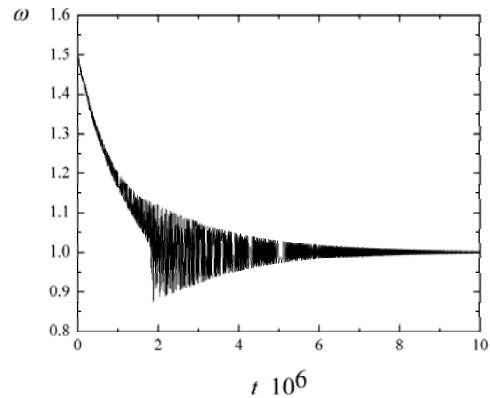


Рис. 8. Ариэль. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.5$. Реальное значение K_t

Спутники, обладающие первоначальным быстрым вращением, в процессе эволюции проходят через ряд резонансных состояний. При этом существует вероятность их захвата в эти состояния. Описанные выше численные эксперименты для крупных спутников показали, что практически все они проходят через резонансы 5:2, 4:2, 3:2 и захватываются в синхронный резонанс 1:1. Для Ио был получен захват в резонанс 3:2 для узкого слоя начальных данных с использованием приливного коэффициента в десять

раз больше реального из таблицы 3 (рис.10). Значение диссипативной функции Q выбирается произвольно. Для Ио использовалась величина $Q = 100$. Для Луны, средняя плотность которой близка по значению к плотности Ио, значение Q по наблюдениям лазерной локации было получено на порядок ниже [9]. Для такого низкого значения ($Q = 10$) применительно к Ио проведенные вычисления как раз привели к захвату в резонанс 3:2. Поскольку, по данным наблюдений, в настоящий момент Ио находится в синхронном резонансе, результаты наших численных экспериментов могут служить косвенным подтверждением правильности принятых значений физических характеристик Ио.

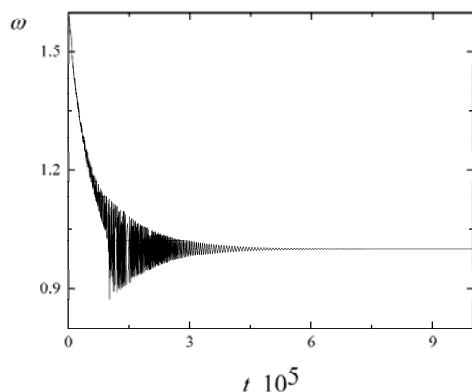


Рис. 9. Ио. Начальные условия $\psi_0 = 1.57$, $\omega_0 = 1.6$.
Реальное значение K_t

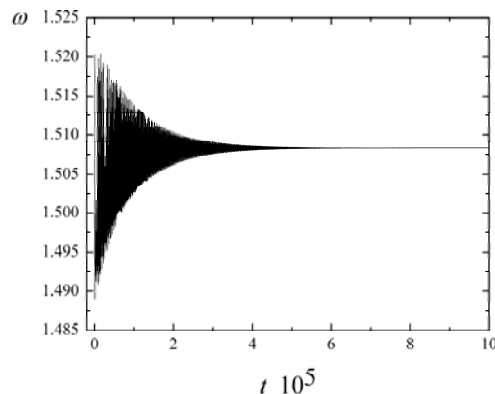


Рис. 10. Ио. Начальные условия $\psi_0 = 1.54 - 1.64$, $\omega_0 = 1.5$. Значение приливного коэффициента $10 K_t$

5. Выводы

Приливная эволюция вращательного движения спутников приводит к возникновению спин-орбитальных резонансов. В настоящее время большинство спутников находится в синхронном вращении с их средними движениями [20, 18]. Существует ненулевая вероятность захвата в другие резонансы [3], также спутники могут неограниченно долго вращаться хаотически [25]. Меркурий – единственное известное на сегодняшний день тело Солнечной системы, находящееся в резонансном состоянии 3:2.

Спутники, обладающие первоначальным быстрым вращением, в процессе приливной эволюции проходят через ряд резонансных состояний. Вероятность их захвата в резонансные состояния, отличные от синхронного 1:1, зависит как от динамических характеристик спутников, так и от их орбитальных параметров. Проведенные в настоящей работе численные эксперименты показали, что при относительно большом произволе в выборе начальных условий, крупные спутники в ходе приливной эволюции их вращательного движения проходят, не задерживаясь, через области резонансов 5:2, 2:1, 3:2 в фазовом пространстве и навсегда захватываются в резонанс 1:1.

Исключение составил Ио. Для узкого слоя начальных данных происходит захват этого спутника в резонанс 3:2 при использовании приливного коэффициента в 10 раз превышающего значение для принятых физических характеристик Ио.

Таким образом, проведенное численное моделирование показало, что величина приливного коэффициента для различных спутников может определять не только временной масштаб приливной вращательной эволюции, но и ход динамической эволюции вращения. Поскольку по данным наблюдений в настоящий момент Ио находится в синхронном резонансе, результаты наших численных экспериментов можно рассматривать как косвенное подтверждение правильности принятых значений физических характеристик Ио.

Автор выражает благодарность И.И. Шевченко и В.В. Куприянову за помощь и консультации. Работа поддержана РФФИ (проект № 05-02-17555).

Литература

1. *Алешкина Е.Ю.*, 2004, Изв. ГАО, 217, 157-161.
2. *Белецкий В.В., Хентов А.А.*, 1995, “Резонансные вращения небесных тел”, Нижний Новгород, Нижегородский гуманитарный центр, 430 с.
3. *Голдрайх П., Пул С.*, 1975, Динамика вращения планет, в сб. «Приливы и резонансы в Солнечной системе», М.: Мир, 130 – 167.
4. *Голдрайх П., Сотер С.*, 1975, “Q в Солнечной системе”, в сб. «Приливы и резонансы в Солнечной системе», М.: Мир, 248 – 272.
5. *Уральская В.С.*, Естественные спутники планет (информационный справочник) <http://lnfml.sai.msu.su/neb/rw/croixrw.htm>
6. *Хаббард У.*, Внутреннее строение планет, М.: Мир, 1987, с.105, с.99.
7. *Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи., М.: Мир, 1990, 512 с.
8. *Шевченко И.И.*, Космические исследования, 2002, 40, N 3, 296–304.
9. *Aleshkina E.Yu.*, 2002, Lunar numerical theory and determination of parameters k_2 , δ_M from analysis of LLR data, *Astron.Astrophys.*, 394, 717-721.
10. *Denk T. et al.*, 2000, *Lunar and Planetary Science*, XXXI, 1596.
11. *Dobrovolskis A.R.*, 1995, “Chaotic rotation of Nereid?”, *Icarus*, 118, 181-198.
12. *Ephemerides Astronomiques 2000* (Annuaire du Bureau des Longitudes) (Masson, Paris).
13. *Gavrilov S.V., Zharkov V.N.*, 1977, “Love numbers of the giant planets”, *Icarus*, 32, 443-449.
14. *Gladman B., Quinn D.D. et al.*, 1996, “Synchronous Locking of Tidally Evolving Satellites”, *Icarus*, 122, 166-192.
15. *Goldreich P., Peale S. J.*, 1970, “The obliquity of Venus”, *Astron. J.*, 75, 273-284.
16. *Khan A., Sharma R., Saha L.M.*, 1998, “Chaotic motion of an ellipsoidal satellite. I.”, *Astron. J.*, 116, 2058-2066.
17. *Kouprianov V.V., Shevchenko I.I.*, 2003, “On the chaotic rotation of planetary satellites: the Lyapunov exponents and the energy”, *Astron. Astrophys.*, 410, 749-757.
18. *Kouprianov V.V., Shevchenko I.I.*, 2005, “Rotational dynamics of planetary satellites: a survey of regular and chaotic behavior”, *Icarus*, 176, 224-234.
19. *Peale S.J.*, 1973, “Some effects of elasticity on lunar rotation”, *The Moon*, 8, 515-531.
20. *Peale S.J.*, 1977, Rotation histories of the natural satellites, in “Planetary satellites”, ed. Burns J.A., Univ. of Arizona Press, Tucson, 87-112.
21. *Quinn D.D. et al.*, 1997, “Relaxation oscillations in tidally evolving satellites”, *Celest.Mech.*, 67, 111-130.
22. *Shevchenko I.I., Kouprianov V.V.*, “On the chaotic rotation of planetary satellites: the Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents”, 2002, *Astron. Astrophys.*, 394, 663-674.
23. *Showman A.P., Malhotra R.*, 1997, “Tidal evolution into the Laplace resonance and the resurfacing of Ganymede”, *Icarus*, v.127, 93-111.
24. *Thomas P.C., Dermott S.F.*, 1991, “The shape of Tethys”, *Icarus*, 94, 391-398.
25. Wisdom J., Peale S.J. & Mignard F., 1984, “The chaotic rotation of Hyperion”, *Icarus*, v.58, 137-152.
26. *Yoder C.F.*, 1995, “Venus’ Free Obliquity”, *Icarus*, 117, №2.
27. *Yoder C.F., Peal S.J.*, 1981, “The tides of Io”, *Icarus*, 47, 1-35.
28. *Zharkov, V.N., Trubitsyn, V.P.*, 1978, *Physics of Planetary Interiors*, Pachart Publishing House, Arizona.

CAPTURE OF SATELLITES WITH SMALL DYNAMICAL ASYMMETRY IN SYNCHRONOUS RESONANCE

Aleshkina E.Yu.

Summary

Numerical analysis of the chaotic rotation of large satellites of planets before capture in synchronous spin-orbit resonance was performed. Simulation of rotational dynamics in the epoch of capture in synchronous resonance was carried out for seven large satellites which have a diameter more than 1000 km (Io, Europe, Ganymede, Callisto (J1-J4), Tethys (S3), Iapetus (S8) and Ariel (U1)). The shapes of all of these satellites are close to spherical. The dynamical model included the effect of tidal friction upon the satellite's rotation. The planar case is considered where it is assumed, that the axis of rotation of the satellite is normal to the orbital plane. In the course of tidal evolution, the satellites with initially fast rotation pass through a number of resonant states. There exists a probability of capture in these resonant states. The numerical experiments carried out in the present paper showed that, for a rather arbitrary choice of initial conditions, in the course of tidal evolution, the satellites pass without lingering through the resonant states 5:2, 2:1, 3:2 in phase space and are finally captured in the resonance state 1:1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ F- И G-КАРЛИКОВ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ОКРЕСТНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА

Байкова А.Т., Бобылев В.В.

На основе пространственных скоростей F- и G-карликов из обзора Нордстрем и др. (2004) прослежено изменение тонкой структуры двумерных UV-распределений остаточных скоростей в зависимости от возраста звезд. Прослежена эволюция основных пиков распределений, ассоциируемых с хорошо известными скоплениями Гиады, Плеяды, Сириуса и т.д. вплоть до предельного среднего возраста звезд около 11 млрд. лет.

Введение

Изучение поля скоростей звезд околосолнечной окрестности имеет важное значение для понимания кинематики и эволюции различных структурных составляющих Галактики. В настоящее время хорошо известно, что распределение пространственных скоростей звезд имеет сложную мелкомасштабную структуру, что может быть обусловлено различными физическими факторами.

Если раньше для описания наблюдаемого поля скоростей достаточно было применения статистического метода [1], позволяющего определить такие характеристики распределения как дисперсии остаточных скоростей и ориентация эллипсоида Шварцшильда, то теперь требуется применение более тонких методов (пространственно неинвариантного (адаптивного) сглаживания по Скульяну [2], вейвлет-анализа и т.п.) с целью выявления устойчивых структурных образований, например, в виде пиков [3,2] и ветвей [2].

В распределениях пространственных скоростей звезд околосолнечной окрестности выделяется несколько характерных пиков, которые ассоциируются с известными рассеянными скоплениями [4-6,2]. Это такие скопления как, например, Плеяды (возраст 70-125 млн. лет [7]), скопление Сириуса (500 млн. лет [8]) и Гиады (650 млн. лет [9]). Все они достаточно молоды по сравнению с возрастом Галактики. Как показано Чандрасекаром [10], устойчивость рассеянного скопления на порядок меньше возраста Галактики. Это накладывает ограничения на применение теории потоковых движений [11-13]. Поэтому большой интерес представляет изучение кинематических характеристик звезд в зависимости от их возраста.

Наличие высокоточных параллаксов и собственных движений большого количества звезд каталог HIPPARCOS [14] позволило выявить тонкую структуру в распределении пространственных скоростей звезд околосолнечной окрестности [3,2,15]. Но эти результаты носили предварительный характер, поскольку лучевые скорости либо были только смоделированы [3,15], либо использовались не достаточно точные их значения [2].

В этой связи несомненную ценность представляет появление обзора Нордстрём и др. [16], содержащего высокоточные лучевые скорости, собственные движения и параллаксы большого и однородного массива F- и G-звезд, и, что очень важно, достаточно надежные оценки индивидуального возраста звезд.

Задачей настоящей работы является изучение структуры распределения пространственных скоростей F- и G-карликов с использованием оценок возраста, приведенных в обзоре [16], с целью проследить эволюцию основных пиков, ассоциируемых с известными скоплениями. Обнаружение концентрации звезд различных возрастов к

одним и тем же пикам имеет большое значение, так как позволяет говорить о наличии постоянно действующего гравитационного фактора (спиральные волны, бар). Подобная точка зрения независимо развивается, в частности, в недавно появившейся работе Фамэя [17] на основе применения других методов к другим выборкам звезд. Для изучения тонкой структуры поля скоростей нами используется адаптивный метод сглаживания гауссовыми функциями исходных распределений звезд.

1. Рабочие данные

Каталог Нордстрем и др. [16], включающий около 14000 F- и G-карликов, содержит оригинальные высокоточные лучевые скорости (типичная ошибка ≈ 0.25 км/с), собранные на основе литературных данных параметры $uvby\beta$ фотометрии Стрёмгрена, параллаксы из каталога HIPPARCOS, дополненные в ряде случаев фотометрическими расстояниями, а также собственные движения звезд из каталогов HIPPARCOS и Tycho-2. Для большей части звезд каталога имеются оценки возраста с типичной ошибкой $< 50\%$. Нами используются только одиночные звезды, расположенные не далее 200 пк от Солнца. Двойные или кратные системы, отмеченные флагом в колонке 4 каталога Нордстрем, не рассматриваются. При этом используются только такие звезды, для которых имеется оценка возраста τ . Лучевые скорости и собственные движения звезд исправлены нами за галактическое вращение с постоянными Оорта $A = 13.7$ км/с/кпк и $B = -12.9$ км/с/кпк, найденными в работе Бобылева [20].

Звезды, использованные для построения двумерных UV-карт остаточных скоростей, удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} e_{\pi} / \pi &< 0.2, \\ e_{\tau} / \tau &< 0.5, \\ |V_{pec}| &< 100 \text{ км/с}, \end{aligned}$$

где $|V_{pec}|$ - пекулярная скорость звезды относительно МСП. Число таких звезд составило 4880. Все это множество звезд было разделено на 8 групп в зависимости от возраста, обозначаемых t1-t8 и содержащих примерно одинаковое количество звезд. Параметры выборки приводятся ниже в таблице 1.

Таблица 1. Параметры выборок звезд.

Выборка	Число звезд	Возраст звезд, Млрд. лет	Средний возраст звезд, Млрд. лет
t1	580	0 – 1.5	1.2 ± 0.2
t2	651	1.5 – 2.0	1.8 ± 0.3
t3	785	2.0 – 2.5	2.3 ± 0.4
t4	504	2.5 – 3.0	2.8 ± 0.6
t5	724	3.0 – 4.3	3.6 ± 1.1
t6	574	4.3 – 6.0	5.2 ± 1.5
t7	656	6.0 – 8.9	7.3 ± 2.2
t8	510	> 8.9	10.8 ± 3.0

2. Метод адаптивного сглаживания

Для того чтобы получить оценку двумерной плотности вероятностей $f(U,V)$ из вычисленных, дискретно распределенных UV-скоростей, мы используем метод адаптивного сглаживания с применением, в отличие от работы Скульяна и др. [2], двумерной радиально симметричной гауссовой функции ядра:

$$K(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-r^2 / 2\sigma^2),$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, при этом выполняется необходимое для оценки плотности вероятностей соотношение: $\int K(r)dr = 1$. Типичная неопределенность в определении скоростей в нашем случае составляет величину 2 км/с, что повлияло на выбор интервала дискретизации двумерных карт, при этом площадь квадратного пиксела равна $s = 2 \times 2$ км/с.

Основная идея метода заключается в том, что в каждой точке карты выполняется операция сглаживания лучом размера, задаваемого параметром σ , изменяющимся в соответствии с плотностью данных в окрестности данной точки. Таким образом, в зонах с повышенной плотностью сглаживание производится сравнительно узким лучом, с понижением плотности данных ширина луча увеличивается.

Используем следующее определение адаптивного сглаживания в произвольной точке $\xi = (U, V)$:

$$f(\xi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\xi - \xi_i}{h\lambda_i}\right),$$

где $\xi_i = (U_i, V_i)$, λ_i – локальный безразмерный масштабный параметр луча в точке ξ_i , h – общий параметр сглаживания, n – число данных. Параметр λ_i в каждой точке двумерной UV-плоскости определяется следующим образом:

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{g}{f(\xi)}}, \quad \ln g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f(\xi),$$

где g представляет собой геометрическое среднее $f(\xi)$.

Очевидно, для определения λ_i необходимо знать распределение $f(\xi)$, которое, в свою очередь, может быть определено, если известны все λ_i . Поэтому задача нахождения искомого распределения решается итерационно. В качестве первого приближения используем распределение, полученное путем сглаживания исходной UV-карты лучом фиксированного размера. Оптимальное значение параметра h находится из условия минимума среднеквадратичного отклонения оценки $f(\xi)$ от истинного распределения $f(\xi)$. Найденные нами значения h для различных выборок звезд, рассматриваемых в данной работе, равно 10 км/с. Кроме того, карты промасштабированы множителем $n \times s$.

3. Результаты

Сглаженные адаптивным методом UV-распределения остаточных скоростей звезд в зависимости от возраста представлены на рис.1. (левая колонка). В правой колонке рис. 1 представлены карты распределений, полученные после вычитания фона. Параметры структурных деталей полученных распределений приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Значения относительных пиков UV-распределений в зависимости от возраста звезд.

Выборка	Hyades	Pleiades	Coma Ber.	Sirius
t1	7.81	0.066	0.038	2.45
t2	4.30	0.45	1.23	1.68
t3	2.81	0.89	0.90	1.98
t4	2.05	2.46	0.95	2.32
t5	3.77	1.23	0.14	1.96
t6	2.00	1.19	0.68	1.16
t7	2.49	1.03	0.67	1.18
t8	2.18	0	0.70	0

Таблица 3. Значения координат пиков U, V ± 2 км/с.

Выборка	Hyades		Pleiades		Coma Ber.		Sirius	
	U	V	U	V	U	V	U	V
t1	-24	-10	0	-20	0	0	4	12
t2	-30	-10	-4	-20	0	0	24	4
t3	-24	-10	-6	-20	0	0	6	6
t4	-20	-10	-4	-20	0	0	6	10
t5	-24	-12	-4	-20	0	0	14	12
t6	-24	-8	-2	-20	0	0	10	12
t7	-24	-8	2	-18	0	0	6	8
t8	-26	-10	2	-16	6	-8	6	8

Эволюция относительных интенсивностей основных пиков UV-распределений в зависимости от возраста выборок звезд графически представлена на рис. 2.

Графическое представление изменения координат U и V основных пиков UV-распределений в зависимости от возраста показано на рис. 3 и 4 соответственно.

4. Обсуждение результатов и выводы

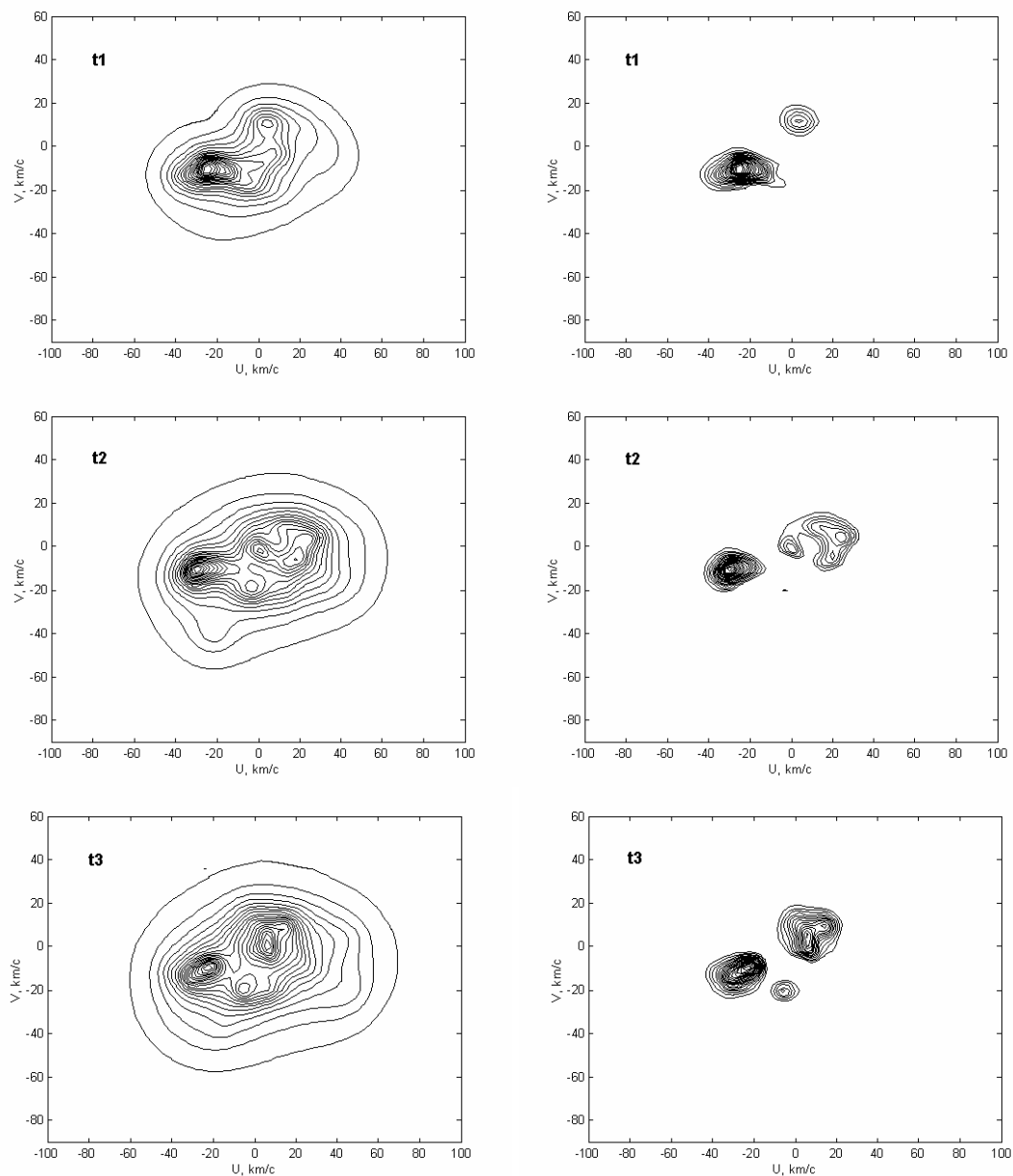
Отметим, что случайные ошибки определения лучевых скоростей звезд уменьшаются от ≈ 2 км/с для самых молодых звезд до ≈ 0.25 км/с для старых. Наиболее надежными являются карты для выборок t3-t6, т.к. они характеризуются меньшими случайными ошибками определения пространственных скоростей. Выполненное нами численное моделирование методом Монте-Карло показало, что случайные ошибки определения пространственных скоростей звезд 2 км/с приводят к изменению координат максимумов распределения на UV-плоскости не более 3-4 км/с.

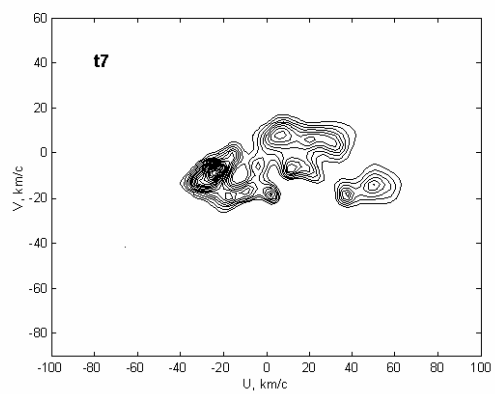
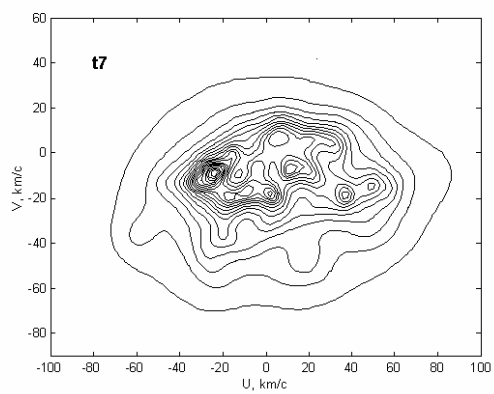
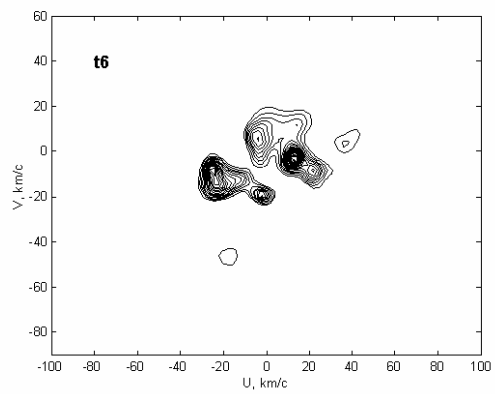
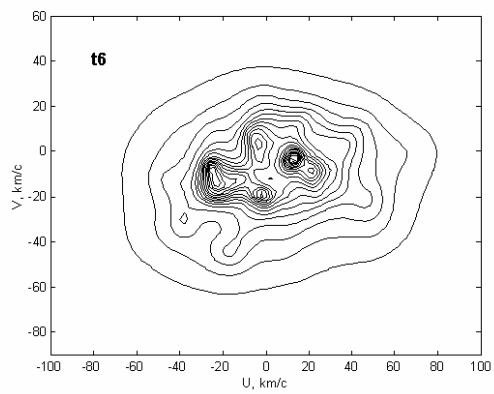
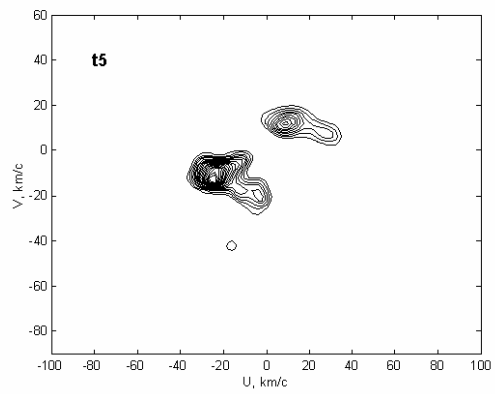
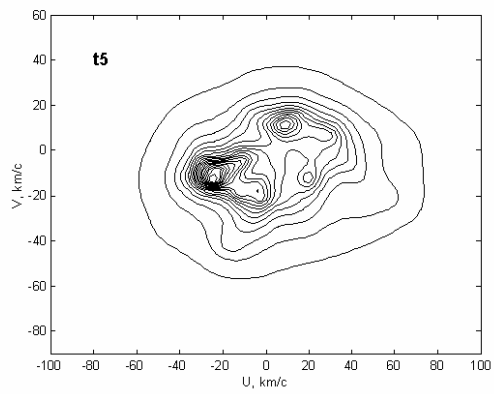
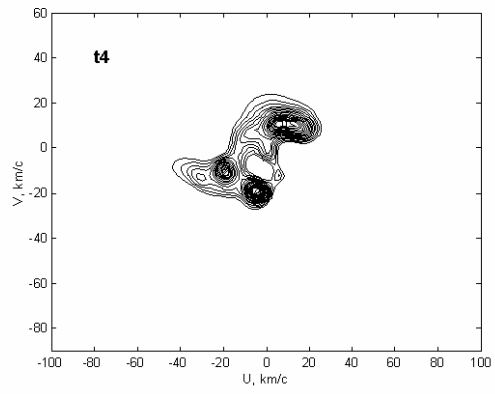
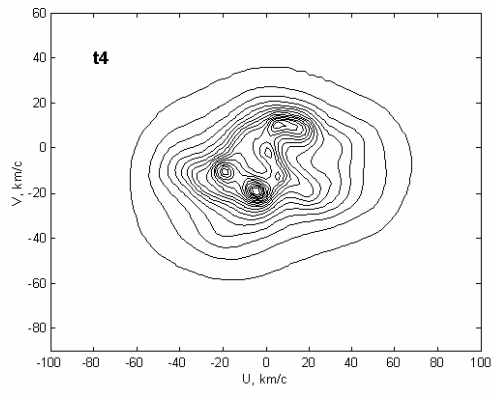
Как можно видеть из рис. 1-4 и таблиц 2-3, 1) на распределениях UV-скоростей звезды различных возрастов концентрируются к нескольким устойчивым пикам (Гиады, Плеяды, Сириус, Волосы Вероники), это показывает, что звезды, входящие в эти образования, возникли не одновременно; 2) доминирующим во всех интервалах возрастов является пик, ассоциируемый со скоплением Гиады; 3) наибольшую интенсивность пик Гиад достигает для звезд со средним возрастом 1.2 млрд. лет, что говорит о содержании большой доли звезд реального рассеянного скопления Гиады; 4) значимых изменений в координатах основных пиков в зависимости от возраста звезд в выборках t1-

t8 не обнаружено, за исключением пика Сириус; 5) для выборки t8 наиболее старых звезд можем видеть развитие структурной детали с центром $U = -54$ и $V = -40$ в виде ветви, которую ассоциируют с потоком Геркулеса.

Из рис. 1 хорошо видно, что ориентация отдельных изолированных пиков заметно меняется в зависимости от возраста выборки (прогрев диска). В тоже время пики Гиад и Плеяд образуют вытянутую структуру в виде ветви, ориентация которой остается неизменной. Подобные структуры в распределении UV-скоростей достаточно большого количества звезд HIPPARCOS подробно описаны в работе Скульяна и др.[2].

Численное моделирование прогрева диска стохастическими спиральными волнами, выполненное в работе Де Симона и др. [18], показало, что расслоение UV-распределения на ветви и пики может быть объяснено нерегулярностями галактического потенциала, а не нерегулярностями в процессах звездообразования. Как показано в работе Фукса [19], к появлению ветвей приводит наличие бара в центре Галактики. В настоящее время считается, что именно с влиянием бара связано возникновение ветви Геркулеса.





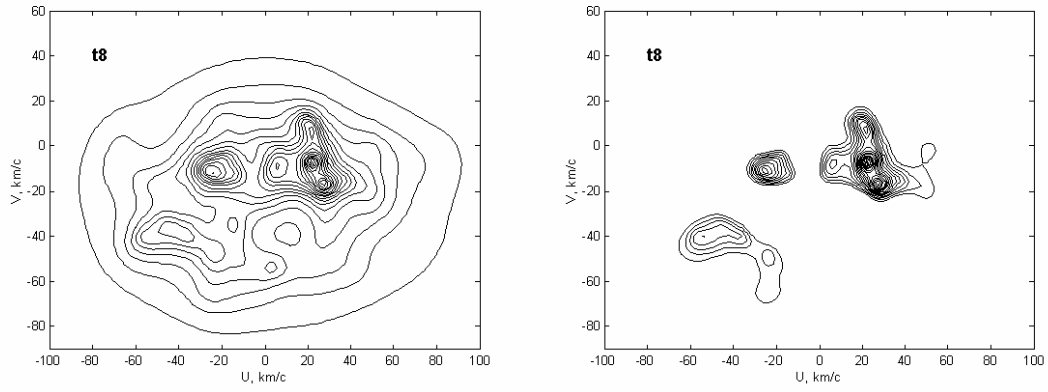


Рис. 1. Сглаженные распределения (левая колонка), распределения, полученные после вычитания фона (правая колонка). Нижний уровень и шаг контурных линий составляют 10% и 5% от пикового значения карты соответственно.

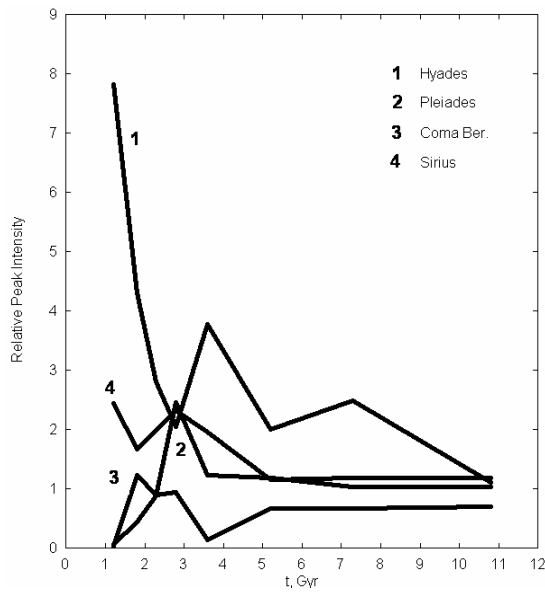


Рис. 2.

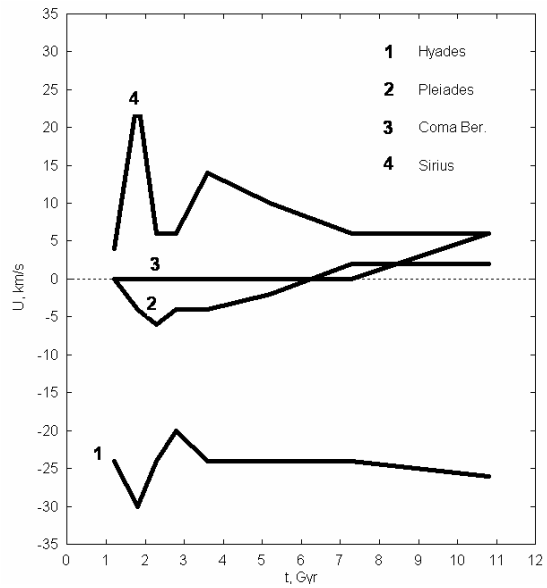


Рис. 3.

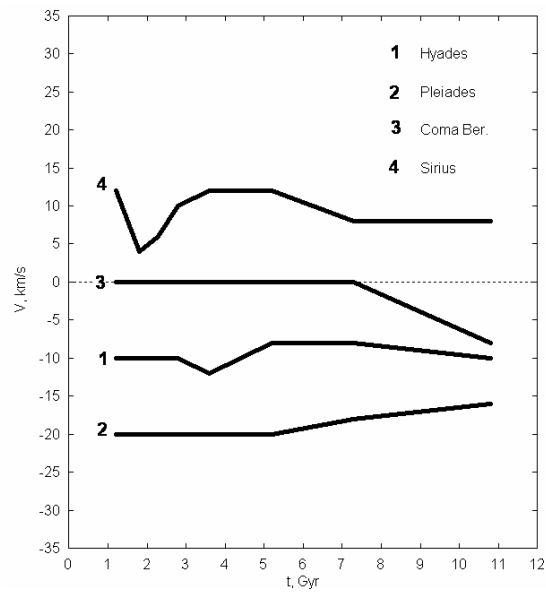


Рис. 4.

В целом, мы можем заключить, что звезды различных возрастов концентрируются к нескольким пикам, ассоциируемым с известными рассеянными скоплениями. Полученные нами результаты согласуются с выводами работы Фамэя и др.[17], в которой была фактически рассмотрена обратная задача, а именно, на распределениях UV-скоростей M- и K-гигантов делались выборки звезд, принадлежащих пикам, а затем определялись возрасты отдельных звезд на основе изохрон. Оказалось, что в пиках концентрируются звезды с очень широким диапазоном возрастов. Это говорит о том, что звезды, принадлежащие отдельным пикам, не образовались одновременно. Этот вывод является основным и в данной работе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант No 05-02-17047).

Литература

1. *Schwarzschild K.*, Nachr. Koniglichen Ges. Wiss. Gottingen, 191 (1908).
2. *Skuljan J., Hearnshaw J.B, and Cottrell P.L.*, MNRAS, **308**, 731 (1999).
3. *Dehnen W.*, Astron. J., **115**, 2384 (1998).
4. *Chereul E, Cr'eze M., and Bienayme O.*, Astron. Astrophys., **340**, 384 (1998).
5. *Chereul E, Cr'eze M., and Bienayme O, et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **135**, 5 (1999).
6. *Asiain R., Figueras F., Torra J. et al.*, Astron. Astrophys. **341**, 427 (1999).
7. *Soderblom D.R., Jones B.F, Balachandran S. et al.*, Astron. J. **106**, 1059 (1993).
8. *King J.R., Villarreal A.R., Soderblom D.R. et al.*, Astron. J. **125**, 1980 (2003).
9. *Castellani V., Degl'Innocenti S., and Moroni P.*, MNRAS, **320**, 66 (2001).
10. *Chandrasekhar S.*, *Principles of stellar dynamics* (Yerkes Observatory, 1942; IL, Moscow, 1948).
11. *Kapteyn J.C.*, British Assoc. Adv. Sci. Rep., 257 (1905).
12. *Eggen O.J.*, Astron. J. **111**, 1615 (1995).
13. *Eggen O.J.*, Astron. J. **112**, 1595 (1996).
14. ESA SP-1200, The Hipparcos and Tycho Catalogues (1997).
15. *Dehnen W. and Binney J.J.* MNRAS **298**, 387 (1998).
16. *Nordstrom B. et al.*, Astron. Astrophys. **419**, 989 (2004).
17. *Famaey B. et al.*, Astron. Astrophys. **430**, 165 (2005).
18. *De Simone R.S., Wu X., and Tremaine S.*, MNRAS **350**, 627 (2004).
19. *Fux R.*, Astron. Astrophys. **373**, 511 (2001).
20. *Бобылев В.В.*, Письма в Астрон. ж. **30**, 185 (2004).

A STUDY OF THE VELOCITY FIELD OF F- AND G- DWARFS IN THE SOLAR NEIGHBOURHOOD SUBJECT TO STAR AGES

Baikova A.T. and Bobylev V.V.

Summary

On the basis of spatial velocities of F- and G- dwarfs from the Nordstrom catalogue (2004) the evolution of the fine structure of two-dimensional UV residual velocity distributions is analyzed subject to star ages. The evolution of basic peaks associated with the Hyades, Pleiades, Sirius etc. open clusters is traced up to the age of 11 Gyr.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ДАМОКЛОИДОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ

Бирюков Е.Е.

Южно-Уральский государственный университет

В работе исследуется распределение орбит дамоклоидов – астероидов на кометных орбитах. Учтены некоторые эффекты наблюдательной селекции. Получено, что показательный закон распределения дамоклоидов по абсолютным звездным величинам вида $n(H) \sim 10^{aH}$ не может описать распределение всех дамоклоидов. Однако показательный закон является удобной аппроксимацией распределения дамоклоидов на ограниченном интервале значений абсолютной звездной величины H .

Введение

Дамоклоидами называют малые тела Солнечной системы, орбиты которых пересекают орбиты планет-гигантов, в том числе и Юпитера. Дамоклоиды движутся на типично кометных орбитах. Первый объект этого класса был открыт в 1991 г. (Дамокл), по имени которого дали название всей группе. Период его обращения вокруг Солнца равен 40,7 лет (большая полуось $a = 11,832$ а.е.). Практически сразу после его обнаружения в работе [1] было показано, что динамические эволюции Дамокла и комет галлеевского типа идентичны, а потому Дамокл является одним из членов популяции неактивных или угасших комет. У этой группы объектов, как и у самого Дамокла, абсолютная звездная величина больше 12, то есть их размеры меньше 25 км (при альбедо 0,04), что говорит о кометном происхождении дамоклоидов. Дамокл движется по галлеевской орбите, поэтому те астероиды, которые также движутся по галлеевским орбитам, называют дамоклоидами. Сам факт обнаружения дамоклоидов свидетельствует о том, под астероидами следует понимать малые тела, которые не проявляют кометной активности. Спектральный анализ дамоклоидов, выполненный в работе [4], свидетельствует о том, что они не могут происходить из транснептуновой области, следовательно, дамоклоиды, как и кометы галлеевского типа, происходят из облака Оорта.

Наблюдение дамоклоидов

В таблице 1 представлены элементы орбит дамоклоидов на 25 мая 2006 года (центр малых планет, [12]). На этот момент было обнаружено 20 дамоклоида. Один из дамоклоидов на центре малых планет отнесен к группе амура (2006 HR30) и один (1999 XS35) к группе аполлона. В первом столбце представлено имя дамоклоида. В следующих трех колонках – элементы орбит: во втором – перигелийное расстояние, в третьем – большая полуось, в четвертом – наклон. В пятом – параметр Гиссерана, в шестом и седьмом – абсолютная и видимая (в момент обнаружения) звездные величины, в восьмом и девятом – гелио- и геоцентрические расстояния дамоклоидов в момент обнаружения. На основании данных таблицы 1 было построено распределение орбит дамоклоидов (рис. 1). В распределении перигелийных расстояний необходимо отметить, что для $q > 2,5$ а.е. изменяется характер распределения. На этих орбитах количество дамоклоидов меньше, чем на орбитах с малым значением перигелийного расстояния, что можно объяснить следствием эффектов наблюдательной селекции.

Таблица 1. Список обнаруженных дамоклоидов.

Имя	<i>q</i>	<i>a</i>	<i>i</i>	Параметр Тиссерана	<i>H</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	Δ
2006 HR30 (амур)	1,226	7,812	31,9	1,78511	11,9	17,32	3,3	3,7
2006 JG57	4,759	9,994	56,7	1,81	12,4	18,72	4,76	3,86
2006 BZ8	1,898	9,659	165,3	-1,03061	14,2	17,76	2,58	2
2005 VX3	3,981	10,126	108,4	-0,18464	14,4	19,94	3,98	3,22
2005 TJ50	3.782	9,224	110.3	-0,18045	15.2	20,7	3,98	3,21
2005 SB223	2.767	30,528	91,4	0,12271	14.2	18,45	2,8	2,53
2005 HL3	1.896	11,37	35.6	1,78719	14.4	16,13	1,9	1,17
2004 YH32	3.528	8,161	79,1	1,02863	12.9	18,65	3,89	3,63
2004 DA62	4.108	7,698	52,2	1,99563	12.8	18,64	4,12	3,57
2003 WN188	2.200	14,525	26,9	1,93551	14.0	17,7	2,59	2,1
2000 HE46	2.367	23,551	158,5	-1,50856	14.8	17,66	2,42	1,54
2000 DG8	2.225	10,796	129,3	-0,62662	13,1	18,42	3,8	3
1999 LE31	4.343	8,129	151,8	-1,3091	12,4	18,45	4,46	3,63
1998 WU24	1.429	15,19	42,5	1,40985	15.0	17,38	1,98	1,51
1998 QJ1	2.101	11,249	23,5	2,03228	16,5	18,33	2,1	1,1
1997 MD10	1.543	26,484	59,2	0,97437	16.0	17,75	2,06	1,08
(20461) Dioretsa 1999 LD31	2.394	23,836	160,4	-1,5429	13.8	17,48	2,84	1,92
(15504) 1999 RG33	2.131	9,38	34,9	1,9528	12.1	18,19	4,33	3,83
(5335) Damocles 1991 DA	1.576	11,839	62	1,14623	13,3	15,47	1,85	1,47
1999 XS35 (аполлон)	0.95	18	19	1,41685	17.2	17,55	1,5	0,8

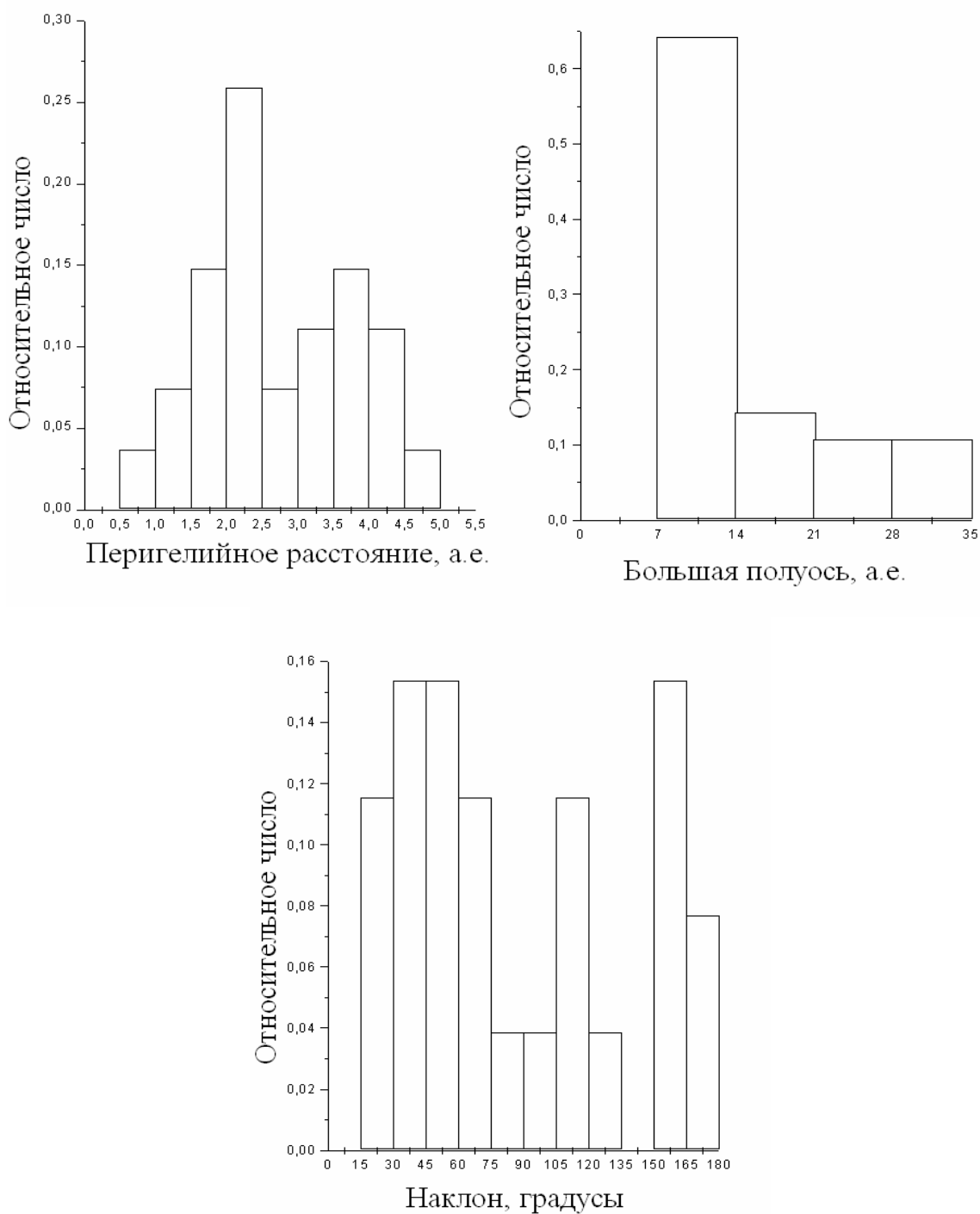


Рис.1. Распределение элементов орбит обнаруженных дамуклоидов.

Можно обнаружить, что имеется избыток дамуклоидов на орбитах с $7 < a < 14$ а.е. и недостаток на орбитах с $a > 14$ а.е., что может так же являться следствием эффектов наблюдательной селекции. В распределении наклонов орбит дамуклоидов обнаруживаются два ярко выраженных пика для $i = 30^\circ - 60^\circ$ и $i = 150^\circ - 165^\circ$.

Для построения распределения дамуклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции была проделана процедура, аналогичная описанной в работах [6] и [7]. Выбор

в пользу данной процедуры был сделан по следующим причинам. Полученное в этих работах распределение орбит транснептуновых объектов и кентавров с учетом эффектов наблюдательной селекции хорошо согласуется с результатами численного моделирования динамического происхождения этих семейств малых тел.

Согласно [6] и [7], вероятность обнаружения объекта с видимой звездной величиной m и элементами орбиты E равна

$$p(m, E) = p_1 p_2 p_3, \quad (1)$$

где p_1 – вероятность, что объект с элементами орбиты E попал в поле обзора, p_2 – вероятность, что объект с орбитальными элементами E имеет видимую звездную величину m , p_3 – вероятность обнаружения объекта с видимой звездной величиной m . Вероятность $p_1 = \frac{\Delta t}{P}$ – есть отношение времени, проведенного объектом в поле зрения земных

служб поиска малых тел Солнечной системы к периоду кометы. В работах [2] и [9] было показано, что наблюдения объектов Солнечной системы сконцентрированы вблизи плоскости эклиптики. Диапазон эклиптических широт $|\beta| < 5^\circ$. На рис.2 представлено распределение широт, в которых были обнаружены дамоклоиды.

Несмотря на то, что вероятность обнаружения дамоклоидов зависит от широты (более чем у половины дамоклоидов в момент обнаружения широта находилась в пределах $-5^\circ - 10^\circ$), использовать этот селекционный эффект не следует, поскольку почти половина дамоклоидов была обнаружена на широтах, значительно превышающих границу, обозначенную в работах [2] и [9]. Можно учитывать наблюдательную селекцию по широте только для тех дамоклоидов, которые были обнаружены на больших геоцентрических расстояниях, поскольку на расстояниях меньше 2 а.е. службы поиска сканируют всю небесную сферу [5]. Но, как видно из рис.3, широты, в которых были обнаружены дамоклоиды, практически не зависят от геоцентрического расстояния. Таким образом учесть наблюдательную селекцию по широте обнаружения дамоклоидов не представляется возможным. Поэтому вероятность p_1 следует опустить.

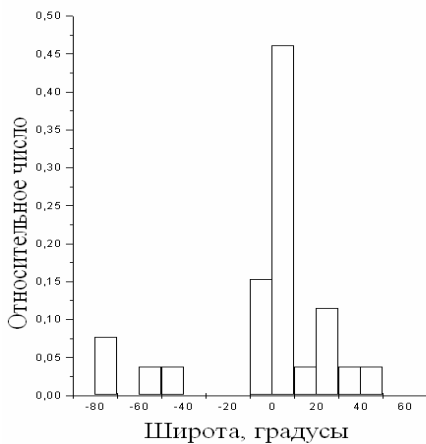


Рис.2. Распределение эклиптических широт, в которых были обнаружены дамоклоиды.

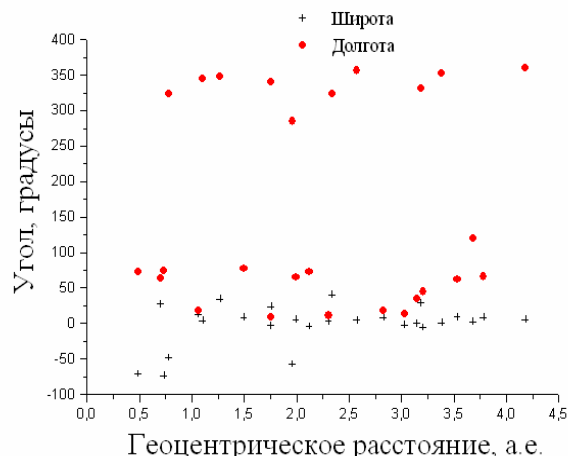


Рис.3. Зависимость широты и долготы, в которых были обнаружены дамоклоиды, от геоцентрического расстояния.

Видимая звездная величина вычисляется по формуле

$$m = H + 5 \log(r\Delta), \quad (2)$$

где H – абсолютная звездная величина, r – гелиоцентрическое расстояние, Δ – геоцентрическое расстояние наблюдаемого тела. Из анализа рис.3 можно заметить, что у всех

дамоклоидов в момент обнаружения долгота была $\pm 90^\circ$. В таком случае, как было показано в работе [10], можно принять, что $\Delta \approx r - 1$.

Функция плотности ϕ от H

$$\phi(H) = B10^{\alpha H}, \quad (3)$$

где $\alpha = (q' - 1)/5$ – коэффициент в показателе степени распределения объектов по звездным величинам, q' – показатель степени распределения объектов по размерам, B – константа. Используя формулы (2) и (3) можно записать значение вероятности p_2

$$p_2 = C10^{\alpha H} = \frac{C}{(r\Delta)^{5\alpha}} 10^{\alpha m}, \quad (4)$$

где C – константа. Из этой формулы видно, что вероятность p_2 можно представить в виде произведения двух функций $p_2 = f(E) \cdot g(m)$, где $f(E) = K/(r\Delta)^{5\alpha}$ – функция зависящая от элементов орбиты объекта, $g(m) = D \cdot 10^{\alpha m}$ – функция, зависящая от видимой звездной величины m (D и K – константы).

Таким образом, вероятность обнаружения объекта можно записать в виде

$$p(m, E) = \Lambda(E)10^{\alpha m} \varepsilon(m), \quad (5)$$

где $\Lambda(E)$ – члены, зависящие от элементов орбит, $\varepsilon(m) = p_3$ – вероятность обнаружения объекта с видимой звездной величиной m . Если усреднить в формуле (5) по всем орбитам, то стоящий в левой части уравнения член $p(m, E)$ будет соответствовать функции распределения видимых звездных величин наблюдаемых дамоклоидов.

Дальше можно пойти двумя путями: либо предполагая, что известно распределение дамоклоидов по размерам (известно значение α), находить функцию $\varepsilon(m)$ из уравнения (5), либо, предположить уже известной функцию $\varepsilon(m)$. В связи с тем, что до сих пор нет устоявшегося мнения о значении степени α в распределении комет по размерам (от 0,28 [3] до 0,53 [11]), следует пойти по второму пути.

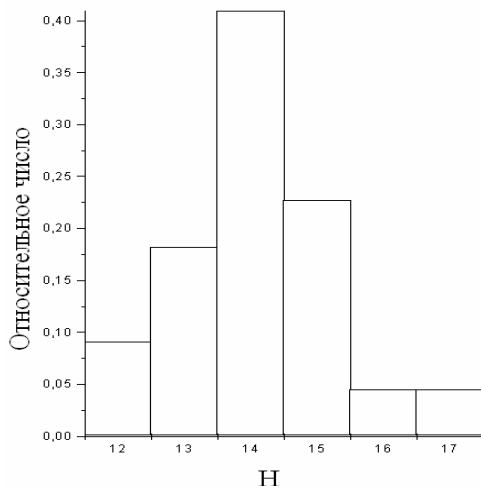


Рис. 4. Распределение абсолютных звездных величин обнаруженных дамоклоидов.

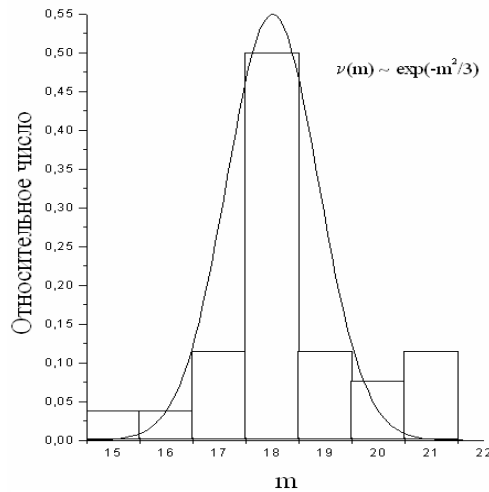


Рис. 5. Распределение видимых звездных величин обнаруженных дамоклоидов.

На рис.4 представлено распределение абсолютных звездных величин обнаруженных дамоклоидов. На рис.5 представлено распределение видимых звездных величин обнаруженных дамоклоидов. Видимые звездные величины дамоклоидов заключены в пределах $15,5 < m < 21$, поэтому можно воспользоваться функцией $\varepsilon(m)$, приведенной в работе [7]:

$$\varepsilon(m) \sim \exp(-m/1,67864). \quad (6)$$

Каждому дамклоиду был сопоставлен вес $w = w_2 w_3$, где $w_2 = 1/p_2$, $w_3 = 1/p_3$. В связи с тем, что не известно распределение дамклоидов по размерам (не известна степень α), было вычислено значение w_2 для разных значений α . С учетом этих весов были построены гистограммы распределений перигелийных расстояний дамклоидов для нескольких значений α (0,3; 0,4; 0,5; 0,6).

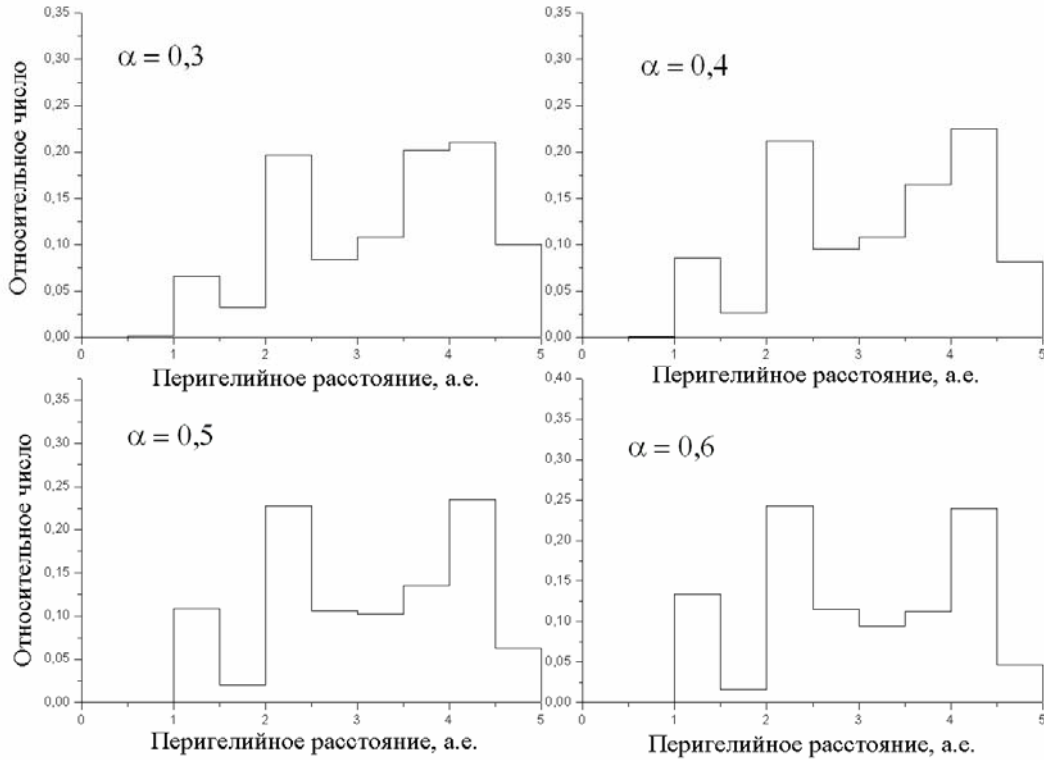


Рис. 6. Распределение перигелийных расстояний орбит дамклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции для четырех значений параметра α в распределении дамклоидов по размерам. Ширина бина 0,5 а.е.

На рис.6 представлено распределение перигелийных расстояний орбит дамклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции. По причине малого количества объектов была построена серия гистограмм с большим шагом (рис.7). Дело в том, что, с одной стороны, на гистограмме с малым шагом можно увидеть многие нюансы распределения, а с другой стороны, при малом количестве объектов гистограмма может не соответствовать действительному распределению. Из рис.7 видно, что только для $\alpha = 0,3$ количество дамклоидов на орбитах с $3 \text{ а.е.} < q < 4 \text{ а.е.}$ не становится меньше, чем на предыдущем интервале. Для всех остальных α в этой области наблюдается снижение количества дамклоидов. Общая картина распределения перигелийных расстояний дамклоидов слабо зависит от выбора параметра α .

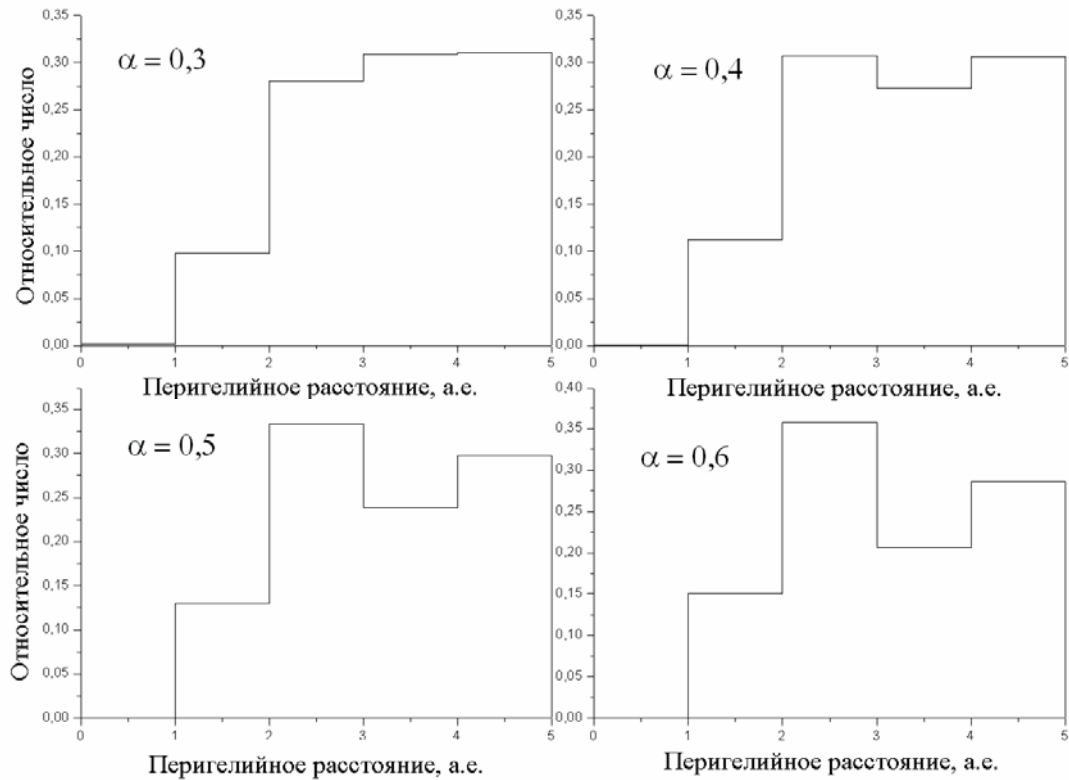


Рис. 7. Распределение перигелийных расстояний орбит дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции для четырех значений параметра α в распределении дамоклоидов по размерам. Ширина бина 1а.е.

Независимо от показателя степени α в распределении дамоклоидов по размерам, характер распределения перигелийных расстояний дамоклоидов не меняется – количество дамоклоидов пропорционально перигелийному расстоянию орбит. На всех четырех графиках наблюдается скачок количества дамоклоидов с $q > 2$ а.е. Так же для всех параметров α количество дамоклоидов на орбитах с $q < 1$ а.е. очень мало: их количество в среднем на 3 порядка меньше, чем в области $1 < q < 2$ а.е. Это объясняется тем, что на орбите с $q < 1$ а.е. обнаружен всего один объект (1999 XS35), абсолютная звездная величина которого 17,2 – это наименьший из обнаруженных дамоклоидов.

Как уже отмечалось выше, до сих пор нет устоявшегося мнения о значении степени α в законе распределения комет по размерам. Можно воспользоваться формулой (3) и для разных значений степени α получить вид функции вероятности обнаружения p_3 , в соответствии с которой $p_3 = \frac{v(m)}{10^{cm}}$, где $v(m)$ - закон распределения обнаруженных дамоклоидов по видимым звездным величинам (из формулы (4) видно, что если усреднить по элементам орбит, то распределение дамоклоидов по абсолютным звездным величинам $\phi(H) \sim g(m)$). На рис. 8 представлена серия кривых, характеризующих зависимость изменения вероятности обнаружения дамоклоидов в зависимости от видимой звездной величины m .

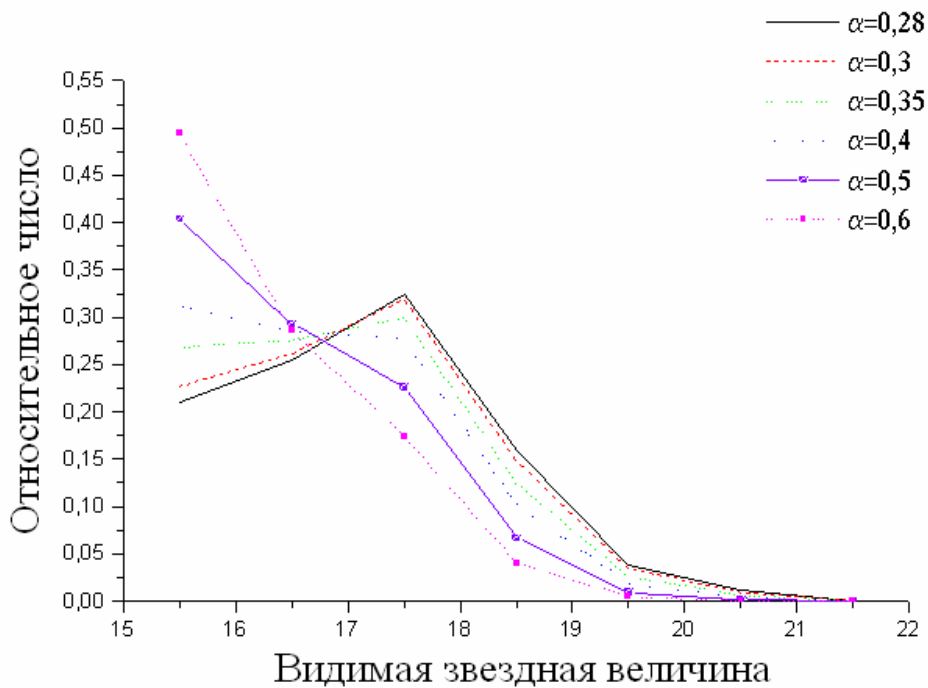


Рис.8. Зависимость изменения вероятности обнаружения дамоклоидов от видимой звездной величины m .

Вероятность обнаружения объекта в зависимости от его звездной величины является монотонной убывающей функцией по причине сложности наблюдения тел с малыми звездными величинами. Этому условию удовлетворяют значения $0,4 < \alpha < 0,6$. Экспоненциальному закону изменения вероятности обнаружения объекта в зависимости от видимой звездной величины отвечает значение $\alpha = 0,6$. При этом кривая аппроксимируется функцией $\varepsilon(m) \sim \exp(-m/1,55305)$ (рис.9).

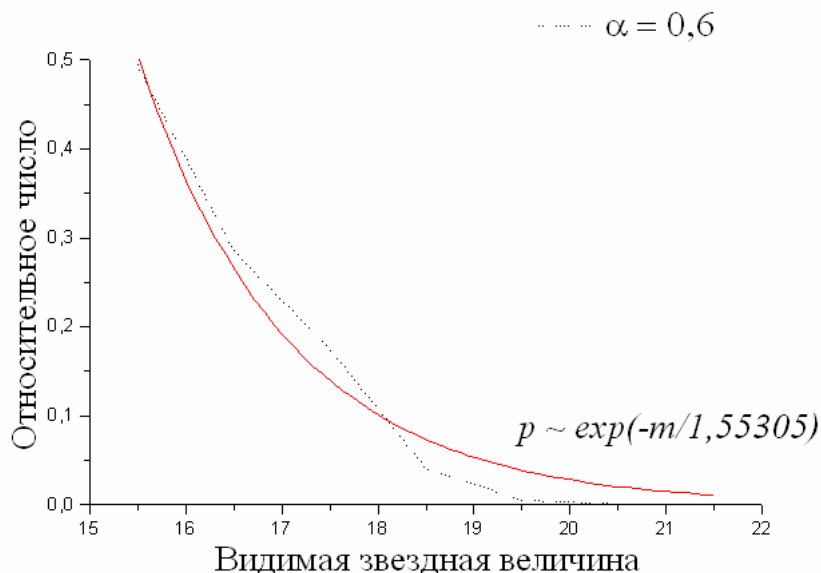


Рис.9. Подбор функции вероятности обнаружения объекта в зависимости от видимой звездной величины.

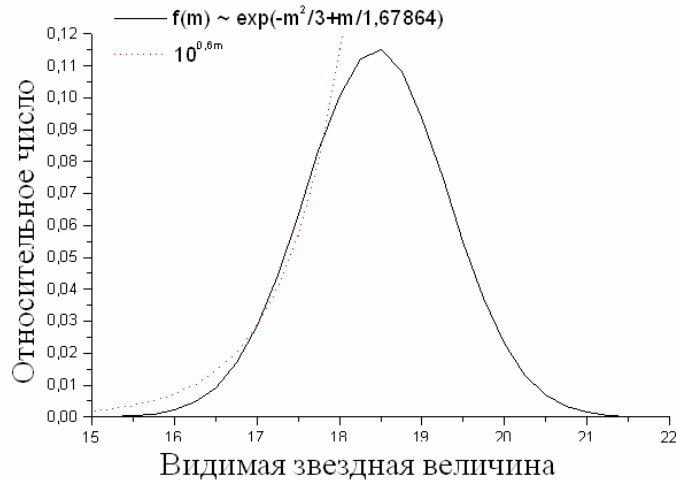


Рис.10. Аппроксимация распределения абсолютных звездных величин астероидов на кометных орбитах функцией $n(H) \sim 10^{\alpha H}$ двумя кривыми, соответствующими $\alpha = 0,6$ и $\alpha = 0,28$.

На рис.10 представлено распределение абсолютных звездных величин всех обнаруженных астероидов на кометных орбитах. Из анализа рис. 10 видно, что в распределении имеется два пика, которые соответствуют значениям степени $\alpha = 0,6$ и $\alpha = 0,28$.

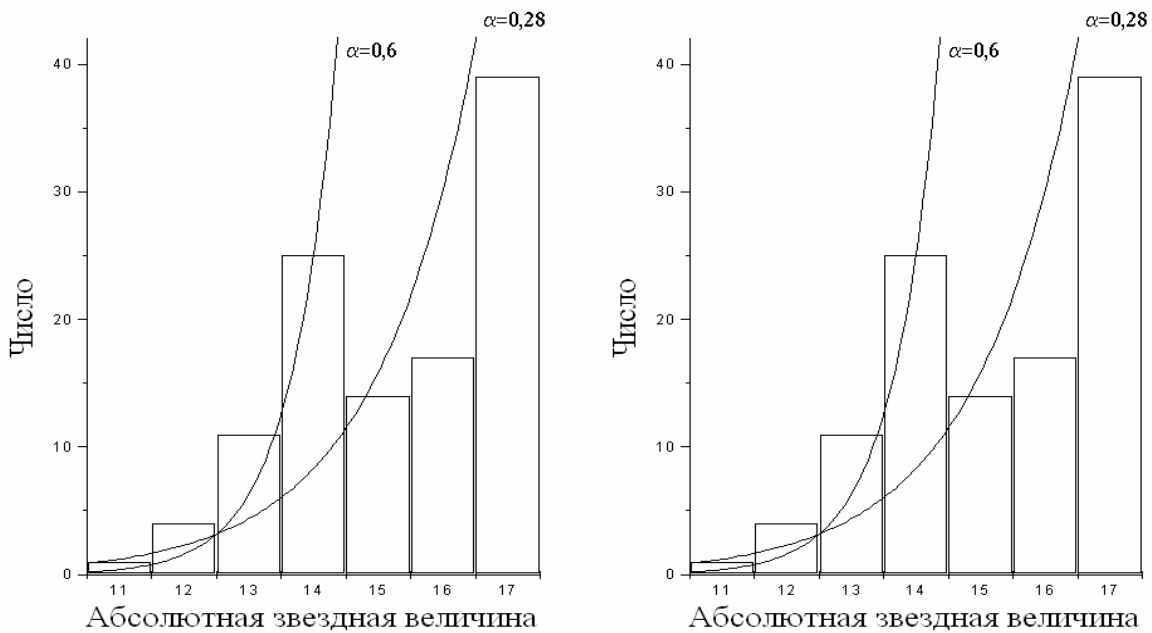


Рис.11. Аппроксимация распределения видимых звездных величин дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции функцией $n(m) \sim 10^{\alpha m}$.

Вообще говоря, показательное распределение является удобной аппроксимацией действительного распределения малых тел Солнечной системы. Совсем не обязательно, что они на самом деле так распределены. Например, в статье [8] было показано, что для разных классов объектов значение α разное. Причем этот параметр зависит от размеров тел: чем больше размеры, тем больше α . Если обратимся к формуле (5), то можно получить распределение дамоклоидов по звездным величинам.

$l(m) = v(m)/p_3 \sim \exp(-m^2/3 + m/1,67864)$. На рис.11 представлен вид этой функции, а так же показано, что на определенном интервале звездных величин она хорошо приближается функцией вида 10^{am} .

Одним из косвенных условий того, что распределение дамоклоидов близко к представленному на рис.11 является то, что дамоклоиды представляют собой угасшие ядра комет. В монографии Шульмана [13] было показано, что малые кометные ядра полностью рассыпаются на осколки. Следовательно, даже если и малых комет больше, чем крупных, они превращаются в пыль. Следовательно, после некоторого значения m количество дамоклоидов должно убывать для больших значений видимых звездных величин. Однако получить вид функции распределения дамоклоидов не представляется возможным поскольку:

$$\exp(-m^2/3 + m/1,67864) = \exp(-H^2/3 - 10H \lg(R\Delta)/3 - [5 \lg(R\Delta)]^2/3 + H/1,67864 + 5 \lg(R\Delta)/1,67864)$$

В этом уравнении невозможно разделить правую часть на произведения функций, аналогично (4). Поэтому действительный вид функции распределения дамоклоидов по размерам остается неизвестным, но на некоторых интервалах H достаточно удобным и близким к действительному распределению является приближение вида $n(H) \sim 10^{aH}$.

Заключение

В работе получено распределение перигелийных расстояний орбит дамоклоидов с учетом эффектов наблюдательной селекции. Показано, что вероятность обнаружения объекта в зависимости от его положения на небесной сфере (главным образом от эклиптической широты), имеет место, однако не столь сильно, как, например, для транснептуновых объектов или кентавров. Распределение дамоклоидов по абсолютным звездным величинам сложно представить функциональной зависимостью, но на некоторых интервалах очень удобным является показательный закон распределения дамоклоидов.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-02-16512 и программой целевой поддержки научных исследований молодых ученых ЮУрГУ.

Выражаю благодарность Емельяненко В.В. за обсуждение результатов и рекомендации.

Литература

1. **Ашер и др.** (Asher D.J., Bailey M.E., Hahn G., & Steel D.). Asteroid 5335 Damocles and its implications for cometary dynamics// Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1994. – V. 267. – P. 195 – 221.
2. **Браун** (Brown M.F.) The Inclination Distribution of the Kuiper Belt //Astron.J. – 2001. – V. 121. – P. 2804-2814.
3. **Вейсман и Лоури** (Weissman P.R. & Lowry S.C.) 2001. Bull. Am. Astron. Soc. V. 33. P.1094.
4. **Джевитт** (D. Jewitt) A first look at the damocloids// Astron.J. – 2005. – V. 129. – P. 530 – 538.
5. **Джедик и др.** (R. Jedicke, A. Morbidelli, T. Spahr, J.-M. Petit, W. F. Bottke Jr.) Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the Spaceguard Goal// Icarus V. 161. 2003 P. 17–33.
6. **Емельяненко и др.** (Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.) High-eccentricity trans-Neptunian objects as a source of Jupiter-family comets// Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2004. – V. 350. – P. 161 – 168.

7. *Емельяненко и др.* (Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.) Centaurs from Oort cloud and the origin of Jupiter-family comets// Mon. Not. R. Astron. Soc. 2005. V. 361. P. 1345-1351.
8. *Мич и др.* (Meech, K.J.; Hainaut, O.R.; Marsden, B.G.) Comet nucleus size distributions from HST and Keck telescopes// 2004. Icarus. V. 170. Issue 2. P. 463- 491
9. *Трухилло и др.* (Trujillo, Jewitt & Luu) // Astron. J. – 2001. – V. 122. – P. 457 –
10. *Трухилло и Браун* (Trujillo and Brown)// Astrophys.J. – 2001. – V. 554. L. 95
11. *Фернандез и др.* (Fernandez J.A., Tancredi G., Rickman H., Licandro J) The population, magnitudes, and sizes of Jupiter family comets// Astron. Astrophys. – 1999. – V. 352. – P.327-340.
12. *Центр малых планет*, 1996// <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Others.html>
13. *Шульман Л.М.* Ядра комет. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.

THE DEBIAS DISTRIBUTION OF DAMOCLOIDS

Biryukov E.E.

Summary

The distribution of Damocloids (asteroids on cometary orbits) is analyzed. The study is based on the observed sample of Damocloids using a procedure to take account of observational biases. It was determined that power-law of Damocloids density-function on absolute magnitude $n(H) \sim 10^{aH}$ can not be used to describe the distribution of all Damocloid orbits. However, the power-law is a good approximation over the limited interval of absolute magnitude H .

КИНЕМАТИКА ОБ-АССОЦИАЦИИ СКОРПИОНА-ЦЕНТАВРА Часть 1. Использование только тригонометрических параллаксов

Бобылев В.В., Байкова А.Т.

В распределении UV-скоростей звезд пояса Гулда выявлены три характерные детали, которые связаны с кинематическими особенностями групп LCC, UCL и US. Для их отделения от звезд пояса Гулда разработан новый метод анализа UV-плоскости. Применение данного метода позволило выделить наиболее вероятные члены указанных деталей. Кинематический анализ выделенных нами 219 звезд ($e_{\pi}/\pi < 0.15$) показал, что движение центров масс трех групп LCC, UCL и US подчиняется, в целом, движению, характерному для пояса Гулда. Помимо этого, весь комплекс SCO-CEN показывает собственное расширение с параметром угловой скорости 37 ± 7 км/с/кпк со значениями кинематического центра $l_{\odot} \approx -45^{\circ}$ и $R_{\odot} \approx 100$ пк. На основе данной скорости получена оценка характерного времени расширения комплекса, которая составляет 26 млн. лет. Угловая скорость собственного вращения комплекса SCO-CEN с указанными параметрами центра составляет -19 ± 7 км/с/кпк.

Введение

В околосолнечной окрестности расположен один из гигантских звездно-газовых комплексов – пояс Гулда. Подобные комплексы являются областями активного звездообразования и наблюдаются не только в нашей Галактике (Ефремов, 1998), но и в других галактиках (Ефремов, 1989; Ефремов, Эльмегрин, 1998).

По-видимому, пояс Гулда входит в состав более старой и более массивной Местной системы звезд. Впервые этот пояс ярких звезд был выделен Гершелем (1847), а галактические координаты полюса большого круга небесной сферы, вдоль которого группируются звезды, были определены Гулдом (1874). В работе Торры и др. (2000) на основе тщательного анализа пространственного распределения и плотности ОБ-звезд каталога HIPPARCOS (1997) были уточнены геометрические характеристики пояса Гулда – наклон к галактической плоскости составил $16 \div 22^{\circ}$, а направление линии узлов $275 \div 295^{\circ}$.

В состав пояса Гулда также входит система близких ОБ-ассоциаций (Линдبلاد, 1997; Зев и др., 1999). Благодаря космическим рентгеновским наблюдениям со спутников ROSAT, Chandra и XMM-Newton, наземным фотометрическим в инфракрасном диапазоне 2MASS, а также астрометрическим каталогам HIPPARCOS и Tycho-2, в близких ОБ-ассоциациях и рассеянных скоплениях выявлено более сотни звезд типа T Tauri (Мамаек и др., 2002; Вихман, 2003; Макаров, 2003). Они представляют собой звезды поздних спектральных классов малой массы, с возрастом несколько миллионов лет, не достигшие стадии главной последовательности и выявляются по ряду характерных признаков – избытку лития, рентгеновскому излучению и др. Эти звезды интересны для нас тем, что расширяют список звезд для изучения кинематики пояса Гулда. С поясом Гулда ассоциируются также водородные облака HI (Олано, 1982; Поппель, Марронетти, 2000), комплексы молекулярных облаков H₂ (Перро, Гренье, 2003). С поясом Гулда тесно связана и структура межзвездного разреженного горячего газа в непосредственной окрестности Солнца радиусом 200–300 пк. Здесь выявлен т.н. “Местный пузырь” (Сфейр и др., 1999), наиболее реалистичной теорией происхождения которого, по мнению Бергхофера, Брейтшвердта (2002), является гипотеза о взрыве около 20 сверхновых в последние 10–20 млн. лет. В околосолнечной окрестности (в основном в

ассоциации Скорпиона-Центавра) уже обнаружены 7 нейтронных звезд (Попов и др., 2003), которые, по-видимому, являются остатками таких сверхновых.

К настоящему времени предложено несколько сценариев образования пояса Гулда. Согласно первому, к его образованию привело столкновение высокоскоростных облаков нейтрального водорода с диском Галактики (Франко и др., 1988; Комерон, Торра, 1992; 1994). Согласно второму, к образованию пояса Гулда привел взрыв сверхновой (Олано, 1982; Поппель, Марронетти, 2000). Согласно третьему (Олано, 2001), образование пояса Гулда является этапом кинематической эволюции Местной системы звезд.

Одной из заметных структур, связанных с поясом Гулда является ОВ-ассоциация Скорпиона-Центавра. Особенностью ОВ-ассоциаций является их гравитационная неустойчивость. Это приводит к их достаточно быстрому рассеиванию и вытягиванию вдоль галактических орбит, которое происходит под влиянием дифференциального вращения Галактики.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы учесть влияние галактического вращения, принять во внимание систематическое вращение и расширение пояса Гулда и оценить скорости возможного собственного расширения и вращения ближайшей к нам ассоциации Скорпиона-Центавра. Для решения задачи мы используем только тригонометрические параллаксы HIPPARCOS в качестве оценки расстояний до звезд.

1. Данные

Подробное описание списка 700 звезд HIPPARCOS, принадлежащих поясу Гулда, можно найти в работе Бобылева (2006). Для звезд ОВ-ассоциации Скорпиона-Центавра нами добавлены кандидаты из списка де Геуса и др. (1989), отождествление которых с каталогом HIPPARCOS было выполнено в работе Сартори и др. (2003). Лучевые скорости звезд нами взяты из каталога OSACA (Бобылев и др., 2006; Гончаров, 2006). Для ассоциации Скорпиона-Центавра их особенность состоит в том, что они вычислены с участием данных Мадсена и др. (2002), которые получены на основе метода групповых параллакссов.

В настоящей работе мы используем только те звезды, которые удовлетворяют условию $e_{\pi}/\pi < 0.2$, что позволяет снизить влияние известного эффекта Лутца-Келкера (1973). Учет галактического вращения нами осуществляется с использованием постоянных Оорта $A = 13.7 \pm 0.6$ км/с/кпк и $B = -12.9 \pm 0.4$ км/с/кпк, которые были определены в работе Бобылева (2004а).

На рис. 1 показана диаграмма показатель цвета – абсолютная звездная величина для 408 анализируемых звезд. Показаны изохронны для трех возрастов, построенные по данным работы Шаерера и др. (1993) для металличности $Z=0.008$. Для учета межзвездного поглощения мы использовали оценки A_v из работы Сартори и др. (2003) для индивидуальных звезд ассоциации Скорпиона-Центавра, для звезд других скоплений мы использовали параметр $E(B-V)$ из каталога COCD (Пискунов и др., 2006). Для перехода от фотометрических величин $T_{\text{схо}} V_T, B_T$ к системе Джонсона и определения величин $V, B-V$ использованы полиномы из работы Мамаека и др. (2002). Из диаграммы, показанной на рис. 1, хорошо видно, что в целом возраст пояса Гульда не превышает 50 миллионов лет. Ширина главной последовательности объясняется тем, что имеется заметная доля звезд, не достигших главной последовательности (Сартори и др., 2003). В то же время, среди кандидатов имеется ряд звезд, например, HIP 82135 (UCL, Sp: K0III, $V_T = -9.2$ км/с), положение которой на диаграмме цвета – абсолютная звездная величина дает основание для ее дальнейшего исключения из списка кандидатов. Характер нижней части диаграммы ($M_v > 4$) связан с тем, что мы привлекли M-карлики, принадлежащие ближайшим движущимся скоплениям Tuc/НогА, TWA и β Pic.

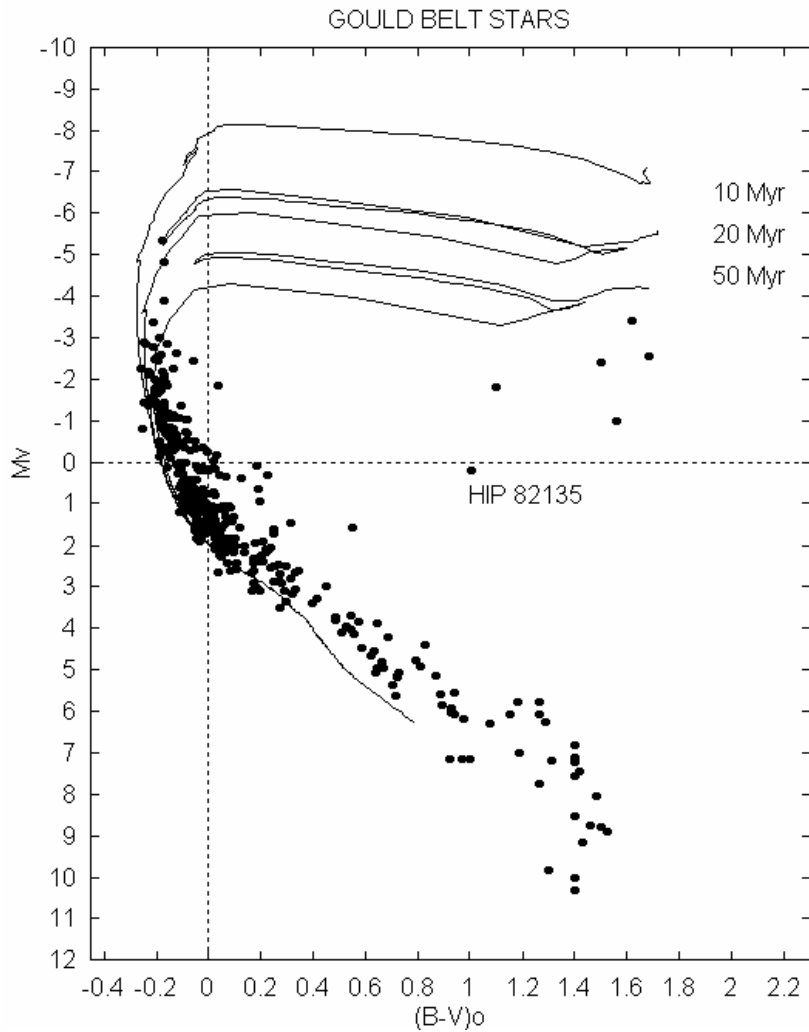


Рис. 1. Диаграмма показатель цвета – абсолютная звездная величина для 408 звезд, удовлетворяющих условию $e_{\pi}/\pi < 0.2$. Показаны изохронны для трех возрастов.

На рис. 2 дано распределение UV-скоростей звезд пояса Гулда, которые освобождены от галактического вращения. Как можно видеть из показанного на рис. 2 распределения скоростей звезд, отчетливо выделяются три концентрации, связанные с кинематическими особенностями звезд Скорпиона-Центавра (UCL, LCC и US).

В данной работе мы ставим задачу по выделению указанных трех структур из общего распределения на UV-плоскости скоростей, без привлечения данных о координатах звезд. Такой подход, по нашему мнению, позволит выявить звезды и других скоплений, имеющих общую кинематику с указанными ветвями. В анализе W-скоростей нет необходимости, так как движения по координате z звезд UCL, LCC и US очень близки. Для решения поставленной задачи мы предложили строгий метод разделения звезд, основанный на вероятностных критериях, подробное описание которого мы даем в п. 3.

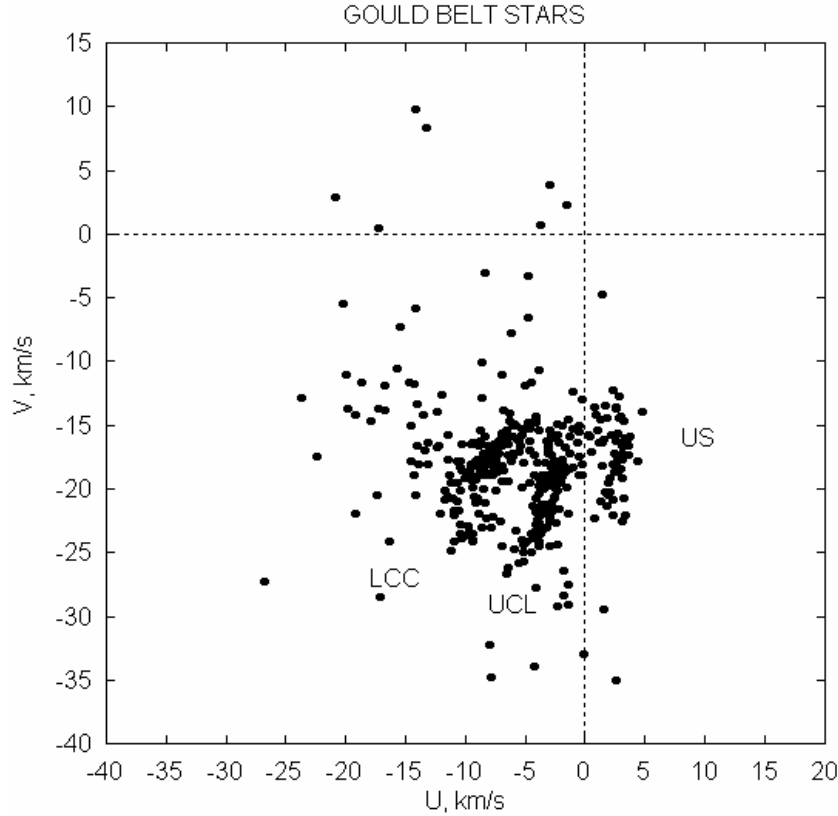


Рис. 2. Распределение UV-скоростей 408 звезд, удовлетворяющих условию $e_{\pi}/\pi < 0.2$. Скорости звезд освобождены от галактического вращения, даны относительно Солнца.

В целом для массива рассматриваемых звезд средние ошибки определения компонент скоростей $V_l = 4.74 \cdot r \cdot \mu_l \cos b$, $V_b = 4.74 \cdot r \cdot \mu_b$ и V_r составляют ± 0.9 км/с, ± 0.9 км/с и ± 3 км/с (когда есть оценки ошибок) соответственно.

2. Кинематическая модель

В настоящей работе используется прямоугольная галактическая система координат с осями, направленными от наблюдателя в сторону галактического центра ($l=0^\circ$, $b=0^\circ$, ось x), в направлении галактического вращения ($l=90^\circ$, $b=0^\circ$, ось y) и в направлении северного полюса Галактики ($b=90^\circ$, ось z).

Мы применяем уравнения, полученные на основе известных формул Боттлингера (Огородников, 1965), в предположении о наличии единого кинематического центра для вращения и расширения, с использованием двух членов разложения в ряд Тейлора угловой скорости вращения и аналогичного параметра для расширения (Линдبلاد, 2000; Бобылев, 2004b). Уравнения имеют вид:

$$V_r = -u_o \cos b \cos l - v_o \cos b \sin l - w_o \sin b + \cos^2 b k_o r + (R-R_o)(r \cos b - R_o \cos(l-l_o)) \cos b k'_o - R_o (R-R_o) \sin(l-l_o) \cos b \omega'_o, \quad (1)$$

$$4.74 r \mu_l \cos b = u_o \sin l - v_o \cos l - (R-R_o)(R_o \cos(l-l_o) - r \cos b) \omega'_o + r \cos b \omega_o + R_o (R-R_o) \sin(l-l_o) k'_o, \quad (2)$$

$$4.74 r \mu_b = u_o \cos l \sin b + v_o \sin l \sin b - w_o \cos b - \cos b \sin b k_o r - (R-R_o)(r \cos b - R_o \cos(l-l_o)) \sin b k'_o + R_o (R-R_o) \sin(l-l_o) \sin b \omega'_o. \quad (3)$$

Здесь коэффициент размерности 4.74 представляет собой частное от деления числа километров в астрономической единице на число секунд в тропическом году, $r = 1/\pi$ – гелиоцентрическое расстояние звезды, R_\odot – расстояние от Солнца до кинематического центра, R – расстояние от звезды до центра вращения, l_\odot – направление на кинематический центр, $u_\odot, v_\odot, w_\odot$ – компоненты пекулярной скорости Солнца. Компоненты собственного движения звезды $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год, лучевая скорость V_r в км/с, параллакс π в мсд, расстояния R, R_\odot и r в кпк. Величина ω_\odot является угловой скоростью вращения, а k_\odot скоростью радиального расширения/сжатия звездной системы на расстоянии R_\odot , параметры ω'_\odot и k'_\odot являются соответствующими производными. Расстояние R вычисляется в соответствии с выражением

$$R^2 = (r \cos b)^2 - 2R_\odot r \cos b \cos(l - l_\odot) + R_\odot^2.$$

Система условных уравнений (1)–(3) содержит семь неизвестных: $u_\odot, v_\odot, w_\odot, \omega_\odot, \omega'_\odot, k_\odot, k'_\odot$, которые определяются методом наименьших квадратов. Предполагается, что левые части уравнений (1)–(3) освобождены от дифференциального вращения Галактики.

3. Метод разделения фракций звезд

В данной работе предлагается разновидность вероятностного подхода к разделению фракций звезд, основанная на приближении двумерной плотности вероятностей UV-скоростей всех рассматриваемых звезд набором отдельных гауссиан, представляющих собой плотности вероятностей отдельных структурных образований.

Для того чтобы получить оценку двумерной плотности вероятностей $f(U, V)$ всех рассматриваемых звезд, мы применяем метод адаптивного сглаживания (Скульян и др., 1999) к карте исходных дискретно распределенных пространственных U, V -скоростей. В отличие от работы Скульяна и др. (1999) мы используем двумерную радиально симметричную гауссову функцию ядра: где $r^2 = x^2 + y^2$. Очевидно, выполняется необходимое для оценки плотности вероятностей соотношение: $\int K(r) dr = 1$. Отметим, что в нашем случае интервал дискретизации двумерных карт был выбран равным 0.25 км/с с учетом плотности распределения звезд в поле скоростей, при этом площадь квадратного пиксела составила $S = 0.25 \times 0.25 \text{ км}^2/\text{с}^2$.

Основная идея адаптивного метода сглаживания заключается в том, что в каждой точке карты выполняется операция свертки лучом размера, задаваемого параметром σ , изменяющимся в соответствии с плотностью данных в окрестности рассматриваемой точки. Таким образом, в зонах с повышенной плотностью сглаживание производится сравнительно узким лучом, с понижением плотности данных ширина луча увеличивается.

Используем следующее определение адаптивного сглаживания в произвольной точке $\xi = (U, V)$ (Скульян и др., 1999):

$$\hat{f}(\xi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\xi - \xi_i}{h\lambda_i}\right),$$

где $\xi_i = (U_i, V_i)$, λ_i – локальный безразмерный масштабный параметр луча в точке ξ_i , h – общий параметр сглаживания, n – число данных $\xi_i = (U_i, V_i)$. Параметр λ_i в каждой точке двумерной UV-плоскости определяется следующим образом:

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{g}{\hat{f}(\xi)}}, \quad \ln g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \hat{f}(\xi),$$

где g представляет собой геометрическое среднее $\hat{f}(\xi)$. Очевидно, для определения λ_i необходимо знать распределение $f(\xi)$, которое, в свою очередь, может быть определено, если известны все λ_i . Поэтому задача нахождения искомого распределения решается итерационно. В качестве первого приближения используем распределение, полученное путем сглаживания исходной UV-карты лучом фиксированного размера. Оптимальное значение параметра h находится из условия минимума среднеквадратического отклонения оценки $\hat{f}(\xi)$ от истинного распределения $f(\xi)$. Найденное нами значение h для комплекса звезд, рассматриваемого в данной работе, составляет примерно 1.25 км/с. Кроме того, карты масштабируются множителем $n \cdot S$ с целью получения полной вероятности, равной единице.

Полученная нами карта двумерной плотности вероятностей UV-скоростей рассматриваемых в данной работе звезд представлена на рис. 3 (а). На этом рисунке можно визуально выделить ассоциации звезд LCC, UCL, US, а также протяженную составляющую пояса Гулда. С целью формально обоснованного отнесения каждой звезды рассматриваемого комплекса к той или иной фракции аппроксимируем каждую фракцию набором из нескольких гауссиан, каждая из которых представляется шестью неизвестными параметрами:

$$P_i(U, V) = A_i \exp \left[- \frac{((U - U_{0i}) \cos \theta_i + (V - V_{0i}) \sin \theta_i)^2}{2\sigma_{U_i}^2} - \frac{((U - U_{0i}) \sin \theta_i - (V - V_{0i}) \cos \theta_i)^2}{2\sigma_{V_i}^2} \right],$$

где i – номер гауссианы, $P_i(U, V)$ – соответствующая функция распределения, параметры гауссианы A_i – амплитуда, пропорциональная числу звезд фракции, U_{0i} и V_{0i} – координаты центра гауссианы по U и V координатам соответственно, σ_{U_i} и σ_{V_i} – соответствующие дисперсии распределения, θ_i – угол, определяющий ориентацию гауссианы на UV-плоскости (угол между большой осью эллипса и осью V).

Фракцию LCC представим суммой двух гауссиан, аппроксимирующих ядро и более протяженную подложку, фракцию UCL – трех гауссиан, две из которых относятся к ядру, а третья – к протяженной подложке, фракцию US – одной гауссианой и, наконец, общую протяженную подложку, относящуюся ко всему комплексу звезд, также одной гауссианой. Далее складываем все семь заданных гауссиан и получаем модельное распределение

$$P_M(U, V) = \sum_{i=1}^7 P_i(U, V)$$

с 42 неизвестными параметрами. Для их определения применяем метод наименьших квадратов приближения модельного распределения к распределению, полученному по исходному распределению скоростей звезд (рис. 3(а)). Таким образом, ищется минимум функционала:

$$e = \sum_{U, V} \|f(U, V) - P_M(U, V)\|^2.$$

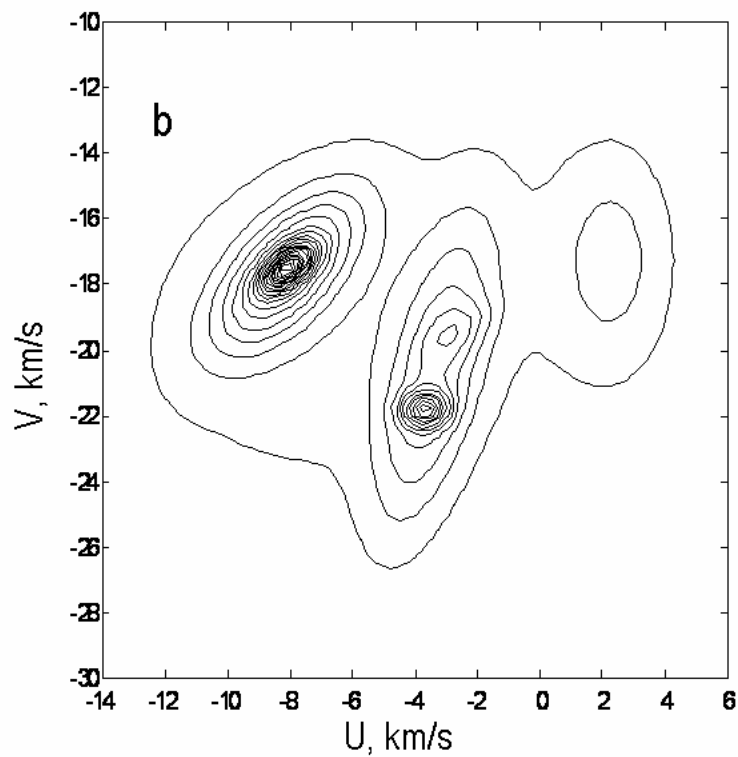
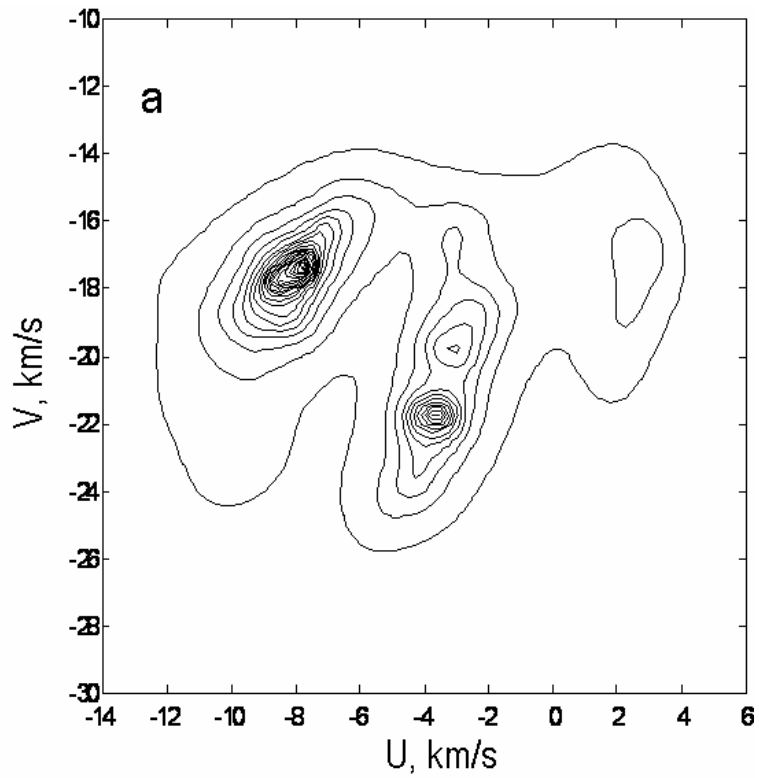


Рис. 3. Распределения плотности вероятностей (а) – полученное адаптивным методом сглаживания по заданному дискретному распределению UV-скоростей звезд; (б) – полученное в результате приближения распределений UV-скоростей звезд отдельных фракций отдельными гауссовыми распределениями.

В результате решения задачи минимизации было найдено модельное распределение, которое изображено на рис. 3(б). Ошибка приближения составила 2.3%. Большой точности можно достичь, привлекая большое число гауссиан, аппроксимирующих еще более тонкие структурные детали на UV-плоскости.

Далее вычисляем вероятности принадлежности каждой звезды с номером $k, k=1\dots n$ к одному из следующих структурных образований LCC, UCL, US или протяженной части пояса Гулда (GOULD) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_k &= \sum_i P_i(U_k, V_k), \\
 P_k^{LCC} &= (P_1(U_k, V_k) + P_2(U_k, V_k)) / P_k, \\
 P_k^{UCL} &= (P_3(U_k, V_k) + P_4(U_k, V_k) + P_5(U_k, V_k)) / P_k, \\
 P_k^{US} &= P_6(U_k, V_k) / P_k, \\
 P_k^{GOULD} &= P_7(U_k, V_k) / P_k.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Очевидно, максимум вычисленных вероятностей относит звезду к той или иной из рассмотренных фракций звезд, названия которых указаны в качестве верхних индексов в формулах (4).

4. Результаты

Полученные нами результаты отражены на рис. 4-5 и в таблицах 1-2. На рис. 4 дано распределения UV-, UW- и VW-скоростей 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, удовлетворяющих условию $e_\pi/\pi < 0.15$, и имеющих положительные координаты x . На рис. 5 дано их пространственное распределение. Звезды разделены в соответствии с полученными по формулам (4) вероятностями и описанному правилу отнесения звезды к той или иной фракции. В таблице 1 показаны кинематические параметры пояса Гулда, найденные при решении уравнений (1)–(3) с использованием рассматриваемых звезд, скорости которых были исправлены за галактическое вращение при различных e_π/π , с параметрами центра $l_\odot=128^\circ$ и $R_\odot = 150$ пк (Бобылев, 2004b). Как видно из таблицы 1, ошибка единицы веса достигает минимума при ограничении $e_\pi/\pi < 0.15$, которое мы и используем далее.

В работе Бобылева (2006), из анализа движения рассеянных скоплений, принадлежащих структуре пояса Гулда, были найдены следующие кинематические параметры: $\omega_\odot = -18.8 \pm 9$ км/с/кпк, $\omega'_\odot = 32.9 \pm 16.4$ км/с/кпк², $k_\odot = 22.1 \pm 4.9$ км/с/кпк, $k'_\odot = -58.3 \pm 16.4$ км/с/кпк², при $l_\odot=128^\circ$ и $R_\odot = 150$ пк, которые были применены для учета движений, связанных с вращением и расширением пояса Гулда как целого. В таблице 2 даны кинематические параметры, найденные при решении уравнений (1)–(3) с использованием звезд SCO-CEN, для которых $e_\pi/\pi < 0.15$, с принятыми значениями $l_\odot=128^\circ$ и $R_\odot = 150$ пк для решения № 1, и $l_\odot=-45^\circ$ и $R_\odot = 100$ пк для решения № 2. В случае решения № 2 скорости звезд были исправлены как за галактическое вращение, так и за движение пояса Гулда.

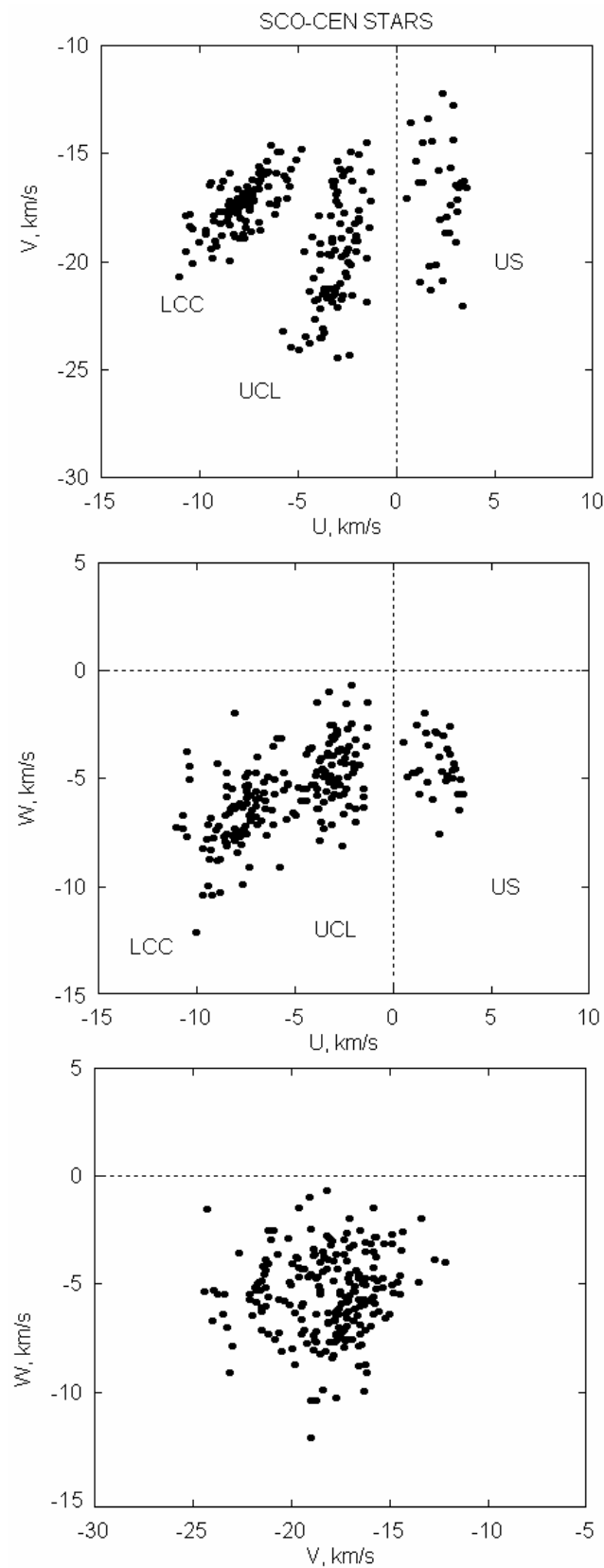


Рис. 4. Распределения UV-, UW- и VW-скоростей 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, удовлетворяющих условию $e_{\pi}/\pi < 0.15$, скорости даны относительно Солнца.

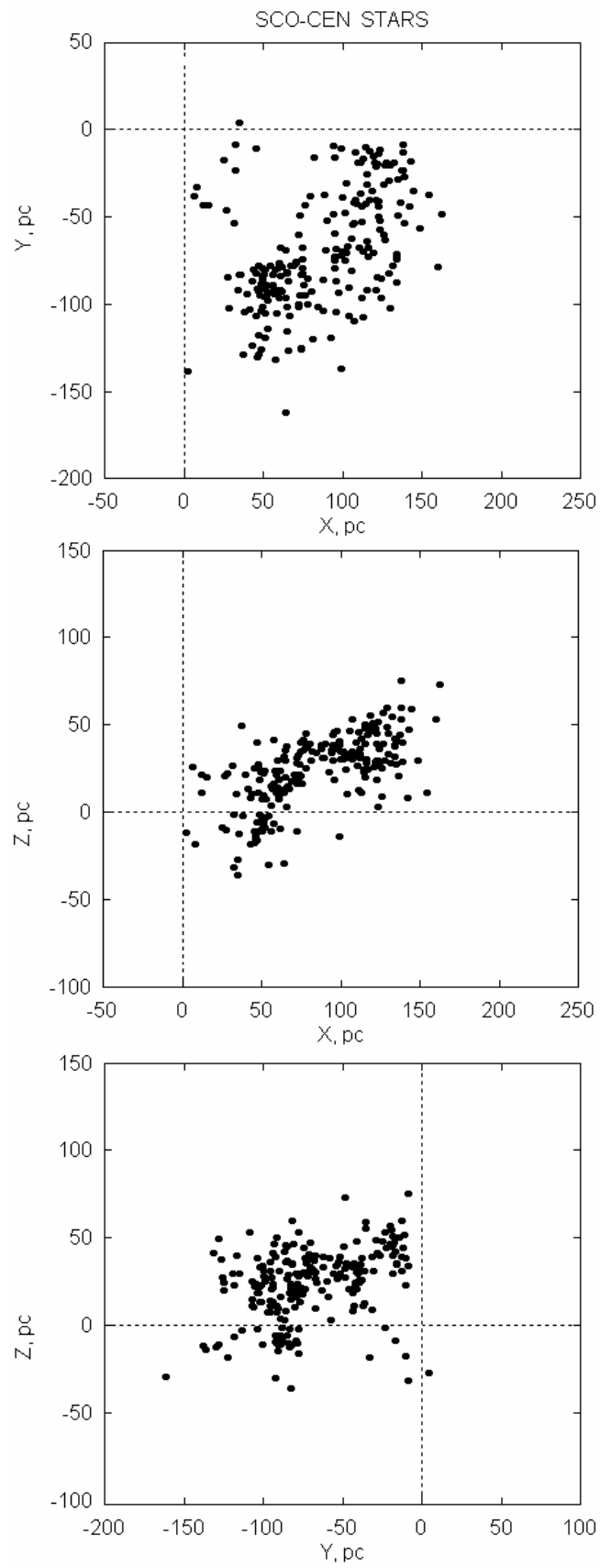


Рис. 5. Пространственное распределение 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, удовлетворяющих условию $e_{\pi}/\pi < 0.15$.

Таблица 1. Кинематические параметры пояса Гулда, найденные при решении уравнений (1)–(3) с использованием рассматриваемых звезд, скорости которых были исправлены за галактическое вращение, при различных e_{π}/π , с принятыми параметрами центра $l_{\odot} = 128^{\circ}$ и $R_{\odot} = 150$ пк.

e_{π}/π	$-U_{\odot}$, км/с $-V_{\odot}$, км/с $-W_{\odot}$, км/с	ω_{\odot} км/с/кпк	ω'_{\odot} км/с/кпк ²	k_{\odot} км/с/кпк	k'_{\odot} км/с/кпк ²	σ км/с	N звезд
0.20	-6.53 ± 0.31 -15.60 ± 0.31 -5.44 ± 0.19	-47 ± 4	111 ± 14	49 ± 4	-87 ± 14	3.92	406
0.15	-6.53 ± 0.31 -15.60 ± 0.31 -5.44 ± 0.19	-62 ± 6	202 ± 24	84 ± 6	-221 ± 24	3.81	328
0.10	-6.53 ± 0.31 -15.60 ± 0.31 -5.44 ± 0.19	-66 ± 14	308 ± 60	79 ± 14	-248 ± 60	4.12	174

Примечание: Компоненты пекулярной скорости Солнца даны с обратным знаком для сопоставления с рис. 2–4.

Таблица 2. Кинематические параметры, найденные при решении уравнений (1)–(3) с использованием звезд SCO-CEN, для которых $e_{\pi}/\pi < 0.15$, с принятыми значениями $l_{\odot} = 128^{\circ}$ и $R_{\odot} = 150$ пк для решения № 1, и $l_{\odot} = -45^{\circ}$ и $R_{\odot} = 100$ пк для решения № 2. В случае решения № 2 скорости звезд были исправлены как за галактическое вращение, так и за вращение и расширение пояса Гулда.

№ решения	$-U_{\odot}$, км/с $-V_{\odot}$, км/с $-W_{\odot}$, км/с	ω_{\odot} км/с/кпк	ω'_{\odot} км/с/кпк ²	k_{\odot} км/с/кпк	k'_{\odot} км/с/кпк ²	σ км/с	N звезд
1	-5.50 ± 0.42 -11.91 ± 0.42 -5.50 ± 0.14	-57 ± 5	60 ± 26	64 ± 5	-82 ± 26	2.01	219
2	-6.58 ± 0.66 -12.66 ± 0.66 -5.50 ± 0.14	-19 ± 7	368 ± 156	37 ± 7	-11 ± 157	2.01	219

Рисунки 6–8 иллюстрируют суть предлагаемого нами подхода. На рис. 6 даны остаточные скорости 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, удовлетворяющих условию $e_{\pi}/\pi < 0.15$. Жирными линиями на рис 6 показаны кривые расширения (слева) и вращения (справа), найденные в работе Бобылева (2006), из анализа движения рассеянных скоплений (значения даны в начале п. 4). Приведение к “центру масс” выполнено с использованием вычисленных на основе простого усреднения средних скоростей:

$U = -11.2$ км/с, $V = -14.3$ км/с, $W = -6.9$ км/с для пояса Гулда (таблицы 1,2 работы Бобылева, 2006), и $U = -4.48$ км/с, $V = -18.28$ км/с, $W = -5.51$ км/с для SCO-CEN. Отчетливо видно, что звезды комплекса Скорпиона-Центавра имеют заметный наклон к показанной кривой расширения пояса Гулда при $R \approx 250$ пк. Как можно видеть из правого графика рис. 6, центр масс комплекса Скорпиона-Центавра имеет существенное отклонение от нанесенной кривой, имеющийся наклон (тот же знак, что и у кривой вращения), который связан с собственным вращением может объяснить большие значения ω_{\odot} , полученные в решении № 1 таблицы 1.

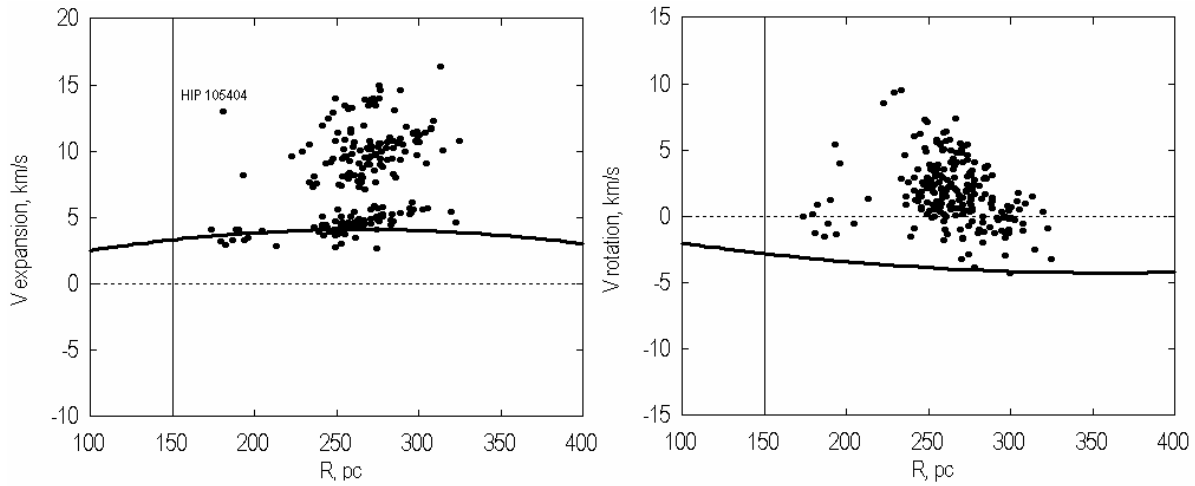


Рис. 6. Скорости 219 звезд (приведены к “центру масс” пояса Гулда, исправлены за вращение Галактики), $e_{\pi}/\pi < 0.15$ в зависимости от расстояния от предполагаемого кинематического центра пояса Гулда. См. также текст.

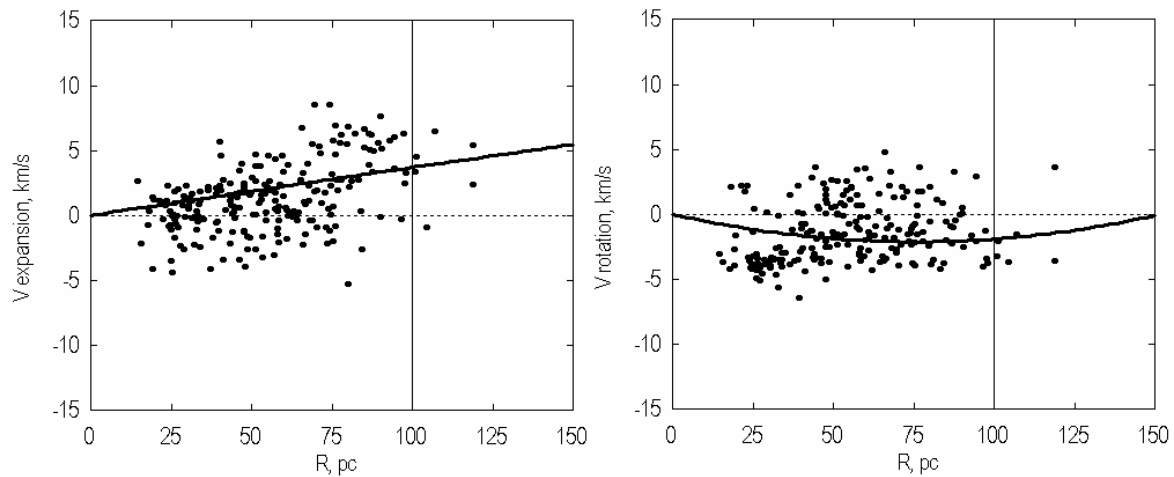


Рис. 7. Остаточные скорости 219 звезд (приведены к “центру масс” комплекса Скорпиона-Центавра, исправлены за вращение Галактики, а также за вращение и за расширение пояса Гулда), в зависимости от расстояния от предполагаемого кинематического центра комплекса Скорпиона-Центавра, вертикальной линией отмечено значение $R_0 = 100$ пк, $l_0 = -45^\circ$.

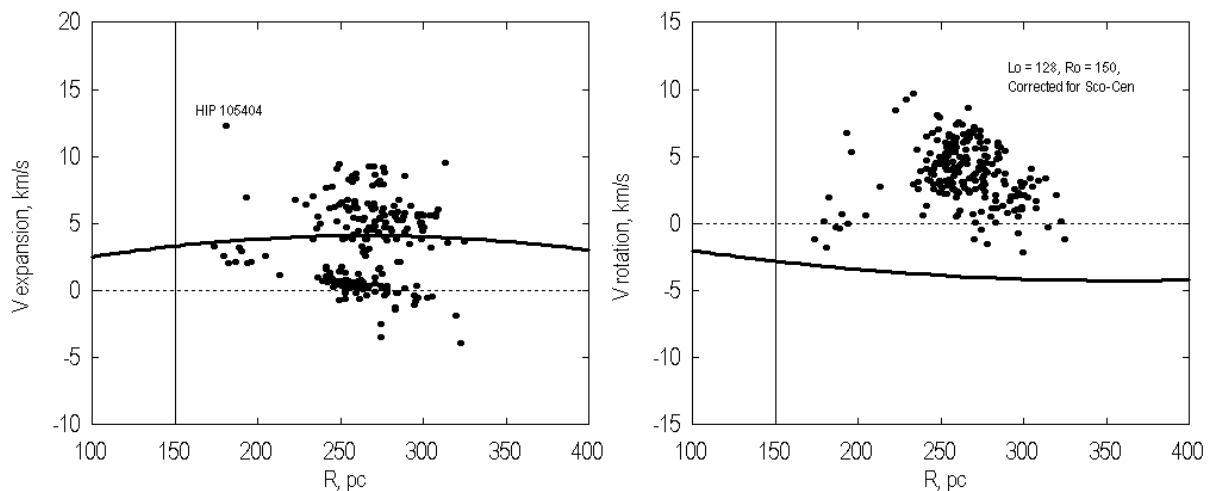


Рис. 8. Скорости 219 звезд (приведены к “центру масс” пояса Гулда, исправлены за вращение Галактики, а также за собственное вращение и расширение комплекса Скорпиона-Центавра), в зависимости от расстояния.

Далее мы предполагаем, что комплекс Скорпиона-Центавра имеет собственное расширение и вращение. Нам представляется логичным предположение о том, что кинематический центр комплекса должен располагаться вблизи геометрического центра. Исходя из этого предположения нами выбран параметр центра R_0 . В работе Бобылева (2004с), на основе моделирования эффектов вращения и расширения было показано, что в случае чистого расширения звездной системы, главная ось как эллипса тензора деформации на UV-плоскости скоростей, так и эллипса остаточных скоростей перпендикулярны к направлению на кинематический центр. На основе этого моделирования, а также рис. 2-3 мы приняли значение $l_0 = -45^\circ$.

На рис. 7 даны остаточные скорости 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, удовлетворяющих условию $e_\pi/\pi < 0.15$. Скорости звезд приведены к “центру масс” комплекса, исправлены за вращение Галактики, а также за вращение и за расширение пояса Гулда. Жирными линиями на рис. 7 показаны кривые расширения (слева) и вращения (справа), найденные с использованием данных звезд (решении № 2 таблицы 2). Из рис. 7 видно, что построенные кривые хорошо согласуются с данными.

На рис. 8 даны остаточные скорости 219 звезд комплекса Скорпиона-Центавра, скорости которых приведены к “центру масс” пояса Гулда, исправлены за вращение Галактики, а также за найденное собственное вращение и расширение комплекса Скорпиона-Центавра комплекса.

На рис. 9 показана UV-плоскость остаточных скоростей 219 звезд, которые исправлены за вращение Галактики, за вращение и расширение пояса Гулда, а также за собственное вращение и расширение комплекса Скорпиона-Центавра (на основе решения № 2 таблицы 2). Как можно видеть из рисунка, облако точек практически не имеет дифференциации, в отличие от верхнего графика на рис. 4. Это позволяет заключить, что, наш подход правильно отражает наблюдаемую кинематику комплекса Скорпиона-Центавра. На рис. 9 отмечена звезда HIP 105404 ($P^{UCL} = 0.63$, звезда из списка Макарова, 2003), которая имеет заметное отклонение от общего распределения.

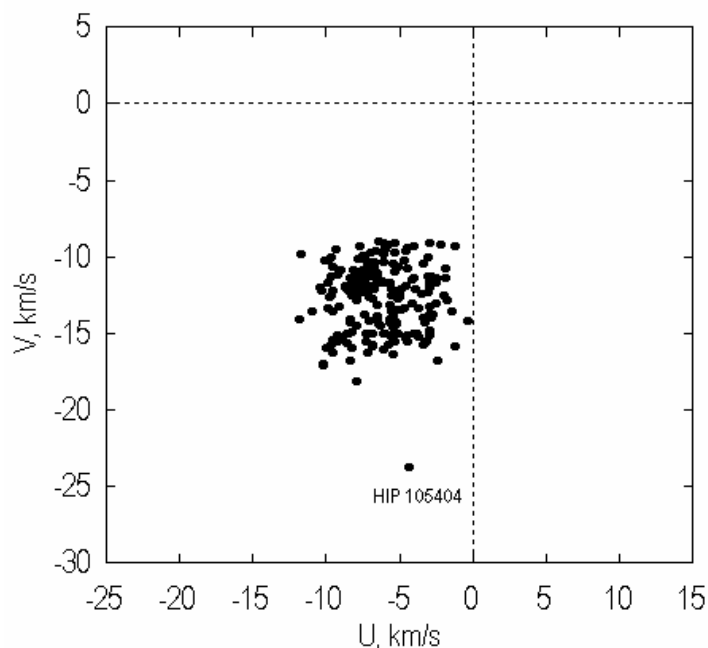


Рис. 9. Остаточные скорости 219 звезд, исправленные за вращение Галактики, за вращение и расширение пояса Гулда, а также за собственное вращение и расширение комплекса Скорпиона-Центавра, скорости даны относительно Солнца.

На основе полученных данных можем заключить, что комплекс Скорпиона-Центавра принимает участие в систематическом расширении пояса Гулда. С другой же стороны, имеется собственное расширение с параметром угловой скорости $k_o = 37 \pm 7$ км/с/кпк ($l_o \approx -45^\circ$ и $R_o \approx 100$ пк.), параметры собственного вращения определяется хуже. На основе полученной скорости k_o можем оценить характерное время расширения комплекса по известной формуле $T = 977.5/k_o$ (Марей, 1986), которая составляет $T = 26 \pm 5$ млн. лет. Эта величина является независимой кинематической оценкой возраста комплекса Скорпиона-Центавра. Она находится в хорошем согласии с оценкой возраста наиболее старых групп (LCC и UCL) $T = 16-20$ млн. лет, которая получена в работе Сартори и др. (2003) из анализа данных фотометрии.

Найденный параметр расширения $k_o = 37 \pm 7$ км/с/кпк находится в согласии с оценкой, полученной Блау (1964) из анализа лучевых скоростей звезд, составившей 50 км/с/кпк. Причиной наблюдаемого эффекта расширения ассоциации Скорпиона-Центавра является воздействие на нее дифференциального галактического вращения.

Необходимо отметить, что представленная схема не является единственным решением, так как на основе имеющихся данных невозможно различить эффекты вращения и расширения. Например, при изменении угла l_o на 45° максимально проявится эффект вращения при незначительном расширении (будет картина, обратная той, что показана на рис. 7). Кроме того, положение сгущений точек на оси ординат, которые даны на рис. 7 и 9, сильно зависит от координат “центра масс”, особенно для скорости V . Изложенная модель, в которой доминирует эффект расширения комплекса Скорпиона-Центавра, нам представляется более реалистичной.

Параметры решения № 2, представленные в таблице 2, вычислены в предположении о том, что $l_o = -45^\circ$ для всех трех групп. Для группы LCC различные методы оценки данного угла дают величины, близкие к этой величине. Это направление систематически изменяется, что видно из рис. 2, 3 и 4 (ориентация эллипсов). Систематическое изменение ориентации первой оси эллипсоида остаточных скоростей связано с вращением пояса Гулда и вращением Галактики (Огородников, 1965). Это изменение позволяет сделать еще одну независимую кинематическую оценку разности времен звездообразования по известной формуле (Огородников, 1965) $\Delta T = \Delta l / 2\omega$, где Δl – изменение угла (вертекса), $\omega = 26.6$ км/с/кпк – угловая скорость вращения Галактики. Например, разность ориентации эллипсов LCC и US на рис. 3b составляет $\Delta l = 45^\circ$, что дает $\Delta T = 15$ млн. лет. Полученная оценка является завышенной, так как выделенная нами структура US, как это видно из рис. 4, неоднородна, состоит из двух фракций. Как можем видеть из рис. 2 и 3, реальные изменения углов ориентации эллипсов (LCC-UCL, UCL-US) имеют величины не более 10° .

В итоге реализации подхода, описанного в п. 3, среди 219 звезд, помимо звезд HIPPARCOS из списка Зева и др. (1999), к комплексу Скорпиона-Центавра нами отнесен и ряд звезд из скоплений TWA (6 звезд), β Pic (3), α Car (1), Chamaeleontis (2), IC 2602 (2) и 4 близкие рентгеновские звезды списка Макарова (2003).

5. Заключение

Нами рассмотрен наиболее полный список звезд HIPPARCOS, принадлежащих ассоциации Скорпиона-Центавра (состоящей из трех групп: LCC, UCL и US), с известными параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями.

В распределении UV-скоростей звезд пояса Гулда выявлены три характерные детали, которые связаны с кинематическими особенностями групп LCC, UCL и US. Для их отделения от звезд пояса Гулда разработан новый метод анализа UV-плоскости. Применение данного метода позволило выделить наиболее вероятные члены указанных деталей.

Анализ движения выделенных нами 219 звезд позволяет сделать следующие выводы. Центры масс трех групп LCC, UCL и US подчиняются, в целом, движению, характерному для пояса Гулда, они принимают участие в его расширении, имеют сходное с ним движение относительно местного стандарта покоя. Помимо этого, весь комплекс Скорпиона-Центавра показывает собственное расширение с параметром угловой скорости $k_o = 37 \pm 7$ км/с/кпк и параметрами кинематического центра $l_o \approx -45^\circ$, $R_o \approx 100$ пк. На основе данной скорости нами получена оценка характерного времени расширения комплекса, которая составляет $T = 26$ млн. лет. Угловая скорость собственного вращения комплекса SCO-CEN с указанными параметрами центра найдена равной -19 ± 7 км/с/кпк.

Формирование каждой из групп LCC, UCL и US происходило из одного родительского облака водорода. Анализ распределений UV-скоростей рассмотренных звезд позволяет заключить также, что в комплексе Скорпиона-Центавра имело место, по крайней мере, три периода звездообразования, первый из которых стартовал около 26 млн. лет назад, другие два происходили примерно через равные промежутки времени, составляющие около $6 \div 10$ млн. лет.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант No 05-02-17047).

Литература

1. **Бобылев В.В.**, Письма в Астрон. журн. **30**, 185 (2004a).
2. **Бобылев В.В.**, Письма в Астрон. журн. **30**, 861 (2004b).
3. **Бобылев В.В.**, докторская диссертация (2004c).
4. **Бобылев В.В., Гончаров Г.А., Байкова А.Т.**, Астрон. журн., **83**, 821, (2006).
5. **Бобылев В.В.**, Письма в Астрон. журн. **32**, 906 (2006).
6. **Бергхофер, Брейтшвердт** (*T.W. Berghofer and D. Breitschwerdt*), Astron. Astrophys., **390**, 299 (2002).
7. **Блаау** (*A. Blaauw*), Annual Rev. of Astron. And Astrophys., **2**, 213 (1964).
8. **Вихман и др.** (*R. Wichmann, J.H.M.M. Schmitt and S. Hubrig*), Astron. Astrophys. **399**, 983 (2003).
9. **Гершель** (*J.F.W. Herschel*), Results of astronomical observations made during the years 1834, 5, 6, 7, 8 at the Cape of Good Hope, (London: Smith, Elder and Co., 1847).
10. **Гончаров Г.А.**, Письма в Астрон. журн. **32**, 844 (2006).
11. **Гулд** (*B.A. Gould*), Proc. of the American Association for Advanced Science, **115**, (1874).
12. **де Геус и др.** (*E.J. de Geus, P.T. de Zeeuw and J. Lub*), Astron. Astrophys. **216**, 44 (1999).
13. **Ефремов Ю.Н.**, Очаги звездообразования в галактиках (М.: Наука, 1989).
14. **Ефремов** (*Y.N. Efremov*), Astron. and Astrophys. Trans., **15**, 3 (1998).
15. **Ефремов, Ельмегрин** (*Y.N. Efremov and B.G. Elmegreen*), MNRAS **299**, 588 (1998).
16. **Зев и др.** (*P.T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, J.H.J. de Bruijne et al.*), Astron. J. **117**, 354 (1999).
17. **Комерон, Торра** (*F. Comeron and J. Torra*), Astron. Astrophys. **261**, 94 (1992).
18. **Комерон, Торра** (*F. Comeron and J. Torra*), Astron. Astrophys. **281**, 35 (1994).
19. **Линдبلاد и др.** (*P.O. Lindblad, J. Palous, K. Loden, et al*), HIPPARCOS Venice'97 Ed. B. Battick (ESA Publ. Div., Noordwijk, 1997), 507.
20. **Линдبلاد** (*P.O. Lindblad*), Astron. Astrophys. **363**, 154 (2000).
21. **Мадсен и др.** (*S.Madsen, D.Dravings and L.Lindegren*), Astron. Astrophys. **381**, 446 (2002).
22. **Макаров** (*V.V. Makarov*), Astron. J. **126**, 1996 (2003).
23. **Мамаек и др.** (*E.E. Matajek, M. Meyer and J. Liebert*), Astron. J. **124**, 1670 (2002).
24. **Маррей К.Э.**, Векторная астрометрия (Киев: Наукова Думка, 1986).
25. **Лутц, Келкер** (*T.E. Lutz and D.H. Kelker*), Pub. Astron. Soc. Pacific **85**, 573 (1973).
26. **Огородников К.Ф.**, Динамика звездных систем (М.: Физматгиз, 1965).
27. **Олано** (*C.A. Olano*), Astron. Astrophys. **112**, 195 (1982).

28. **Олано** (C.A. Olano), Astron. Astrophys. **121**, 295 (2001).
29. **Перро, Гренье** (C.A. Perrot and I.A. Grenier), Astron. Astrophys. **404**, 519 (2003).
30. **Пискунов и др.** (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Roser, et al.), Astron. Astrophys., **445**, 545, (2006).
31. **Попов и др.** (S.B. Popov, M. Colpi, M.E. Prokhorov, et al.), Astron. Astrophys., **406**, 111, (2003).
32. **Поппель, Марронетти**, (W.G.L. Poppel and P. Marronetti), Astron. Astrophys., **358**, 299 (2000).
33. **Сартори и др.** (M.J. Sartori, J.R.D. Lepine and W.S. Dias), Astron. Astrophys. **404**, 913 (2003).
34. **Сфейр и др.** (D.M. Sfeir, R. Lallement, F. Grifo, et al.), Astron. Astrophys., **346**, 785 (1999).
35. **Скуljan и др.** (J. Skuljan, J.B. Hearnshaw, and P.L. Cottrell), MNRAS, **308**, 731 (1999).
36. **Торра и др.** (J. Torra, D. Fernandez and F. Figueras), Astron. Astrophys. **359**, 82 (2000).
37. **Франко и др.** (J. Franko, G. Tenorio-Tagle, P. Bodenheimer, et al.), Astroph. J. **333**, 826 (1988).
38. **Шаерер и др.** (D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder et al) Astron. Astroph. Suppl., **98**, 523 (1993).
39. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, (1997).

KINEMATICS OF THE SCO-CEN OB-ASSOCIATION

1. Using only the trigonometric parallaxes

Bobylev V.V. and Bajkova A.T.

Summary

Three typical features have been detected in the Gould Belt UV-velocity distribution, which are associated with the kinematical peculiarities of LCC, UCL and US groups. A new UV-plane analysis method is proposed for separation of these star fractions from the Gould Belt. Application of this method allowed us to detect the most probable members of LCC, UCL and US. Kinematical analysis of the detected groups with $e_{\pi}/\pi < 0.15$ shows, that the motion of their centers is in general dependent, on the rule typical of the Gould Belt expansion. In addition the entire complex SCO-CEN shows a proper expansion with a parameter $37 \pm 7 \text{ km c}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ (with parameters of the kinematical center at $l_{\odot} \approx -45^{\circ}$ and $R_{\odot} \approx 100 \text{ pc}$). Using the obtained parameter we estimated a typical time period of expansion for SCO-CEN to be approximately 26 Myr. The angular velocity of the SCO-CEN proper rotation is found to be $-19 \pm 7 \text{ km/s/kpc}$.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ УРАНА В 2004 ГОДУ НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ В ПУЛКОВЕ

Бронникова Н.М., Васильева Т.А.

Приведены 11 положений Урана, полученные по пластинкам Нормального астрографа с 3 августа по 21 декабря 2004 года. Редукция выполнена линейным методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога ТУСНО-2. Проведены сравнения результатов наблюдений с эфемеридами DE200/LE200 и DE405/LE405 по программе ЭПОС [Львов В.Н. и др., 1999]. Средние значения $(O - C)$ равны: $(O - C)_\alpha = -0.^s009 \pm 0.^s006$, $(O - C)_\delta = -0.^s05 \pm 0.09$ по DE200 и $(O - C)_\alpha = -0.^s014 \pm 0.^s006$, $(O - C)_\delta = -0.^s08 \pm 0.09$ по DE405.

Ошибка одного положения равна $\pm 0.^s27$ по α и $\pm 0.^s28$ по δ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект N 04-02-16157.

В 2004 году были продолжены фотографические наблюдения Урана на нормальном астрографе, начатые в 2002 году [Bronnikova N.M., Vasil'eva T.A., 2003]. В период с 3 августа по 21 декабря было получено 11 пластинок. Методика наблюдений была такая же, как в 2003 году [Бронникова Н.М., Васильева Т.А., 2004]. Блеск Урана ослаблялся на $3.^m1$ с помощью нейтрального фильтра, использовалась диафрагма 0.5D. В 2004 году использовались отечественные пластинки ПФС – 03, выпущенные фирмой "Славич" в г. Переславль–Залесском. Пластинки довольно прозрачные, эмульсия мелкозернистая, изображения звезд и Урана круглые, довольно четкие. При экспозиции 4 – 5 минут получается предельная величина $10^m.4 - 10^m.5$.

Уран в период наблюдений имел величину $5.^m7 - 5.^m9$ на пластинках получался как звезда $8.^m8 - 9.^m0$. Опорные звезды (от 6 до 9 звезд) для редукции выбраны из каталога ТУСНО-2, имели в среднем величину от $8.^m6$ до $9.^m2$. Разность величин изображений Урана и опорных звезд не превышала $0.^m2$ и на положение Урана не влияла ошибка из-за уравнивания блеска.

Методика измерений и обработки были такими же, как и при обработке наблюдений Урана в 2003 году [Бронникова Н.М., Васильева Т.А., 2004].

Полученные при обработке наблюдений ошибки единицы веса $S_{x,y}$ и ошибки редукции $E_{x,y}$, характеризующие в основном точность измерений и точность положений по каталогу, в среднем по 11 пластинкам имеют значения: $S_x = 0.^s27$, $S_y = 0.^s28$, $E_x = 0.^s11$, $E_y = 0.^s12$ и почти в 1.5–1.8 раза меньше, чем в 2003 году.

Это объясняется тем, что в 2003 году Уран фотографировался на старые пластинки ORWO Zu-21, пластинки были с большой химической вуалью. Другого фотоматериала не было. Так как опорный каталог один и тот же, то эта разница ошибок возникает из-за ошибок измерений, вуалированные темные пластинки измеряются сложнее, соответственно точность измерений ниже.

В результате были получены геоцентрические экваториальные координаты Урана в системе экватора и равноденствия J2000, приведенные в таблице 1. В этой таблице приведены: дата наблюдений (UTC) в долях суток, $(O - C)$, полученные из сравнения полученных координат с эфемеридой DE –200/LE200.

$(O - C)$ вычислены по программе ЭПОС [Львов В.Н. и др., 1999]. В таблице приведены фамилии наблюдателей: Бр. – Бронникова Н.М., Хв – Ховричев М.Ю.

Таблица 1. Геоцентрические экваториальные координаты Урана в 2004 году.

Дата (UTC)	α_{J2000} h m s	δ_{J2000} ° ' "	$(O-C)_\alpha$ DE200	$(O-C)_\beta$ DE200	На- блюда- тель
2004 08 03.951084	22 31 02.548	-10 10 39.57	+0. ^s 032	+0."13	Бр.
08 05.935609	22 30 46,437	-10 12 16.24	-0.038	-0.56	Бр.
08 16.933690	22 29 12.538	-10 21 32.45	-0.016	+0.16	Бр.
09 04.900528	22 26 21,597	-10 38 07.20	-0.012	-0.60	Бр.
10 15.797273	22 21 19.595	-11 06 11.04	0.000	-0.07	Хв.
10 28.756467	22 20 30.030	-11 10 25.62	-0.020	-0.03	Бр.
10 30.731418	22 20 25.074	-11 10 49.33	-0.014	-0.04	Бр.
11 22.722542	22 20 21.813	-11 10 12.01	-0.011	+0.05	Бр.
11 27.674463	22 20 34.527	-11 08 47.20	-0.022	+0.18	Бр.
12 13.635119	22 21 47.075	-11 01 15.50	-0,008	+0.27	Хв.
2004 12 21.639630	22 22 40.680	-10 55 51.68	+0.010	-0.03	Бр.

Было проведено сравнение и с эфемеридой DE405. В среднем по 11 наблюдениям в 2004 году $(O-C)$ равны $(O-C)_\alpha = -0.^s009 \pm 0.^s006$, $(O-C)_\delta = -0."05 \pm 0.09$ по DE200 и $(O-C)_\alpha = -0.^s014 \pm 0.^s006$, $(O-C)_\delta = -0."08 \pm 0.09$ по DE405. Среднеквадратическая ошибка (СКО) одного положения, вычисленная по уклонениям отдельных $(O-C)$ от среднего равна, как по DE200, так и по DE405: $\sigma_\alpha \cos \delta = \pm 0."27$, $\sigma_\delta = \pm 0."28$.

Литература

1. *N.M. Bronnikova, T.A. Vasil'eva* - Astrometric observations of the Uranus in 2002 with Normal Astrograph at Pulkovo, Trans. of JOURNEES- 2003, "Astrometry, Geodinamics and Solar System Dinamics from milliarcseconds, p. 279-280.
2. *Бронникова Н.М., Васильева Т.А.* – 2004, Астрометрические наблюдения Урана в 2003 году на нормальном астрографе в Пулковке, Изв. ГАО, № 217, с.162-164.
3. *Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.* – 1999 – ЭПОС – программная система для решения эфемеридных задач, связанных с объектами Солнечной системы, руководство пользователя, ГАО РАН, СПб., Пулковко, 28 с.

PHOTOGRAPHIC POSITIONAL OBSERVATIONS OF THE URANUS IN 2004 WITH THE NORMAL ASTROGRAPH AT PULKOVO

Bronnikova N.M., Vasil'eva T.A.

Summary

Eleven positions of the planet Uranus are given. The plates were taken with the Normal Astrograph at Pulkovo in 2004. The reference stars were taken from the catalogue Tycho – 2. The obtained positions were compared with the ephemeris DE –200/LE200 and DE405/LE405, using the programm EPOS. The everage (O-C) are as follows:

$$(O-C)_\alpha = -0.^s009 \pm 0.^s006; (O-C)_\delta = -0."05 \pm 0."09, DE -200/LE200.$$

$$(O-C)_\alpha = -0.^s014 \pm 0.^s006; (O-C)_\delta = -0."08 \pm 0."09, DE405/LE405$$

The error of one position is equal to $\pm 0."27$ for α u $\pm 0."28$ for δ .

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛОЙ ПЛАНЕТЫ ЦЕРЕРЫ (1) НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ В 1998-2000 ГОДАХ

Васильева Т.А.

Приведены 42 положения малой планеты Ceres (1) по наблюдениям на нормальном астрографе в Пулкове в период с 1998 по 2000 годы. Редукция пластинок выполнена методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога ГУСНО -2. Проведено сравнение с эфемеридой при помощи программы ЭПОС. Средние значения разностей за весь период наблюдений составили $(O-C)_{\alpha \cos \delta} = -0''17 \pm 0.009$; $(O-C)_{\delta} = -0''14 \pm 0.021$

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 04-02-16157.

В данной работе использованы наблюдения малой планеты Ceres (1) в период с 1998 по 2000 годы на нормальном астрографе в Пулкове. Выбрано и обработано 14 пластинок, удовлетворительных по качеству изображений. Наблюдения проводились с 3-4 минутными экспозициями, по 3 экспозиции на каждой пластинке [1]. Для наблюдений использовались гиперсенсibilизированные пластинки Zu-1, Zu-21. Наблюдатели: Бронникова Н., Нарижная Н., Бобылев В.

Измерения выполняются на Аскорекорде по обычной методике [1,2]. Дальнейшая обработка измерений производится на ПК методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога ГУСНО-2. Каждая экспозиция обрабатывалась отдельно. Ошибки единицы веса в среднем равны: $S_x = \pm 0.''19$, $S_y = \pm 0.''21$, а ошибки редукции: $E_x = \pm 0.''12$, $E_y = \pm 0.''13$.

Результаты наблюдений малой планеты Церера приведены в таблице 1 в виде топоцентрических координат, отнесенных к экватору и равноденствию J2000.0 на момент наблюдений по всемирному времени. В таблице приводятся значения (O-C), определенные путем сравнения с эфемеридами при помощи программы ЭПОС [3]. Средние значения разностей за весь период наблюдений составили:

$$(O-C)_{\alpha \cos \delta} = -0''17 \pm 0.009; (O-C)_{\delta} = -0''14 \pm 0.021$$

Ошибка одного положения равна 0.''09 по α и 0.''14 по δ .

Таблица. Топоцентрические координаты малой планеты Церера по наблюдениям на нормальном астрографе.

Дата, UT	$\alpha^{h,m,s}$ J2000.0	$\delta^{\circ}'"$ J2000.0	$(O-C)_{\alpha \cos \delta}$	$(O-C)_{\delta}$
1998 09 03.026896	04 34 50.075	+15 47 54.93	-0.21"	0.06"
1998 09 03.031051	04 34 50.285	+15 47 55.48	-0.08	0.13
1998 09 03.034444	04 34 50.480	+15 47 55.97	0.17	0.13
1998 09 05.007443	04 36 25.161	+15 51 37.67	0.09	0.12
1998 09 05.011599	04 36 25.353	+15 51 38.08	-0.11	-0.06
1998 09 05.015759	04 36 25.551	+15 51 38.57	-0.05	0.10
1998 11 18.914243	04 31 19.307	+17 13 19.63	0.15	-0.12
1998 11 18.919161	04 31 19.044	+17 13 20.02	-0.23	-0.14
1998 11 18.923316	04 31 18.789	+17 13 20.17	-0.10	-0.16
1998 11 20.960297	04 29 22.238	+17 15 29.86	-0.17	-0.11
1998 11 20.964625	04 29 21.983	+17 15 30.09	-0.17	0.15
1998 11 20.968954	04 29 21.720	+17 15 30.28	-0.28	-0.14

1998 12 23.844002	03 58 41.387	+18 41 33.23	-0.24	-0.28
1998 12 23.848157	03 58 41.215	+18 04 33.92	-0.10	-0.12
1998 12 23 852312	03 58 41.030	+18 04 34.39	-0.17	-0.17
1999 01 08.797069	03 50 41.004	+18 45 23.17	-0.23	-0.25
1999 01 08.805726	03 50 40.931	+18 45 24.12	-0.12	-0.11
1999 01 08.805726	03 50 40.855	+18 45 24.66	-0.14	-0.32
2000 02 11.033045	12 55 14.015	+10 33 03.77	-0.20	-0.11
2000 02 11.036507	12 55 14.008	+10 33 04.82	-0.21	0.14
2000 02 11.039970	12 55 14.003	+10 33 05.89	-0.20	-0.15
2002 03 12.982690	12 42 22.117	+13 44 25.98	-0.19	0.21
2002 03 12.986846	12 42 21.926	+13 44 27.45	-0.16	-0.23
2002 03 12.991001	12 42 21.735	+13 44 28.91	-0.12	-0.27
2000 04 09.878571	12 19 08.863	+15 27 51.39	0.16	0.10
2000 04 09.882726	12 19 08.664	+15 27 51.54	-0.19	0.14
2000 04 09.886882	12 19 08.461	+15 27 51.68	-0.29	0.18
2000 04 20.869652	12 11 42.968	+15 21 30.54	-0.13	-0.03
2000 04 20.873807	12 11 42.814	+15 21 30.04	-0.24	0.06
2000 04 20.877962	12 11 42.673	+15 21 29.48	-0.15	0.15
2000 04 21.857537	12 11 09.789	+15 19 33.09	-0.21	-0.36
2000 04 21.861692	12 11 09.652	+15 19 32.65	-0.14	-0.28
2000 04 21.865847	12 11 09.510	+15 19 32.39	-0.15	-0.02
2000 04 22.889738	12 10 36.430	+15 17 16.75	-0.24	-0.23
2000 04 22.894932	12 10 36.259	+15 17 16.05	-0.26	-0.20
2000 04 22.899780	12 10 36.106	+15 17 15.34	-0.19	-0.23
2000 04 23.871736	12 10 06.054	+15 14 53.77	-0.31	-0.23
2000 04 23.875891	12 10 05.928	+15 14 53.21	-0.24	-0.15
2000 04 23.880046	12 10 05.801	+15 14 52.50	-0.20	-0.23
2000 04 26.860309	12 08 41.675	+15 06 21.06	-0.08	-0.17
2000 04 26.868619	12 08 41.556	+15 06 20.66	-0.17	0.22
2000 04 26.864464	12 08 41.443	+15 06 19.74	-0.17	0.10

Литература

1. **Васильева Т.А., Бронникова Н.М.** – 1998 - Фотографические наблюдения малых планет в Пулковке. Изв. ГАО, №213, с. 180-182.
2. **Киселева Т.П.** – 1994 – Итоги наблюдений малых планет на нормальном астрографе Пулковской обсерватории в 1974-1990 гг. Изв. ГАО, №209 с.76-87.
3. **Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.** – 1999 – ЭПОС. Программная система для решения эфемеридных задач, связанных с объектами Солнечной системы. Руководство пользователя, СПб, ГАО РАН, 28 с.

THE PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF THE MINOR PLANET CERES (1) WITH THE NORMAL ASTROGRAPH AT PULKOVO

Vasyľ'eva T.A.

Summary

Forty two positions of the minor planet Ceres (1) are given. The plates were taken with the Normal Astrograph at Pulkovo during the period 1998 - 2000. The reference stars were taken from the catalogue TYCHO-2. The average $(O-C)_{\alpha,\delta}$ is equal to: $(O-C)_{\alpha}\cos\delta = -0.''017\pm 0.009$; $(O-C)_{\delta} = -0.''14\pm 0.021$.

О ДИНАМИКЕ ВОЗМОЖНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ АСТЕРОИДА 1220 КРОКУС

Верещагина И.А., Шор В.А.

Посредством численного интегрирования уравнений поступательно-вращательного движения и сравнения полученных периодов движения с периодичностями в наблюдаемых кривых блеска изучена возможность двойственности астероида 1220 Крокус. В качестве первоначальных оценок параметров гипотетической системы взяты оценки, полученные Р.П. Бинзелом (R.P. Binzel) в работе [2]. Путем варьирования начальных данных найдены возможные варианты устойчивых решений с периодами, которые соответствуют наблюдаемым периодам, проявляющимся в кривых блеска.

Введение

В настоящее время имеется свыше 130000 занумерованных малых планет, орбиты которых определены достаточно надежно. Несмотря на то, что наблюдения некоторых из их числа уже давно косвенным образом указывали на их двойственность, до 90-х годов прошлого века в астрономии господствовало представление об астероидах как об одиночных телах. И только открытие в феврале 1994 года автоматическим межпланетным аппаратом «Галилей» спутника у астероида 243 Ида позволило по-новому взглянуть на данную популяцию Солнечной системы. То обстоятельство, что спутник был обнаружен сразу же после начала исследования малых планет космическими аппаратами (Ида – вторая после 951 Гаспры малая планета, наблюдавшаяся с пролетной траектории), позволило сразу предположить, что наличие спутников у астероидов – это обычное явление, и такие объекты достаточно многочисленны.

Действительно, за последние десять лет различными методами удалось получить изображения ряда астероидов с их спутниками, причем один из астероидов – 87 Сильвия – оказался тройным. На данный момент известно около 100 двойных астероидов [1].

Одним из главных источников сведений о кратности астероидов являются фотометрические наблюдения, из которых получают кривые блеска. Поскольку астероиды имеют, как правило, неправильную форму, то даже одиночные малые планеты могут обнаруживать изменение блеска с периодом, равным периоду вращения вокруг оси. Кривые блеска, соответствующие двойным астероидам, могут иметь свои характерные особенности, которые связаны с возможностью наблюдений затмений и покрытий в таких системах и осевым вращением двух тел. Также возможны наблюдения изменений блеска, связанных с изменением вращения компонентов системы вследствие их гравитационного влияния друг на друга (вынужденная прецессия, нутация). Все или часть этих признаков наблюдаются у большого числа малых планет. К числу таких объектов относится астероид 1220 Крокус (Crocus).

В работе [2] из анализа кривой блеска данного астероида были получены оценки параметров возможной двойной системы. Р.П. Бинзел, отождествляя наибольший из наблюдаемых в кривой блеска Крокуса периодов с периодом вынужденной прецессии, вызванной наличием спутника, и считая главный компонент двойной системы трехосным эллипсоидом, получил оценки его главных полуосей, а также оценки диаметра спутника и радиуса его орбиты. В настоящей работе на основе этих оценок проверяется возможность существования устойчивого движения в данной гипотетической двойной системе, а также возможность возникновения вынужденной прецессии с наблюдаемым

периодом, как предполагает автор [2]. В процессе исследования нам удалось также уточнить оценки радиуса орбиты спутника, его диаметра и периода вращения.

Описание модели

При изучении движения двойных астероидов часто приходится иметь дело с телами, расположенными на расстояниях сравнимых с размерами самих тел. В таких случаях тела, если их форма отлична от сферической, нельзя считать материальными точками, так как сила взаимодействия между ними существенным образом зависит от их взаимной ориентации. Таким образом, их поступательное и вращательное движения должны рассматриваться совместно.

Данная задача о поступательно-вращательном движении интенсивно разрабатывалась и продолжает разрабатываться в различных предположениях о параметрах рассматриваемых систем. В нашем численном исследовании движения в системе двойного астероида мы ограничиваемся модельной задачей, а именно: два однородных трехосных эллипсоида, представляющих собой компоненты двойной системы, движутся под действием взаимного тяготения и притяжения Солнца. Дифференциальные уравнения движения для такой системы были получены Г.Н. Дубошиным [3]. Они выводятся из

общих уравнений Лагранжа 2-го рода $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q'_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \frac{\partial U}{\partial q_i}$, где за обобщенные координаты q_i принимаются абсолютные прямоугольные координаты центров инерции тела

(x_i, y_i, z_i) , описывающие поступательное движение, и углы Эйлера $(\varphi_i, \psi_i, \theta_i)$, описывающие вращение тела.

Мы рассматриваем задачу трех тел: «астероид – спутник – Солнце», и решаем задачу в относительных координатах, причем начало координат выбираем в центре Солнца. Для нашей задачи описанные выше уравнения окончательно выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} x'_i &= V_{x_i} \\ y'_i &= V_{y_i} \\ z'_i &= V_{z_i} \\ V'_{x_i} &= \frac{(m_0 + m_i)}{m_0 m_i} \frac{\partial U_{i0}}{\partial x_i} + \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \\ V'_{y_i} &= \frac{(m_0 + m_i)}{m_0 m_i} \frac{\partial U_{i0}}{\partial y_i} + \frac{\partial R_i}{\partial y_i} \\ V'_{z_i} &= \frac{(m_0 + m_i)}{m_0 m_i} \frac{\partial U_{i0}}{\partial z_i} + \frac{\partial R_i}{\partial z_i} \end{aligned} \tag{1}$$

$$A_i p'_i - (B_i - C_i) q_i r_i = \left(\frac{\partial U}{\partial \psi_i} - \cos \theta_i \frac{\partial U}{\partial \varphi_i} \right) \frac{\sin \varphi_i}{\sin \theta_i} + \cos \varphi_i \frac{\partial U}{\partial \theta_i}$$

$$B_i q'_i - (C_i - A_i) r_i p_i = \left(\frac{\partial U}{\partial \psi_i} - \cos \theta_i \frac{\partial U}{\partial \varphi_i} \right) \frac{\cos \varphi_i}{\sin \theta_i} - \sin \varphi_i \frac{\partial U}{\partial \theta_i}$$

$$C_i r'_i - (A_i - B_i) p_i q_i = \frac{\partial U}{\partial \varphi_i}$$

$$p_i = \psi'_i \sin \varphi_i \sin \theta_i + \theta'_i \cos \varphi_i$$

$$\begin{aligned}
q_i &= \psi'_i \cos \varphi_i \sin \theta_i - \theta'_i \sin \varphi_i \\
r_i &= \psi'_i \cos \theta_i + \varphi'_i \\
(i &= 0, 1, 2)
\end{aligned}$$

Здесь используются следующие величины: m_i - масса соответствующего тела, A_i, B_i, C_i - главные центральные моменты инерции, p_i, q_i, r_i - проекции угловой скорости вращения тела в собственной для этого тела системе координат, которые связаны с углами Эйлера с помощью кинематических уравнений [3], R_i - пертурбационная функция, вычисляемая через потенциал U_{ij} :

$$R_i = \sum_{j=1}^{n'} \left(\frac{1}{m_i} U_{ij} + \frac{1}{m_0} \left(x_i \frac{\partial U_{j0}}{\partial x_j} + y_i \frac{\partial U_{j0}}{\partial y_j} + z_i \frac{\partial U_{j0}}{\partial z_j} \right) \right) \quad (2)$$

Для вычисления потенциала U_{ij} мы ограничились членами до третьего порядка включительно в разложении, предложенном Г.Н. Дубошиным [3,4]:

$$U_{ij} \cong Gm_i m_j + Gm_i \frac{A_j + B_j + C_j - 3I_j^{ij}}{2\Delta_{ij}^3} + Gm_j \frac{A_i + B_i + C_i - 3I_i^{ij}}{2\Delta_{ij}^3}, \quad (3)$$

где G - гравитационная постоянная, $\Delta_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ - расстояние между центрами тел, I_s^{ij} - момент инерции тела относительно прямой, соединяющей центры инерции двух тел.

Система уравнений (1) - это система дифференциальных уравнений 1-го порядка. Для получения ее численного решения использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка с адаптивным шагом [5]. Критерием успешности выполнения численного интегрирования служило постоянство классических интегралов системы (1) – площадей и энергии. Кроме того, интегрирование осуществлялось в прямом и обратном направлениях и полученные в результате обратного интегрирования значения параметров сравнивались с начальными условиями.

Двойственность астероида 1220 Крокус

Кривая блеска астероида 1220 Крокус [2] содержит два периода: 737^h с амплитудой $0.^m87$ и $7.^h90$ с амплитудой $0.^m15$, причем амплитуда короткопериодических колебаний, по-видимому, модулируется на протяжении долгого периода и наибольшая амплитуда колебаний блеска связана не с коротким, а с долгим периодом. На основании этого в работе [2] предполагается, что первый период является периодом вынужденной прецессии главного компонента, вызванной наличием спутника. Второй же период – это период вращения главного компонента вокруг своей оси.

Основания для предположения о вынужденной прецессии, вызванной наличием спутника, следующие. Автор [2] справедливо утверждает, что два периода в движении твердого тела возможны, если оно находится в состоянии прецессии. Возможны два вида прецессии: вынужденная и свободная. Свободная прецессия может иметь место без воздействия внешних факторов, так что вектор углового момента остается фиксированным в пространстве. В состоянии свободной прецессии может находиться астероид, испытавший в недалеком прошлом столкновение, которое вывело его ось вращения

из положения, совпадающего с главной осью инерции. Вынужденная прецессия происходит под действием силы, не совпадающей по направлению с осью вращения. В качестве такой силы может выступать притяжение со стороны спутника. Против того, что Крокус находится в состоянии свободной прецессии есть сильный аргумент [2]: свободная прецессия осесимметричного тела должна иметь период того же порядка, что и период вращения. Для Крокуса же период прецессии (737^h) и вращения (7.90^h) различаются слишком сильно. С другой стороны, если наблюдаемая прецессия вынужденная, то она не может быть вызвана Солнцем или Юпитером, т.к. периоды в таком случае, по имеющимся оценкам, должны быть порядка 10^4 лет, что значительно больше 737^h . Таким образом, есть все основания полагать, что причиной вынужденной прецессии Крокуса является его спутник.

Учитывая ограничения, которые накладываются на данную систему величинами наблюдаемых параметров, и ограничения, вытекающие из распределения моментов количества движения между главным компонентом и спутником, Бинзел пришел к выводу, что в данной двойной системе возможны лишь такие решения, в которых величина спутника ограничена пределами от 6.2 км до 9 км. В соответствующих крайних случаях параметры возможной системы имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} 1. r_{\text{спутника}} &= 6.2 \text{ км}, R_{\text{орбиты}} = 50 \text{ км и } T_{\text{обращения}} = 22^h \\ 2. r_{\text{спутника}} &= 9.0 \text{ км}, R_{\text{орбиты}} = 73 \text{ км и } T_{\text{обращения}} = 31^h \end{aligned} \quad (4)$$

Для размеров главного компонента используются оценки [2]

$$a = 12 \text{ км}, b = 11 \text{ км}, c = 6 \text{ км} \quad (5)$$

при плотности $\rho = 3.0 \text{ г/см}^3$. (6)

Для наклона орбиты спутника Бинзел принял значение

$$i = 60^\circ. \quad (7)$$

Оценки формы Крокуса были получены следующим образом. В работе [2] главный компонент системы Крокус рассматривается как трехосный эллипсоид с полуосями $a > b > c$. Тогда, зная амплитуды основных колебаний, можно найти отношение полуосей. Если колебание, равное периоду вращения, имеет амплитуду 0.15 , то из отношения соответствующих площадей имеем: $2.5 \log \frac{2\pi ac}{2\pi bc} = 0.15 \Rightarrow b \approx 0.9a$. Аналогично, для второй амплитуды: $2.5 \log \frac{2\pi ab}{2\pi bc} = 0.87 \Rightarrow c \approx 0.45a$ в предположении, что при прецессии мы видим то полярную, то экваториальную части астероида. Величина a определяется из видимого блеска Крокуса в предположении, что альbedo = 0.10. Оценки орбиты спутника делались из соотношения между периодами прецессии и вращения (см.[2]) и третьего закона Кеплера.

Таким образом, в качестве исходной информации мы использовали данные (4)-(7), полученные в работе [2]. Целью нашей работы было построение модели (1)-(3) на основе этих данных и с помощью ее численного решения проверка возможности существования такой системы и ее устойчивости.

Нами были приняты следующие предположения: спутник считался сферическим, поскольку каких-либо оценок его формы в литературе нет, и орбита спутника считалась

в начальный момент круговой. Таким образом, единственным свободным (неизвестным) параметром в данной задаче был угол нутации главного компонента - θ_1 . Варьируя данный параметр, необходимо было получить период прецессии оси вращения главного компонента, равный 737^h , который, как упоминалось выше, определяется по кривой блеска Крокуса. Вторым наблюдаемый период – период вращения главного компонента вокруг своей оси – принимался в задаче в качестве начального условия.

Учитывая оценку наклона орбиты (7), мы рассматривали два возможных варианта: прямое движение спутника ($i = 60^\circ$) и обратное ($i = 120^\circ$). Угол нутации θ_1 менялся для каждого случая с шагом 5° .

Первым этапом нашей работы было интегрирование уравнений (1)-(3) на интервале времени в 2000^h . Мы оставляли для дальнейшего рассмотрения только те орбиты, которые на данном интервале времени показывали изменения элементов орбиты в не очень широких пределах без наличия линейных трендов. Решения, которые давали наиболее близкий период прецессии к искомому, приведены для обоих случаев оценок (4) в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Орбиты, полученные в результате численного эксперимента в случае первого варианта оценок (4).

i , градусы	θ_1 , градусы	$P_{\text{прецессии}}$, часы	$P_{\text{обращения спутника}}$, часы	$P_{\text{вращения гл. компонента}}$, часы
60	170	1375	21.5	22.0
120	110	795	21.5	22.0
120	120	985	21.5	22.0
120	130	1380	21.7	22.0
120	170	1240	21.3	22.0

Таблица 2. Орбиты, полученные в результате численного эксперимента в случае второго варианта оценок (4).

i , градусы	θ_1 , градусы	$P_{\text{прецессии}}$, часы	$P_{\text{обращения спутника}}$, часы	$P_{\text{вращения гл. компонента}}$, часы
60	130	1360	30.8	31.0
60	170	1300	30.8	31.0
120	120	900	30.8	31.0
120	130	1300	31.0	31.0
120	170	1360	30.8	31.0

Как видно из приведенных результатов, период вынужденной прецессии главного компонента оказывается всегда заметно больше, чем 737^h . Поэтому было решено изменить начальные данные таким образом, чтобы период прецессии соответствовал наблюдаемому.

Для этого, оставляя неизменными значения больших полуосей главного компонента (5) и плотности (6), мы варьировали размеры спутника с шагом ± 0.1 км от значений, указанных в (4). Для каждого значения радиуса спутника мы меняли начальные условия (скорость и расстояние между компонентами) так, чтобы получаемый период прецессии был как можно ближе к наблюдаемому. В результате, вместо (4) были получены следующие, новые оценки параметров орбиты спутника:

$$\begin{aligned}
1. r_{\text{спутника}} &= 6.7 \text{ км}, R_{\text{орбиты}} = 44 \text{ км и } T_{\text{обращения}} = 18^h \\
2. r_{\text{спутника}} &= 9.7 \text{ км}, R_{\text{орбиты}} = 65 \text{ км и } T_{\text{обращения}} = 25^h
\end{aligned}
\tag{8}$$

При этом оба варианта получаются при обратном движении спутника, т.е. при угле наклона его орбиты $> 90^\circ$, причем углы наклона также немного отличаются от предполагаемого вначале $i = 120^\circ$. Полученные элементы орбиты спутника (большая полуось, эксцентриситет и наклон) для обоих случаев (8) приводятся ниже:

$$\begin{aligned}
1. \theta_1 &= 78.5^\circ, a = 44.4 \text{ км}, e = 0.010, i = 132.5^\circ \\
2. \theta_1 &= 71.0^\circ, a = 64.6 \text{ км}, e = 0.005, i = 124.0^\circ
\end{aligned}
\tag{9}$$

Чтобы проверить, насколько системы с параметрами (8) и (9) устойчивы, оба варианта решений были проинтегрированы на интервале 100 лет. В обоих случаях, на протяжении всего времени интегрирования все периоды (прецессии оси вращения главного компонента, обращения спутника и вращения главного компонента) сохраняли свои значения. Элементы орбиты спутника a, e, i менялись в узких пределах и не имели линейных трендов. На этом основании нами было сделано предположение об устойчивости найденных решений.

Заключение

Итак, целью настоящей работы явилась проверка возможной двойственности астероида 1220 Крокус при условии совпадения теоретически получаемых периодов вращения и вынужденной прецессии главного компонента с наблюдаемыми. В качестве начальных оценок параметров системы использовались оценки, полученные Бинзелом в работе [2]. При этом устойчивость полученного решения проверялась экспериментально. На первом этапе производилось интегрирование на интервале в 2000^h . Отбирались такие параметры, при которых система не распадалась. На следующем этапе система с выбранными параметрами численно интегрировалась на интервале 1 год, а затем – на 100 лет. Системы, которые не распались в течение 100 лет и параметры которых при этом менялись в узких пределах, при отсутствии тенденции к их сильному изменению в дальнейшем (отсутствие линейных трендов), считались устойчивыми.

Результаты данного исследования показали, что для оценок размеров спутника, радиуса его орбиты и периода вращения, сделанных в работе [2], период вынужденной прецессии главного компонента получается заметно больше, чем наблюдаемый. Этот результат является следствием более сложной и более точной модели поступательно-вращательного движения, использованной в нашей работе. Поэтому, оценки указанных параметров, сделанные Бинзелом для двух крайних случаев возможных решений, были изменены таким образом, чтобы оба периода, наблюдаемый и теоретический, совпадали. Были найдены два варианта решений, удовлетворяющих этому условию. Данные решения имеют место при обратном движении спутника по орбите, и являются устойчивыми на исследованном интервале.

Следует отметить то обстоятельство, на которое обращал внимание еще Бинзел. Размеры спутника в исследованных случаях оказались сравнимыми с размерами самого Крокуса и вклад отражаемого им света, если он имеет альбедо, сравнимое с альбедо главного компонента, в общий блеск системы не является пренебрежимо малым. Возможно, в кривой блеска Крокуса присутствует еще один период, связанный со спутником, который по каким-либо причинам не был обнаружен Бинзелом. Кроме того, эффективный размер главного компонента при столь большом спутнике также нуждается

в переоценке. В любом случае, данная система требует проведения дальнейших фотометрических наблюдений и исследований.

Авторы данной статьи выражают благодарность И.И. Шевченко за внимание к работе и полезные замечания.

Литература

1. <http://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoontable.html>.
2. **Binzel R.P.** Is 1220 Crocus a Precessing Binary Asteroid? *Icarus*, v.63, 1, 1985.
3. **Дубошин Г.Н.** Небесная механика. Основные задачи и методы. ФМ., 1963.
4. **Дубошин Г.Н.** О разложении силовой функции двух конечных тел. Сообщения ГАИШ, № 201, 1977.
5. **Мысовских И.П.** Методы вычислений.

ON THE DYNAMICS OF A PROBABLE BINARY SYSTEM OF THE ASTEROID 1220 CROCUS

Vereshchagina I.A., Shor V.A.

Summary

We have investigated a possibility of stable motion in the probable binary system of 1220 Crocus. Initial values of the parameters of the binary system were taken from [2]. The equations of prograde (prorate?)-rotational motion of the system were integrated numerically over the time interval of one hundred years. Plausible variants of the suspected binary system which correspond to observational data have been found. Plausible variants of the binary system which correspond to observed periods in the light curve and their amplitudes have also been found. However, the satellite size was determined to be comparable with that of the primary which circumstance casts doubt on the photometric model of the system that forms the basis of dynamical investigations.

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ
СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА,
ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320М В 2004-2006 гг.**

**Девяткин А.В., Алешкина Е.Ю., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Бехтева А.С.,
Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верещагина И.А., Кракосевич О.В.,
Баршевич К.В.**

Приводятся результаты астрометрических наблюдений спутников Юпитера (Гималия, Элара, Пасифе) и спутников Сатурна (Гиперион, Япет, Феба). Получены положения спутников в системе каталогов UCAC-2 и USNO-B1.0. Обработка наблюдений выполнена с использованием программных систем АПЕКС и АПЕКС-2 с учетом хроматической рефракции. Средняя точность наблюдений по прямому восхождению и склонению составляет 0".25.

С 1998 г. на зеркальном астрографе ЗА-320 ведутся регулярные астрометрические наблюдения избранных спутников Юпитера и Сатурна. С 2001 г. наблюдения проводятся в автоматическом режиме [4, 5]. Обработка наблюдений 2004 - начала 2005 года выполнена в среде программной системы АПЕКС [3], а с осени 2005 года – с помощью автоматической программной системы обработки наблюдений АПЕКС-2. С их помощью были получены величины "O". Редукция наблюдений производилась методом 8 постоянных. Для учета хроматической рефракции были приняты следующие значения показателя цвета В–V: Гималия - 0.67, Элара - 0.69, Пасифе - 0.63, Гипериона - 0.78, Япет – 0.72, Феба - 0.70. Значения "C" были вычислены по эфемеридам, полученным через Интернет (telnet://ssd.jpl.nasa.gov).

В результате было получено 326 положений спутников Юпитера и Сатурна. В таблицах 1-6 представлены следующие данные:

- а) момент наблюдения – первая колонка,
- б) измеренные топоцентрические астрометрические прямые восхождения и склонения – вторая и третья колонки соответственно,
- в) величины $(O-C)_{\alpha \cos \delta}$ и $(O-C)_{\delta}$ – четвертая и пятая колонки,
- г) последняя колонка - обозначение наблюдателя (Девяткин – Dev, Алешкина – Ale, Горшанов – Gor, Куприянов – Kou, Бехтева – Bek., Ибрагимов – Ibr, Верещагина – Ver, Кракосевич – Kra, Баршевич – Bar).

В таблице 7 приведены средние значения разностей $(O-C)$ за весь период наблюдений и оценки точности наблюдений (среднеквадратические ошибки), вычисленные по значениям $(O-C)$ за весь период наблюдений.

Таблица 1. Гималия (J6). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05

Дата, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha \cos \delta}$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2005 01 15.163028	13 11 19.10	-05 59 56.67	+ 0.12	+0.39	Bar
2005 02 4.144207	13 14 02.09	-06 22 38.47	-0.10	+0.37	Dev
2005 02 9.134547	13 13 56.31	-06 23 45.51	+ 0.25	+0.53	Gor
2005 02 10.061555	13 13 53.15	-06 23 45.36	+0.52	+0.42	Bar

Таблица 1. Гималия(Ј6). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2005 02 21.921474	13 12 13.93	-06 17 45.81	-0.19	+0.27	Ale
2005 02 23.037789	13 11 59.09	-06 16 37.71	-0.07	+0.41	Gor
2005 02 24.998340	13 11 30.91	-06 14 24.04	+0.35	+0.48	Dev
2005 02 26.061991	13 11 14.39	-06 13 04.20	+0.23	+0.29	Bek
2005 03 1.911267	13 10 08.07	-06 07 30.63	+0.42	-0.04	Gor
2005 03 2.074352	13 10 04.97	-06 07 15.09	+0.48	-0.15	Gor
2005 03 2.929043	13 09 48.73	-06 05 50.38	-0.18	+ 0.40	Bar
2005 03 10.044719	13 07 14.66	-05 52 00.53	-0.18	+0.59	Bar
2005 03 13.051561	13 06 00.20	-05 45 03.25	0.44	+0.35	Kra
2005 03 15.018953	13 05 08.69	-05 40 09.65	-0.28	+0.45	Ale
2005 03 16.028683	13 04 41.50	-05 37 33.22	+0.17	+0.19	Gor
2005 03 17.024587	13 04 14.17	-05 34 54.60	+0.30	+0.38	Bek
2005 03 20.991467	13 02 20.67	-05 23 46.64	+0.27	+0.29	Gor
2005 03 21.907148	13 01 53.53	-05 21 04.27	+0.15	+0.43	Ale
2005 03 22.946638	13 01 22.26	-05 17 56.87	+0.02	+0.22	Gor
2005 03 28.979252	12 58 13.73	-04 58 40.64	+0.30	+0.32	Ale
2005 03 30.001719	12 57 40.73	-04 55 14.33	+0.14	+0.33	Gor
2005 03 31.997605	12 56 35.69	-04 48 24.05	-0.01	+0.26	Dev
2005 04 3.983459	12 54 57.16	-04 37 53.62	+0.22	-0.08	Kou
2005 04 4.978175	12 54 24.08	-04 34 19.34	+0.11	+0.10	Ale
2005 04 6.970535	12 53 17.61	-04 27 05.36	+0.02	+0.21	Bar
2005 04 14.943660	12 48 52.64	-03 57 26.00	-0.13	-0.19	Dev
2005 04 16.931985	12 47 47.86	-03 49 57.93	-0.09	-0.01	Kra
2005 04 17.927835	12 47 15.74	-03 46 13.79	-0.22	+0.14	Kou
2005 04 18.861506	12 46 45.90	-03 42 44.33	-0.03	+0.02	Ale
2005 04 19.915255	12 46 12.46	-03 38 48.36	+0.20	+0.12	Gor
2005 05 9.880537	12 37 12.18	-02 31 03.35	+0.00	-0.06	Ale
2005 05 15.910271	12 35 17.41	-02 15 07.56	+0.04	+0.16	Kou
2006 04 22.993064	14 51 20.27	-14 34 36.08	+0.36	+0.05	Kra
2006 04 23.934527	14 50 56.03	-14 33 09.68	+0.07	+0.17	Bar
2006 04 24.989960	14 50 28.68	-14 31 33.30	+0.45	+0.09	Ale
2006 04 26.941652	14 49 37.73	-14 28 35.92	+0.17	+0.12	Ver
2006 04 27.957253	14 49 11.06	-14 27 04.38	+0.31	+0.02	Bek
2006 04 30.963452	14 47 51.70	-14 22 36.29	+0.27	+0.27	Bar
2006 05 1.950539	14 47 25.57	-14 21 09.64	+0.07	+0.32	Ale
2006 05 2.964610	14 46 58.75	-14 19 41.58	+0.49	+0.20	Gor
2006 05 5.956117	14 45 39.70	-14 15 26.76	+0.14	+0.21	Ibr
2006 05 7.953195	14 44 47.23	-14 12 41.69	-0.05	+0.17	Bar
2006 05 8.949971	14 44 21.209	-14 11 20.66	+0.10	+0.47	Ale
2006 05 9.945718	14 43 55.33	-14 10 01.35	+0.23	+0.30	Gor
2006 05 10.939624	14 43 29.61	-14 08 43.20	+0.13	+0.36	Ver

Таблица 2. Пасифе (J8). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05.

Дата,UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2005 01 1.151353	13 03 50.27	-06 13 01.45	-0.37	-0.38	Bek
2005 01 15.158256	13 08 39.02	-06 38 31.48	-0.08	+0.37	Bar
2005 02 9.127556	13 11 53.29	-06 48 26.92	-0.19	+0.43	Gor
2005 02 10.052831	13 11 52.03	-06 47 54.82	-0.19	-0.31	Bar
2005 02 23.029896	13 10 31.54	-06 33 30.44	-0.04	+0.56	Gor
2005 02 26.066428	13 09 56.42	-06 28 24.75	-0.16	+0.71	Bek
2005 03 2.070621	13 09 01.47	-06 20 46.63	+0.40	+0.22	Gor
2005 03 10.041160	13 06 44.30	-06 02 39.56	+0.45	+0.67	Bar
2005 03 15.014737	13 05 02.57	-05 49 40.08	+0.23	+0.19	Ale
2005 03 21.910944	13 02 25.34	-05 29 58.10	-0.40	+0.13	Ale
2005 03 28.983853	12 59 30.13	-05 08 21.26	+0.21	-0.01	Ale
2005 03 29.985728	12 59 04.53	-05 05 12.67	+0.08	+0.37	Gor
2005 04 3.978174	12 56 55.41	-04 49 26.77	-0.13	-0.02	Kou
2005 04 4.972833	12 56 29.55	-04 46 17.35	+0.43	+0.12	Ale
2005 04 6.958031	12 55 37.82	-04 40 00.02	+0.07	+0.01	Bar
2005 04 14.939605	12 52 12.85	-04 15 07.55	+0.37	+0.48	Dev
2005 04 17.924553	12 50 58.82	-04 06 10.52	+0.22	-0.28	Kou
2005 04 18.865281	12 50 35.93	-04 03 23.98	-0.18	-0.02	Ale
2005 04 19.919097	12 50 10.54	-04 00 20.15	-0.12	-0.42	Gor
2005 04 25.900808	12 47 53.17	-03 43 40.38	0.58	+0.35	Ale
2005 05 9.875130	12 43 29.71	-03 11 30.52	-0.18	+0.51	Ale
2006 04 22.999001	14 55 01.51	-14 12 10.30	+0.43	-0.20	Kra
2006 04 23.937896	14 54 30.82	-14 10 13.15	+0.36	+0.40	Bar
2006 04 24.008124	14 54 28.50	-14 10 04.68	+0.59	+0.12	Bar
2006 04 26.944980	14 52 51.09	-14 03 57.91	+0.66	+0.10	Ver
2006 04 26.999274	14 52 49.25	-14 03 50.65	+0.64	+0.55	Ver
2006 04 30.966722	14 50 35.16	-13 55 34.28	+0.30	-0.21	Bar
2006 05 1.954092	14 50 01.51	-13 53 30.90	+0.32	-0.20	Ale
2006 05 2.968066	14 49 26.90	-13 51 24.38	+0.36	-0.09	Gor
2006 05 5.965679	14 47 44.24	-13 45 13.22	+0.05	+0.47	Ibr
2006 05 6.961238	14 47 10.17	-13 43 11.80	+0.06	+0.07	Kra
2006 05 7.959039	14 46 36.08	-13 41 10.39	+0.53	+0.20	Bar
2006 05 9.952048	14 45 28.11	-13 37 10.70	+0.27	+0.37	Gor

Таблица 3. Элара (J7). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05.

Дата,UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2005 01 1.161123	13 07 30.67	-05 30 27.51	+0.04	+0.36	Bek
2005 01 15.168059	13 12 09.02	-06 02 45.98	-0.20	+ 0.77	Bar
2005 02 4.148568	13 14 13.72	-06 24 31.12	+0.46	+0.44	Dev
2005 02 10.057339	13 13 44.48	-06 24 27.23	+0.21	+0.70	Bar
2005 02 23.033905	13 10 56.70	-06 13 17.13	-0.11	+0.31	Gor
2005 03 1.905586	13 08 35.15	-06 01 26.25	-0.10	+0.49	Gor
2005 03 10.048960	13 05 06.92	-05 42 35.28	-0.34	-0.28	Bar

Таблица 3. Элара (J7). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2005 03 16.020752	13 02 11.59	-05 25 52.33	-0.10	-0.02	Gor
2005 03 17.016279	13 01 40.86	-05 22 52.74	-0.01	+0.31	Bek
2005 03 20.987799	12 59 34.82	-05 10 28.02	+0.47	+0.35	Gor
2005 03 21.899405	12 59 05.22	-05 07 31.19	+0.22	+0.19	Ale
2005 03 22.942708	12 58 31.05	-05 04 06.06	+0.36	+0.28	Gor
2005 03 28.971055	12 55 09.35	-04 43 37.88	-0.27	-0.03	Ale
2005 03 30.005531	12 54 34.29	-04 40 00.73	+0.40	+0.28	Gor
2005 03 31.971810	12 53 27.39	-04 33 05.41	+0.17	-0.07	Dev
2005 04 3.988041	12 51 44.62	-04 22 21.26	-0.30	-0.14	Kou
2005 04 4.982877	12 51 10.83	-04 18 47.59	-0.04	-0.05	Ale
2005 04 6.975224	12 50 03.34	-04 11 39.23	-0.17	-0.05	Bar
2005 04 14.947709	12 45 40.25	-03 43 21.51	+0.33	-0.31	Dev
2005 04 16.935602	12 44 37.24	-03 36 28.73	-0.26	-0.42	Kra
2005 04 17.931190	12 44 06.24	-03 33 04.02	+0.09	-0.10	Kou
2005 04 18.857487	12 43 37.76	-03 29 55.47	+0.42	-0.11	Ale
2005 04 19.923192	12 43 05.29	-03 26 20.55	+0.06	-0.06	Gor
2005 04 25.904462	12 40 12.69	-03 07 03.28	+0.59	-0.54	Ale
2005 05 9.877974	12 34 45.75	-02 29 08.56	-0.07	-0.23	Ale
2005 05 15.904658	12 33 04.49	-02 16 44.28	+0.47	+0.16	Kou
2006 04 22.995659	14 50 23.15	-14 32 27.68	+0.68	+0.09	Kra
2006 04 23.931983	14 50 00.01	-14 30 28.94	+0.07	+0.61	Bar
2006 04 24.986955	14 49 33.87	-14 28 17.01	+0.48	+0.11	Ale
2006 04 26.939085	14 48 45.31	-14 24 14.43	+0.17	+0.41	Ver
2006 04 27.954745	14 48 19.99	-14 22 09.72	+0.31	+0.68	Bek
2006 04 30.960350	14 47 05.03	-14 16 09.96	+0.19	+0.11	Bar
2006 05 1.948062	14 46 40.45	-14 14 14.19	-0.14	+0.42	Ale
2006 05 2.962060	14 46 15.28	-14 12 17.48	-0.20	+0.29	Gor
2006 05 5.962190	14 45 01.36	-14 06 43.15	-0.25	+0.05	Ibr
2006 05 6.955465	14 44 37.15	-14 04 55.89	+0.04	+0.54	Kra
2006 05 7.955706	14 44 12.89	-14 03 10.83	+0.23	+0.22	Bar
2006 05 8.952745	14 43 48.85	-14 01 27.72	+0.07	+0.52	Ale
2006 05 9.948530	14 43 25.01	-13 59 47.74	+0.01	+0.14	Gor

Таблица 4. Гиперион (S7). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05.

Дата, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 09 15.065415	07 46 15.00	+21 01 03.31	+0.11	+0.36	Gor
2004 09 20.061440	07 48 01.22	+20 55 03.72	+0.16	+0.21	Kou
2004 10 12.109259	07 54 12.50	+20 40 19.10	-0.03	+0.24	Dev
2004 10 28.953191	07 56 34.26	+20 36 24.69	-0.30	+0.03	Dev
2004 10 31.089298	07 56 42.91	+20 35 19.60	-0.30	+0.79	Kra
2004 11 2.129089	07 56 54.37	+20 34 37.65	-0.24	+0.68	Ale
2004 11 22.044678	07 56 15.82	+20 38 19.30	+0.75	-0.01	Kou
2004 11 26.053305	07 56 01.28	+20 39 37.04	+0.57	+0.67	Dev
2004 12 13.858950	07 52 17.18	+20 51 10.44	+0.17	+0.28	Ale
2004 12 14.073251	07 52 14.50	+20 51 17.33	+0.03	+0.17	Ale

Таблица 4. Гиперион (S7). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2004 12 25.131620	07 49 33.28	+21 03 20.24	+0.33	+0.44	Bek
2004 12 31.985232	07 46 51.57	+21 08 15.42	+0.17	+0.31	Bek
2005 01 16.077335	07 42 08.07	+21 24 27.14	+0.19	+0.19	Bar
2005 02 3.907832	07 36 00.84	+21 40 27.87	+0.24	+0.15	Dev
2005 02 21.773421	07 31 16.56	+21 51 10.37	+0.19	+0.04	Ale
2005 02 22.788558	07 31 06.60	+21 52 11.06	-0.12	+0.43	Gor
2005 02 24.799050	07 30 44.02	+21 54 11.54	+0.35	+0.15	Dev
2005 02 25.848556	07 30 30.25	+21 55 09.56	+0.20	+0.15	Bek
2005 03 3.697474	07 29 05.13	+21 57 21.58	+0.47	+0.65	Dev
2005 03 4.867009	07 28 52.38	+21 57 15.10	+0.16	+0.29	Bek
2005 03 12.921482	07 28 24.00	+21 58 13.33	+0.35	+0.26	Kra
2005 03 16.729219	07 28 22.62	+22 00 27.85	+0.07	+0.34	Bek
2005 03 18.913475	07 28 16.69	+22 01 46.77	+0.05	+0.25	Bek
2005 03 28.738266	07 27 55.24	+22 00 21.24	+0.45	+0.14	Ale
2005 03 29.837600	07 28 01.61	+21 59 59.52	+0.47	+0.06	Gor
2005 03 30.809831	07 28 08.58	+21 59 45.65	-0.08	+0.53	Bar
2005 04 6.864290	07 29 14.51	+22 00 20.23	+0.32	+0.27	Bar
2005 04 14.808999	07 30 01.52	+21 59 15.74	+0.22	+0.19	Dev
2005 04 17.824883	07 30 31.20	+21 56 57.42	+0.34	+0.24	Kou
2005 04 18.813294	07 30 44.36	+21 56 13.24	+0.36	+0.26	Ale
2005 04 19.823044	07 30 59.33	+21 55 31.32	+0.29	+0.18	Gor
2005 04 25.834796	07 32 47.56	+21 53 02.69	+0.10	+0.40	Ale
2005 04 26.841455	07 33 06.45	+21 52 53.43	+0.03	+0.33	Gor
2005 10 28.123368	08 52 37.66	+18 00 19.54	+0.10	+0.56	Bek
2005 10 28.139078	08 52 37.86	+18 00 18.77	+0.55	+0.64	Bek
2005 11 1.124087	08 53 26.82	+17 57 18.99	+0.70	+0.12	Ale
2005 10 28.123368	08 52 37.70	+18 00 19.46	+0.69	+0.48	Bek
2005 10 28.139078	08 52 37.85	+18 00 18.24	+0.29	+0.12	Bek
2005 11 1.124087	08 53 26.80	+17 57 19.01	+0.45	+0.14	Ale
2006 01 17.856360	08 44 38.70	+18 45 57.52	+0.14	+0.08	Gor
2006 01 19.004656	08 44 11.73	+18 47 08.41	+0.10	-0.24	Kou
2006 02 20.823961	08 34 08.10	+19 28 35.30	+0.10	+0.23	Ale
2006 03 13.063166	08 29 24.77	+19 45 52.22	+0.76	-0.03	Bar
2006 03 24.982459	08 27 25.78	+19 52 22.11	+0.14	+0.41	Bek
2006 04 18.854774	08 27 39.85	+19 51 06.11	+0.17	+0.47	Gor
2006 05 3.845810	08 30 01.87	+19 45 10.78	+0.45	+0.04	Ver
2006 05 4.835798	08 30 10.66	+19 44 09.23	+0.22	-0.11	Bek
2006 05 5.847574	08 30 21.15	+19 43 03.01	+0.35	+0.02	Ibr
2006 05 6.859146	08 30 33.21	+19 41 54.60	-0.00	-0.25	Kra
2006 05 7.821149	08 30 46.22	+19 40 50.05	+0.40	+0.08	Bar
2006 05 7.827379	08 30 46.30	+19 40 49.71	+0.31	+0.16	Bar
2006 05 7.838787	08 30 46.48	+19 40 49.06	+0.57	+0.29	Bar
2006 05 7.844742	08 30 46.55	+19 40 48.56	+0.37	+0.20	Bar
2006 05 7.847010	08 30 46.59	+19 40 48.40	+0.37	+0.20	Bar
2006 05 9.868087	08 31 18.37	+19 38 36.95	+0.17	+0.60	Gor
2006 05 10.854484	08 31 35.79	+19 37 36.21	+0.05	+0.14	Ver

Таблица 5. Япет (S8). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05

Дата,UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 09 15.065415	07 46 15.62	+20 59 17.09	-0.13	+0.36	Gor
2004 10 12.131139	07 55 01.87	+20 42 39.95	-0.24	-0.06	Dev
2004 11 2.131703	07 56 56.79	+20 36 49.91	+0.05	+0.11	Ale
2004 11 22.103661	07 55 53.10	+20 38 24.86	+0.01	+0.18	Kou
2004 11 26.051090	07 55 30.21	+20 39 55.42	+0.33	-0.10	Dev
2004 11 29.082614	07 55 10.42	+20 41 22.97	-0.29	-0.32	Kou
2004 12 13.861000	07 52 52.51	+20 51 59.38	+0.33	+0.31	Ale
2004 12 25.115843	07 50 04.15	+21 02 49.62	-0.07	-0.12	Bek
2004 12 25.134987	07 50 03.81	+21 02 50.94	+0.03	+0.04	Bek
2004 12 31.987583	07 47 51.26	+21 09 52.54	-0.15	+0.25	Bek
2005 01 8.141126	07 45 12.32	+21 17 02.83	+0.19	+0.16	Dev
2005 01 12.051517	07 43 39.33	+21 20 47.13	-0.02	+0.53	Gor
2005 01 30.018561	07 36 38.90	+21 35 26.17	+0.17	+0.38	Kra
2005 02 1.869449	07 35 41.13	+21 37 26.55	-0.18	+0.22	Gor
2005 02 3.903564	07 35 02.48	+21 38 50.26	-0.31	-0.17	Dev
2005 02 9.027619	07 33 35.07	+21 42 17.89	+0.21	+0.41	Gor
2005 02 9.072760	07 33 34.34	+21 42 19.49	-0.04	+0.25	Gor
2005 02 9.075699	07 33 34.31	+21 42 19.71	+0.09	+0.36	Gor
2005 02 9.079197	07 33 34.26	+21 42 19.84	+0.18	+0.36	Gor
2005 03 2.757697	07 29 49.78	+21 55 50.15	-0.14	+0.47	Bar
2005 03 3.694993	07 29 44.14	+21 56 19.91	+0.30	+0.12	Dev
2005 03 10.923353	07 29 08.20	+21 59 44.81	+0.57	+0.26	Bek
2005 03 10.927082	07 29 08.15	+21 59 44.61	+0.37	-0.01	Bek
2005 02 9.806079	07 33 23.09	+21 42 49.03	+0.11	+0.39	Bar
2005 02 27.970438	07 30 08.11	+21 54 15.87	+0.70	-0.28	Kou
2005 03 1.811989	07 29 55.71	+21 55 18.46	+0.80	-0.14	Gor
2005 03 4.702488	07 29 38.33	+21 56 51.60	+0.23	+0.20	Bek
2005 03 4.704903	07 29 38.31	+21 56 51.65	+0.17	+0.19	Bek
2005 03 12.916167	07 29 00.49	+22 00 30.87	+0.19	+0.08	Kra
2005 03 16.729219	07 28 48.34	+22 01 44.92	+0.15	+0.26	Bek
2005 03 16.731251	07 28 48.32	+22 01 44.71	-0.04	+0.02	Bek
2005 03 16.731251	07 28 48.32	+22 01 44.71	-0.04	+0.02	Bek
2005 03 16.731251	07 28 48.32	+22 01 44.71	-0.05	+0.02	Bek
2005 03 21.881035	07 28 37.25	+22 02 51.02	-0.03	+0.62	Ale
2005 03 31.750488	07 28 36.81	+22 02 58.09	+0.33	+0.59	Dev
2005 04 4.803797	07 28 46.75	+22 02 15.08	-0.07	+0.43	Ale
2005 04 5.775694	07 28 50.22	+22 02 00.57	+0.08	-0.07	Gor
2005 04 6.862104	07 28 54.67	+22 01 43.83	+0.38	+0.59	Bar
2005 04 14.800433	07 29 46.25	+21 58 49.20	+0.26	+0.12	Dev
2005 04 14.808999	07 29 46.32	+21 58 49.08	+0.24	+0.25	Dev
2005 04 17.824883	07 30 15.74	+21 57 24.39	+0.31	+0.34	Kou
2005 04 17.823829	07 30 15.72	+21 57 24.36	+0.20	+0.29	Kou
2005 04 18.811317	07 30 26.61	+21 56 54.78	+0.17	+0.23	Ale
2005 04 18.813294	07 30 26.63	+21 56 54.74	+0.17	+0.26	Ale

Таблица 5. Япет (S8). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2005 04 19.823044	07 30 38.41	+21 56 23.66	+0.25	+0.21	Gor
2005 04 19.820347	07 30 38.38	+21 56 23.60	+0.26	+0.06	Gor
2005 04 25.801961	07 32 01.68	+21 53 05.96	+0.21	+0.27	Ale
2005 04 26.839694	07 32 18.45	+21 52 29.80	+0.27	+0.50	Gor
2005 05 2.847005	07 34 08.31	+21 48 50.37	+0.59	+0.61	Ale
2005 09 23.094058	08 42 09.14	+18 36 58.70	+0.01	+0.05	Dev
2005 10 28.130968	08 53 06.76	+18 00 22.90	-0.15	+0.77	Bek
2005 11 1.136567	08 53 59.06	+17 58 16.16	+0.16	+0.19	Ale
2005 12 14.107961	08 53 07.73	+18 05 27.46	+0.02	-0.12	Gor
2005 12 27.910742	08 50 14.19	+18 18 08.27	+0.24	+0.16	Gor
2005 12 28.875815	08 50 01.41	+18 19 11.36	+0.08	+0.18	Bar
2006 02 9.095565	08 38 02.18	+19 16 00.59	+0.09	+0.02	Kou
2006 03 3.698220	08 30 33.92	+19 39 50.73	-0.17	+0.21	Ibr
2006 03 12.843082	08 28 37.78	+19 46 01.87	+0.15	+0.23	Bar
2006 03 14.830351	08 28 19.83	+19 47 07.99	+0.34	+0.15	Gor
2006 03 22.814099	08 27 33.21	+19 50 45.76	+0.26	+0.08	Kou
2006 04 10.851785	08 27 50.88	+19 53 59.75	+0.38	+0.08	Gor
2006 04 25.844938	08 29 20.75	+19 50 05.42	+0.21	+0.11	Gor

Таблица 6. Феба (S9). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05.

Дата,UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 09 20.065827	07 49 26.99	+20 56 40.08	+0.67	+0.06	Kou
2004 10 12.105821	07 55 08.06	+20 42 58.01	-0.25	+0.27	Dev
2004 10 16.126742	07 55 48.97	+20 41 21.32	+0.52	+0.24	Ale
2004 11 2.134618	07 57 21.44	+20 38 10.43	+0.26	+0.18	Ale
2004 11 26.047883	07 55 42.77	+20 44 15.25	-0.42	+0.38	Dev
2004 12 13.855988	07 51 46.80	+20 56 02.54	-0.37	+0.42	Ale
2004 12 14.076427	07 51 43.12	+20 56 13.14	+0.26	+0.35	Ale
2004 12 25.109008	07 48 21.20	+21 05 44.85	+0.11	+0.18	Bek
2004 12 31.981480	07 46 00.78	+21 12 10.35	+0.09	+0.36	Bek
2005 01 16.071986	07 40 32.43	+21 26 36.26	+0.07	-0.14	Bar
2005 01 30.015702	07 35 34.38	+21 39 07.22	+0.48	+0.38	Kra
2005 02 21.782873	07 29 00.67	+21 54 59.04	-0.43	+0.31	Ale
2005 02 22.783234	07 28 47.50	+21 55 30.33	-0.01	-0.05	Gor
2005 02 22.886396	07 28 46.15	+21 55 34.27	+0.09	+0.69	Gor
2005 02 23.765553	07 28 34.94	+21 56 00.54	+0.03	-0.01	Bar
2005 02 23.942369	07 28 32.68	+21 56 06.04	-0.08	+0.21	Bar
2005 02 24.802445	07 28 22.13	+21 56 31.40	+0.25	-0.02	Dev
2005 02 25.853979	07 28 09.53	+21 57 01.83	-0.04	+0.15	Bek
2005 02 27.967440	07 27 45.73	+21 57 59.90	+0.55	+0.67	Kou
2005 02 28.795420	07 27 36.91	+21 58 20.93	-0.14	+0.17	Ale
2005 02 1.866036	07 34 37.09	+21 41 27.61	-0.14	-0.02	Gor
2005 02 3.911258	07 33 57.05	+21 43 05.02	-0.19	-0.26	Dev
2005 02 9.812353	07 32 07.74	+21 47 30.45	-0.19	+0.33	Bar
2005 03 1.802643	07 27 26.62	+21 58 46.25	+0.20	+0.32	Gor

Таблица 6. Феба (S9). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2005 03 1.948785	07 27 25.12	+21 58 49.56	+0.02	+0.16	Gor
2005 03 2.829088	07 27 16.53	+21 59 10.79	-0.31	+0.23	Bar
2005 03 3.828525	07 27 07.20	+21 59 33.71	-0.26	+0.13	Dev
2005 03 4.710606	07 26 59.38	+21 59 53.36	-0.01	+0.28	Bek
2005 03 9.861548	07 26 20.65	+22 01 31.55	+0.74	-0.16	Bar
2005 03 12.933422	07 26 03.46	+22 02 18.18	+0.18	+0.23	Kra
2005 03 14.855153	07 25 55.05	+22 02 41.82	+0.01	-0.35	Ale
2005 03 15.838829	07 25 51.44	+22 02 53.42	+0.19	+0.30	Gor
2005 03 16.738424	07 25 48.57	+22 03 02.54	+0.10	+0.24	Bek
2005 03 20.834439	07 25 40.37	+22 03 33.55	+0.54	-0.09	Gor
2005 03 21.875767	07 25 39.57	+22 03 39.40	+0.37	+0.49	Ale
2005 03 22.798828	07 25 39.31	+22 03 42.68	+0.19	-0.07	Gor
2005 03 28.825592	07 25 47.81	+22 03 46.85	+0.04	+0.17	Ale
2005 03 29.834375	07 25 50.97	+22 03 44.07	+0.42	+0.26	Gor
2005 03 30.806691	07 25 54.45	+22 03 40.46	+0.22	+0.32	Bar
2005 03 31.821139	07 25 58.57	+22 03 35.80	+0.28	+0.52	Dev
2005 04 3.811797	07 26 13.60	+22 03 15.42	+0.40	+0.34	Kou
2005 04 4.798921	07 26 19.46	+22 03 06.65	-0.10	+0.17	Ale
2005 04 5.790342	07 26 25.89	+22 02 56.56	+0.60	-0.31	Gor
2005 04 6.854780	07 26 33.21	+22 02 46.03	+0.08	+0.59	Bar
2005 04 14.803454	07 27 44.96	+22 00 45.48	+0.49	+0.38	Dev
2005 04 25.832539	07 30 10.77	+21 56 16.28	+0.27	+0.25	Ale
2005 09 23.091273	08 42 58.73	+18 33 34.25	+0.15	-0.26	Dev
2005 10 28.136032	08 54 19.56	+17 55 20.88	+0.32	+0.26	Bek
2005 11 1.140731	08 55 06.74	+17 52 57.43	-0.12	+0.33	Ale
2005 12 4.138744	08 56 52.80	+17 52 39.07	+0.62	+0.40	Kra
2005 12 14.110618	08 55 44.02	+17 59 24.70	+0.44	-0.01	Gor
2005 12 23.054505	08 54 05.86	+18 07 50.97	+0.11	+0.15	Bek
2005 12 27.914217	08 52 59.41	+18 13 14.71	-0.21	+0.02	Gor
2005 12 28.879246	08 52 45.23	+18 14 22.51	+0.26	-0.10	Bar
2006 01 8.961262	08 49 41.19	+18 28 33.57	+0.09	+0.09	Bar
2006 01 12.935721	08 48 27.42	+18 34 02.81	+0.07	+0.12	Bek
2006 01 14.851330	08 47 50.73	+18 36 44.06	+0.03	-0.29	Kra
2006 01 17.859535	08 46 51.81	+18 41 01.25	+0.15	-0.02	Gor
2006 01 18.066993	08 46 47.64	+18 41 19.00	+0.07	-0.08	Gor
2006 01 20.007545	08 46 08.87	+18 44 06.77	-0.03	+0.37	Bek
2006 01 21.087436	08 45 47.08	+18 45 39.78	+0.09	+0.08	Kra
2006 01 22.094302	08 45 26.65	+18 47 07.10	+0.08	+0.21	Kra
2006 02 2.880819	08 41 23.49	+19 04 01.35	-0.07	+0.50	Bek
2006 02 6.919426	08 40 00.62	+19 09 36.75	+0.07	+0.10	Ale
2006 02 6.922001	08 40 00.55	+19 09 37.17	-0.19	+0.30	Ale
2006 02 7.972922	08 39 39.20	+19 11 02.78	-0.11	+0.22	Gor
2006 02 9.097296	08 39 16.48	+19 12 33.30	-0.11	-0.01	Kou
2006 02 17.003950	08 36 41.89	+19 22 43.46	+0.35	+0.49	Bek
2006 02 17.023121	08 36 41.49	+19 22 44.02	-0.25	-0.33	Bek
2006 02 27.859070	08 33 30.80	+19 34 54.74	+0.27	+0.11	Ale

Таблица 6. Феба (S9). Результаты наблюдений 2004.09 – 2006.05 (продолжение).

2006 02 27.861776	08 33 30.76	+19 34 54.53	+0.34	-0.26	Ale
2006 03 1.879180	08 32 58.80	+19 36 54.89	+0.05	+0.19	Kou
2006 03 4.005638	08 32 26.52	+19 38 55.13	+0.07	+0.15	Ibr
2006 03 1.879180	08 32 58.80	+19 36 54.90	+0.02	+0.20	Kou
2006 03 4.005638	08 32 26.53	+19 38 55.08	+0.18	+0.10	Ibr
2006 03 6.794912	08 31 46.57	+19 41 23.44	+0.18	+0.16	Ale
2006 03 11.763898	08 30 42.22	+19 45 18.85	-0.14	-0.23	Kra
2006 03 11.941785	08 30 40.04	+19 45 27.39	-0.23	+0.60	Kra
2006 03 12.767404	08 30 30.39	+19 46 02.05	+0.50	-0.16	Bar
2006 03 12.846295	08 30 29.39	+19 46 05.65	-0.48	+0.11	Bar
2006 03 12.911887	08 30 28.69	+19 46 08.16	+0.58	-0.09	Bar
2006 03 13.783130	08 30 18.75	+19 46 44.52	+0.17	+0.21	Ale
2006 03 14.833601	08 30 07.15	+19 47 26.04	+0.23	-0.12	Gor
2006 03 15.835816	08 29 56.48	+19 48 04.79	-0.09	+0.26	Kou
2006 03 17.879318	08 29 36.01	+19 49 18.15	-0.01	+0.25	Ibr
2006 03 22.817306	08 28 53.69	+19 51 48.41	+0.10	+0.17	Kou
2006 03 24.984640	08 28 38.35	+19 52 41.96	+0.06	+0.11	Bek
2006 03 31.827394	08 28 03.52	+19 54 42.32	+0.06	+0.38	Ver
2006 04 10.867588	08 27 50.37	+19 55 20.73	+0.34	+0.34	Gor
2006 05 9.869911	08 31 19.13	+19 42 31.19	+0.54	+0.17	Gor

Таблица 7. Средние значения и ошибки наблюдений.

Спутник	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	σ_{δ}''
Гималия	45	+0".13	±0".21	+0".24	±0".18
Элара	39	+0.11	±0.28	+0.17	±0.32
Пасифе	33	+0.18	±0.30	+0.16	±0.32
Гиперион	56	+0.24	±0.24	+0.25	±0.22
Япет	62	+0.14	±0.22	+0.20	±0.23
Феба	91	+0.11	±0.26	+0.16	±0.23

Литература

1. *Бекяшев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Кулиш А.П., Сви́дунович А.Г., Шумахер А.В.* Зеркальный астрограф ЗА-320 //Изв. ГАО, 1998, N 213, с.249-258.
2. *Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Сви́дунович А.Г.* Астрометрические наблюдения спутников Сатурна на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1998-1999 гг.// Изв.ГАО, 2000, N 214, с.382-386.
3. *Девяткин А.В., Грицук А.Н., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В.* АПЕКС – программная система для обработки ПЗС-изображений в астрономии // Изв. ГАО, 2000, №214, с.455–468.
4. *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 зеркальном астрографе ЗА-320. II. // Изв. ГАО, 2004, №217, с.505-530.

5. **Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Куприянов В.В., Корнилов Э.В.** Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320 // Изв. ГАО, 2002, №216, с.128-156.
6. telnet://ssd.jpl.nasa.gov
7. **Девяткин А.В., Алешикина Е.Ю., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Сидоров М.Ю.** Астрометрические наблюдения спутников Юпитера и Сатурна, полученные на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1999-2004 гг.// Изв.ГАО, 2000, N 217, с.194-2146.

ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF SATELITTES OF JUPITER AND SATURN WITH THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2004-2006

Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu, Bekhteva A.S., Baturina G.D., Ibragimov F.M., Vereschagina I.A., Krakosevich O.V., Barshevich K.V.

Summary

Astrometric observations of Jupiter's satellites (Himalia, Elara, Pasiphae) and of Saturn's satellites (Hyperion, Yarpetus, Phoebe) were made with ZA-320 Mirror Astrograph at the Pulkovo Observatory. Processing of the observations with account for chromatic refraction was done by means of the APEX program system in UCAC-2 and USNO-B1.0 catalogue systems in 2004-2006. The average accuracy of observations in right ascension and declination was 0."25.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320М В 2004-2006 гг.

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю.,
Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верещагина И.А.,
Кракосевич О.В., Баршевич К.В.**

Проведены астрометрические наблюдения астероидов и комет. Получены положения для 222 астероидов и для 6 комет в системе каталогов USNO-B1.0 и UCAC-2. Обработка наблюдений выполнена с использованием программных систем АПЕКС и АПЕКС-II с учетом хроматической рефракции. Средняя точность наблюдений по прямому восхождению и склонению составляет 0".3.

С 1998 г. на телескопе ЗА-320 [1, 2, 7, 8] проводятся наблюдения малых планет. С 2002 года на телескопе была начата программа наблюдений объектов, сближающихся с Землей, которая осуществляется в рамках темы "Пулковская программа изучения объектов, сближающихся с Землей" [4, 6, 10]. В программу наблюдений малых тел Солнечной системы на ЗА-320 включены следующие объекты: астероиды из Critical List MPC; астероиды, которые недавно открыты; двойные астероиды; астероиды - бывшие кометы; наблюдения тесных сближений астероидов; видимые сближения астероидов; астероиды, названные именами пулковских астрономов; астероиды, к которым летят космические зонды; покрытия звезд астероидами, кометы.

Наблюдения на ЗА-320 проводились в автоматическом режиме [2, 8]. Обработка ПЗС наблюдений была выполнена при помощи следующих программных систем: полуавтоматической системы АПЕКС [5] и автоматической – АПЕКС-II. Редукция наблюдений производилась методом 8 постоянных. Обработка наблюдений была проведена в системе каталогов USNO-B1.0 и UCAC-2. С помощью систем АПЕКС были получены величины "O". Для учета хроматической рефракции использовались значения показателя цвета B-V, если они были известны [11], а для остальных объектов было принято значение B-V = 0.80. Эфемеридные значения "C" вычислялись с использованием программы ЭПОС [9].

В таблицах 1-2 приведены результаты обработки наблюдений и данные по наблюдаемым объектам. Обозначение столбцов следующее: Объект – название объекта, N – количество наблюдений, $\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$ - среднее значение разностей (O-C) по прямому восхождению за весь период наблюдений, $\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$ — внешняя ошибка одного наблюдения по прямому восхождению (оценка по разностям (O-C) за весь период наблюдений), $\overline{(O-C)}_{\delta}$ - среднее значение разностей (O-C) по склонению за весь период наблюдений, σ_{δ}'' — внешняя ошибка одного наблюдения по склонению (оценка по разностям (O-C) за весь период наблюдений), "Z диапазон" — диапазон наблюдений объекта по зенитному расстоянию.

Для комет, в случае большого тренда в O-C, оценка точности была проведена по отклонениям индивидуальных точек от кривой не более второго порядка, проведенной методом МНК через эти точки.

Топоцентрические астрометрические положения астероидов и комет на эпоху J2000 были опубликованы в Minor Planet Circular [12 - 30].

Таблица 1. Результаты обработки наблюдений малых планет
и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	σ_{δ}''	Z диапазон
4 Vesta	6	-0".03	$\pm 0".32$	+0".11	$\pm 0".17$	67°-75°
10 Hygiea	24	+0.23	0.22	-0.09	0.21	62-74
87 Sylvia	152	+0.04	0.12	+0.17	0.11	42-71
243 Ida	151	+0.05	0.18	-0.03	0.13	45-74
287 Nephthys	151	+0.04	0.15	+0.03	0.16	54-75
305 Gordonia	6	-0.05	0.08	+0.30	0.14	44-55
423 Diotima	112	-0.12	0.16	-0.03	0.17	39-72
762 Pulcova	4	-0.02	0.15	+0.10	0.03	72-73
1081 Reseda	6	-0.28	0.19	-0.08	0.23	31-53
1373 Cincinnati	82	-0".05	$\pm 0".23$	-0".02	$\pm 0".23$	6°-72°
1384 Kniertje	12	+0.18	0.25	+0.24	0.28	67-75
1670 Minnaert	7	+0.02	0.21	+0.10	0.16	26-52
1792 Reni	19	+0.04	0.29	+0.05	0.26	31-65
1951 Lick	36	-0.06	0.36	-0.06	0.23	43-69
2323 Zverev	18	-0.13	0.30	+0.22	0.22	45-68
2543 Machado	3	-0.27	0.12	-0.31	0.23	48-55
2642 Vesale	15	-0.11	0.28	-0.09	0.32	66-72
2938 Hopi	63	-0.12	0.26	+0.04	0.31	10-57
3673 Levy	45	+0.11	0.36	+0.19	0.31	62-75
3691 Bede	6	+0.14	0.39	+0.003	0.13	16-38
3800 Karayusuf	70	-0.25	0.22	-0.19	0.21	19-54
4055 Magellan	63	-0.03	0.26	+0.05	0.24	33-75
4212 Sansyu-Asuke	5	+0.06	0.29	+0.13	0.27	26-41
4228 Nemiro	8	+0.15	0.28	+0.17	0.17	47-63
4964 Kourovka	3	+0.24	0.07	-0.14	0.16	55-57
4986 Osipovia	8	-0.02	0.17	+0.20	0.23	39-53
5066 Garradd	38	-0.27	0.25	+0.15	0.27	7-28
5164 Millo	126	-0.02	0.29	+0.003	0.23	6-60
5653 Camarillo	78	+0.14	0.32	+0.17	0.30	17-62
5706 Finkelstein	3	-0.29	0.15	+0.28	0.03	57-58
6050 Miwablock	5	-0.09	0.27	+0.35	0.46	63-75
6456 Golombek	54	+0.10	0.25	-0.24	0.23	53-71
7467 1989 WQ1	15	+0.01	0.27	+0.06	0.31	5-47
7569 1989 BK	3	-0.04	0.24	+0.21	0.14	54-55
14222 1999 WS1	4	-0.16	0.37	-0.19	0.67	68-74
16064 1999 RH27	24	+0.03	0.29	+0.09	0.41	32-64
16958 Klaasen	17	-0.07	0.31	-0.20	0.36	46-59
19021 2000 SC8	44	-0.36	0.23	+0.10	0.28	40-68
21088 1992 BL2	37	+0.04	0.26	+0.15	0.31	5-62
22141 2000 VH36	7	-0.46	0.16	-0.07	0.10	49-61
22653 1998 QV2	4	-0.27	0.40	-0.35	0.11	67-74

24418 2000 BA7	3	-0.24	0.31	+0.09	0.39	47-56
25916 2001 CP44	7	+0.33	0.23	+0.14	0.26	31-39
31263 1998 EG9	3	-0.38	0.12	-0.02	0.06	42-43
39774 1997 GO27	4	-0.21	0.39	-0.19	0.42	52-67
40263 1999 FQ5	20	+0.08	0.24	-0.05	0.29	41-66
41434 2000 GB82	3	+0.24	0.41	-0.56	0.17	28-39
53430 1999 TY16	6	-0.11	0.49	-0.27	0.42	9-65
54690 2001 EB	8	+0.33	0.41	+0.14	0.39	24-51
66251 1999 GJ2	52	+0.17	0.24	-0.01	0.30	29-67
85839 1998 YO4	4	+0.29	0.56	+0.42	0.50	63-73
86067 1999 RM28	10	+0.25	0.32	-0.07	0.51	45-73
90373 2003 SZ219	20	+0.04	0.27	-0.09	0.26	47-64
97679 2000 GG2	9	+0.25	0.55	-0.11	0.49	36-62
97725 2000 GB147	7	+0.14	0.34	+0.37	0.36	40-61
101058 1998 RN3	7	-0.19	0.44	-0.05	0.43	25-36
1977 VA	5	+0.22	0.47	+0.13	0.43	58-61
1979 QB	15	-0.17	0.30	-0.19	0.26	36-48
1992 BF	1	+0.34	-	-0.55	-	66
1998 ST49	19	-0.28	0.42	-0.11	0.48	21-59
1998 UO1	3	-0.03	0.29	+0.36	0.19	28-33
1998 VO33	12	+0.02	0.53	-0.11	0.26	39-49
1998 WZ6	20	-0.08	0.31	+0.09	0.35	5-51
1998 XE12	1	-1.28	-	+0.43	-	51
1999 HF1	81	+0.10	0.50	-0.22	0.32	2-74
1999 JA11	1	+0.11	-	+0.15	-	9
1999 JV3	1	-0.14	-	-0.56	-	67
1999 KX4	2	-0.05	-	-0.33	-	44
1999 LF6	6	-0.28	0.32	-0.23	0.26	26-48
1999 RC32	4	+0.29	0.07	-0.34	0.08	40-42
1999 XS16	1	-0.08	-	+0.06	-	43
1999 YB	2	-0.17	-	+0.54	-	28-33
1999 YC	1	+0.15	-	-0.64	-	36
1999 YK5	16	+0.20	0.59	+0.77	0.40	4-43
2000 AF6	15	+0.14	0.33	+0.09	0.25	35-64
2000 BD19	12	-0.42	0.42	+0.42	0.67	4-30
2000 BJ19	3	-0.06	0.39	-0.04	0.55	37-56
2000 CN101	2	+0.40	-	-0.30	-	56-69
2000 RL77	6	+0.20	0.35	-0.09	0.24	41-72
2000 TJ1	4	+0.18	0.35	+0.02	0.18	15-38
2000 TK1	3	+0.01	0.37	-0.02	0.40	40-40
2000 UT16	12	+0.06	0.49	-0.20	0.32	3-36
2000 WN10	2	+0.32	-	+0.20	-	32-35
2000 XR15	9	+0.19	0.32	+0.12	0.43	12-41
2001 CB21	11	+0.20	0.31	-0.23	0.24	11-49
2001 CD32	10	+0.02	0.23	+0.20	0.27	43-71
2001 CL42	32	+0.12	0.28	-0.11	0.29	27-71

2001 CV19	8	+0.09	0.62	-0.07	0.55	10-44
2001 FZ6	35	+0.10	0.28	-0.18	0.26	47-62
2001 HG31	35	-0.02	0.35	-0.01	0.23	60-64
2001 ME1	6	-0.17	0.46	-0.26	0.16	50-65
2001 QD96	7	+0.19	0.48	+0.11	0.37	50-65
2001 RQ151	1	+0.09	-	-0.34	-	72
2001 SE170	10	+0.09	0.33	-0.11	0.37	27-61
2001 SG276	4	-0.07	0.24	+0.18	0.30	24-54
2001 SW169	6	+0.42	0.37	+0.06	0.30	31-37
2001 UD123	1	+0.06	-	+0.36	-	49
2001 WR1	41	+0.20	0.33	-0.08	0.40	39-54
2001 XV10	5	-0.18	0.37	+0.40	0.15	35-64
2002 BK26	16	+0.13	0.38	+0.03	0.27	40-54
2002 CC19	16	+0.32	0.30	+0.10	0.36	24-49
2002 CD	18	+0.72	0.37	-0.35	0.34	64-74
2002 DP3	7	+0.01	0.32	-0.28	0.34	23-36
2002 EZ2	15	+0.25	0.30	+0.16	0.35	40-65
2002 EZ11	6	-0.53	0.32	-0.21	0.27	67-73
2002 HW	7	-0.01	0.14	-0.09	0.19	45-50
2002 JC	3	-0.89	0.50	+0.21	0.49	59-62
2002 RX211	24	-0.06	0.32	-0.10	0.25	38-75
2002 VQ94	178	+0.16	0.32	-3.94	0.33	9-52
2002 VQ6	2	-0.22	-	-0.21	-	44-50
2002 WP11	18	+0.11	0.36	-0.05	0.20	27-58
2003 CP20	1	-1.37	-	-0.60	-	59
2003 CY18	34	+0.09	0.43	+0.03	0.29	35-71
2003 QQ47	4	-0.38	0.42	+0.35	0.23	47-73
2003 SA224	42	-0.22	0.31	-0.09	0.25	9-75
2003 SW222	28	+0.10	0.27	-0.05	0.41	2-53
2003 TL4	4	-0.08	0.32	-0.25	0.22	23-24
2003 YQ117	10	-0.22	0.35	-0.13	0.23	64-71
2003 YU1	22	-0.02	0.29	-0.11	0.32	26-51
2004 BV102	6	+0.21	0.40	-0.35	0.17	27-39
2004 DC	13	-0.10	0.31	+0.23	0.26	24-27
2004 EW9	20	+0.12	0.43	+0.13	0.35	7-39
2004 FE3	13	-0.63	0.54	+0.06	0.29	31-74
2004 FH11	14	-0.16	0.39	+0.13	0.40	28-71
2004 FN18	40	+0.03	0.31	-0.06	0.32	25-62
2004 GA1	8	+0.04	0.29	+0.18	0.34	24-48
2004 GX127	4	+0.12	0.71	-0.28	0.43	37-43
2004 JA27	3	+0.46	0.19	+0.37	0.21	41-44
2004 LJ1	12	-0.01	0.30	+0.09	0.31	40-71
2004 MU2	16	+0.16	0.27	-0.13	0.30	33-47
2004 MZ7	14	-0.17	0.30	-0.16	0.32	47-71
2004 NL8	3	+0.25	0.37	+0.06	0.36	58-62
2004 OB	7	+0.12	0.52	+0.24	0.34	47-71

2004 PE97	5	-0.08	0.58	+0.22	0.19	45-71
2004 QC17	15	+0.17	0.42	+0.13	0.41	19-50
2004 QD3	23	+0.61	0.37	-0.69	0.36	3-60
2004 QD17	11	-0.14	0.39	+0.15	0.39	13-68
2004 QF1	39	-0.02	0.32	-0.10	0.29	18-63
2004 QF20	5	+0.15	0.41	-0.17	0.44	52-71
2004 QQ	4	+0.16	0.47	+0.13	0.31	33-49
2004 QT24	15	-0.33	0.41	-0.42	0.44	30-57
2004 QU24	14	-0.02	0.24	-0.10	0.26	63-73
2004 QV16	1	-0.12	-	+0.05	-	32
2004 QY2	4	-0.12	0.34	0.00	0.32	68-75
2004 QZ2	18	+0.09	0.42	-0.09	0.33	36-64
2004 RD252	5	+0.15	0.67	+0.39	0.56	8-27
2004 RF84	8	+0.13	0.22	-0.07	0.17	35-70
2004 RJ84	3	+0.24	0.70	+0.13	0.17	29-38
2004 RM251	13	-0.17	0.40	+0.26	0.37	30-73
2004 RN9	6	+1.21	0.92	+0.74	0.60	16-70
2004 RQ10	5	+0.24	0.32	-0.03	0.21	39-46
2004 RZ109	7	+0.20	0.43	-0.10	0.34	10-33
2004 RZ164	4	+0.14	0.36	0.00	0.27	7-28
2004 SB1	4	+0.30	0.69	+0.56	0.33	28-54
2004 SB20	1	-0.96	-	-0.30	-	69
2004 SV26	9	-0.04	0.28	-0.07	0.26	25-47
2004 SV55	3	+0.04	0.54	+0.01	0.20	39-58
2004 SX	1	-0.14	-	+0.81	-	73
2004 TB18	12	+0.04	0.51	+0.21	0.50	31-56
2004 TP1	5	+0.26	0.35	-0.26	0.57	8-55
2004 TP20	1	2.60	-	-0.13	-	65
2004 TR14	10	-0.32	0.31	+0.03	0.21	6-58
2004 UE	1	-0.17	-	0.00	-	16
2004 UR	2	-0.19	-	-0.08	-	46-53
2004 UV1	11	-0.17	0.36	-0.02	0.22	28-70
2004 VA	6	+0.17	0.38	+0.12	0.32	58-69
2004 VB	4	+0.21	0.33	+1.40	0.51	23-39
2004 VC17	4	+0.50	0.30	+0.41	0.31	58-67
2004 VD17	3	+1.79	0.27	+0.51	0.07	44-64
2004 WG1	3	+0.08	0.25	-0.29	0.13	37-38
2004 XO14	7	-0.23	0.28	-0.13	0.47	38-61
2004 YC5	5	+0.27	0.31	+0.05	0.21	10-44
2004 YH32	7	+0.35	0.29	-0.59	0.32	37-42
2004 YY23	22	+0.23	0.29	+0.13	0.27	39-56
2005 AB	109	+0.16	0.34	+0.02	0.30	8-63
2005 AD13	9	+0.01	0.20	+0.25	0.12	30-52
2005 AT42	67	+0.02	0.36	+0.09	0.27	62
2005 CK38	30	-0.07	0.25	-0.00	0.31	54-72
2005 CV69	41	+0.02	0.21	+0.04	0.40	15-74

2005 EA94	5	-0.41	0.43	+0.18	0.27	35-44
2005 ED318	79	+0.96	0.49	-0.01	0.32	18-60
2005 EJ225	7	+0.19	0.30	+0.04	0.26	28-34
2005 EK94	2	-0.13	-	-0.28	-	8-21
2005 FC3	3	-0.18	0.18	-0.22	0.11	73
2005 FD	1	+0.16	-	-0.41	-	42
2005 FL4	4	-0.07	0.37	+0.03	0.36	37-38
2005 GG	2	-0.10	-	+0.39	-	42-44
2005 GO22	6	+0.08	0.49	+0.03	0.14	70-71
2005 GU	2	+0.20	-	+0.40	-	38
2005 JB	5	-0.05	0.11	-0.49	0.13	16-30
2005 JE46	13	+0.14	0.30	-0.10	0.17	42-67
2005 JS108	4	+0.03	0.31	-0.41	0.41	44-56
2005 JU108	15	+0.02	0.22	-0.19	0.39	44-55
2005 MW1	4	-0.04	0.23	-0.24	0.24	64-70
2005 MX1	22	+0.11	0.31	-0.02	0.35	17-52
2005 OE3	10	+0.03	0.28	+0.48	0.30	23-29
2005 OW	3	+0.09	0.28	-0.01	0.23	41
2005 QB96	1	+0.33	-	-0.53	-	63
2005 QE166	13	+0.19	0.39	-0.01	0.45	45-70
2005 QO11	3	+0.37	0.36	+0.14	0.29	57-60
2005 QX151	1	-0.62	-	+0.03	-	48
2005 RB	6	+0.03	0.48	-0.09	0.27	50-60
2005 RC	13	+0.07	0.27	-0.28	0.39	44-54
2005 RK3	17	+2.00	0.71	+0.45	0.61	4-58
2005 RQ20	1	-0.03	-	+0.28	-	53
2005 SD	15	+0.03	0.28	+0.02	0.28	5-35
2005 ST1	4	+0.19	0.13	+0.07	0.36	52-54
2005 TU50	11	+0.50	0.36	-0.14	0.24	41-48
2005 TZ51	4	-0.09	0.21	-0.05	0.23	48-52
2005 UO157	13	-0.00	0.41	-0.21	0.29	50-65
2005 VY17	25	+0.07	0.50	-0.03	0.22	15-59
2005 XJ8	12	+0.13	0.36	-0.13	0.25	62-75
2005 XL80	10	-0.12	0.12	-0.18	0.32	7-46
2005 YY93	13	-0.11	0.32	+0.01	0.17	35-54
2006 AL3	1	+0.303	-	+0.97	-	48
2006 BG	1	-0.35	-	-0.89	-	57
2006 BN55	1	-0.09	-	+0.12	-	42
2006 EF71	2	-0.05	-	-0.12	-	53-55
2006 FD51	17	-0.32	0.36	-0.23	0.34	38-61

Таблица 2. Результаты обработки наблюдений малых планет, названных именами пулковских астрономов и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	σ_{δ}''	Z диапазон
762 Pulcova	4	-0.02	0.15	+0.10	0.03	72-73
1792 Reni	19	+0.04	0.29	+0.05	0.26	31-65
2323 Zverev	18	-0.13	0.30	+0.22	0.22	45-68
4228 Nemiro	8	+0.15	0.28	+0.17	0.17	47-63

Таблица 3. Результаты обработки наблюдений комет и данные по наблюдаемым объектам/

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	σ_{δ}''	Z диапазон
29P Schwassmann-Wachmann 1	37	+0.08	0.49	-0.07	0.39	49-76
78P Gehrels 2	86	+0.30	0.47	-0.01	0.35	44-77
78P-B (Gehrels 2)	12	-1.15	2.40	-0.68	1.17	28-71
C/2003 WT42	208	+0.01	0.40	-0.16	0.34	8-70
C/2004 Q2	204	-0.55	2.12	+0.21	1.86	2-75
C/2006 A1	49	+0.40	0.52	+0.38	0.36	49-71

Авторы выражают свою благодарность В.Н. Львову С.Д. Цекмейстер и Р.И. Смехачевой за эфемеридную поддержку наблюдений.

Литература

1. *Бекяшев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Кулиш А.П., Свидуневич А.Г., Шумахер А.В.* // Зеркальный астрограф ЗА-320, Изв. ГАО, 1998, № 213, с. 249-258.
2. *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 зеркальном астрографе ЗА-320.И, Изв. ГАО, 2004, №217, с.505-530.
3. *Девяткин А.В., В.Н. Львов, М.Ю. Сидоров, Р.И. Смехачева.* Результаты наблюдения звезды 2559 каталога Hipparcos 111 Ate 10 сентября 2000 года, Тезисы ВАК-2001, СПб, 6-12 августа, 2001, с.57.
4. *Девяткин А.В., Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В., Куприянов В.В., Сидоров М.Ю.* Пулковская программа изучения объектов сближающихся с Землей // Межрегиональная конференция «Экология космоса», Санкт-Петербург, 2002, с.26-27.
5. *Девяткин А.В., А.Н. Грицук, Д.Л. Горшанов, Э.В. Корнилов.* АПЕКС – программная система для обработки ПЗС-изображений в астрономии // Изв. ГАО, 2000, №214, с.455–468.
6. *Девяткин А.В., Грицук А.Н., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В., Куприянов В.В., Свидуневич А.Г., Саловатова А.Е.* Наблюдения сближающихся малых планет на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1998-1999 гг. // Изв.ГАО, 2000, N 214, с.370-381.
7. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Грицук А.Н., Шумахер А.В.* // Система наведения зеркального астрографа ЗА-320, Изв. ГАО, 2000, № 214, с. 523-532.
8. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Куприянов В.В., Корнилов Э.В.* Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320 // Изв.ГАО, 2002, №216, с.128–156.

9. *Львов В.Н., Р.И. Смехачева, С.Д. Цекмейстер.* ЭПОС. Программная система для решения эфемеридных задач, связанных с объектами Солнечной системы. Руководство пользователя, 1999, ГАО РАН, 28 с.
10. *Львов, В.Н. А.В. Девяткин, Р.И. Смехачева, С.Д. Цекмейстер, Д.Л. Горшанов, Э.В. Корнилов, В.В. Курпьянов, В.Б. Рафальский, М.Ю. Сидоров.* Пулковская программа изучения объектов, сближающихся с Землей // Изв. ГАО, 2004, №216, с.127–127.
11. *D. Matson,* Ed. IRAS Asteroid and Comet Survey: Preprint Version No.1 (1986). (JPL internal document No. 3698).
12. *Devyatkin, A.V.; Khrutskaya, E.V.; Khovritchev, M.Yu.; Narizhnaja, N.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Izmailov, I.S.; Baturina, G.D.* Minor Planet Circular 54966, Minor Planet Observations, 8 (2005).
13. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Minor Planet Circular 54939, Comet Observations, 2 (2005).
14. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Minor Planet Observations, Minor Planet Circular 54345, 4 (2005).
15. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 54101, 5 (2005).
16. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L. et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2005-H33 (2005).
17. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Minor Planet Observations, Minor Planet Circular 53630, 2 (2005).
18. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 53595, 3 (2005).
19. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2004-Y19 (2004).
20. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations Minor Planet Circular 53257, 4 (2004).
21. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2004-V80 (2004).
22. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 53139, 1 (2004)
23. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 53257, 4 (2004)
24. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 55475, 2 (2005)
25. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.,* Minor Planet Observations, Minor Planet Circular 55509, 2 (2005)

26. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 55685, 2 (2005)
27. *Lehky, M.; Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2005-Y55 (2005).
28. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; Kouprianov, V.V.; Aleshkina, E.Yu.; Krakosevich, O.V.; Barshevich, K.V.; Ibragimov, F.M.; Baturina, G.D.* Comet Observations, Minor Planet Circular 55911, 3 (2006).
29. *Ticha, J.; Tichy, M.; Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2006-C20 (2006).
30. *Devyatkin, A.V.; Bekhteva, A.S.; Gorshanov, D.L.; et al.* Observations of Comets, Minor Planet Electronic Circ., 2006-D08 (2006).

ASTROMETRIC OBSERVATION OF MINOR BODIES OF SOLAR SYSTEM WITH THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2002-2004

Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu, Bekhteva A.S., Baturina G.D., Ibragimov F.M., Vereschagina I.A., Krakosevich O.V., Barshevich K.V.

Summary

Observations of minor bodies of the solar system were made. Positions of 222 asteroids and 6 comets were obtained in the UCAC-2 and USNO-B1.0 reference frame. The APEX-II program was used for processing the observations. Chromatic refraction was taken into account and the accuracy of the positions was estimated. The average error was about 0".3 for right ascension and declination.

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ
УРАНА, НЕПТУНА И СИСТЕМЫ ПЛУТОН — ХАРОН
НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320М В 2004–2006 гг.**

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю.,
Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Ибрагимов Ф.М., Верещагина И.А.,
Кракосевич О.В., Баршевич К.В.**

Проведены астрометрические наблюдения Урана, Нептуна и системы Плутон — Харон на зеркальном астрографе ЗА-320М в Пулкове. Получено 86 положений в системе каталогов UCAC-2 и USNO-B1.0. Обработка наблюдений проведена с использованием программных систем АПЕКС и АПЕКС-2 с учетом хроматической рефракции. В полученные положения системы Плутон — Харон введены поправки за переход от положения фотоцентра к барицентру.

На автоматическом комплексе зеркальном астрографе ЗА-320М с 1999 г. ведутся астрометрические наблюдения системы Урана, Нептуна и системы Плутон — Харон [3–5]. Для наблюдений использовались ПЗС-камеры ST-6 (2004–2005гг.) и FLI (2005–2006гг.). Наблюдения проводились на зенитных расстояниях до 76° . При наблюдениях использовались экспозиции от 60^s до 200^s для системы Плутон — Харон и 2^s – 10^s для Урана и Нептуна. Обработка наблюдений 2004-начала 2005 года выполнена в среде программной системы АПЕКС [6], а с осени 2005 года – с помощью автоматической программной системы обработки наблюдений АПЕКС-2, с учетом хроматической рефракции. В полученные положения системы Плутон — Харон введены поправки для перехода от наблюдаемого фотоцентра к положению барицентра системы в соответствии с методикой редукции, изложенной в статье [3].

Ниже в таблице 1 представлены топоцентрические прямые восхождения и склонения системы Плутон — Харон на эпоху J2000. Сравнение наблюдений произведено с теориями DE200 и DE405. Эфемеридные значения координат объекта вычислены с использованием программной системы EPOS [10]. В координаты системы Плутон — Харон введены поправки за приведение наблюдений к барицентру системы. В таблице 2 приведены данные о наблюдениях системы Плутон — Харон, полученных на ЗА-320М в 2004–2006 гг. Как видно из таблицы, средние значения $(O-C)_\alpha$, при сравнении наблюдений с теорией DE200, достигли значения $+4.8''$. Оценка точности наблюдений (среднеквадратичные ошибки) сделана по отклонениям значений $(O-C)$ от средних значений за весь период наблюдений. В таблице 3 представлены результаты наблюдений планеты Уран. В таблице 4 представлены результаты наблюдений планеты Нептун. В таблице 5 приведены данные о наблюдениях Урана и Нептуна, полученных на ЗА-320М в 2004–2006 гг.

Таблица 1. Топоцентрические астрометрические координаты системы Плутон — Харон, полученные в 2003-2004 гг. (Н — наблюдатель: Gor — Горшанов Д.Л., Dev — Девяткин А.В., Э.В., Kou — Куприянов В.В., Ale — Алешкина Е.Ю., Bek — Бехтева А.С., Kra — Кракосевич О.В., Var — Баршевич К.В., Ibr — Ибрагимов Ф.М.)

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} H m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $\alpha\cos\delta$ "	DE200 (O-C) δ "	Н
2004 09 10.753163	17 17 07.37	-14 33 51.75	+4.49	-0.76	Bek
2004 09 10.754680	17 17 07.36	-14 33 51.78	+4.33	-0.76	Bek
2005 03 16.121672	17 37 04.26	-15 08 52.74	+4.62	-0.24	Gor
2005 03 16.123529	17 37 04.27	-15 08 52.78	+4.73	-0.30	Gor
2005 03 21.107942	17 37 10.00	-15 08 04.15	+4.56	-0.29	Gor
2005 03 21.109788	17 37 10.00	-15 08 04.13	+4.52	-0.28	Gor
2005 03 22.096678	17 37 10.76	-15 07 54.31	+5.00	-0.28	Ale
2005 03 23.107055	17 37 11.36	-15 07 44.07	+4.71	-0.13	Gor
2005 03 23.108898	17 37 11.36	-15 07 44.09	+4.67	-0.17	Gor
2005 03 30.083686	17 37 11.86	-15 06 33.54	+4.62	-0.44	Gor
2005 03 30.085529	17 37 11.85	-15 06 33.34	+4.61	-0.26	Gor
2005 04 1.085807	17 37 10.79	-15 06 12.90	+4.55	-0.34	Dev
2005 04 1.087650	17 37 10.78	-15 06 12.87	+4.44	-0.33	Dev
2005 04 5.078760	17 37 07.13	-15 05 32.05	+5.01	-0.51	Ale
2005 03 16.121672	17 37 04.27	-15 08 52.59	+4.78	-0.09	Gor
2005 03 16.123529	17 37 04.28	-15 08 52.64	+4.98	-0.15	Gor
2005 03 21.107942	17 37 10.00	-15 08 04.20	+4.61	-0.34	Gor
2005 03 23.108898	17 37 11.37	-15 07 44.09	+4.80	-0.17	Gor
2005 04 1.087650	17 37 10.80	-15 06 12.29	+4.72	+0.25	Dev
2005 04 2.078314	17 37 10.10	-15 06 02.44	+4.91	-0.08	Bek
2005 04 2.080777	17 37 10.11	-15 06 01.95	+5.10	+0.39	Bek
2005 04 5.078760	17 37 07.08	-15 05 32.02	+4.34	-0.47	Ale
2005 04 19.012088	17 36 38.26	-15 03 12.56	+4.49	-0.03	Ale
2005 04 22.034299	17 36 28.93	-15 02 44.83	+4.46	-0.68	Dev
2005 04 22.035336	17 36 28.93	-15 02 44.79	+4.80	-0.64	Dev
2005 04 15.053698	17 36 48.90	-15 03 51.02	+4.80	-0.13	Dev
2005 05 16.961619	17 34 37.15	-14 59 35.41	+5.40	+0.18	Ale
2005 05 21.942063	17 34 08.79	-14 59 11.58	+4.85	-0.48	Kra
2005 05 22.954589	17 34 02.86	-14 59 07.14	+4.95	-0.37	Kou
2005 05 22.955590	17 34 02.84	-14 59 06.94	+4.82	-0.17	Kou
2006 07 4.878913	17 38 50.17	-15 43 19.02	+4.71	-0.08	Dev
2006 07 4.879207	17 38 50.17	-15 43 19.06	+4.58	-0.11	Dev
2006 07 4.881752	17 38 50.15	-15 43 18.64	+4.56	+0.32	Dev
2006 07 4.882062	17 38 50.18	-15 43 18.84	+5.05	+0.13	Dev
2006 07 4.882697	17 38 50.15	-15 43 18.74	+4.66	+0.23	Dev
2006 07 4.883008	17 38 50.19	-15 43 18.86	+5.25	+0.11	Dev
2006 07 4.883647	17 38 50.14	-15 43 18.78	+4.61	+0.19	Dev
2006 07 4.883962	17 38 50.15	-15 43 18.44	+4.84	+0.53	Dev
2006 07 4.884274	17 38 50.16	-15 43 18.94	+5.00	+0.03	Dev

Таблица 1 (продолжение).

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2006 07 4.884587	17 38 50.17	-15 43 18.40	+5.19	+0.58	Dev
2006 07 5.877565	17 38 44.09	-15 43 25.92	+4.66	+0.70	Dev
2006 07 5.877878	17 38 44.09	-15 43 26.08	+4.60	+0.56	Dev
2006 07 5.878195	17 38 44.11	-15 43 26.50	+5.03	+0.14	Dev
2006 07 5.878613	17 38 44.06	-15 43 25.88	+4.29	+0.76	Dev
2006 07 5.879429	17 38 44.08	-15 43 26.22	+4.68	+0.43	Dev
2006 07 5.879743	17 38 44.09	-15 43 26.50	+4.88	+0.15	Dev
2006 07 5.880059	17 38 44.07	-15 43 26.27	+4.55	+0.37	Dev
2006 07 5.880370	17 38 44.05	-15 43 26.54	+4.32	+0.11	Dev
2006 07 5.897375	17 38 43.97	-15 43 26.82	+4.69	-0.04	Dev
2006 07 5.898049	17 38 43.99	-15 43 26.21	+4.96	+0.59	Dev
2006 07 5.898380	17 38 44.00	-15 43 26.48	+5.23	+0.31	Dev
2006 07 6.898327	17 38 37.93	-15 43 34.30	+4.77	+0.45	Ver
2006 07 6.898695	17 38 37.92	-15 43 34.83	+4.61	-0.08	Ver

Таблица 2. Наблюдения системы Плутон — Харон в 2004–2006 гг.
(N — количество наблюдений,
(O-C) $_{\alpha\cos\delta}$ и (O-C) $_{\delta}$ — среднегодовые значения положений,
 σ — внешняя ошибка одного наблюдения)

	N	DE200			
		$\overline{(O-C)_{\alpha\cos\delta}}$ "	$\sigma_{\alpha\cos\delta}$ "	$\overline{(O-C)_{\delta}}$ "	σ_{δ} "
2004 г.	2	—	—	—	—
2005 г.	28	+4.75	± 0.23	-0.23	± 0.24
2006 г.	23	+4.78	± 0.26	+0.28	± 0.26

Таблица 3. Топоцентрические астрометрические координаты Урана, полученные в 2004-2006 гг.

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2004 09 7.855632	22 25 55.24	-10 40 38.10	-0.33	-0.04	Gor
2004 09 8.948448	22 25 45.61	-10 41 33.01	+0.34	+0.28	Kra
2004 09 9.868320	22 25 37.52	-10 42 19.06	+0.22	+0.43	Dev
2004 09 10.856692	22 25 28.86	-10 43 08.01	+0.12	+0.80	Bek
2004 09 11.860285	22 25 20.09	-10 43 57.63	-0.31	+0.91	Kra
2004 09 12.866201	22 25 11.41	-10 44 47.56	+0.00	+0.45	Kou
2004 09 14.847032	22 24 54.44	-10 46 23.51	-0.24	+0.68	Gor

Таблица 3 (продолжение).

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2004 09 14.845754	22 24 54.47	-10 46 23.22	+0.08	+0.92	Gor
2004 09 19.789534	22 24 13.35	-10 50 15.58	-0.04	+0.69	Kou
2004 09 20.762295	22 24 05.49	-10 50 59.89	+0.08	+0.56	Ale
2004 09 24.881218	22 23 33.16	-10 54 00.63	+0.35	+0.77	Bek
2004 10 7.845865	22 22 03.48	-11 02 15.06	+0.06	+0.50	Dev
2004 10 11.858127	22 21 40.15	-11 04 20.64	+0.09	+0.97	Dev
2004 10 25.713017	22 20 39.05	-11 09 41.15	-0.32	+0.36	Ale
2004 10 28.725340	22 20 30.13	-11 10 25.05	-0.10	+0.56	Dev
2004 10 30.760773	22 20 25.03	-11 10 49.45	+0.12	+0.58	Kra
2004 10 30.761413	22 20 25.02	-11 10 49.18	+0.10	+0.87	Kra
2004 11 3.775936	22 20 17.16	-11 11 24.86	-0.08	+0.44	Dev
2004 11 22.722069	22 20 21.80	-11 10 12.14	-0.34	+0.35	Ale
2004 11 22.724263	22 20 21.85	-11 10 12.23	+0.37	+0.23	Ale
2004 11 25.736261	22 20 29.00	-11 09 23.89	-0.02	+0.25	Dev
2004 11 25.737018	22 20 29.00	-11 09 24.08	+0.04	+0.03	Dev
2004 11 25.738077	22 20 29.04	-11 09 24.03	+0.46	+0.08	Dev
2004 11 28.691971	22 20 37.77	-11 08 27.16	+0.35	-0.08	Kou
2004 12 12.681963	22 21 41.48	-11 01 50.60	+0.65	-0.00	Kou
2004 12 21.640993	22 22 40.67	-10 55 51.40	-0.06	+0.61	Gor
2004 12 25.631729	22 23 11.31	-10 52 47.63	-0.29	+0.40	Kra
2005 01 03.614571	22 24 29.20	-10 45 03.06	+0.34	+0.67	Ale
2005 01 03.616101	22 24 29.18	-10 45 03.55	-0.12	+0.09	Ale
2005 08 03.997442	22 46 28.86	-08 39 10.84	+0.06	+0.77	Bar
2005 08 08.923242	22 45 50.53	-08 43 08.35	-0.24	+0.79	Kou
2005 08 08.972961	22 45 50.16	-08 43 11.48	+0.17	+0.12	Kou
2005 08 08.973086	22 45 50.13	-08 43 11.50	-0.13	+0.11	Kou
2005 08 18.876313	22 44 27.39	-08 51 38.62	-0.26	+0.74	Dev
2005 08 18.876438	22 44 27.40	-08 51 38.82	-0.02	+0.55	Dev
2005 08 19.887131	22 44 18.62	-08 52 32.16	-0.15	+0.66	Bek
2005 08 19.887260	22 44 18.62	-08 52 32.33	-0.12	+0.49	Bek
2005 08 20.037054	22 44 17.33	-08 52 39.80	+0.27	+0.96	Bek
2005 08 20.037178	22 44 17.34	-08 52 39.82	+0.41	+0.95	Bek
2005 08 20.888545	22 44 09.88	-08 53 25.48	-0.09	+0.51	Kra
2005 08 20.888666	22 44 09.88	-08 53 25.07	-0.09	+0.92	Kra
2005 08 22.876674	22 43 52.43	-08 55 11.72	+0.10	+0.38	Bar
2005 08 22.876797	22 43 52.42	-08 55 11.82	-0.01	+0.29	Bar
2005 08 22.877432	22 43 52.40	-08 55 11.66	-0.23	+0.48	Bar
2005 08 22.877559	22 43 52.41	-08 55 11.92	-0.03	+0.23	Bar
2005 08 23.870882	22 43 43.63	-08 56 04.79	+0.08	+0.62	Gor
2005 08 23.871007	22 43 43.62	-08 56 04.87	-0.04	+0.55	Gor
2005 08 24.876791	22 43 34.69	-08 56 58.76	-0.10	+0.72	Bar
2005 08 24.876914	22 43 34.70	-08 56 58.81	+0.05	+0.68	Bar
2005 08 25.867933	22 43 25.87	-08 57 52.70	-0.05	+0.16	Dev

Таблица 3 (продолжение).

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2005 08 25.868059	22 43 25.88	-08 57 52.27	+0.17	+0.60	Dev
2005 09 01.869784	22 42 23.01	-09 04 10.52	+0.18	+0.77	Dev
2005 09 01.869909	22 42 23.02	-09 04 10.79	+0.42	+0.51	Dev
2005 09 02.960308	22 42 13.17	-09 05 09.26	+0.07	+0.86	Bek
2005 09 02.960436	22 42 13.17	-09 05 09.30	+0.07	+0.83	Bek
2005 09 05.960130	22 41 46.21	-09 07 50.58	+0.28	+0.69	Ibr
2005 09 05.960255	22 41 46.20	-09 07 50.60	+0.18	+0.68	Ibr
2005 09 10.870265	22 41 02.45	-09 12 10.70	+0.28	+0.79	Kra
2005 09 10.870388	22 41 02.45	-09 12 11.03	-0.06	+0.47	Kra
2005 09 11.887361	22 40 53.45	-09 13 04.23	-0.10	+0.40	Ibr
2005 09 11.887488	22 40 53.45	-09 13 04.65	-0.10	-0.01	Ibr
2005 09 13.848340	22 40 36.27	-09 14 45.75	-0.11	+0.43	Gor
2005 09 13.848465	22 40 36.28	-09 14 45.84	+0.04	+0.34	Gor
2005 09 17.916422	22 40 01.27	-09 18 11.92	+0.44	+0.51	Kra
2005 09 19.798466	22 39 45.36	-09 19 44.74	-0.05	+0.82	Ale
2005 09 19.798608	22 39 45.33	-09 19 45.13	-0.46	+0.44	Ale
2005 09 22.849037	22 39 20.13	-09 22 12.27	+0.04	+0.74	Dev
2005 09 22.849162	22 39 20.14	-09 22 12.29	+0.24	+0.72	Dev
2005 09 24.839569	22 39 04.04	-09 23 46.03	+0.04	+0.62	Kra
2005 09 24.839569	22 39 04.04	-09 23 46.03	+0.04	+0.62	Kra
2005 09 24.839692	22 39 04.03	-09 23 46.05	-0.12	+0.61	Kra
2005 09 25.775435	22 38 56.58	-09 24 30.11	-0.30	-0.19	Kou
2005 09 25.775559	22 38 56.59	-09 24 30.01	-0.19	-0.09	Kou
2005 09 26.783147	22 38 48.66	-09 25 15.07	-0.04	+0.88	Ale
2005 09 26.783268	22 38 48.66	-09 25 15.39	-0.07	+0.57	Ale
2005 10 11.793947	22 37 03.29	-09 35 18.14	-0.39	+0.89	Gor
2005 10 11.793947	22 37 03.29	-09 35 18.14	-0.36	+0.89	Gor
2005 10 11.793947	22 37 03.29	-09 35 18.15	-0.39	+0.89	Gor
2005 11 01.745313	22 35 29.45	-09 43 50.14	+0.67	+0.67	Gor
2005 11 01.745313	22 35 29.45	-09 43 50.16	+0.69	+0.66	Gor
2005 11 01.745313	22 35 29.45	-09 43 50.22	+0.63	+0.59	Gor
2005 12 27.691242	22 37 51.49	-09 27 32.73	-0.18	+0.32	Gor
2005 12 27.691366	22 37 51.50	-09 27 33.22	-0.09	-0.17	Gor
2006 01 01.631544	22 38 30.91	-09 23 27.95	+0.56	+0.92	Dev
2006 01 01.631952	22 38 30.86	-09 23 28.30	-0.16	+0.55	Dev
2006 01 08.626829	22 39 32.77	-09 17 06.43	-0.06	+0.41	Bar
2006 01 08.626978	22 39 32.82	-09 17 06.32	+0.69	+0.53	Bar
2006 01 17.642017	22 41 02.04	-09 07 58.52	+0.16	+0.16	Gor
2006 01 18.642873	22 41 12.56	-09 06 54.11	+0.32	+0.21	Kou

Таблица 4. Топоцентрические астрометрические координаты Нептуна, полученные в 2004-2005 гг.

Дата наблюдения, UTC	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ' "	DE200 (O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2004 09 9.819701	21 02 09.49	-16 58 10.91	-0.25	+0.32	Dev
2004 09 9.818735	21 02 09.50	-16 58 10.85	-0.26	+0.36	Dev
2004 10 28.722816	21 00 08.39	-17 07 09.93	-0.75	+0.34	Dev
2005 08 08.921794	21 14 27.63	-16 08 20.43	-0.82	+0.35	Kou
2005 08 08.921977	21 14 27.63	-16 08 20.30	-0.80	+0.48	Kou
2005 09 01.868185	21 11 57.83	-16 19 46.79	-0.84	+0.55	Dev
2005 09 01.868371	21 11 57.83	-16 19 46.64	-0.79	+0.71	Dev
2005 09 22.808206	21 10 12.53	-16 27 45.42	-0.93	+0.02	Dev
2005 09 25.784516	21 10 00.74	-16 28 38.72	-0.51	+0.30	Dev
2005 09 25.784697	21 10 00.72	-16 28 38.28	-0.77	+0.75	Dev
2005 12 26.597370	21 12 57.25	-16 16 11.36	-0.60	+0.06	Ale
2005 12 26.597556	21 12 57.29	-16 16 10.65	-0.02	+0.77	Ale
2005 12 26.598389	21 12 57.32	-16 16 10.94	+0.41	+0.44	Ale
2005 12 26.598581	21 12 57.28	-16 16 11.24	-0.23	+0.14	Ale
2005 12 26.598882	21 12 57.26	-16 16 11.12	-0.54	+0.25	Ale

Таблица 5. Наблюдения Урана и Нептуна в 2004–2006 гг.

(N — количество наблюдений,
(O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ и (O-C) $_{\delta}$ — среднегодовые значения положений,
 σ — внешняя ошибка одного наблюдения)

	Uranus					Neptune				
	N	$\overline{(O-C)_{\alpha}\cos\delta}$	$\overline{\sigma_{\alpha}\cos\delta}$	$\overline{(O-C)_{\delta}}$	$\overline{\sigma_{\delta}}$	N	$\overline{(O-C)_{\alpha}\cos\delta}$	$\overline{\sigma_{\alpha}\cos\delta}$	$\overline{(O-C)_{\delta}}$	$\overline{\sigma_{\delta}}$
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
2004 г.	27	+0.05	±0.26	+0.47	±0.31	3	-0.44	±0.30	+0.34	±0.02
2005 г.	56	+0.02	±0.26	+0.54	±0.31	12	-0.53	±0.40	+0.40	±0.26
2006 г.	6	+0.25	±0.34	+0.46	±0.28	—	—	—	—	—

Основные результаты

На зеркальном астрографе ЗА-320М в Пулкове в 2004–2006 гг. проведены астрометрические наблюдения системы Плутон — Харон (получено 53 положения), планеты Уран (получено 89 положений) и планеты Нептун (получено 15 положений). Обработка наблюдений проведена в системе каталогов UCAC-2 и USNO-B1.0. с использованием программных систем АПЕКС и АПЕКС-2 с учетом хроматической рефракции. В координатах учтены поправки за переход от положения фотоцентра системы Плутон — Харон к ее барицентру. Полученные координаты были сравнены с теориями DE200 и DE405

Авторы выражают свою благодарность В.Н. Львову, С.Д. Цекмейстер и Р.И. Смехачевой за эфемеридную поддержку наблюдений.

Литература

1. Аллен К.У. Астрофизические величины, 1977, М.: Мир, 446 с.
2. Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Кулиш А.П., Свидунович А.Г., Шумахер А.В. // Зеркальный астрограф ЗА-320, Изв. ГАО, 1998, № 213, с. 249–258.
3. Десяткин А.В. Астрометрические наблюдения системы Плутон — Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1999 г. // Изв. ГАО, 2000, № 214, с. 361-369.
4. Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В., Куприянов В.В., Сидоров М.Ю. Астрометрические наблюдения Плутон — Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 2000–2002 гг. // Изв. ГАО, 2002, № 216, с.114-119.
5. Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина К.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Сидоров М.Ю. Астрометрические наблюдения Урана и системы Плутон — Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 2002–2004 гг. // Изв. ГАО, 2004, № 217, с.223-2289.
6. Десяткин А.В., Грицук А.Н., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В. АПЕКС — программная система для обработки ПЗС-наблюдений в астрометрии // Изв. ГАО, 2000, №214, с. 455-468.
7. Канаев И.И., Десяткин А.В., Кулиш А.П., Грицук А.Н., Шумахер А.В. // Система наведения зеркального астрографа ЗА-320, Изв. ГАО, 2000, № 214, с. 523-532.
8. Канаев И.И., Десяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Куприянов В.В., Корнилов Э.В. Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320 // Изв. ГАО, 2002, № 216, с.128-156.
9. Десяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320. // Изв.ГАО, 2004, №217, с.505-530.
10. Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д. ЭПОС. Программная система для решения эфемеридных задач, связанных с объектами Солнечной системы. Руководство пользователя, 1999, ГАО РАН, 28 с.

ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF URANUS, NEPTUNE AND PLUTO — CHARON SYSTEM WITH THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2004–2006

**Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu.,
Bekhteva A.S., Baturina G.D., Ibragimov F.M., Vereschagina I.A.,
Krakosevich O.V., Barshevich K.V.**

Summary

The astrometric observations of Pluto — Charon system, Neptune and Uranus were made with the mirror astrograph ZA-320m in Pulkovo Observatory and 53 positions in the system of the UCAC-2 and USNO-B1.0 catalogues were obtained. The processing of the observations was done with account for chromatic refraction by means of the APEX and APEX-II software systems. The reduction of the observations was performed for transition from a position of photocentre of Pluto — Charon system to its barycentre.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЯ ЛИШЬ КООРДИНАТЫ ОБЩИХ ЗВЕЗД, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ДВУХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ КАТАЛОГАХ С РАЗНЫМИ РАВНОДЕНСТВИЯМИ (1900. И 2000.0)

Ефимов А.А., Смирнов Б.Н., Шпитальная А.А.

Решена задача по определению скорости вращения экваториальной системы координат (ЭСК) на основе использования координат общих звёзд, которые содержатся в двух фундаментальных каталогах с разными равноденствиями (NFK_{1900,0} и FK5_{2000,0}), без знания собственных движений этих звезд.

Решение задачи получено в форме поворота ЭСК за 100 лет, заданного направляющими косинусами осей ЭСК_{2000,0} относительно осей исходной ЭСК_{1900,0}

Введение

В существующем (классическом) методе определения собственных движений звезд из меридианных наблюдений необходимо знать, как вращается экваториальная система координат (ЭСК) и, наоборот, незнание точных значений собственных движений звезд не дает возможности определить вращение ЭСК.

Поэтому, чтобы определить, например, собственные движения звезд классическим методом, приходится считать, что в первом приближении известна прецессия, то есть вращение ЭСК.

Авторами предложен метод, по которому сначала по координатам звезд двух фундаментальных каталогов NFK 1900.0 [1] и FK5 2000.0 [2] определяются направляющие косинусы осей повернутой ЭСК 2000 относительно осей ЭСК 1900, а затем по формулам вычисляются собственные движения звезд и параметры движения плоскости эллиптики.

Матричное представление задачи

Решение задачи упрощается, если использовать понятие матрицы направляющих косинусов K .

Пусть,

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k_{ij} – косинус угла между i -ой осью исходной ЭСК 1900 и j -ой осью повернутой ЭСК 2000 ($i, j = 1, 2, 3$).

Матрица K дает возможность записать в матричной форме уравнение:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix}_{2000} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix}_{1900} \cdot \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

для пересчета декартовых координат сразу трех неподвижных точек (в частности трех неподвижных звезд) из системы координат ЭСК 1900 в систему координат ЭСК 2000 и обратно.

Декартовы координаты x, y, z в формуле (2) связаны с координатами α и δ следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} x &= \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ y &= \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ z &= \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (2')$$

Формула (2) очень важна для решения поставленной задачи, не говоря, уже о том, что она по существу, дает определение матрицы направляющих косинусов - матрицы K , которая является мощным инструментом исследования теоретических проблем в фундаментальной астрометрии.

Поскольку неподвижных звезд не существует, то равенство (2) будет нарушено собственными движениями звезд за время между двумя равноденствиями каталогов. Восстановить нарушенное равенство (2) можно двумя путями: 1) учетом перемещений звезд в системе J2000.0; 2) аналогичным учетом в системе В 1900.0:

$$1) \left. \begin{aligned} &\left(\begin{array}{ccc} (x_1 - \Delta x_{12}) & (y_1 - \Delta y_{12}) & (z_1 - \Delta z_{12}) \\ (x_2 - \Delta x_{22}) & (y_2 - \Delta y_{22}) & (z_2 - \Delta z_{22}) \\ (x_3 - \Delta x_{32}) & (y_3 - \Delta y_{32}) & (z_3 - \Delta z_{32}) \end{array} \right)_{2000} = \\ &= \left(\begin{array}{ccc} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{array} \right)_{1900} \cdot \left(\begin{array}{ccc} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{array} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\Delta x_{i2}, \Delta y_{i2}, \Delta z_{i2}$, ($i=1, 2, 3$) – проекции собственных движений $\bar{\Delta r}_1, \bar{\Delta r}_2, \bar{\Delta r}_3$ на оси ЭСК₂₀₀₀.

$$2) \left. \begin{aligned} &\left(\begin{array}{ccc} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{array} \right)_{2000} = \\ &= \left(\begin{array}{ccc} (x_1 + \Delta x_{11}) & (y_1 + \Delta y_{11}) & (z_1 + \Delta z_{11}) \\ (x_2 + \Delta x_{21}) & (y_2 + \Delta y_{21}) & (z_2 + \Delta z_{21}) \\ (x_3 + \Delta x_{31}) & (y_3 + \Delta y_{31}) & (z_3 + \Delta z_{31}) \end{array} \right)_{1900} \cdot \left(\begin{array}{ccc} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{array} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\Delta x_{i1}, \Delta y_{i1}, \Delta z_{i1}$, ($i=1, 2, 3$) – проекции собственных движений $\bar{\Delta r}_1, \bar{\Delta r}_2, \bar{\Delta r}_3$ на оси ЭСК₁₉₀₀.

Для решения задачи потребуется формула, аналогичная (4), для 4-ой, 5-ой и 6-ой звезд:

$$\left. \begin{aligned} &\left(\begin{array}{ccc} x_4 & y_4 & z_4 \\ x_5 & y_5 & z_5 \\ x_6 & y_6 & z_6 \end{array} \right)_{2000} = \\ &= \left(\begin{array}{ccc} (x_4 + \Delta x_{41}) & (y_4 + \Delta y_{41}) & (z_4 + \Delta z_{41}) \\ (x_5 + \Delta x_{51}) & (y_5 + \Delta y_{51}) & (z_5 + \Delta z_{51}) \\ (x_6 + \Delta x_{61}) & (y_6 + \Delta y_{61}) & (z_6 + \Delta z_{61}) \end{array} \right)_{1900} \cdot \left(\begin{array}{ccc} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{array} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Формулы (3)–(5) можно записать для любых трех звезд.

Решение задачи возможно при наличии не менее шести звезд, координаты которых содержатся в том и другом каталогах и основано на простой идее.

Пусть \bar{r}_{i1} и \bar{r}_{j1} – радиус-векторы любых двух звезд i и j в момент первого равноденствия (1900.0). Скалярное произведение этих векторов

$$(\bar{r}_{i1} \cdot \bar{r}_{j1}) \equiv (\bar{r}_i \cdot \bar{r}_j)_{1900} \quad (6)$$

равно косинусу угла между этими звездами в тот же момент времени (1900.0).

С учетом собственных движений звезд за сто лет величина (6) в общем случае изменится. Процесс этого изменения можно записать следующим образом:

$$(\Delta \bar{r}_i \cdot \bar{r}_j)_{1900} + (\bar{r}_i \cdot \Delta \bar{r}_j)_{1900} = (\bar{r}_i \cdot \bar{r}_j)_{2000} - (\bar{r}_i \cdot \bar{r}_j)_{1900}, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{r}_i$ и $\Delta \bar{r}_j$ – собственные перемещения звезд по небесной сфере за сто лет.

Уравнение (7) выполняется с точностью до $(\Delta \bar{r})^2$. К исследованию привлекались звезды, собственное движение которых не превышает 40."0 за сто лет (таких звезд в фундаментальных каталогах – абсолютное большинство). Следовательно, погрешность, вносимая дифференциальным уравнением (7) в определяемые величины, не будет превышать $\pm 0."01$ за сто лет.

Решение задачи с использованием положений звезд в две эпохи

Пронумеруем звезды, подлежащие исследованию, и выберем две группы звезд с номерами: (1,2,3) и (4,5,6).

Будем сочетать звезды первой группы со звездами второй группы (по две звезды в каждом сочетании). Получим девять сочетаний:

$$(1-4, 1-5, 1-6,) (2-4, 2-5, 2-6,) (3-4, 3-5, 3-6,) \quad (9)$$

Девять сочетаний (9) дают возможность выписать девять уравнений типа (7). При этом для сокращения записи равноденствия 1900.0 и 2000.0 обозначим соответственно 19 и 20 (или просто 1, 2).

$$\left. \begin{aligned} (\bar{r}_1 \cdot \Delta \bar{r}_4)_{19} + (\bar{r}_4 \cdot \Delta \bar{r}_1)_{19} &= (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{19} \\ (\bar{r}_1 \cdot \Delta \bar{r}_5)_{19} + (\bar{r}_5 \cdot \Delta \bar{r}_1)_{19} &= (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_5)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_5)_{19} \\ (\bar{r}_1 \cdot \Delta \bar{r}_6)_{19} + (\bar{r}_6 \cdot \Delta \bar{r}_1)_{19} &= (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_6)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_6)_{19} \end{aligned} \right\} \quad (10)_1$$

$$\left. \begin{aligned} (\bar{r}_2 \cdot \Delta \bar{r}_4)_{19} + (\bar{r}_4 \cdot \Delta \bar{r}_2)_{19} &= (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_4)_{20} - (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_4)_{19} \\ (\bar{r}_2 \cdot \Delta \bar{r}_5)_{19} + (\bar{r}_5 \cdot \Delta \bar{r}_2)_{19} &= (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_5)_{20} - (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_5)_{19} \\ (\bar{r}_2 \cdot \Delta \bar{r}_6)_{19} + (\bar{r}_6 \cdot \Delta \bar{r}_2)_{19} &= (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_6)_{20} - (\bar{r}_2 \cdot \bar{r}_6)_{19} \end{aligned} \right\} \quad (10)_2$$

$$\left. \begin{aligned} (\bar{r}_3 \cdot \Delta \bar{r}_4)_{19} + (\bar{r}_4 \cdot \Delta \bar{r}_3)_{19} &= (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_4)_{20} - (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_4)_{19} \\ (\bar{r}_3 \cdot \Delta \bar{r}_5)_{19} + (\bar{r}_5 \cdot \Delta \bar{r}_3)_{19} &= (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_5)_{20} - (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_5)_{19} \\ (\bar{r}_3 \cdot \Delta \bar{r}_6)_{19} + (\bar{r}_6 \cdot \Delta \bar{r}_3)_{19} &= (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_6)_{20} - (\bar{r}_3 \cdot \bar{r}_6)_{19} \end{aligned} \right\} \quad (10)_3$$

Уравнения $(10)_1 - (10)_3$ являются исходными для решения поставленной задачи. На примере уравнений $(10)_1$ покажем, как можно от неизвестных $\Delta \bar{r}_i$ перейти к другой категории неизвестных – направляющим косинусам (1).

В качестве первого шага представим левые части уравнений $(10)_1$ в декартовой экваториальной системе координат ЭСК₁₉₀₀:

$$\left. \begin{aligned} & (x_{11} \cdot \Delta x_{41} + y_{11} \cdot \Delta y_{41} + z_{11} \cdot \Delta z_{41})_{19} + \\ & + (x_{41} \cdot \Delta x_{11} + y_{41} \cdot \Delta y_{11} + z_{41} \cdot \Delta z_{11})_{19} = (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{19} \\ & (x_{11} \cdot \Delta x_{51} + y_{11} \cdot \Delta y_{51} + z_{11} \cdot \Delta z_{51})_{19} + \\ & + (x_{51} \cdot \Delta x_{11} + y_{51} \cdot \Delta y_{11} + z_{51} \cdot \Delta z_{11})_{19} = (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_5)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_5)_{19} \\ & (x_{11} \cdot \Delta x_{61} + y_{11} \cdot \Delta y_{61} + z_{11} \cdot \Delta z_{61})_{19} + \\ & + (x_{61} \cdot \Delta x_{11} + y_{61} \cdot \Delta y_{11} + z_{61} \cdot \Delta z_{11})_{19} = (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_6)_{20} - (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_6)_{19} \end{aligned} \right\} (10)'_1$$

Вычисляя при помощи матричных уравнений (4) или (5) величины $\Delta x_{i1}, \Delta y_{i1}, \Delta z_{i1}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) и подставляя затем эти величины в уравнения $(10)'_1$, получим три линейных уравнения с девятью направляющими косинусами (1).

Из уравнений $(10)_1 - (10)_3$ видно, что для получения остальных шести уравнений достаточно в найденных уравнениях сделать замену индексов: 1 на 2, 2 на 3. Нет необходимости выписывать всю систему девяти уравнений с девятью неизвестными-направляющими косинусами, для иллюстрации выпишем только одно уравнение, соответствующее первому уравнению из системы уравнений $(10)'_1$:

$$\left. \begin{aligned} & (x_{42} \cdot x_{11} + x_{12} \cdot x_{41}) \cdot k_{11} + (y_{42} \cdot x_{11} + y_{12} \cdot x_{41}) \cdot k_{12} + \\ & + (z_{42} \cdot x_{11} + z_{12} \cdot x_{41}) \cdot k_{13} + (x_{42} \cdot y_{11} + x_{12} \cdot y_{41}) \cdot k_{21} + \\ & + (y_{42} \cdot y_{11} + y_{12} \cdot y_{41}) \cdot k_{22} + (z_{42} \cdot y_{11} + z_{12} \cdot y_{41}) \cdot k_{23} + \\ & + (x_{42} \cdot z_{11} + x_{12} \cdot z_{41}) \cdot k_{31} + (y_{42} \cdot z_{11} + y_{12} \cdot z_{41}) \cdot k_{32} + \\ & + (z_{42} \cdot z_{11} + z_{12} \cdot z_{41}) \cdot k_{33} = (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{20} + (\bar{r}_1 \cdot \bar{r}_4)_{19} \end{aligned} \right\} (11)$$

В качестве коэффициентов перед неизвестными в уравнении (11) выступают декартовы координаты звезд обоих равноденствий. Остальные восемь уравнений могут быть получены из уравнения (11) путем изменения первых индексов номеров звезд, не трогая вторых индексов – индексов равноденствий. Закономерность изменения номеров звезд видна из уравнений $(10)_1 - (10)_3$, помня, что уравнение (11) соответствует первому уравнению из группы уравнений $(10)_1$.

Решить систему девяти линейных уравнений методом Гаусса, построенных на базе первых шести звезд, не составляет большого труда. Для этого достаточно девять уравнений представить в форме одного матричного уравнения с основной матрицей (9×9) .

Полученное матричное уравнение нужно решить несколько раз, производя перед каждым решением замену координат звезд на координаты других звезд.

После определения направляющих косинусов, используя формулу (3), нетрудно определить проекции собственных движений $\Delta \bar{r}_i$ на оси ЭСК₂₀₀₀ т.е., собственные движения в декартовых координатах любых звезд по формуле:

$$\left. \begin{aligned} & \begin{pmatrix} \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & \Delta z_{12} \\ \Delta x_{22} & \Delta y_{22} & \Delta z_{22} \\ \Delta x_{32} & \Delta y_{32} & \Delta z_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix}_{2000} - \\ & - \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix}_{1900} \cdot \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Численные результаты

Численное определение направляющих косинусов по координатам звезд из каталогов NFK₁₉₀₀ и FK5₂₀₀₀ произведено в виде эксперимента по 27 общим звездам. В качестве иллюстрации приведен пример усредненного значения матрицы направляющих косинусов, полученных по этим 27 звездам предлагаемым методом

$$\left. \begin{aligned} & K_{FK} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} 0.999702284086 & 0.022402328975 & 0.009705555763 \\ -0.022402201550 & 0.999749051168 & -0.000136939346 \\ -0.009705719023 & -0.000080612655 & 0.999953048177 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

и усредненное значение матрицы направляющих косинусов, полученное с помощью формулы (3), используя значения собственных движений $\Delta x_{i2}, \Delta y_{i2}, \Delta z_{i2}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 27$) тех же 27 звезд из ГИППАРКОС'а:

$$\left. \begin{aligned} & K_{sun} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} 0.999706893289 & 0.022358506016 & 0.009716181979 \\ -0.022348543509 & 0.999760840539 & -0.000107306492 \\ -0.009715609884 & -0.000109688891 & 0.999952042732 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для сравнения приведем еще произведения матриц (13) и (14) на свои транспонированные матрицы. Эти произведения в идеале должны равняться единичной матрице, поскольку оси экваториальной системы координат обязаны быть перпендикулярными друг другу.

$$\left. \begin{aligned} & K_{FK} \cdot K_{FK}^T = \\ & = \begin{pmatrix} 1.000000718963 & -1.539939733211 \cdot 10^{-7} & 4.716796667272 \cdot 10^{-7} \\ -1.539939733211 \cdot 10^{-7} & 1.000000042686 & 9.602530923763 \cdot 10^{-8} \\ 4.716796667272 \cdot 10^{-7} & 9.602530923763 \cdot 10^{-8} & 1.000000305903 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (13')$$

$$\left. \begin{aligned} & K_{sun} \cdot K_{sun}^T = \\ & = \begin{pmatrix} 1.000008179473 & 1.012315743221 \cdot 10^{-5} & 5.01364186043 \cdot 10^{-7} \\ 1.012315743221 \cdot 10^{-5} & 1.000021207187 & 1.657264712887 \cdot 10^{-7} \\ 5.01364186043 \cdot 10^{-7} & 1.657264712887 \cdot 10^{-7} & 0.999998492871 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (14')$$

Отметим одно преимущество предлагаемого метода, в котором сначала по координатам звезд определяются направляющие косинусы, а затем по направляющим косинусам, используя формулы типа (3), вычисляются собственные движения звезд. Это преимущество состоит в том, что относительные ошибки столетних собственных движений примерно в пять раз больше, чем относительные ошибки координат [3].

Определение из наблюдений звезд параметров движения плоскости эклиптики

Имеем известную [4] схему отображения прецессионного движения точек на небесной сфере:

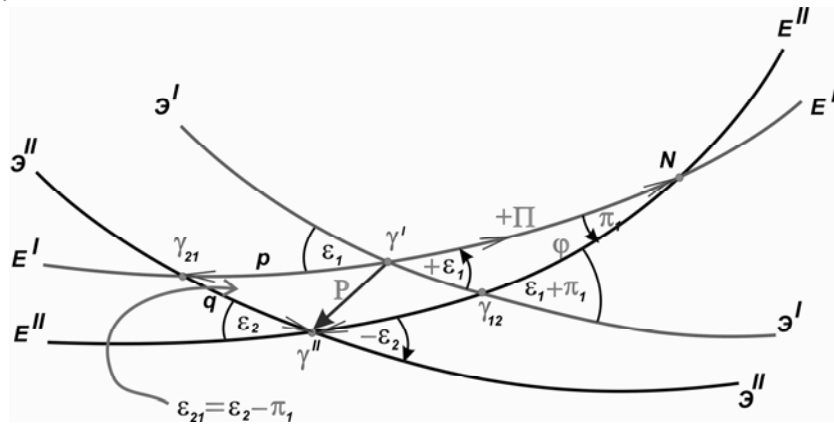


Рис.1. Движение точки весеннего равноденствия на небесной сфере.

\mathcal{E}' – положение небесного экватора в момент равноденствия каталога NFK₁₉₀₀.

\mathcal{E}'' – положение небесного экватора в момент равноденствия FK5_{2000.0};

E' – положение плоскости эклиптики в момент 1900.0;

E'' – положение плоскости эклиптики в момент 2000.0;

N – восходящий узел новой эклиптики E'' на старой эклиптике E' ;

Π – долгота восходящего узла N от начальной точки весеннего равноденствия γ' ;

π_1 – угол поворота эклиптики E'' относительно эклиптики E' за сто лет;

φ – долгота восходящего узла N относительно точки весеннего равноденствия γ'' (в момент 2000.0.);

p – (дуга большого круга $\gamma' \gamma_{21}$) = лунно-солнечная прецессия в плоскости E' ;

q – (дуга большого круга $\gamma_{21} \gamma''$) = прецессия от планет в плоскости \mathcal{E}'' ;

p^1 – (дуга большого круга $\gamma_{12} \gamma''$) = лунно-солнечная прецессия в плоскости E'' ;

q^1 – (дуга большого круга $\gamma' \gamma_{12}$) = прецессия от планет в плоскости \mathcal{E}' ;

P – (дуга большого круга $\gamma' \gamma''$) = результирующая прецессия за сто лет.

Параметры Π, π_1, φ – определялись по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \Pi_{2000} &= \frac{k_{13} \cdot \cos \varepsilon_2 - k_{12} \cdot \sin \varepsilon_2}{(k_{22} \cdot \sin \varepsilon_2 - k_{23} \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot \cos \varepsilon_1 + (k_{32} \cdot \sin \varepsilon_2 - k_{33} \cdot \cos \varepsilon_2) \cdot \sin \varepsilon_1} \\ \sin \pi_1 &= \frac{k_{13} \cdot \cos \varepsilon_2 - k_{12} \cdot \sin \varepsilon_2}{\sin \Pi_{2000}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{k_{21} \sin \varepsilon_1 - k_{31} \cdot \cos \varepsilon_1}{(k_{32} \cdot \cos \varepsilon_1 - k_{22} \cdot \sin \varepsilon_1) \cdot \cos \varepsilon_2 + (k_{33} \cdot \cos \varepsilon_1 - k_{23} \cdot \sin \varepsilon_1) \cdot \sin \varepsilon_2} \\ \sin \pi_1 &= \frac{k_{21} \cdot \sin \varepsilon_1 - k_{31} \cdot \cos \varepsilon_1}{\sin \varphi} \end{aligned} \right\}$$

Заключение

С использованием координат 27 звезд в системах FK5 и ГИПАРКОС получена скорость вращения эклиптики:

FK5	$\pi_1 = 47''.08 \pm 0''.04.$
ГИПАРКОС	$\pi_1 = 47''.33 \pm 0''.12.$

Принятые справочные данные: $\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = 23^\circ 27' 08''.27 \\ \varepsilon_2 = 23^\circ 26' 21''.41 \end{array} \right\}$.

Разумеется, 27 звезд недостаточно для того, чтобы утверждать, что найденные направляющие косинусы осей ЭСК₂₀₀₀ относительно осей ЭСК₁₉₀₀ являются истинными. Но если для этой цели использовать все 870 общих звезд, содержащихся в каталогах NFK₁₉₀₀ и FK5₂₀₀₀, то можно найти, практически, истинный поворот ЭСК₂₀₀₀ относительно ЭСК₁₉₀₀, что позволит определить собственные движения звезд и параметры вращения плоскости эклиптики. В списке литературы указаны работы, предшествующие данному исследованию [5÷11].

Литература

1. *A. Auwers.* Veröff. König. Astr. Rechen-Instituts. № 33. Neuer Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs. Berlin 1907.
2. *W. Fricke, H. Schwan, T. Lederle.* Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Veröff. ARI, Heidelberg. Verlag G.Braun, Karlsruhe 1988.
3. *Л.И. Бакулин.* Фундаментальные каталоги звезд. Москва. «Наука», 1980, 289 с.
4. *А.В. Загребин.* Введение в астрометрию. М-Л.: Наука, ФМ, 1966, 351 с.
5. *А.А. Ефимов, В.А. Фомин, А.А. Шпитальная.* Определение абсолютных собственных движений звезд и абсолютной прецессии из трех абсолютных каталогов. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.16, Л., 1991, с.151-157.
6. *А.А. Ефимов, В.А. Фомин, А.А. Шпитальная.* Определение абсолютных собственных движений звезд и абсолютной прецессии из пяти абсолютных пулковских каталогов (1845.0, 1865.0, 1885.0, 1905.0, 1930.0). В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.17, СПб, 1994, с.380-395.
7. *А.А. Ефимов, В.А. Фомин, А.А. Шпитальная.* Определение абсолютных собственных движений звезд, прецессии и движения плоскости эклиптики из абсолютных каталогов звезд. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.18, СПб, 1995, с.376-400.
8. *А.А. Ефимов, В.А. Фомин, А.А. Шпитальная.* Уточненный метод определения прецессии и движения плоскости эклиптики. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.19, СПб, 1996, с.446-450.
9. *А.А. Ефимов, Т.И. Кальтман, В.А. Фомин, А.А. Шпитальная.* Определение вращений экваториальной системы координат и плоскости эклиптики из звездных каталогов с разными равноденствиями. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.20, СПб, с. 220-238.
10. *В.В. Бобылев, А.А. Ефимов, А.А. Шпитальная.* Определение вращения плоскости эклиптики из астрономических наблюдений. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.21, СПб, 1999, с. 418-422.
11. *А.А. Ефимов, Б.Н. Смирнов, А.А. Шпитальная.* Определение вращения плоскости эклиптики из фундаментальных каталогов звезд. В сб. серии «Проблемы исследования Вселенной», вып.23, СПб, 2001, с.640-649.

**DETERMINATION OF THE ROTATING VELOCITY OF THE EQUATORIAL
REFERENCE SYSTEM USING ONLY COORDINATES OF COMMON STARS
CONTAINED IN TWO FUNDAMENTAL STELLAR CATALOGUES WITH
DIFFERENT EQUINOXES (1900.0 AND 2000.0),**

Efimov A.A., Smirnov B.N., Shpitalnaya A.A.

Summary

The problem of determining the rotating velocity of the Equatorial Reference System (ERS), without knowledge of stellar proper motions, was solved. Only coordinates of common stars contained in two fundamental stellar catalogues with different equinoxes (NFK 1900 and FK52000) were utilized. The solution was to turn the ERS during 100 years, by setting the direction-cosines of axes ERS₂₀₀₀ relative to ERS₁₉₀₀. It has been solved the problem connected with determination of the rotating velocity of the equatorial reference system (ERS) without knowledge of stellar proper motions. Only coordinates of common stars contained in two fundamental stellar catalogues with different equinoxes (NFK₁₉₀₀ and FK5₂₀₀₀) were used. The solution of the problem has been received in the form of the turning ERS during 100 years, setting directive cosines of axes ERS₂₀₀₀ relatively initial ERS₁₉₀₀

ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТИ ЯРКИХ ШИРОКИХ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПУЛКОВСКОЙ ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Киселев А.А., Романенко Л.Г., Калинин С.И.

На основе 20-40-летних фотографических наблюдений двойных звезд на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове проведено динамическое исследование 5 широких пар, а именно: ADS 5436, 6783, 9559 (δ Boo), 14878 и 16558. Используются также данные о наблюдениях этих звезд из каталога WDS, тригонометрические параллаксы Hipparcos и лучевые скорости А.А. Токовинина. Физическая природа четырех первых пар не вызывает сомнений, пятая пара ADS 16558 может быть оптической. Наблюдаемые относительные движения компонент (дуги составляют от 0.2 до 7.0^0) соответствуют орбитальным с периодами от 100000 до 2000 лет. Впервые получены оценки суммы масс компонент: в случае ADS 14878 она составляет не менее 25 масс Солнца (возможно, ошибка в параллаксе), для ADS 16558 – не менее 7000 масс Солнца (оптическая пара или "черная дыра"?), для остальных звезд – соответствует соотношению "масса-светимость". Определена также ориентация полученных орбит в галактической системе координат. Выявлено, что плоскости почти всех этих орбит (а они - наивероятнейшие) круто наклонены к плоскости Галактики, т.е. также, как было отмечено в предыдущих работах.

В настоящее время в Пулкове на 26" рефракторе продолжают наблюдения и исследования визуально-двойных звезд (ВДЗ). Некоторые результаты наблюдений представлены в публикациях [1-3]. Пулковская программа содержит около 420 ВДЗ ($\rho > 3''$, $m < 10^m$). С 1960 г. наблюдения ведутся фотографическим методом, а с 1993 г. параллельно используется ПЗС-техника. Программа расширена за счет более тесных (до $1''$) и слабых (до 12^m) звезд. Основная цель программы - кинематические и динамические исследования, включая определение орбит, масс и ориентации орбит в галактической системе координат.

Для решения этих задач используется метод параметров видимого движения (ПВД) и привлекаются дополнительные данные: тригонометрические параллаксы и лучевые скорости компонент. Около половины ВДЗ нашей программы оказались обеспеченными тригонометрическими параллаксами высокого качества, полученными HIPPARCOS'ом в 1997 г. [4]. Избранные звезды нашей программы наблюдались на Измерителе лучевых скоростей (ИЛС) А.А. Токовининым по нашей просьбе [5, 6]. Настоящая работа является продолжением начатых исследований [7-12].

Общие данные об исследуемых звездах приведены в табл.1. В табл.2 указаны данные о наблюдениях и параметры видимого движения, полученные на их основе, а также - относительные лучевые скорости компонент $\Delta V_r = V_rB - V_rA$.

Радиус кривизны видимого движения (параметр второго порядка) всех пяти исследуемых звезд ввиду малости наблюдаемой дуги не определяется. Для получения элементов орбит мы воспользовались наивероятнейшим соотношением между величинами пространственного вектора положения r и его проекцией на плоскость r_1 :

$$r_1 = \frac{\pi}{4} r = r \cos \beta; \quad \beta \approx \pm 38^0$$

- теорема Клейбера (см. [16]). Соответственно, из наблюдений определяются два вектора положения, расположенные над картинной плоскостью ($\beta > 0$) или под ней ($\beta < 0$). В

итоге получаем две орбиты, тождественные в динамическом смысле, но различные в геометрическом.

Элементы полученных ПВД-орбит приведены в табл.3 в двух вариантах, для $\beta=+38^0$ и $\beta = -38^0$. Для ADS 16558 орбита, полученная с параллаксом $\pi_{HIP} = 0.003''$, требует суммы масс компонент до 7300 масс Солнца, что вызывает сомнение. Звезда может быть оптической, т.к. абсолютные и относительные движения компонент малы и практически совпадают, или ее параллакс грубо ошибочный. В связи с этим, дополнительно приведена альтернативная орбита, полученная в предположении нормальной массы системы (см. табл.1) и подобранным параллаксом ($\pi_t = 0.041''$).

Кроме того, избыточная масса (25 масс Солнца) выявляется в системе ADS 14878, если используемый параллакс правильный. Однако даже если используемый параллакс увеличить на величину его ошибки, величина минимальной массы остается избыточной (3 массы Солнца). В остальных трех системах динамика движений удовлетворяет принятым массам согласно соотношению "масса-светимость" [17].

В табл.4 приведены параметры ориентации полученных орбит в галактической системе координат. Обращаем внимание, что плоскости почти всех орбит (а они - наименее вероятнейшие) круто наклонены к плоскости Галактики ($|b| < 30^0$, т.е. также, как отмечено в статьях [9-10]), в остальных параметрах закономерности распределения не выявляются.

Разброс наблюдений относительно вычисленных орбит, для примера, представлен на рис.1, 2 и 3 для ADS 6783, 14878 и 16558 соответственно. Эфемериды вариантов орбит при $\beta=+38^0$ и $\beta= -38^0$ наблюдаемых коротких дуг для всех исследуемых звезд практически совпадают. Как видим, полученные орбиты могут считаться только предварительными, хотя в динамическом отношении (при данных параллаксах и лучевых скоростях) представляют определенный интерес, т.к. соответствуют массам: 1.9 (нормальная), 25 (избыточная) и 7300 масс Солнца (черная дыра?).

Таблица 1. Общие данные об исследуемых визуально-двойных звездах.

ADS Name	$(\alpha, \delta)_{2000.0}$	mA mB	SpA SpB	M_{SpA} M_{SpB}	π_t $\pm \epsilon\pi$	μ_x mas	μ_y mas	$V_r A \pm \epsilon A$ $V_r B \pm \epsilon B$
5436	$06^h 48.3^m$ $55^\circ 43'$	6.3 6.3	F6V F5V	1.3 1.3	.021 ± 1	+059 +059	-105 -105	+5.7 \pm 0.3 +7.9 \pm 0.2
6783	$08^h 24.3^m$ $44^\circ 57'$	7.8 9.4	G0V K0	1.1 0.8	.027 ± 2	-067 -070	-079 -074	+7.9 \pm 0.2 +7.8 \pm 0.2
9559 (δBoo)	$15^h 15.5^m$ $33^\circ 19'$	3.4 7.9	G8III G0	2.6 1.1	.028 ± 1	+085 +084	-111 -110	-12.6 \pm 0.2 -12.3 \pm 0.3
14878	$21^h 20.0^m$ $52^\circ 59'$	7.7 7.9	G5V G5	0.9 0.9	.006* ± 5	-025* -032*	+082* +046*	+31.0 \pm 0.1 +29.0 \pm 0.1
16558	$23^h 10.0^m$ $36^\circ 51'$	7.9 8.3	K4III K2	2.3 0.8	.003 ± 1	+015 +003	-003 -001	+9.1 \pm 0.2 +8.2 \pm 0.2

Примечания: m и Sp - визуальная величина и спектральный класс компонент A и B из WDS [15], M_{Sp} – масса компоненты согласно соотношению “масса-светимость” [17] в единицах массы Солнца (при отсутствии класса светимости принимаем класс V), π_t - параллаксы и μ_x , μ_y - собственные движения компонент по наблюдениям Hipparcos [4] (* - для ADS 14878 - по данным каталогов Дженкинс [13] и AGK-3 [14] соответственно), V_r – лучевые скорости компонент в км/с, полученные А.А. Токовининым [6].

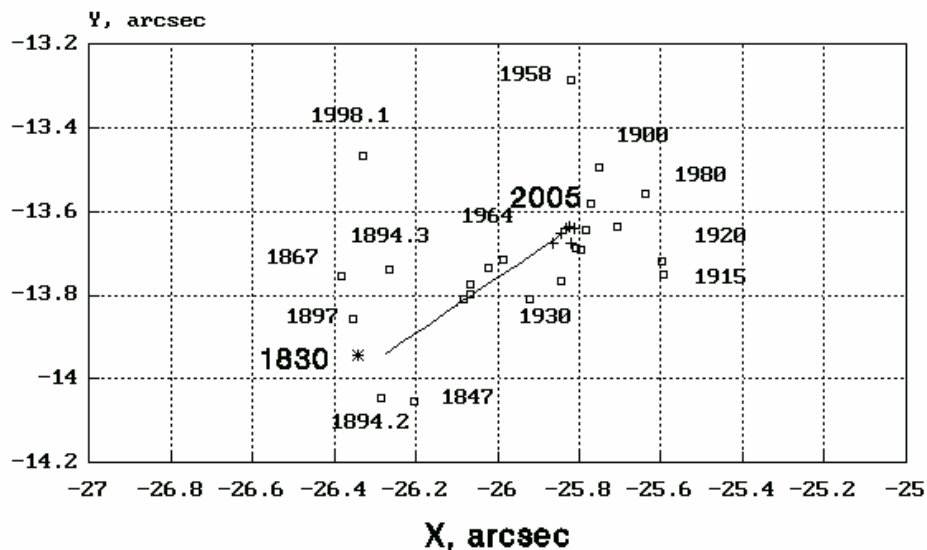


Рис1. Наблюдения ADS 6783 в 1830-2005 годы. 1830 год - наблюдения F.G.W. Struve.

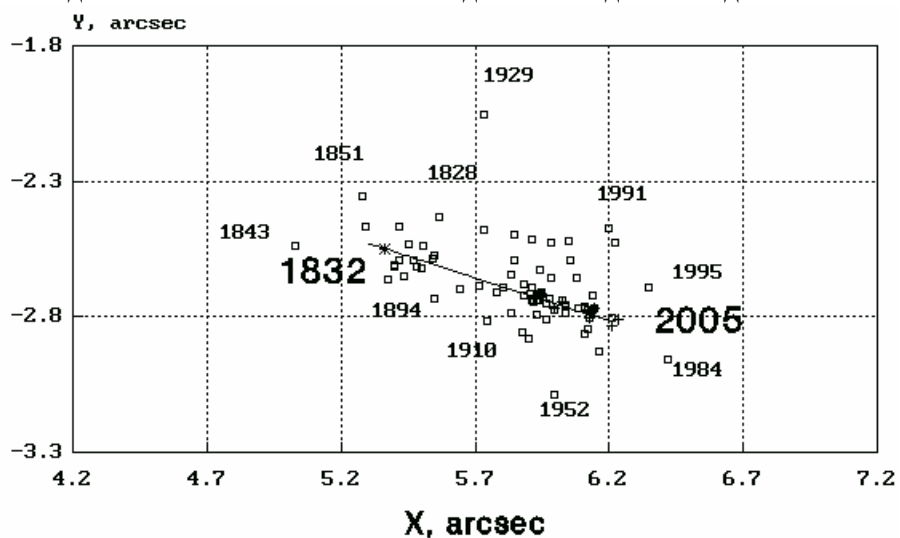


Рис2. Наблюдения ADS 14878 в 1828-2005 годы. 1832 год - наблюдения F.G.W. Struve.

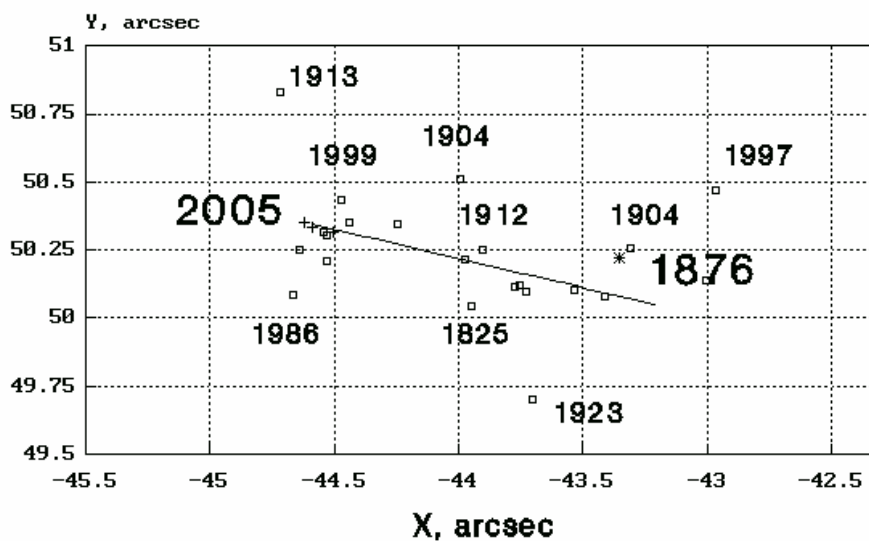


Рис3. Наблюдения ADS 16558 в 1825-2005 годы. 1876 год - наблюдения E. Dembovski.

Обозначения на рис.1-3: — Эфемериды □ WDS + Пулковские * I-е уверенное наблюдение.

Таблица 2. Наблюдательные данные.
Параметры видимого (относительного) движения.

ADS	T_n T_k	ΔT T_0	n n_p	$\Delta\sigma_w$ 1"	ρ 1"	θ 1°	μ 1"/год	ψ 1°	ΔV_r км/с
5436	1962	42	--	0.6	4.599	257.28	.0051	96.	+2.3
	2003	1982.65	33		± 07	± 03	± 06	$\pm 3.$	± 0.2
6783	1830	176	27	0.6	29.223	242.15	.0032	57.	-0.1
	2005	1996.17	13		± 05	± 01	± 06	$\pm 5.$	± 0.2
9559	1822	184	94	0.2	105.021	78.02	.0016	250.	+0.3
	2005	1914.11	10		± 63	± 04	± 11	$\pm 12.$	± 0.3
14878	1828	178	88	0.8	6.340	114.92	.0054	108.	-2.0
	2005	1917.19	30		± 25	± 14	± 04	$\pm 2.$	± 0.2
16558	1995	11	--	1.2	67.173	318.52	.0109	282.	-1.0
	2005	1995.79	14		± 10	± 01	± 24	$\pm 12.$	± 0.3

Примечания: T_n и T_k – начальная и конечная эпохи используемого ряда позиционных наблюдений, ΔT – период наблюдений (базисная дуга), T_0 – средняя эпоха наблюдений, n – количество использованных в данном исследовании наблюдений из каталога WDS [15], n_p – количество пластинок, полученных в Пулковке, $\Delta\sigma_w$ – величина наблюдаемой дуги по данным каталога WDS, ρ , θ , μ и ψ – параметры видимого движения и их ошибки, ΔV_r – относительная лучевая скорость компонент, приведенная на момент T_0 .

Таблица 3. Элементы ПВД-орбит.

ADS	a	P , лет	β	e	ω	i	Ω	T_{II}	W	M_{dyn}
5436	5."	2200	+38 ⁰	.30	253 ⁰	97 ⁰	263 ⁰	1246	145 ⁰	2.6
			-38	.89	119	104	246	2307	201	
6783	21.	16000	+38	.94	212	81	235	6845	187	1.9
			-38	.87	30	84	58	7497	189	
9559	78.	76000	+38	.73	218	86	75	39773	180	3.7
			-38	.99	136	74	91	22775	184	
14878	12.	18000	+38	.54	60	96	290	550	81	25.
			-38	.97	158	111	97	1035	161	
16558	124	98000	+38	.64	26	126	104	-5887	103	7300
			-38	.70	195	129	279	-5560	112	
*	136	110000	0	.75	82	128	139	-2788	98	3.1

Примечание: a , P , e , ω , i , Ω и T_{II} – элементы орбиты, β – угол наклона вектора АВ к картинной плоскости на средний момент T_0 , для которого определены ПВД согласно табл.2, W – истинная аномалия на момент T_0 , M_{dyn} – сумма масс компонент в единицах массы Солнца, соответствующая динамике движения (см. [7]). В последней строке для ADS 16558 приведена альтернативная орбита (с суммой масс M_{Sp} и подобранным параллаксом $\pi_t = 0.041''$).

Таблица 4. Ориентация ПВД-орбит в галактической системе координат.

ADS	a	P	β	e	Скорость		Полус		Периастр	
	1"	лет	1^0		1^0	b^0	1^0	b^0	1^0	b^0
5436	5.	2200	+38 -38	.30 .89	174 174	+46 +46	73 86	+11 - 1	344 174	- 4 +52
6783	21.	16000	+38 -38	.94 .87	32 32	+39 +39	95 286	-29 +18	17 78	+20 +69
9559	78.	76000	+38 -38	.73 .99	298 298	+77 +77	333 312	-10 -12	241 263	- 7 +72
14878	12.	18000	+38 -38	.54 .97	228 228	-55 -55	179 32	+24 -34	76 39	+27 +56
16558	124	98000	+38 -38	.64 .70	23 23	+35 +35	42 129	-54 +22	178 212	-27 -17
*	136	110000	0	.75	340	+41	44	-26	141	-14

- - см. примечание к табл. 3.

Авторы выражают благодарность всем наблюдателям 26" рефрактора, особенно - соавторам каталогов [1-3]. Мы также предполагаем продолжать наблюдения и исследования визуально-двойных звезд Пулковской программы, в том числе - широких пар с медленным орбитальным движением.

Обращаемся с призывом к астрономическому сообществу поддержать космические проекты (типа GAIA), которые могли бы доставить информацию о параллаксах визуально-двойных звезд, особенно слабых.

Литература

1. *А.А. Киселев, О.А. Калиниченко, Г.А. Плюгин, Н.А. Шахт, О.В. Кияева, Б.А. Фираго, О.П. Быков.* "Каталог относительных положений и движений 200 визуально-двойных звезд по наблюдениям в Пулкове на 26" рефракторе в 1960-1986 гг." – Л.: Наука, 1988, 40 с.
2. *А.А. Kiselev, O.A. Kalinichenko, O.V. Kiyayeva, N.A. Shakht, L.G. Romanenko, I.S. Izmailov, O.P. Bykov, K.L. Maslennikov.* "Pulkovo Visual Double Star Catalogue" /VizieR On-line Data Catalog: I/292, 2004.
3. *А.А. Киселев, О.А. Калиниченко, О.В. Кияева, Н.А. Шахт, Л.Г. Романенко, И.С. Измайлов, О.П. Быков, К.Л. Масленников, Е.А. Грошева.* "Каталог относительных положений 234 визуально-двойных звезд" – <http://www.puldb.ru> (2006).
4. *M.A.C. Perryman, E. Hoeg et al.* "The HIPPARCOS and TYCHO Catalogs"/ Noordwijk, ESA, 1997, v.1.
5. *А.А. Токовинин.* "Лучевые скорости компонентов широких визуально-двойных звезд" // Астрон.ж., 1994, т.71, с.293-295.
6. *А.А. Tokovinin, M.G. Smekhov.* "Statistics of spectroscopic sub-systems in visual multiple stars" // Astron. and Astrophys., 2002, v.382, p.118-123.
7. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко.* "Динамическое исследование девяти широких визуально-двойных звезд в окрестностях Солнца" // Астрон.ж., 1996, т.73, с.875-882.
8. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко, И.С. Измайлов, Е.А. Грошева.* "Новые орбиты 9 визуально-двойных звезд, выведенные методом параметров видимого движения" // Известия ГАО в Пулкове № 214, 2000, с.239-254.

9. **А.А. Киселев, Л.Г. Романенко.** "Ориентация ПВД-орбит ВДЗ Пулковской программы в галактической системе координат" // Изв. ГАО в Пулкове № 216, 2002, с.269-273.
10. **A.A. Kisselev, L.G. Romanenko.** "Orientation of AMP-orbits of Pulkovo programme binary stars in the Galaxy coordinate frame" // Astron.Soc.of the Pacific, Conf.Ser., v.316, 2004, p.250-254.
11. **А.А. Киселев, О.В. Кияева.** "Определение минимальной суммы масс компонент двойной звезды с известным параллаксом из наблюдений короткой дуги видимого движения". // ПАЖ, 2003, т.29, №1, с.46-49.
12. **А.А. Киселев, Л.Г. Романенко, О.А. Калинин.** "Новые орбиты 7 широких визуально-двойных звезд Пулковской программы " // Изв. ГАО в Пулкове №217, 2004, с.279-285.
13. **O. Heckmann.** "AGK 3. Star catalogue of positions and proper motions north of -2.5 deg. declination". / Hamburg-Bergedorf: Hamburger Sternwarte, 1975, edited by W.Dieckvoss.
14. **L.F. Jenkins.** "General catalogue of trigonometric stellar parallaxes". / New Haven, Yale University Observatory, 1952.
15. **B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. William, G.G. Douglass, C.E. Worley.** "The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. I. The Washington Double Star Catalog". // Astron.J., 2001, v.122, pp.3466-3471.
16. **П.П. Паренаго.** "Курс звездной астрономии" - М.: ГИТТЛ, 1954, с.74.
17. **К.У. Аллен.** "Астрофизические величины" - М.: "Мир", 1977, с.295.

DYNAMICAL INVESTIGATION OF FIVE VISUAL DOUBLE STARS OF THE PULKOVO OBSERVATIONAL PROGRAMME

Kisselev A., Romanenko L., Kalinin S.

Summary

The dynamical investigation of five bright wide double stars - ADS 5436, 6783, 9559 (δ Boo), 14878 and 16558 - was carried out on the basis of 20-40 years photographic observations with the 26-inch refractor at Pulkovo. Additional data, such as - the HIPPARCOS parallaxes, the radial velocities and the WDS positions, were also used. The physical nature of the first four observed pairs is evident, but the fifth pair (ADS 16558) is probably an optical pair. The observed relative motions (arcs 0.2 - 7.0⁰) correspond to orbit motions with periods from 100000 to 2000 years. The dynamical estimations of the component masses (M_{dyn}) were obtained for the first time. They are in good agreement with the mass-luminosity relation (M_{Sp}). However, for the binary ADS 14878 we obtain M_{dyn} equal to 25 mass of the Sun. Probably the parallax used was incorrect. For ADS 16558 the same estimation gives M_{dyn} equal to 7300 mass of the Sun. We suspect that the pair is optical or a "black hole". The orientation of the calculated orbits is presented. All orbit planes are steeply inclined towards the galactic plane, as was shown in the papers by the same authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ САТУРНА И ЕГО СПУТНИКОВ в 2004-2005 гг. НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ

Киселева Т.П., Калиниченко О.А.

Приводятся результаты фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в 2004-2005 гг. главных спутников (1-6, 8) Сатурна. Положения Сатурна определялись по наблюдениям его спутников без измерения изображений планеты на фотопластинках. Анализ точности результатов, выполненный на основе сравнения наблюдений с теориями движения показал высокую точность наблюдений. Случайные ошибки наблюдений Сатурна равны $\pm 0.07''$ по обеим координатам, систематические отклонения от эфемериды DE405, равные $+0.13''$ и $-0.03''$ указывают на неточность теории Сатурна. Точность определения положений спутников в системе экваториальных координат равна $\pm 0.10''$, $\pm 0.08''$, относительных положений (относительно Титана): $\pm 0.076''$, $\pm 0.086''$. Для астрометрической редукции использовался каталог ТУСНО-2. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № № 04-02-16157, 04-07-90081.

1. Наблюдения и редукция

В 2004-2005 гг. продолжались фотографические наблюдения Сатурна и его спутников 1-6 и 8-го с целью определения их точных координат, необходимых для уточнения существующих теорий движения этих объектов. Результаты наблюдений 1994-2003 гг. опубликованы в работах [1 - 4].

Наблюдения производились в периоды с января по апрель 2004 г. и с февраля по март 2005 г. Применялись пластинки NP-27 с экспозициями по 2 минуты. На каждую пластинку фотографировались по 6 изображений системы Сатурна и по 2 следа в начале и в конце цепочки изображений в виде двух изображений системы Сатурна на одном и том же суточном следе, полученные путем остановки часового механизма. В наблюдениях принимали участие следующие научные сотрудники лаборатории астрометрии и звездной астрономии: О.А. Калиниченко, Л.Г. Романенко, О.В. Кияева, М.А. Можяев. Измерения фотопластинок выполнены О.А. Калиниченко на измерительном приборе Аскорекорд. Астрометрическая редукция выполнялась двумя методами: методом "след-масштаб" и методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога ТУСНО-2. С появлением высокоточных космических звездных каталогов на пластинках 26-дюймового рефрактора практически всегда имеется достаточное число опорных звезд для редукции, и обработка двумя методами производилась только для их сравнения. В результате редукции определялись координаты спутников Сатурна в системе опорного каталога ТУСНО-2, координаты спутников относительно Титана, а также определялись координаты самой планеты с использованием теоретических расстояний между спутниками и Сатурном согласно эфемериде спутников, без измерения изображений самой планеты. Такой способ определения координат Сатурна позволяет избежать ошибок, возникающих при измерениях изображений Сатурна, таких, как ошибки фазы, влияние кольца и т.п. [5].

Для сравнения результатов с теорией движения спутников Сатурна TASS-1.7 [6] использовалась эфемерида, вычисленная по программе Н.В. Емельянова <http://Infm1.sai.msu.ru/neb/nss/servicer.htm>

Результаты определения координат Сатурна сравнивались с теорией DE405.

2. Результаты наблюдений

Результаты наблюдений приведены в таблицах 1 и 2, где приводятся топоцентрические экваториальные координаты Сатурна и его спутников в системе опорного каталога ГУСНО-2 и соответствующие (O-C). В таблице 3 приводятся координаты спутников относительно Титана в виде $X = \Delta\alpha \cos\delta$ и $Y = \Delta\delta$ в секундах дуги, вычисленные как разности экваториальных координат спутников. (O-C)_{X,Y} приводятся для астрометрической редукции наблюдений по методу шести постоянных с опорными звездами.

Астрометрические топоцентрические координаты Сатурна вычислялись без измерений изображений планеты на фотографиях следующим образом. Определялись координаты спутников, затем к ним добавлялись эфемеридные значения расстояний между спутниками и Сатурном. Таким образом, положение Сатурна определялось на каждой пластинке по 5-6-ти спутникам (с первого по восьмой, кроме седьмого). При таком методе определения координат Сатурна его положения содержат в себе ошибки теорий движения спутников и измерений изображений спутников, а также ошибки опорного каталога, зато отсутствуют ошибки фотографических изображений планеты, которые могут достигать 0.4", как показал опыт нашей предыдущей работы. В таблице 1 приводятся: дата и момент наблюдений в системе UTC, топоцентрические прямые восхождения и склонения Сатурна в системе экватора и равноденствия J2000.0, N - число спутников, участвовавших в определении положения Сатурна, (O-C)_{RA} и (O-C)_D, вычисленные с использованием теории JPL - DE405.

Таблица 1. Астрометрические топоцентрические координаты Сатурна, определенные по спутникам.

№ пл.	Дата и момент (UTC)	R.A. (2000.0)	Decl. (2000.0)	N	(O-C) _{RA}	(O-C) _D
21560	2004 01 02.897682	06 41 18.008 ±.002	+22 25 48.66 ±.03	6	+0.007 ^s	-0.01"
21561	2004 01 23.853065	06 34 14.698 002	+22 34 48.76 02	6	+0.012	-0.10
21562	2004 01 24.759440	06 33 58.325 006	+22 35 09.74 01	6	+0.009	-0.02
21564	2004 02 19.786060	06 28 09.961 002	+22 43 21.95 01	5	+0.001	-0.10
21569	2004 03 04.828526	06 27 03.714 007	+22 46 17.40 05	5	+0.023	-0.05
21573	2004 03 09.802437	06 27 03.042 001	+22 47 04.17 01	6	+0.005	-0.01
21579	2004 03 11.741310	06 27 06.047 002	+22 47 20.16 01	6	+0.006	-0.02
21598	2004 04 01.743004	06 29 33.469 003	+22 48 48.74 02	6	+0.005	-0.07
21722	2005 02 03.837547	07 35 45.524 001	+21 39 46.14 03	6	+0.008	-0.09
21735	2005 02 09.818150	07 34 00.312 002	+21 44 21.77 02	5	+0.007	-0.04
21738	2005 02 23.867468	07 30 38.141 005	+21 53 12.51 01	6	+0.011	+0.10
21739	2005 03 03.762155	07 29 18.049 002	+21 56 50.03 05	5	+0.014	-0.16
21745	2005 03 22.745015	07 28 00.211 002	+22 01 19.39 02	6	+0.012	+0.03
21757	2005 03 28.838025	07 28 11.198 002	+22 01 27.88 02	6	+0.006	-0.01
21758	2005 03 29.821530	07 28 14.611 002	+22 01 25.82 03	7	+0.006	+0.06

21767	2005 03 30.744424	07 28 18.246	+22 01 22.86	6	+0.014	-0.05
		001	04			
21768	2005 03 31.779180	07 28 22.755	+22 01 18.60	7	+0.008	-0.03
		002	02			

В таблице 2 приводятся топоцентрические экваториальные координаты спутников, причем (O-C) вычислены путем сравнения результатов с теорией TASS-1.7.

Таблица 2. Астрометрические топоцентрические координаты спутников Сатурна.

Момент наблюдений UTC	R.A. (2000.0)	Decl (2000.0)	(O-C) _{RA} Sec	(O-C) _D arcsec
(1S) Мимас				
2005 03 22.745015	07 28 02.338	+22 01 21.75	-0.010 ^s	+0.08"
2005 03 29.821530	07 28 12.593	+22 01 23.01	+0.021	-0.05
2005 03 30.744424	07 28 16.235	+22 01 21.74	+0.012	-0.17
2005 03 31.779180	07 28 20.981	+22 01 10.23	+0.026	-0.10
(2S) Энцелад				
2004 01 02.897682	06 41 15.448	+22 25 37.06	+0.002 ^s	-0.02"
2004 01 23.853065	06 34 16.801	+22 34 39.12	+0.003	-0.18
2004 01 24.759440	06 33 55.518	+22 35 02.10	+0.005	-0.02
2004 02 19.786060	06 28 07.241	+22 43 14.90	+0.009	-0.04
2004 03 09.802437	06 27 00.703	+22 47 10.12	+0.007	+0.06
2004 03 11.741310	06 27 07.357	+22 47 07.27	-0.004	+0.06
2004 04 01.743004	06 29 34.937	+22 49 03.83	+0.017	-0.08
2005 02 03.837547	07 35 48.302	+21 39 46.37	+0.002	-0.06
2005 02 23.867468	07 30 35.697	+21 53 01.06	+0.008	+0.08
2005 03 22.745015	07 28 02.338	+22 01 21.75	-0.010	+0.08
2005 03 29.821530	07 28 12.842	+22 01 34.78	+0.007	+0.07
2005 03 30.744424	07 28 20.825	+22 01 29.81	+0.011	-0.11
2005 03 31.779180	07 28 23.422	+22 01 04.82	-0.004	-0.11
(3S) Тэффия				
2004 01 02.897682	06 41 21.612	+22 25 52.26	+0.005	+0.00
2004 01 23.853065	06 34 17.699	+22 35 05.20	+0.021	-0.01
2004 01 24.759440	06 33 55.118	+22 34 55.46	+0.009	+0.01
2004 02 19.786060	06 28 07.699	+22 43 34.90	0.000	-0.14
2004 03 04.828526	06 27 04.776	+22 45 59.13	0.000	-0.12
2004 03 09.802437	06 26 59.948	+22 47 07.87	0.000	-0.03
2004 03 11.741310	06 27 02.796	+22 47 20.27	+0.008	-0.07
2004 04 01.743004	06 29 30.704	+22 48 34.79	+0.003	-0.06
2005 02 03.837547	07 35 45.414	+21 39 26.85	+0.009	-0.22
2005 02 09.818150	07 34 03.346	+21 44 16.26	+0.003	-0.00
2005 02 23.867468	07 30 35.949	+21 53 24.20	+0.009	+0.09
2005 03 03.762155	07 29 14.716	+21 56 40.93	+0.014	-0.00
2005 03 22.745015	07 27 57.471	+22 01 05.26	+0.005	-0.06
2005 03 28.838025	07 28 12.675	+22 01 13.73	+0.010	-0.01
2005 03 29.821530	07 28 12.762	+22 01 38.42	0.000	+0.18
2005 03 30.744424	07 28 19.892	+22 01 09.52	+0.016	-0.04
2005 03 31.779180	07 28 20.341	+22 01 27.62	+0.006	+0.02
(4S) Диона				
2004 01 02.897682	06 41 14.886	+22 25 24.27	+0.013	+0.05
2004 01 23.853065	06 34 13.448	+22 35 14.30	+0.014	-0.14
2004 01 24.759440	06 33 55.072	+22 34 46.12	+0.008	-0.00

2004	02	19.786060	06	28	12.831	+22	43	46.25	+0.004	-0.14
2004	03	04.828526	06	27	03.201	+22	46	43.40	+0.038	-0.14
2004	03	09.802437	06	27	06.722	+22	47	22.25	+0.004	-0.05
2004	03	11.741310	06	27	07.236	+22	46	56.15	+0.007	-0.01
2004	04	01.743004	06	29	29.437	+22	48	49.59	+0.007	-0.04
2005	02	03.837547	07	35	50.076	+21	39	51.28	+0.015	+0.01
2005	02	09.818150	07	34	02.293	+21	44	47.46	+0.013	-0.07
2005	02	23.867468	07	30	36.400	+21	53	33.56	+0.002	+0.14
2005	03	03.762155	07	29	19.447	+21	57	15.84	+0.018	-0.13
2005	03	22.745015	07	28	03.037	+22	01	41.55	+0.004	-0.01
2005	03	28.838025	07	28	08.490	+22	01	42.84	+0.007	+0.04
2005	03	29.821530	07	28	13.801	+22	01	01.00	+0.003	-0.06
2005	03	30.744424	07	28	22.182	+22	01	36.76	+0.012	-0.02
2005	03	31.779180	07	28	18.894	+22	01	23.04	+0.007	+0.06

(5S) Рея

2004	01	02.897682	06	41	15.544	+22	25	09.48	+0.008	-0.02
2004	01	23.853065	06	34	11.585	+22	35	18.86	+0.017	-0.10
2004	01	24.759440	06	33	52.051	+22	34	54.01	+0.012	-0.03
2004	02	19.786060	06	28	08.165	+22	43	56.18	-0.004	-0.09
2004	03	04.828526	06	26	58.693	+22	46	31.98	+0.028	-0.06
2004	03	09.802437	06	26	57.044	+22	46	55.17	+0.006	-0.00
2004	03	11.741310	06	27	110562	+22	47	12.49	+0.007	-0.05
2004	04	01.743004	06	29	28.476	+22	48	24.97	+0.006	-0.06
2005	02	03.837547	07	35	45.051	+21	39	10.34	+0.012	-0.08
2005	02	09.818150	07	34	06.162	+21	44	43.61	+0.007	-0.10
2005	02	23.867468	07	30	40.986	+21	53	47.57	+0.016	+0.12
2005	03	22.745015	07	28	04.413	+22	01	49.32	+0.002	+0.04
2005	03	28.838025	07	28	05.379	+22	01	24.83	+0.007	-0.08
2005	03	29.821530	07	28	12.527	+22	00	51.76	+0.004	+0.06
2005	03	30.744424	07	28	30.865	+22	01	09.50	+0.016	+0.09
2005	03	31.779180	07	28	26.908	+22	01	47.97	+0.012	-0.00

(6S) Титан

2004	01	02.897682	06	41	04,751	+22	24	53.37	+0.011	+0.07
2004	01	23.853065	06	34	26.216	+22	34	02.12	+0.012	-0.04
2004	01	24.759440	06	34	12.526	+22	34	52.80	+0.010	+0.03
2004	02	19.786060	06	27	57.763	+22	42	23.44	-0.003	-0.09
2004	03	04.828526	06	26	50.442	+22	46	21.91	+0.025	+0.08
2004	03	09.802437	06	27	05.507	+22	45	41.97	+0.009	-0.06
2004	03	11.741310	06	27	17.248	+22	46	39.43	+0.005	-0.04
2004	04	01.743004	06	29	37.682	+22	50	10.30	-0.001	-0.17
2005	02	03.837547	07	35	31.118	+21	39	31.47	+0.007	-0.02
2005	02	09.818150	07	34	09.952	+21	43	30.83	+0.004	-0.01
2005	02	23.867468	07	30	38.103	+21	51	50.25	+0.007	+0.08
2005	03	22.745015	07	27	47.894	+22	01	33.34	-0.003	+0.06
2005	03	28.838025	07	28	16.831	+22	00	23.26	+0.003	-0.03
2005	03	29.821530	07	28	24.480	+22	00	43.17	+0.005	+0.14
2005	03	30.744424	07	28	30.865	+22	01	05.96	+0.015	-0.02
2005	03	31.779180	07	28	36.620	+22	01	32.75	+0.001	-0.06

(S8) Япет

2004	01	02.897682	06	40	35.946	+22	24	07.01	+0.005	-0.17
2004	01	23.853065	06	34	25.445	+22	33	22.85	+0.008	-0.11
2004	01	24.759440	06	34	12.068	+22	33	52.67	+0.009	-0.09
2004	03	04.828526	06	26	52.652	+22	47	38.41	+0.031	-0.19
2004	03	09.802437	06	26	38.111	+22	47	30.30	+0.010	-0.00
2004	03	11.741310	06	26	36.764	+22	47	23.50	+0.005	-0.02
2004	04	01.743004	06	29	13.224	+22	46	33.88	-0.001	-0.03
2005	02	03.837547	07	35	03.743	+21	38	47.61	+0.006	-0.15

2005 02 09.818150	07 33 22.910	+21 42 49.14	+0.009	-0.00
2005 02 23.867468	07 30 39.735	+21 51 50.02	+0.024	-0.22
2005 03 03.762155	07 29 43.724	+21 56 21.73	+0.012	-0.18
2005 03 28.838025	07 28 33.631	+22 03 11.98	+0.008	+0.01
2005 03 29.821530	07 28 34.344	+22 03 08.69	+0.000	+0.07
2005 03 31.779180	07 28 36.833	+22 02 57.23	+0.008	-0.02

В таблице 3 приводятся координаты спутников относительно Титана, вычисленные по опорным звездам методом шести постоянных в системе экватора и равноденствия J2000.0. Момент наблюдений - в системе UTC, X,Y - расстояния между спутником и Титаном, (O-C)_X, (O-C)_Y - сравнение результатов, полученных по опорным звездам с теорией TASS-1.7.

Таблица 3. Координаты спутников Сатурна относительно Титана.

Момент наблюдений UTC	X arcsec	Y arcsec	(O-C) _X , arcsec	(O-C) _Y arcsec
Энцелад-Титан				
2004 01 02.897682	+148.32	+43.68	-0.12	-0.09
2004 01 23.853065	-130.40	+37.00	-0.11	-0.13
2004 01 24.759440	-235.55	+9.29	-0.06	-0.04
2004 02 19.786060	+131.14	+51.46	+0.17	+0.05
2004 03 09.802437	-66.43	+88.15	-0.01	+0.12
2004 03 11.741310	-136.80	+27.83	-0.13	+0.09
2004 04 01.743004	-38.04	-66.49	+0.15	+0.06
2005 02 03.837547	+239.55	+14.89	-0.08	-0.04
2005 02 23.867468	-33.50	+70.80	+0.00	-0.00
2005 03 22.745015	+182.64	+1.79	+0.21	-0.01
2005 03 29.821530	-161.84	+51.60	+0.02	-0.06
2005 03 30.744424	-139.75	+23.84	-0.04	-0.08
2005 03 31.779180	-183.52	-27.92	-0.07	-0.05
Тэффия - Титан				
2004 01 02.897682	+233.79	+58.89	-0.09	-0.07
2004 01 23.853065	-117.96	+63.08	+0.13	+0.03
2004 01 24.759440	-241.09	+2.66	-0.01	-0.02
2004 02 19.786060	+137.48	+71.46	+0.03	-0.04
2004 03 04.828526	+198.46	-22.78	-0.11	-0.20
2004 03 09.802437	-76.88	+85.90	-0.10	+0.02
2004 03 11.741310	-199.87	+40.84	+0.03	-0.02
2004 04 01.743004	-96.47	-95.50	+0.04	+0.10
2005 02 03.837547	+199.30	-4.62	+0.02	-0.20
2005 02 09.818150	-92.05	+45.42	-0.01	+0.00
2005 02 23.867468	-29.99	+93.95	+0.02	+0.00
2005 03 03.762155	-68.43	-89.25	-0.06	+0.08
2005 03 22.745015	+133.17	-28.08	+0.11	-0.12
2005 03 28.838025	-57.79	+50.46	+0.10	+0.02
2005 03 29.821530	-162.95	+55.24	-0.06	+0.04
2005 03 30.744424	-152.58	+3.55	+0.02	-0.01
2005 03 31.779180	-226.37	-5.13	+0.05	+0.07
Диона - Титан				
2004 01 02.897682	+140.53	+30.89	+0.02	-0.02
2004 01 23.853065	-176.83	+72.19	+0.04	-0.09
2004 01 24.759440	-241.74	-6.67	-0.03	-0.03

2004 02 19.786060	+208.48	+82.81	+0.08	-0.05
2004 03 04.828526	+176.46	+21.60	+0.18	-0.10
2004 03 09.802437	+16.80	+100.28	-0.07	+0.01
2004 03 11.741310	-138.47	+16.72	+0.01	-0.02
2004 04 01.743004	-113.99	-80.70	+0.09	+0.13
2005 02 03.837547	+264.28	+19.80	+0.09	+0.02
2005 02 09.818150	-106.71	+76.63	+0.14	-0.06
2005 02 23.867468	-23.70	+103.31	-0.06	+0.05
2005 03 03.762155	-2.61	-54.33	-0.00	+0.16
2005 03 22.745015	+210.57	+8.20	+0.10	-0.07
2005 03 28.838025	-115.99	+79.57	+0.07	+0.06
2005 03 29.821530	-148.50	+17.82	-0.12	-0.20
2005 03 30.744424	-120.73	+30.79	-0.02	+0.00
2005 03 31.779180	-246.49	-9.70	+0.07	+0.12

Рея - Титан

2004 01 02.897682	+149.65	+16.11	-0.04	-0.09
2004 01 23.853065	-202.65	+76.74	+0.08	-0.05
2004 01 24.759440	-283.58	+1.21	+0.02	-0.05
2004 02 19.786060	+143.82	+92.75	-0.01	+0.00
2004 03 04.828526	+114.11	+10.14	+0.04	-0.07
2004 03 09.802437	-117.04	+73.20	-0.02	+0.05
2004 03 11.741310	-78.64	+33.05	+0.01	-0.01
2004 04 01.743004	-127.36	-105.44	+0.08	+0.11
2005 02 03.837547	+194.23	-21.13	+0.06	-0.06
2005 02 09.818150	-52.81	+72.77	+0.03	-0.09
2005 02 23.867468	+40.12	+117.44	+0.10	+0.03
2005 03 03.762155	+53.87	-88.50	-0.12	+0.05
2005 03 22.745015	+229.70	+15.97	+0.07	-0.02
2005 03 28.838025	-159.26	+61.56	+0.06	-0.05
2005 03 29.821530	-166.23	+8.58	-0.01	-0.07
2005 03 30.744424	-110.37	+3.53	+0.01	+0.11
2005 03 31.779180	-135.05	+15.22	+0.14	+0.05

Япет - Титан

2004 01 02.897682	-399.44	-46.36	-0.10	-0.14
2004 01 23.853065	-10.68	-39.26	-0.06	-0.06
2004 01 24.759440	-6.35	-60.12	-0.02	-0.11
2004 03 09.802437	-378.90	+108.33	+0.05	+0.05
2004 03 11.741310	-559.88	+44.06	+0.03	+0.00
2004 04 01.743004	-338.20	-216.41	-0.08	+0.14
2005 02 03.837547	-381.65	-43.86	-0.04	-0.13
2005 02 09.818150	-655.52	-41.69	+0.04	+0.00
2005 03 03.762155	+335.14	-108.44	-0.04	+0.11
2005 03 28.838025	+233.60	+168.72	+0.03	+0.04
2005 03 29.821530	+137.14	+145.51	-0.09	-0.06
2005 03 31.779180	+2.96	+84.48	+0.09	+0.03

3. Анализ точности наблюдений и оценка точности теорий движения

Анализ результатов наблюдений производился на основе сравнения с эфемеридами DE405 для Сатурна и TASS-1.7 для спутников, а также на основе сравнения результатов, полученных на одной пластинке по 5-6 экспозициям и по 5-6 спутникам - для определения положений самой планеты.

В таблице 4 приводятся средние значения О-С для Сатурна и спутников по всему наблюдательному периоду и оценка внешних ошибок положений - для звездных координат.

Таблица 4. Средние значения (О-С) и внешние ошибки экваториальных координат Сатурна и спутников.

Объект	$(O-C)_{\alpha \cos \delta}$	$(O-C)_{\delta}$	$\sigma_{1\alpha \cos \delta}$	$\sigma_{1\delta}$	n
	<i>arcsec</i>				
Сатурн	+0.18"	-0.03"	$\pm 0.07"$	$\pm 0.07"$	17
	± 02	± 02			
Мимас	+0.17	-0.06	0.22	0.10	4
Энцелад	+0.05	-0.02	0.10	0.08	13
Тэфия	+0.10	-0.03	0.08	0.09	17
Диона	+0.14	-0.03	0.12	0.08	17
Рея	+0.13	-0.02	0.10	0.07	16
Титан	+0.10	-0.00	0.10	0.08	16
Япет	+0.13	-0.08	0.12	0.09	14

В этой таблице n - число положений каждого объекта, определенных по 5- 6 разномоментным экспозициям на каждой пластинке.

Точность определения координат Сатурна по спутникам без измерения изображений самого Сатурна оказалась высокой: $\pm 0.07''$ для одного положения планеты, определенного по 6 спутникам на каждой фотопластинке. Сравнение координат Сатурна с теорией DE405 показало систематическую величину О-С: по прямому восхождению $+0.127''$, по склонению $-0.029''$. Как видно из таблицы, О-С спутников имеют те же знаки и близкие величины, что свидетельствует о неточности эфемериды Сатурна порядка $0.1''$. Этот результат согласуется с результатом определения координат Сатурна в работе [5].

Достоинством этого метода определения координат Сатурна является его независимость от ошибок, обусловленных качеством изображений планеты на фотографиях (так же и на ПЗС). Точность определения этих координат определяется точностью измерений, точностью координат звезд в опорном каталоге (ошибка редукции) и точностью теорий движения спутников. В нашем исследовании удастся разделить эти ошибки и оценить точность теории движения спутников следующим образом.

Внутренняя ошибка одного положения Сатурна, определенного по 5-6 спутникам на одной пластинке, равна (см. табл.1):

$$\varepsilon_{\alpha \cos \delta} = \pm 0.031'' , \quad \varepsilon_{\delta} = \pm 0.027''$$

Внутренняя ошибка одного положения Сатурна, определенного только по одному спутнику, равна:

$$\varepsilon_{1\alpha \cos \delta} = \pm 0.076'' , \quad \varepsilon_{1\delta} = \pm 0.067''$$

$\varepsilon_{1\alpha}$, $\varepsilon_{1\delta}$ состоят из ошибок: (1) измерений спутника ($\varepsilon_{m\alpha}$, $\varepsilon_{m\delta}$), (2) ошибок редукции в методе б постоянных ($\varepsilon_{r\alpha}$, $\varepsilon_{r\delta}$), (3) ошибок теории движения спутника ($\varepsilon_{c\alpha}$, $\varepsilon_{c\delta}$). По нашим оценкам на основании опыта наблюдений: $\varepsilon_{m\alpha, \delta} = 0.05''$, $\varepsilon_{r\alpha, \delta} = 0.04''$. Отсюда ошибка теории движения спутников оценивается как: $\varepsilon_{c\alpha, \delta} = 0.03''$. Эта оценка согласуется с оценкой точности теорий движения главных спутников Сатурна, дающейся на сайте JPL: <http://ssd.jpl.nasa.gov>.

В таблице 5 приводится оценка точности относительных координат спутников по отношению к Титану, полученных двумя методами астрометрической редукции: методом с опорными звездами (S_x^* , S_y^*) и методом "след-масштаб" (S_x^{WE} , S_y^{WE}).

Таблица 5. Точность относительных координат спутников.

Пары спутников	S_x^*	S_y^*	S_x^{WE}	S_y^{WE}	n
	a r c s e c				
Энцелад - Титан	±0.09"	±0.07"	±0.10"	±0.16"	13
Тэфия - Титан	0.07	0.09	0.13	0.17	17
Диона - Титан	0.08	0.09	0.07	0.17	17
Рея - Титан	0.06	0.07	0.08	0.14	17
Япет - Титан	0.06	0.09	0.11	0.21	13
Среднее	0.08	0.08	0.10	0.18	

Здесь n - то же, что и в таблице 4.

Как видно из таблицы, точность определения относительных координат по звездам выше, чем в методе "след-масштаб", особенно это касается координаты по склонению. Причиной этого является влияние ошибок ориентировки в методе "след-масштаб" на астрометрическую редукцию при больших расстояниях между спутниками, больших 50 секунд дуги. При использовании современных высокоточных звездных каталогов при редукции по звездам влияние этих ошибок минимально. Поэтому в данной работе мы приводим результаты, определенные по опорным звездам ТУСНО-2.

Литература

1. **Т.П. Киселева, И.С. Измайлов.** Результаты позиционных ПЗС-наблюдений спутников Сатурна и Юпитера на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке. // Известия ГАО в Пулковке, 2000, N 214, с. 333-343.
2. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко.** Результаты фотографических наблюдений спутников Сатурна в Пулковке в 1994 - 1998 гг. // Известия ГАО в Пулковке, 2000, № 214, с.344-355.
3. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко.** Результаты фотографических позиционных наблюдений спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке в 1999-2001 гг. // Известия ГАО в Пулковке, 2002, № 216, с.185-190.
4. **А.А. Kiselev.** Satellite astrometry with long-focus astrograph. // Galactic and Solar System Optical Astrometry. Proceedings of the Royal Greenwich Observatory and the Institute of Astronomy Workshop. Cambridge, June 21-24, 1993, p. 325-328.
5. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко, М.А. Можжаев.** Фотографические наблюдения спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в 2001-2003 гг. в Пулковке. Определение координат Сатурна по наблюдениям его спутников. // Известия ГАО в Пулковке, № 217, 2004, с.297-305.
6. **A. Vienne, L. Duriez,** 1995, A & A, v.297, p. 588.

**THE RESULTS OF PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF SATURN AND THE
MAIN SATURNIAN SATELLITES WITH THE 26-INCH REFRACTOR
IN PULKOVO IN 2004-2005**

Kiseleva T.P., Kalinichenko O.A.

Summary

The results of determinations of relative positions of the main Saturnian Satellites (1-6, 8) using photographic observations with 26-inch refractor of Pulkovo observatory in 2004-2005 are given. The positions of Saturn were determined using the observations of Satellites without measuring Saturnian images on the plates. The external errors of Saturnian positions were determined on the basis of comparison of observations with theories. The error of one position of Saturn is equal to 0.07", and that of Satellites is 0.10", 0.08" for both coordinates.

The accuracy of relative positions of Satellites is equal to 0.07" and 0.08". The systematic deviations of observations of Saturn from DE405 are +0.13" and -0.03". The catalogue TYCHO-2 was used for the astrometric reduction.

The study has been carried out with the financial support of RFBR №№ 04-02-16157, 04-07-90081.

О ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКЕ ДВУХ СПУТНИКОВ САТУРНА – ПРОМЕТЕЯ И ПАНДОРЫ

Мельников А.В., Шевченко И.И.

Путем численных экспериментов исследованы возможные режимы вращения двух спутников Сатурна – Прометей (С16) и Пандоры (С17). Показано, что в случае хаотического вращения оба спутника имеют преимущественную ориентацию: наибольшая ось фигуры спутника преимущественно направлена на Сатурн.

Введение

Теоретический анализ, проведенный в 80-х годах прошлого века Уиздомом и др. [1,2], показал, что спутник несферической формы на эллиптической орбите может вращаться хаотическим, непредсказуемым образом. При этом, согласно [1,2], наиболее вероятным кандидатом на хаотическое вращение из-за своей несферической формы и значительного эксцентриситета орбиты является спутник Сатурна Гиперион (С7). Моделирование кривых блеска Гипериона [3–7] подтвердило хаотический характер его вращения.

Недавно в теоретическом исследовании [8] было найдено, что два других спутника Сатурна – Прометей (С16) и Пандора (С17) – также могут находиться в состоянии хаотического вращения. Важный, прежде всего с наблюдательной точки зрения, вопрос состоит в следующем: существует ли преимущественная ориентация этих спутников при хаотическом вращении, или все ориентации равновероятны? То, что ориентация спутника при хаотическом вращении, вообще говоря, не обязательно должна быть изотропной, показывают численные эксперименты Уиздома [2] по расчетам вращения Фобоса в окрестности сепаратрис спин-орбитального резонанса 1:2 (см. Рис. 5 статьи [2]).

Знать ответ на этот вопрос в случае Прометей и Пандоры важно для извлечения выводов о характере вращения спутников из наблюдательной информации, в частности, из информации, поступающей с космического аппарата «Кассини».

Система координат и уравнения движения

Считаем далее, что спутник представляет собой несферическое твердое тело, движущееся по невозмущенной эллиптической орбите вокруг планеты. Планета является гравитирующей точкой. Положение спутника на орбите определяется истинной аномалией f . Форма спутника описывается трехосным эллипсоидом инерции с главными полуосями $a > b > c$ и главными центральными моментами инерции $A < B < C$. Динамика трехмерного вращательного движения спутника определяется параметрами e , c/b , b/a и начальными условиями движения. Угловые скорости вращения выражаются в единицах среднего движения, расстояния «спутник – планета» – в единицах большой полуоси эллипса орбиты. Один орбитальный период соответствует 2π единицам времени.

Для описания ориентации спутника используем инерциальную систему координат $Oxyz$, идентичную применявшейся в работе Уиздома [2]. Система определена исходно в перигентре орбиты следующим образом: ось x направлена по вектору «перигентр орбиты спутника – планета», ось y параллельна вектору орбитальной скорости в перигентре, ось z ортогональна орбитальной плоскости и дополняет систему до «пра-

вой». Ориентация спутника относительно осей системы координат $Oxyz$ определяется последовательностью поворотов на углы Эйлера θ , ϕ , ψ из положения совпадения главных полуосей инерции с осями системы координат в перицентре орбиты до их реального положения. Повороты проводятся в следующей последовательности [2]: сначала делается поворот на угол θ вокруг оси c , затем поворот на угол ϕ относительно новой оси b и, наконец, поворот на угол $-\psi$ относительно новой оси a до совпадения осей инерции спутника с их реальным положением в пространстве.

Вращательную динамику спутника описывают динамические и кинематические уравнения Эйлера. Они имеют следующий вид [1,2,7,9]:

$$\begin{cases} A \frac{d\omega_a}{dt} - \omega_b \omega_c (B - C) = -3 \frac{GM}{r^3} \beta \gamma (B - C), \\ B \frac{d\omega_b}{dt} - \omega_c \omega_a (C - A) = -3 \frac{GM}{r^3} \gamma \alpha (C - A), \\ C \frac{d\omega_c}{dt} - \omega_a \omega_b (A - B) = -3 \frac{GM}{r^3} \alpha \beta (A - B), \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_a = -\frac{d\theta}{dt} \sin \phi + \frac{d\psi}{dt}, \\ \omega_b = \frac{d\theta}{dt} \cos \phi \sin \psi + \frac{d\phi}{dt} \sin \psi, \\ \omega_c = \frac{d\theta}{dt} \cos \phi \cos \psi - \frac{d\phi}{dt} \cos \psi. \end{cases}$$

Здесь G – универсальная гравитационная постоянная, M – масса планеты, ω_a , ω_b и ω_c – проекции вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ на соответствующие оси инерции спутника; $r = a(1 - e \cos E)$ – расстояние «спутник – планета», a и E – большая полуось орбиты и эксцентрическая аномалия, соответственно. Для направляющих косинусов главных осей инерции относительно направления на планету имеем [7]:

$$\begin{cases} \alpha = \cos \phi \cos(\theta - f), \\ \beta = -\cos \psi \sin(\theta - f) + \sin \phi \sin \psi \cos(\theta - f), \\ \gamma = \sin \psi \sin(\theta - f) + \sin \phi \cos \psi \cos(\theta - f). \end{cases}$$

Численные эксперименты

В используемой нами системе координат угол ϕ есть угол между наибольшей осью фигуры (осью наименьшего момента инерции) спутника и плоскостью орбиты, а угол, равный $\theta - f$, есть угол между направлением на планету и плоскостью, содержащей указанную ось и ортогональной плоскости орбиты. Уиздом [2] посредством численного интегрирования уравнений трехмерного вращательного движения построил проекции траектории движения на плоскость $(\phi, \theta - f)$ в случае Фобоса (Рис. 5 статьи [2]). Рассматривалось вращательное движение Фобоса с модельными начальными условиями вблизи сепаратрис резонанса 1:2 с орбитальным движением. Плоское вращательное движение Фобоса является неустойчивым относительно наклона оси вращения не только вблизи сепаратрис, но и практически во всей области данного резонанса в фазовом пространстве [2]. Рис. 5 статьи [2] наглядно демонстрирует, что пространственное вращение Фобоса с такими начальными условиями не является вполне беспорядочным: имеется предпочтительная ориентация большой оси фигуры спутника по направлению на планету.

Предпримем аналогичное исследование возможного хаоса во вращении Прометей и Пандоры. Для Прометей полагаем $e = 0.002$, $c/b = 0.680$, $b/a = 0.676$; для Пандоры — $e = 0.004$, $c/b = 0.705$, $b/a = 0.800$. Приведенные данные о величинах e , c/b и b/a взяты из работы [10].

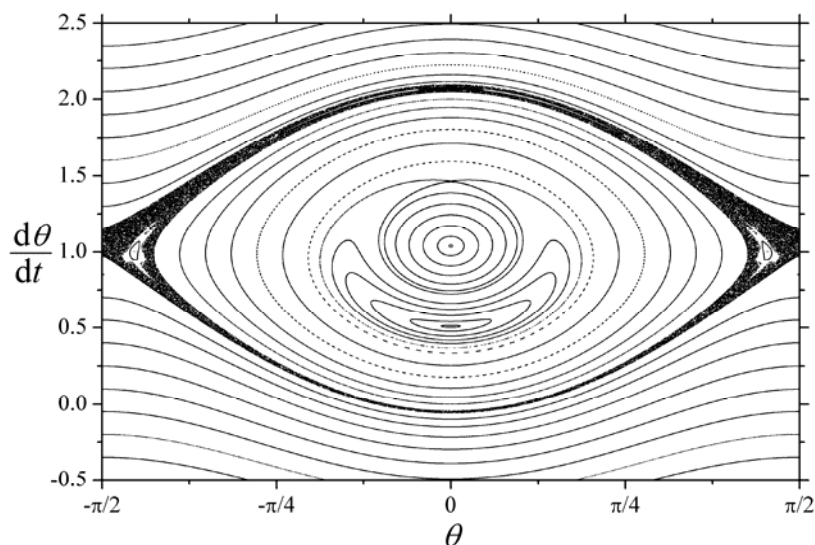


Рис. 1. Сечение фазового пространства вращательного движения

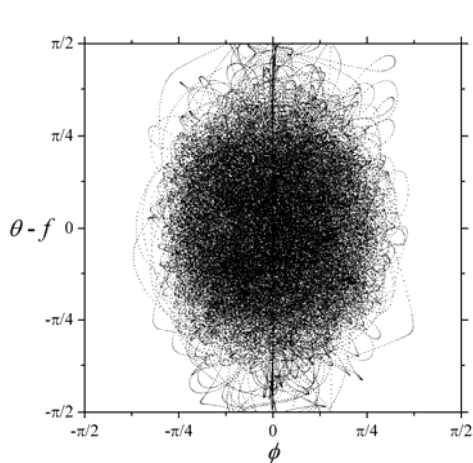
для $e = 0.002$, $c/b = 0.680$, $b/a = 0.676$ (Прометей).

Выполним численное интегрирование уравнений вращательного движения для указанных значений параметров. В качестве начальных условий, задающих ориентацию и скорость вращения спутника относительно собственного центра масс, возьмем следующие значения: $\theta = \pi/2$, $\phi = 10^{-4}$, $\psi = 0$, $d\theta/dt = 1$, $d\phi/dt = d\psi/dt = 0$. Они соответствуют начальным данным внутри хаотического слоя на определенном в перигентре орбиты сечении фазового пространства плоского вращательного движения спутника (см. Рис. 1). Интегрирование проводим на промежутке времени в 10000 орбитальных периодов. Используется интегратор Дормана–Принса [11]. Данные об ориентации выводились на шаге, равном $1/100$ орбитального периода, то есть всего выводился один миллион точек.

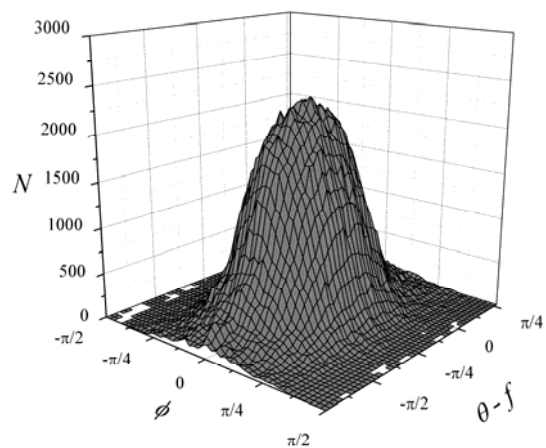
На Рис. 2а и 3а точками показаны проекции полученных траекторий на плоскость $(\phi, \theta - f)$ для обоих спутников, а на Рис. 2б и 3б — трехмерные графики плотности точек на этой плоскости. На рисунках с проекциями траекторий приведены результаты интегрирования на промежутке в 1000 орбитальных периодов, а графики плотности построены на основе результатов интегрирования на промежутке в 10000 орбитальных периодов. Из рисунков четко видно, что в хаотическом режиме трехмерного вращения оба спутника имеют преимущественную ориентацию наибольшей оси в направлении на планету.

Согласно [12], у коорбитальных Прометей и Пандоры большие полуоси орбит равны соответственно 139400 км и 141700 км; средний радиус Сатурна равен 57600 км. Относительная площадь видимого с поверхности спутника диска Сатурна (относительно площади небесной полусферы) составляет 8.9% для Прометей и 8.6% для Пандоры, столько же времени в среднем большие оси фигур этих спутников должны быть ориентированы в направлении на планету при полностью беспорядочном «кувыркании». На самом же деле, как следует из описанного численного эксперимента, у Прометей большая ось фигуры направлена на Сатурн в течение $\approx 30\%$ (с точностью до двух значащих цифр), а у Пандоры — в течение $\approx 22\%$ всего времени интегрирования, то есть «норма» превышена соответственно в ≈ 3.3 и ≈ 2.6 раза.

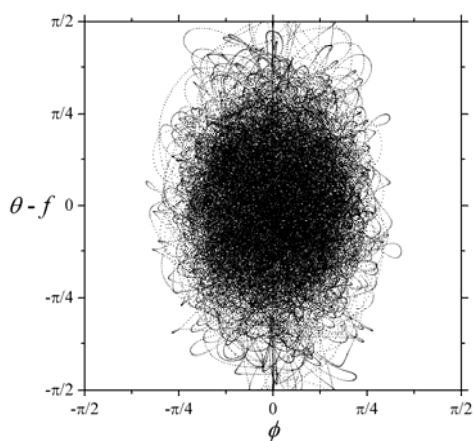
Анизотропия ориентации спутников при хаотическом вращении способна затруднить выяснение характера вращения из фотографий и кривых блеска.



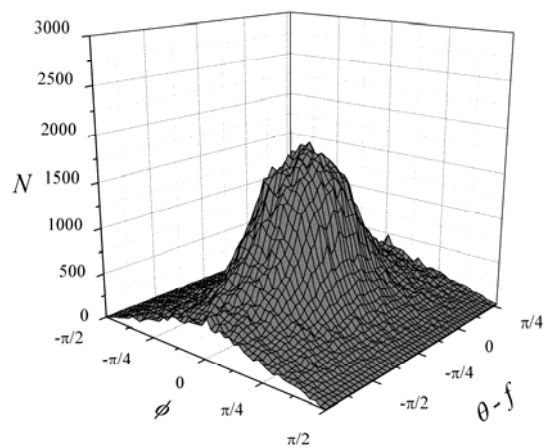
(a)



(б)

Рис. 2. Ориентация Прометея при хаотическом вращении.

(a)



(б)

Рис. 3. Ориентация Пандоры при хаотическом вращении.

Заключение

Итак, в настоящей работе приведены результаты численно-экспериментального исследования ориентации двух спутников Сатурна – Прометея и Пандоры – при их возможном хаотическом вращении. Показано, что у Прометея и Пандоры присутствует преимущественная ориентация наибольшей оси фигуры спутника по направлению на планету. Это затрудняет извлечение выводов о характере вращения этих спутников из наблюдений, поскольку наблюдаемое вращение может быть схоже с обычным синхронным вращением.

Работа поддержана РФФИ (проект 05-02-17555). А.В. Мельников благодарит Фонд содействия отечественной науке за оказанную финансовую поддержку.

Литература

1. **Уиздом и др.** (Wisdom J., Peale S.J., and Mignard F.) The chaotic rotation of Hyperion // Icarus. 1984. V.58. №2. P.137–152.
2. **Уиздом** (Wisdom J.) Rotational dynamics of irregularly shaped natural satellites // Astron. J. 1987. V.94. P.1350–1360.
3. **Клаветтер** (Klavetter J.J.) Rotation of Hyperion. I. Observations // Astron. J. 1989a. V.97. №2. P.570–579.
4. **Клаветтер** (Klavetter J.J.) Rotation of Hyperion. II. Dynamics // Astron. J. 1989b. V.98. №5. P.1855–1874.
5. **Томас и др.** (Thomas P.C., Black G.J., Nicholson P.D.) Hyperion: rotation, shape and geology from Voyager images // Icarus. 1995. V.117. №1. P.128–148.
6. **Блэк и др.** (Black G.J., Nicholson P.D., Thomas P.C.) Hyperion: rotational dynamics // Icarus. 1995. V.117. №1. P.149–161.
7. **Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н. и др.** Наблюдения и теоретический анализ кривых блеска естественных спутников планет // Астрон. Вестник. 2002. Т.36. №3. С.269–281.
8. **Куприянов и Шевченко** (Koupryanov V.V., Shevchenko I.I.) Rotational dynamics of planetary satellites: A survey of regular and chaotic behavior. // Icarus. 2005. V.176. P.224–234.
9. **Белецкий В.В.** Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука. 1965. 416 с.
10. **Éphémérides Astronomiques.** 1999. Annuaire du Bureau des Longitudes. Masson. Paris.
11. **Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.** Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир. 1990. 512 с.
12. **Френч и др.** (French R.G., McGhee C.A., Dones L. et al.) Saturn's wayward shepherds: the peregrinations of Prometheus and Pandora. // Icarus. 2003. V.162. P.143–170.

ON THE ROTATIONAL DYNAMICS OF TWO SATURN'S SATELLITES PROMETHEUS AND PANDORA

Melnikov A.V., Shevchenko I.I.

Summary

Possible rotation regimes of two satellites of Saturn, Prometheus (S16) and Pandora (S17), are studied using numerical experiments. It is shown that in case of chaotic rotation both satellites have preferred orientations: the largest axis of the satellite is preferably directed towards Saturn.

КАТАЛОГ ПОЛОЖЕНИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОЗВЕЗД СЕВЕРНОГО НЕБА

Нарижная Н.В., Рыльков В.П.

Обработано большое количество фотопластинок Пулковского нормального астрографа по программе наблюдений галактических радиоисточников (Pul GRS). Получена система опорных звезд вокруг 66 северных радиозвезд для дальнейших ПЗС-наблюдений. Цель таких наблюдений - уточнение координат радиозвезд, которые могут быть галактическими реперами при определении связи опорных систем координат, основанных на оптических и РСДБ-наблюдениях астрометрических внегалактических радиоисточников.

Получены координаты 63 радиозвезд северного неба в диапазоне от 2.4 до 12 зв. величин. Внутренняя точность положений радиозвезд в пределах 0.02-0.12". Приведены данные о числе опорных звезд в 30' окрестности для всех 63 галактических радиозвезд. Весь каталог содержит более 10 тысяч звезд от 7 до 16 зв. величины.

Создание системы опорных звезд для наблюдений галактических радиоисточников (радиозвезд - GRS) является одной из важнейших задач астрометрии, подобно наблюдениям внегалактических радиоисточников (ERS), для привязки оптических астрономических координатных систем к системе ICRS, основанной на высокоточных радиоинтерферометрических VLBI-наблюдениях [1].

В Пулкове программа фотографических наблюдений 116 галактических радиозвезд (Pul GRS) северного неба до -10° склонения была начата осенью 1994 г. на Пулковском Нормальном Астрографе (33/346). Список объектов для наблюдения был сформирован из списка галактических радиозвезд H.G. Walter [2]. Предполагалось получить фотографические экваториальные координаты непосредственно самих радиоисточников и создать плотную систему опорных звезд в их окрестности для наблюдений с CCD-детекторами. Программа Pul GRS и методика получения точных положений радиозвезд и окружающих их звезд описана в работе [3]. Сейчас мы имеем приблизительно 300 фотопластинок для более чем 90 областей: две-три пластинки для каждой как минимум. Для каждого поля одна пластинка была получена с несколькими маленькими экспозициями и с ослабляющим яркие радиозвезды фильтром. Число и продолжительность экспозиций было пропорционально их звездной величине. Для получения опорных звезд в окрестности GRS были получены фотопластинки с большими экспозициями (12-20 минут).

В настоящее время мы закончили измерения и обработку фотопластинок для 66 каталогов окрестностей GRS северного неба. Измерялись практически все видимые на пластинке звезды в радиусе до 15-20 угловых минут от центра в радиоисточнике. В табл.1 даны средние эпохи наблюдений для каждого поля и статистика полученных звезд. Для более 10 тысяч звезд были получены астрометрические координаты для окрестностей 66 GRS. Положения всех этих звезд приведены на эпоху равноденствия J2000.0. Положения 8087 звезд были получены впервые. Ошибки редукции (ошибки единицы веса) при использовании 18-32 опорных звезд из каталогов PPM, SMC в начальной стадии обработки и Tycho-2 или UCAC в настоящее время, составили 0,20-0,30" для обеих координат. Внутренняя сходимость при обработке разных пластинок равна 0,02-0,10" по прямому восхождению и склонению. В каждом поле диаметра до 30-40 угловых минут вокруг GRS получалось от 100 до 300 звезд. Число полученных

звезд в каждом поле приводится в табл.1 в последних столбцах. В скобках последнего столбца таблицы дано число звезд каталога Tycho-2 для той же площадки. Фотографические положения самих радиозвезд для всех полей размещены там же.

Таблица 1. Фотографические координаты 63 галактических радиозвезд и число опорных звезд в 20' окрестностях GRS

N п/п	Идентификация источника	Эпоха наблюд. 1990 +	J2000, RA			Tycho-2 в ISRF DE			Ч и с л о з в е з д всего нов. Tycho			
			h	m	s	o	/	//				
1	BD+08	19v	8.877	00	14	58.825	08	49	15.40	178	141	(7)
2	BD+23	106v	5.078	00	47	20.358	24	16	02.01	126	111	(1)
3	BD+06	189v	6.370	01	16	55.098	06	48	42.28	131	110	(5)
4	BD-00	210	5.055	01	22	50.328	00	42	44.45	169	129	(16)
5	BD+06	211v	4.776	01	22	56.722	07	25	07.96	123	106	(15)
6	BD+22	226	7.038	01	25	35.652	23	30	41.48	145	118	(8)
7	BD+69	179v	5.044	02	48	55.480	69	38	03.20	135	119	(27)
8	BD+40	673	5.014	03	08	10.096	40	57	20.52	146	110	(7)
9	BD+47	781v	4.776	03	13	22.355	48	06	31.53	155	121	(6)
10	BD+59	609v	6.022	03	14	05.327	59	33	48.55	154	120	(9)
11	BD+28	532	5.052	03	26	35.365	28	42	54.66	145	116	(9)
12	BD+25	580	5.052	03	37	10.937	25	59	29.20	132	113	(11)
13	HD 283447	v	6.784	04	14	12.918	28	12	12.34	153	140	(7)
14	BD+49	1150v	6.110	04	18	14.567	50	17	43.93	145	115	(6)
15	BD+26	730	6.066	04	36	48.164	27	07	56.30	154	151	(7)
16	BD+18	734	5.016	04	48	42.065	18	42	35.85	152	119	(10)
17	BD+58	805	6.110	05	06	12.124	59	01	17.04	132	125	(11)
18	BD+03	1007	6.580	05	41	26.751	03	46	40.76	166	127	(11)
19	BD+20	1162	5.014	05	54	23.034	20	16	34.75	137	122	(5)
20	BD+07	1055	5.016	05	55	10.288	07	24	24.99	149	120	(2)
21	BD+31	1179v	5.011	06	03	53.660	31	19	41.16	144	121	(9)
22	BD+29	1590	5.574	07	43	18.681	28	53	01.55	139	120	(3)
23	BD+57	1118	5.255	08	02	35.776	57	16	25.31	168	131	(8)
24	BD+32	1772v	5.260	08	39	08.545	31	47	44.51	127	111	(8)
25	BD+55	1317v	5.249	09	09	55.958	54	29	18.60	143	125	(8)
26	BD+25	2191	7.219	10	00	01.739	24	33	09.97	154	137	(17)
27	BD+83	297	5.241	10	31	04.830	82	33	30.79	147	128	(11)
28	BD+57	1277	7.218	10	35	09.616	57	04	57.65	168	130	(17)
29	BD+61	1211	6.192	10	55	43.586	60	28	09.67	149	128	(5)
30	BD+52	1579v	5.244	11	40	46.367	51	59	53.29	155	141	(12)
31	BD+73	549v	5.247	12	15	41.489	72	33	04.52	127	120	(11)
32	BD+36	2344v	5.246	13	10	36.927	35	56	05.39	143	117	(11)
33	BD+24	2592v	5.258	13	30	46.817	24	13	57.67	168	129	(13)
34	BD+37	2426	5.255	13	34	47.749	37	10	56.76	156	128	(16)
35	BD+30	2688v	5.310	15	39	15.230	29	37	19.63	151	129	(20)

Таблица 1 (продолжение). Фотографические координаты 63 галактических радиозвезд и число опорных звезд в 20' окрестностях GRS

п/п	Идентификация источника	Эпоха наблюд. 1990 +	J2000, RA			Tycho-2 в ISRF DE			Число звезд		
			h	m	s	o	/	//	всего	нов.	Tych
36	BD+26 2508	5.260	13	56	09.547	25	55	07.20	176	147	(13)
37	BD+22 2715	5.249	14	32	32.566	22	15	35.94	145	135	(13)
38	BD+39 2849v	6.215	15	13	32.550	38	34	05.69	181	115	(10)
39	BD+67 922v	5.310	16	01	41.038	66	48	10.06	146	123	(12)
40	BD+34 2750d	5.255	16	14	40.912	33	51	31.30	175	126	(12)
41	BD+60 1691p	5.310	16	39	03.959	60	41	59.06	149	122	(14)
42	BD+82 498	6.307	16	45	58.199	82	02	14.20	166	132	(9)
43	BD+49 2596v	4.605	17	10	25.605	48	57	56.50	162	128	(14)
44	BD+74 717v	4.655	17	32	41.283	74	13	38.23	168	129	(13)
45	I+26 228	4.660	17	50	25.124	70	45	36.24	172	137	(11)
46	BD+22 3245v	6.478	17	58	38.523	22	08	46.78	167	127	(4)
47	BD+29 3187	6.600	18	08	15.992	29	41	28.18	167	136	(5)
48	BD+33 3223	4.605	18	50	04.768	33	21	45.59	166	145	(31)
49	BD+49 2929	4.811	19	05	09.849	49	55	23.42	148	124	(7)
50	BD+52 2350v	4.811	19	08	25.839	52	25	32.84	153	129	(16)
51	BD+38 4010	7.712	20	19	32.411	38	43	53.99	230	142	(17)
52	BD+43 3571	5.964	20	20	27.958	43	51	16.14	210	142	(9)
53	BD+40 4220v	4.811	20	32	22.425	41	18	18.85	183	137	(26)
54	BD+27 3952v	4.627	21	02	25.871	27	48	26.36	175	131	(9)
55	BD+14 4668	4.627	21	44	31.240	14	46	19.73	147	125	(7)
56	BD+62 2007v	4.775	21	56	39.146	63	37	31.90	156	119	(4)
57	BD+43 4112v	6.858	22	01	30.737	43	53	25.27	208	129	(4)
58	BD+45 3813v	4.734	22	08	40.851	45	44	31.69	197	139	(8)
59	BD+48 3747	6.778	22	30	06.496	49	21	23.15	262	218	(4)
60	BD+52 3375v	4.775	23	09	30.047	53	02	39.77	158	131	(2)
61	BD+45 4283	4.734	23	37	33.747	46	27	31.55	194	131	(8)
62	BD+35 5110	7.419	23	49	40.944	36	25	31.03	158	130	(13)
63	BD+27 4642v	4.734	23	55	03.813	28	38	00.93	165	130	(17)

Почти половина из обработанных радиозвезд имеют признак переменности, что нами помечено в таблице знаком «V». Мы сравнивали наши результаты с положениями совпадающих радиозвезд из каталогов Tycho-2, PPM, CaMC и положениями GRS, полученными другими авторами [4]. Сравнение координат радиозвезд с их положениями в трех каталогах показало, что координаты радиозвезд из фотографических наблюдений на Нормальном астрографе в целом хорошо совпадают с результатами по каталогу PPM (фотографический), кроме двух очень ярких звезд HIP 14576 и 27989. Относительно наблюдений в визуальной области (каталог СМС) с CCD-детектором и широкополосных наблюдений в космосе (каталог Tycho), то сравнение показывает более значимые разности координат как в RA, так и в DE. В целом при сравнении совпадающих радиозвезд значительного систематического сдвига в положениях не наблюда-

ется. Как нами было отмечено [4], для большинства представленных радиозвезд их звездные величины в каталоге Tucho на 0.2-0.5^m слабее полученных из наземных наблюдений. Это можно было бы объяснить несовпадением фотометрических систем, однако есть ряд звезд (Hip N 23743, 20070 и 14576), для которых звездные величины практически совпадают. Проведенный анализ отклонений в положениях радиозвезд показывает, что достаточно большие расхождения обусловлены тем, что большинство изучаемых нами радиозвезд являются яркими объектами (2-12^m).

Полученные каталоги более 10 тысяч опорных звезд для наблюдений 63 GRS даны на среднюю эпоху наблюдения каждого поля. Для значительной части звезд, имеются собственные движения, заимствованные из отождествлений с каталогом UCAC2. Работа по получению каталогов звезд вокруг GRS в Лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН продолжается. Переход на качественно новый метод наблюдений на Нормальном астрографе с ПЗС-камерой, установленной в 2005 году, даст возможность повысить точность наблюдений галактических радиоисточников.

Литература

1. *Bulleten IAU*, 1993, 73, pp.3-19.
2. *H.G. Walter, R. Hering, Ch. de Vegt*, An astrometric catalogue of radio stars, 1991, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 86, pp.357-393.
3. *В.П. Рыльков, Н.В. Наризная*, Пулковская программа наблюдений галактических радиоисточников – Pul GRS, 1996, *Известия ГАО*, N 210, с.264-271.
4. *В.П. Рыльков, Н.В. Наризная*, Каталог звезд для ПЗС-наблюдений 14 галактических радиоисточников, 1998, *Известия ГАО*, №213, стр.41-47.
5. *В. Рыльков, Н. Наризная, А. Дементьева*, “Каталоги опорных звезд 13-16^m для ПЗС-наблюдений 35 внегалактических (ERS) и 64 галактических (GRS) радиоисточников”, сборник - *Proceedings of the workshop “Optical and radio sources – location and connection”*, 2003, Nikolaev, Ukraina, с.21-23.
6. *Vladimir Ryl'kov, Natalia Narizhnaya*, "The Catalogue of Reference Stars around 72 Galactic Radio Sources." *Romanian Astronomical Journal*, vol.15, Supplement, pp.187-189, Bucharest, 2005.

THE CATALOGUE OF POSITIONS OF GALACTIC RADIO SOURCES OF NORTHERN SKY

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

Summary

The program (Pul GRS) of photographic observations of 116 galactic radio stars (GRS) with declinations up to -10 degrees was started in the autumn of 1994 with the Pulkovo Normal Astrograph (33/346). Its objective was to obtain photographic coordinates of radio sources and create a reference system of stars in their vicinity.

The galactic radio stars can be used as the frames of reference when determining the relationship between the reference coordinate systems, based on optical and VLBI-observations of astrometric extragalactic radio sources. A catalogue of more than 10000 reference stars was obtained in a region about 20 arcmin near the GRS. The number of reference stars of 7-16 mag to each fields are given.

Coordinates of 63 radio stars in a range from 2.4 up to 12 mag was obtained. An interior accuracy of positions of radio stars is in a range 0.02-0.12". A comparison of the obtained coordinates with other catalogues was performed.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОК СВОДНОГО КАТАЛОГА ОПОРНЫХ ЗВЕЗД ВОКРУГ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

**Рыльков В.П.¹, Дементьева А.А.¹, Нарижная Н.В.¹,
Пинигин Г.И.², Майгурова Н.В.², Процюк Ю.И.²**

¹Россия, ГАО РАН, Пулковое, vryl@gao.spb.ru

²Украина, НАО, Николаев, pinigin@nao.nikolaev.ua

Для выполнения оптических CCD-наблюдений слабых астрометрических внегалактических радиоисточников (ERS) с целью их привязки к VLBI наблюдениям (системе ICRF), получен сводный каталог опорных звезд 10-16mag для 190 полей с ERS северного неба. В его состав входят три фотографических каталога: Пулковский – Pul-ERS (для 35 источников), Бухарестский – Vich (188 источников), Киевский – Kiev (115) и один, полученный на АМК Николаевской обсерватории, оснащенный CCD камерой (208 радиоисточников). Все наблюдения выполнены в течение одного десятилетия – в 90-е годы. Работа по получению сводного каталога продолжается и будут подключаться позиционные наблюдения с CCD-камерой на Пулковском нормальном астрографе и продолжающиеся наблюдения в других обсерваториях.

Используя собственные движения каталога UCAC2 (до 50° по склонению) сделаны сравнения положений совпадающих звезд с выборками звезд из этого каталога и из Карлсбергского каталога SMC13 (до 30° по склонению). Результаты сравнения с ним и каталогом UCAC2 показывают, что внешняя точность сводного каталога порядка 0.05-0.10". Внутренняя точность положений по обеим координатам в среднем не хуже 0.05". Все положения звезд в сводном каталоге даны: для звезд с выбранными из UCAC2 собственными движениями на эпоху и равноденствие J2000.0, для остальных - на эпоху наблюдения.

В настоящее время фундаментальная астрометрическая система координат (ICRF - The International Celestial Reference Frame) определена VLBI положениями около 600 компактных внегалактических радиоисточников (квazarов или ERS), причем 212 из них определяют саму систему. Они наблюдаются радиоинтерферометрическими методами (VLBI) с точностью до миллионных долей угловой секунды и за наблюдаемые промежутки времени не дают смещений на небесной сфере. Координаты астрометрических радиоисточников с достигнутой в настоящее время точностью в радиоастрометрии приведены в подробном исследовании S.Ma, et al. [1]. В силу объективно сложившихся обстоятельств (пропускания атмосферы и свойств человеческого глаза) наземная астрономия базируется на наблюдениях в оптическом диапазоне и вплоть до конца XX века ее базовыми основами были фундаментальные астрономические системы (FK4, FK5), основанные на оптических меридианных астрометрических наблюдениях с земной поверхности.

Для установления связи оптической и радио астрометрических систем координат наблюдения общих объектов в обоих диапазонах считаются наиважнейшей задачей наземной позиционной астрометрии, решение которой в оптике возможно только с помощью оснащенных ПЗС-приемниками телескопов из-за исключительно малой яркости большинства ERS из основного списка ERS. Трудность состоит еще и в том, что при редукции астрометрических координат переход от ярких опорных звезд к слабым осуществляется через 8-12 звездных величин с помощью двухступенчатой привязки (сначала получают промежуточную систему опорных звезд 14-16 mag), что приводит к дополнительным потерям точности определения оптических положений радиоисточни-

ков. Возникла необходимость создания первичной высокоточной системы слабых опорных звезд вокруг внегалактических радиоисточников.

В настоящее время выполняется много работ по созданию такой системы опорных звезд вблизи астрометрических ERS [2-5], основное назначение которых дать возможность прямого наблюдения ERS в оптическом диапазоне с достаточной точностью без многоступенчатой астрометрической привязки при редукации от ярких опорных звезд к слабым определяемым. Наша работа посвящена получению сводного каталога опорных звезд для CCD-матриц, покрывающих на небесной сфере квадрат порядка 15-20 угловых минут.

В нашем распоряжении авторами были предоставлены четыре оригинальных каталога звезд, полученных специально для будущих наблюдений слабых ERS с помощью CCD-детекторов [3]. Три из них получены фотографическим путем на телескопах астрографах, один на осевом меридианном круге с CCD-матрицей (табл.1). Фотографические наблюдения выполнены в 90-е годы прошлого столетия в Пулковской обсерватории на Нормальном астрографе (330/3464) – 74 поля ERS (обработано 35), в обсерватории Киевского университета на астрографе (200/4126) – 115 полей с ERS, в Румынской национальной обсерватории в Бухаресте на двойном астрографе (380/600) – 188 ERS. CCD-наблюдения 208 полей с ERS выполнены на аксиальном меридианном круге Николаевской обсерватории – АМС (180/2480).

Точность полученных положений системы опорных звезд Пулковских каталогов обычная фотографическая: ошибки редукации (ошибки единицы веса) по 15-25 опорным звездам каталога Tycho-2 в среднем 0,15-0,25". Усреднение положений звезд производилось по 3-4 пластинкам, средняя точность каждого положения в основном от 0,05 до 0,10".

Точность положений Киевского фотографического каталога подобна нашей. Особенность этого каталога состоит в том, что звезды в нем расположены в градусной зоне, поэтому при объединении его в сводный каталог довольно много звезд не вошли в сводный каталог. Бухарестские наблюдения выполнялись по киевской программе PIRS и при обработке использовались те же программы редукации, - точность положений полученных опорных звезд вокруг ERS такая же.

Для увеличения плотности и точности положений звезд в окрестностях ERS было решено объединить эти каталоги, полученные приблизительно в одни и те же эпохи. Поскольку каталоги получены на разных инструментах и даже разными методами регистрации изображения, было необходимо привести их положения к одной эпохе и изучить разности координат одних и тех же звезд на предмет систематических отклонений.

Таблица 1. Каталоги, входящие в сводный каталог опорных звезд вокруг ERS

место наблюдения	имя каталога	тип наблюдений	размер поля, мин	число полей	число звезд	эпоха наблюдений	звездные величины
Пулково	Pul ERS	фото	35x35	35	4500	1991-1995	10-16
Киев ГУ	PIRS-K	фото	60x60	115	2875	1989-1993	12-15
Бухарест	PIRS-B	фото	60x60	188	4700	1991-2000	12-15
Николаев	AMC1B	CCD	60x24	208	14403	1996-1998	12-14

Для значительной части звезд необходимые для решения этой задачи собственные движения звезд были взяты из каталога положений и собственных движений звезд UCAC2 [6] после их отождествления. Понятно, что рассматриваемые четыре каталога имеют разную значимость, т.е. разные веса при включении в сводный каталог. В каче-

стве веса нами взята кратность наблюдений звезды в каталогах. Поэтому наибольший вес измерений отдельных звезд имеет каталог Николаевской обсерватории: до 6 измерений каждой координаты, второй по значимости каталог Пулковской обсерватории: - от 3 до 5 пластинок на отдельные поля. Остальные содержат по одному измерению каждого поля звезд. Поэтому для выявления систематических отклонений было сделано сравнение нескольких полей каталогов AMC1B и PulERS, как содержащих наибольшее число совпадающих звезд поля. Каталоги Николаевских (с CCD-детектором) и Пулковских (фотографических) наблюдений были переведены на J2000.0 и вычислены разности положений совпадающих звезд. Средние значения таких разностей (O-C) и их с.к.о. приведены в табл.2. Для поля звезд ERS 0133+476 совпадающие звезды дают значительные отклонения положений по обеим координатам (рис.1).

Таблица 2. Средние разности положений совпадающих звезд AMC1B (Николаев) и Pul ERS (Пулково) для 9 каталогов (RA - в сек, DE – arcsec)

N пп	Имя Поля	Число звезд с μ в каталоге			средние значения (O-C) и ошибки	
		Ник	Пул	совпадает	RA \pm Err (s)	DE \pm Err (")
1	0026+346	106	148	57	-0.006 ± 0.047	-0.41 ± 0.43
2	0133+476	206	159	76	0.024 ± 0.047	-0.27 ± 0.35
3	0355+508	82	117	45	0.010 ± 0.034	-0.21 ± 0.31
4	0420+417	76	112	28	0.017 ± 0.045	-0.34 ± 0.44
5	0552+398	235	148	57	0.009 ± 0.033	-0.13 ± 0.36
6	0923+392	21	56	11	-0.060 ± 0.026	-0.50 ± 0.76
7	2200+420	278	92	53	0.007 ± 0.041	-0.19 ± 0.38
8	2337+264	98	92	44	0.018 ± 0.036	-0.23 ± 0.55
9	2351+456	78	110	25	-0.040 ± 0.047	0.03 ± 0.38

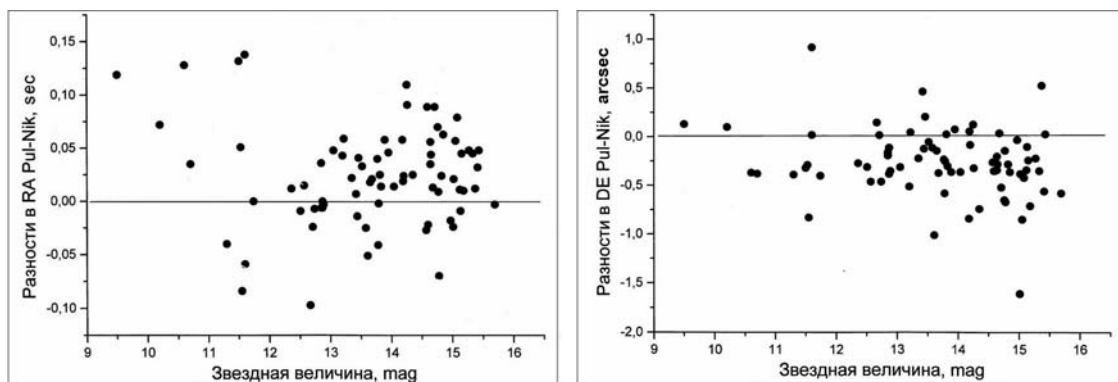


Рис.1. Разности координат в RA и DE для 76 совпадающих звезд Николаевского и Пулковского каталога для поля ERS 0133+476.

Сразу бросается в глаза наличие практически для всех 9 полей отрицательной составляющей по склонению. В прямом восхождении отметим наличие систематических составляющих, но для разных полей разных знаков. Было выполнено сравнение положений совпадающих звезд в исходных каталогах и со звездами каталога UCAC2 (USNO CCD Astrograph Catalog - N.Zacharias, nz@usno.navy.mil [6]). В исходных каталогах исключены звезды с большими расхождениями в положениях, кроме этого в каталогах Николаевской обсерватории авторами переработаны и исключены все сомни-

тельные наблюдения. В результате уменьшилось число полей и соответственно число звезд исходного Николаевского каталога [7-9].

Путем взаимного отождествления и выявления совпадающих звезд в каталогах были усреднены и включены в сводный каталог 9245 звезд для 151 поля вблизи ERS, имеющие собственные движения из UCAC2 (для северных склонений до +45-50°), а также положения более 4500 звезд, полученные из объединяемых каталогов, не имеющих собственных движений (для склонений более +50°). Все звезды, которые имеют собственные движения, переведены на эпоху и равноденствие J2000, для остальных приведены положения на эпоху наблюдения в эпоху равноденствия J2000.

Таким образом, для 191 поля квадрата стороной до 30 угловых минут с внегалактическими радиоисточниками ICRF нами получен каталог положений более 13500 опорных звезд (табл.3). На сегодняшний момент каталог неравномерен – довольно много полей содержит мало звезд. Это в основном поля, которые не входили в программы наблюдений в Пулково и Николаеве. Они будут расширены наблюдениями в следующие годы.

Таблица 3. Число опорных звезд сводного каталога в полях с астрометрическими ERS.

Имя поля	Число звезд	Имя поля	Число звезд	Имя поля	Число звезд	Имя поля	Число звезд	Имя поля	Число звезд
0003_066	52	0600_177	29	1144_402	31	1652_398	174	0016_731	176
0013_005	9	0607_157	11	1148_001	40	1656_053	30	0153_744	125
0026_346	196	0611_131	105	1155_251	38	1657_261	4	0212_735	200
0056_001	36	0642_214	157	1156_295	25	1717_178	167	0224_671	182
0106_013	41	0642_449	38	1213_350	36	1732_389	37	0454_844	150
0116_319	110	0657_172	160	1226_373	23	1743_173	17	0609_607	45
0119_115	20	0707_476	8	1228_126	49	1748_253	21	0615_820	141
0133_476	257	0710_439	43	1236_077	5	1749_096	208	0716_714	96
0146_056	37	0711_356	93	1252_119	50	1751_288	32	0804_499	33
0202_319	35	0722_145	80	1302_102	10	1821_107	242	0831_557	32
0221_067	18	0735_178	86	1308_326	19	1920_211	21	0833_585	39
0234_285	84	0738_313	33	1315_346	7	1923_210	179	0836_710	114
0235_164	30	0742_103	15	1323_321	41	1947_079	71	0917_624	34
0256_075	36	0745_241	80	1324_224	3	2005_403	323	0954_658	35
0300_470	170	0748_126	90	1328_307	37	2008_068	56	1031_567	34
0306_102	11	0814_425	33	1351_018	17	2029_121	30	1039_811	123
0309_411	169	0818_128	13	1354_195	34	2113_293	214	1311_678	21
0316_413	313	0827_243	48	1404_286	39	2121_053	45	1342_663	36
0319_121	33	0839_187	32	1413_135	196	2128_048	73	1418_546	104
0333_321	164	0851_202	65	1442_101	60	2131_021	60	1435_638	103
0336_019	37	0859_140	21	1459_480	39	2134_004	32	1547_507	35
0355_508	210	0859_470	36	1502_106	37	2136_141	87	1637_574	42
0400_258	74	0906_015	65	1510_089	38	2144_092	45	1738_476	36
0420_014	77	0912_029	15	1511_100	18	2145_067	81	1739_522	43
0420_417	202	0917_449	50	1532_016	61	2149_056	96	1749_701	152
0425_048	10	0923_392	79	1538_149	36	2150_173	37	1803_784	145
0428_205	38	0941_080	64	1546_027	61	2200_420	277	1807_698	152
0430_052	6	0952_179	33	1548_056	19	2201_315	175	1928_738	144
0434_188	5	0953_254	9	1555_001	69	2216_038	42	2007_776	162
0440_003	89	1004_141	58	1600_335	38	2230_114	36	2021_614	114

0446_112	11	1011_250	10	1606_106	51	2251_158	53	2030_547	33
0457_024	81	1020_400	23	1607_268	37	2253_417	140	2037_511	30
0458_020	41	1030_415	39	1611_343	82	2318_049	45		
0500_019	92	1038_064	39	1614_051	23	2319_272	76		
0506_101	62	1042_071	12	1622_253	4	2328_107	54		
0507_179	29	1111_149	45	1624_416	61	2337_264	135		
0528_134	46	1116_128	42	1633_382	68	2344_092	38		
0536_145	79	1117_146	35	1638_398	113	2351_456	159		
0552_398	275	1123_264	40	1641_399	261	2352_495	35		
0556_238	123	1128_385	36	1647_296	37				

Полученные нами индивидуальные каталоги каждого поля необходимо проверить на ошибки путем сравнения хотя бы с двумя независимо полученными каталогами. Из современных каталогов, содержащих достаточное количество звезд, нами выбраны два:

- 1 – UCAC2, который охватывает звезды до 16-18 mag до склонений $+40^{\circ}$:- 50° ,
- 2 – SMC13 для звезд от -3.2° до $+30.2^{\circ}$, [10].

Для проверки точности сводного каталога мы выбрали десять полей в склонении от 0 до $+30^{\circ}$, в которых число совпадающих с этими каталогами звезд достаточно велико. Это показано в табл.4, в которой дано число звезд поля сводного каталога и число совпадающих звезд в каждом поле с SMC13 и UCAC2. В таблице показано наличие остаточных систематических отклонений по прямому восхождению и склонению. Заметим, что в пределах 100 mas они остаются в RA, а для нескольких полей достигают 200 mas в DE. Если учесть, что в диапазоне от 12 до 16 звездной величины сами каталоги сравнения (SMC13 и UCAC2) имеют вну-тренние и внешние ошибки 50-100 mas, то наш сводный каталог вполне вписывается в эти точностные границы.

На рис.2 показано распределение более 10000 звезд (~75%) сводного каталога, имеющих оценки звездной величины из UCAC2 или полученные нами. Большинство определяемых звезд имеют величины от 12 до 15m, а разброс отклонений в сравниваемых каталогах находится в пределах -1 :- 1 arcsec по обеим координатам.

На рис.3 приведены разности координат в RA и DE для более 950 совпадающих с UCAC2 звезд. Значительные разности положений можно объяснить не только отклонениями в координатах, а еще и собственными движениями UCAC2, которыми приводили на эпоху сравнения.

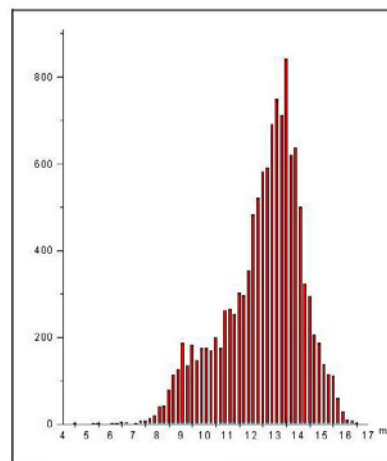


Рис.2. Распределение звезд в сводном каталоге.

Таблица 4. Сравнение совпадающих звезд для 10 полей объединенного каталога и звезд каталогов CMC13 и UCAC2 (RA – в сек, DE – arcsec)

N пп	Имя Поля	Число звезд с μ в каталоге		средние значения (O-C) и с.к.о.	
		Сводн.	Общих	RA \pm Err	DE \pm Err
CMC13					
1	0234+285	82	51	0.006 ± 0.017	-0.07 ± 0.42
2	0400+258	74	49	0.001 ± 0.021	-0.07 ± 0.50
3	0611+131	105	75	0.000 ± 0.021	0.16 ± 0.66
4	0748+126	90	59	0.006 ± 0.033	0.19 ± 0.64
5	1413+135	29	23	-0.001 ± 0.022	-0.02 ± 0.29
6	1606+106	51	31	0.001 ± 0.024	-0.02 ± 0.61
7	1821+107	242	180	0.000 ± 0.024	-0.05 ± 0.44
8	2113+293	214	141	-0.001 ± 0.026	-0.03 ± 0.39
9	2136+141	87	64	0.003 ± 0.021	0.01 ± 0.53
10	2337+264	135	88	-0.005 ± 0.016	-0.07 ± 0.27
UCAC2					
1	0234+285	82	78	0.005 ± 0.019	0.02 ± 0.40
2	0400+258	74	65	0.000 ± 0.020	0.06 ± 0.55
3	0611+131	105	105	0.000 ± 0.022	0.15 ± 0.67
4	0748+126	90	83	0.006 ± 0.033	0.23 ± 0.69
5	1413+135	29	29	-0.005 ± 0.020	-0.05 ± 0.27
6	1606+106	51	51	0.000 ± 0.024	0.03 ± 0.55
7	1821+107	242	230	0.000 ± 0.023	0.00 ± 0.41
8	2113+293	214	214	0.000 ± 0.025	0.01 ± 0.42
9	2136+141	87	80	0.002 ± 0.021	0.09 ± 0.53
10	2337+264	135	123	-0.006 ± 0.017	-0.01 ± 0.32

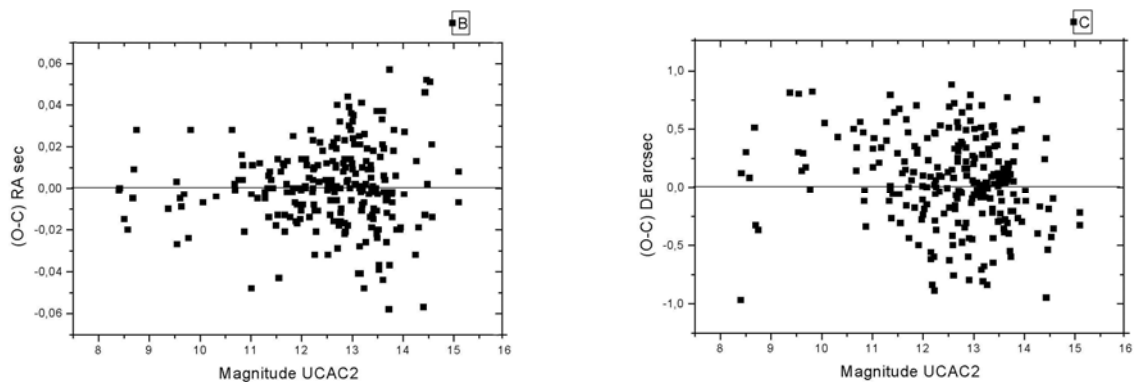


Рис.3. Разности координат в RA и DE для совпадающих звезд с UCAC2 для 10 полей с ERS в зависимости от звездной величины.

Из табл.4 следует, что хотя число звезд UCAC2 и нашего каталога для этих полей во многом совпадают, некоторые поля имеют значительные отклонения (для ERS 0611+131 или 0748+146) как в среднем, так и по отдельным координатам звезд. Эти обстоятельства диктуют требования систематических перенаблюдений и уточнения по-

положений звезд каталогов, используемых в качестве опорных при получении координат самих ICRF радиоисточников. В этом мы и видим основную цель наблюдений полей вокруг ERS. Только имея высокоточную систему слабых опорных звезд можно получить оптические координаты ERS для выявления связи оптической и радио систем координат в астрометрии.

Предварительный вариант сводного каталога формируется нами в следующем формате: на каждую звезду отводится 92 позиции. Сами координаты приводятся в градусах и в целом формате без пробелов (RA – ЧЧММССДДД, DE - +ГГММССДД) в системе ICRF Hipparcos (опорный каталог Tycho2) на эпоху равноденствия 2000.0. Значение эпохи наблюдения дается как для RA, так и для DE, так как они могут быть получены в разные эпохи наблюдений. Большая часть положений в каталоге приведена на эпоху и равноденствие 2000.0, поскольку координаты звезд приведены на эпоху J2000.0 с помощью выбранных из UCAC2 собственных движений (около двух третей звезд каталога).

Таблица 5. Образец печати части каталога поля с ERS.

1	9.81	187.60200135	2000.000	3	18.8	37.06571250
2000.000	4	-10.0	123024480	37035656		
2	12.14	186.92736105	2000.000	3	-28.8	37.07463278
2000.000	4	-9.3	122742566	37042867		
3	11.23	187.52814450	1997.345	3	0.0	37.11927861
1997.270	3	0.0	123006754	37070940		
. . . .						
22	11.30	186.75515145	2000.000	3	-42.5	37.30340083
2000.000	3	19.2	122701236	37181224		
23	14.40	187.62678330	2000.000	2	-13.7	37.03313472
2000.000	2	1.7	123030427	37015928		

Позиции:

- 1 - 5 — I5, номер звезды по данному каталогу;
- 16 - 10 — F6.2, звездная величина, если она есть (по UCAC или найдена наблюдателем);
- 11 - 23 — F13.8, RA в градусах в системе ICRS для равноденствия J2000.0;
- 24 - 32 — F9.3, эпоха наблюдения RA;
- 33 - 35 — I3, число наблюдений RA или число пластинок;
- 36 - 41 — F6.1, собственное движение по RA mas/year (без $\cos(\delta)$);
- 42 - 54 — F13.8, DE в градусах в системе ICRS для равноденствия J2000.0;
- 55 - 63 — F9.3, эпоха наблюдения DE;
- 64 - 66 — I3, число измерений, использованных для получения склонения;
- 67 - 72 — F6.1, собственное движение по DE mas/year.
- 73 - 82 — I10, RA звезды в целом формате ЧЧММССДДД;
- 83 - 92 — I10, DE звезды в целом формате +ГГММССДД.

Исследуемый вариант сводного каталога для 191 поля с ERS находится на магнитных носителях в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН. При систематическом повторении наблюдений и повышении точности координат звезд такие поля с ERS ICRF, определяющими инерциальную систему координат, будут давать не только отслеживание движения оптических систем координат, но могут стать астро-

метрическими стандартами и в будущем служить хорошим контролем точности космических астрометрических наблюдений.

Литература

1. **C. Ma, E.F. Arias, T.M. Eubanks, A.L. Fey, A.M. Contier, et al.**, The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry, A.J., 116, July 1998, pp.516-546.
2. **C. de Vegt, R. Hindsley, N. Zacharias, and L. Winter**, A Catalog of Faint Reference Stars in 398 Fields of Extragalactic Radio Reference Frame Sources, A.J., 121, May 2001, pp.2815-2818.
3. **В.П. Рылков, А.А. Деметьева, Н.В. Наризная**, Каталоги звезд для ПЗС-наблюдений галактических и внегалактических радиоисточников, Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique, п/р д-ф.м.н. Г.И.Пинигина, Николаев, Атол, 2001, с.35-42.
4. **Y. Babenko, A. Daniltsev, N. Maigurova, G. Pinigin, A. Dementyeva, V. Ryl'kov, 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.
5. **P. Fedorov, A. Myznikov**, "Compiled Catalogue of Reference Stars around Extragalactic Radio Sources. Reduction Techniques and the First Results". Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supl.Ser., № 5, 2005, p.134-140.
6. **N. Zacharias, T.J. Rafferty, M.I. Zacharias**, The UCAC Astrometric Survey, 2000, in ASP Conf. Ser., Vol. 216, Astronomical Data Analysis Software and Systems IX, eds. N. Manset, C. Veillet, D. Crabtree (San Francisco: ASP), 427.
7. **В.П. Рылков, А.А. Деметьева, Н.В. Наризная**, Каталоги звезд для ПЗС наблюдений галактических и внегалактических астрометрических радиоисточников", сб. Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique, ed.G.I. Pinigin, Nikolaev, Atol, 2001, p.79-89.
8. **V. Ryl'kov, A. Dement'eva, N. Narizhnaya, G. Pinigin, N. Maigurova, Yu. Protsyuk, G. Bocsa, P. Popescu, V. Kleschenok**, "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, p.328-332.
9. **Vladimir Ryl'kov, Anna Dement'eva, Natalia Narizhnaya, Nadezhda Maigurova, Genady Pinigin, Yuri Protsyuk, Gheorghe Bocsa, Petre Popescu**, "Compiled Catalogue of Reference Stars around 43 Extragalactic Radio Sources." Romanian Astronomical Journal, vol.15, Supplement, pp.131-136, Bucharest, 2005.
10. **Carlsberg Meridian Catalogue La Palma**, Number 13, 2003, Copenhagen University Observatory, p.14.

RESEARCH OF THE ERRORS OF COMPILED CATALOGUE OF REFERENCE STARS AROUND THE EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES

**Ryl'kov V.P., Dement'eva A.A., Narizhnaya N.V.
Pinigin G.I., Maigurova N.V., Procuk Ju.I.**

Summary

Some differential catalogues of reference stars around extragalactic radiosources obtained from photographic and CCD-observations at different observatories were analyzed. A compiled catalogue of star positions in fields 30'x 30', for reduction of optical observations ERS with telescopes equipped with CCD-cameras, was obtained.

Photographic observations of 74 ERS were made in Pulkovo Observatory, 115 ERS - in Observatory of Kiev University, 188 ERS - in Rumanian National Observatory at Bucharest, and 208 ERS in Nikolaev observatory with a telescope equipped with a CCD-camera. The compiled catalogue of more than 13 thousand stars was created for 20-30 arcmin around ERS. Using proper motions of stars from the catalogue UCAC2 comparisons were made for positions of common stars, of the compiled catalogue, with those from UCAC2 (up to 50 for declination) and from the Carlsberg catalogue CMC13 (up to + 30 for declination). For most of the selected fields from the compiled catalogue the average exterior accuracy was about 0.05-0.08". An interior accuracy of positions against both coordinates was not worse than 0.10". The systematic deviations are either absent, or insignificant.

НОВЫЕ СЕМЕЙСТВА АСТЕРОИДОВ ВО ВНЕШНЕЙ ЧАСТИ ГЛАВНОГО ПОЯСА ВБЛИЗИ СОИЗМЕРИМОСТИ 9:5

Смирнов С.С.

Среди астероидов группы Кибелы с помощью программной системы ЭПОС выделены динамически устойчивые семейства астероидов 87 SYLVIA, 909 ULLA, 3092 HERODOTUS и подсемейство Sylvia-Outsiders (71724). В систему ЭПОС был добавлен блок преобразования угловых элементов орбит от плоскости эклиптики к новой плоскости, относительно которой наклоны орбит астероидов внутри семейств очень близки.

Введение

Внешнюю часть Главного пояса астероидов, ограниченную резонансами среднего движения астероидов и Юпитера 7:4 и 2:1, традиционно рассматривают как зону группы Кибелы. Хаотическая динамика орбит в окрестности мощнейшего резонанса 2:1 затрудняет более подробное структурирование этой группы. Однако с обнаружением в ней более 1200 астероидов выделение подгрупп стало необходимым. Такая работа начата в ГАО с использованием универсальных возможностей программной системы ЭПОС [1,2].

Преобразование элементов орбит для выявления кластеров астероидов

Главная идея нашего метода – преобразование орбитальных элементов от плоскости эклиптики к плоскости симметрии распределения наклонностей орбит. При этом предполагается, что вариация оскулирующих элементов i , Ω на одну эпоху внутри кластера примерно совпадает с вариацией i , Ω каждой малой планеты в процессе динамической эволюции. Таким образом, кластерная структура исследуемой области фазового пространства элементов оперативно выявляется в первом приближении без вычисления того или другого типа собственных или средних элементов [3].

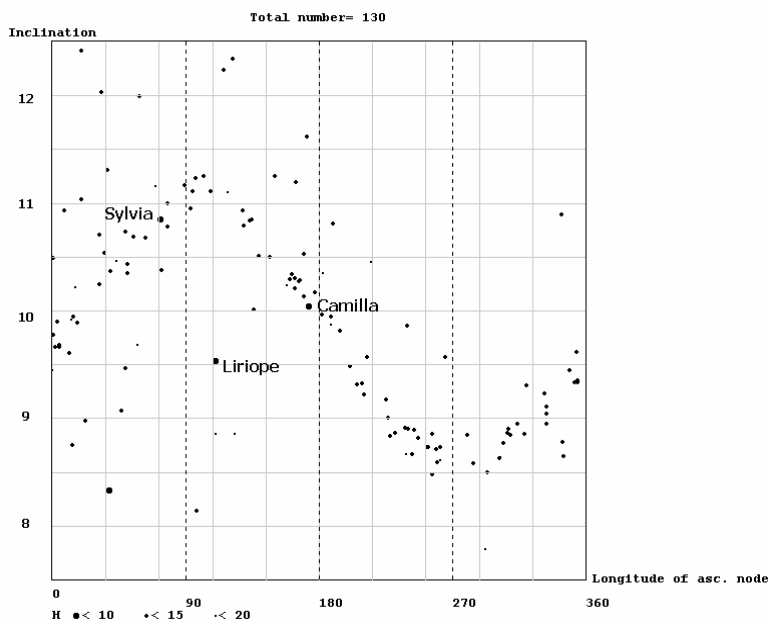


Рис. 1.

В программный пакет ЭПОС добавлен блок, преобразующий элементы орбит от эклиптической к новой системе координат путем поворота вокруг координатных осей Z и X на заданные Эйлеравы углы ψ и θ . В разных зонах пояса астероидов оптимальные углы ротации не совпадают.

По всей совокупности астероидов В.А. Шор [4] определил для плоскости симметрии $\Omega=96^\circ.4$, $i=1^\circ.0$. При изучении структуры группы Гильды [5] нами использовались значения $\Omega=100^\circ$, $i=1^\circ.25$. Для орбит троянцев и греков естественную основную плоскость задает орбита Юпитера ($\Omega=100^\circ.5$, $i=1^\circ.3$). Изучая движение Плутона, Эриды и других транснептуновых объектов, удобно в качестве основной использовать неизменяемую плоскость Лапласа ($\Omega=107^\circ.6$, $i=1^\circ.58$).

В окрестности резонанса 9:5 наилучшим образом спрямляет известную синусоидальную зависимость i vs Ω (рис. 1) двойная ротация вокруг оси Z на угол $\psi=98^\circ$ и вокруг оси X на угол $\theta=1^\circ.2$. Сравнение с рис. 2 ясно показывает, насколько легче произвести выборку точек, соответствующих родственным объектам, когда они занимают прямоугольную область на координатной плоскости.

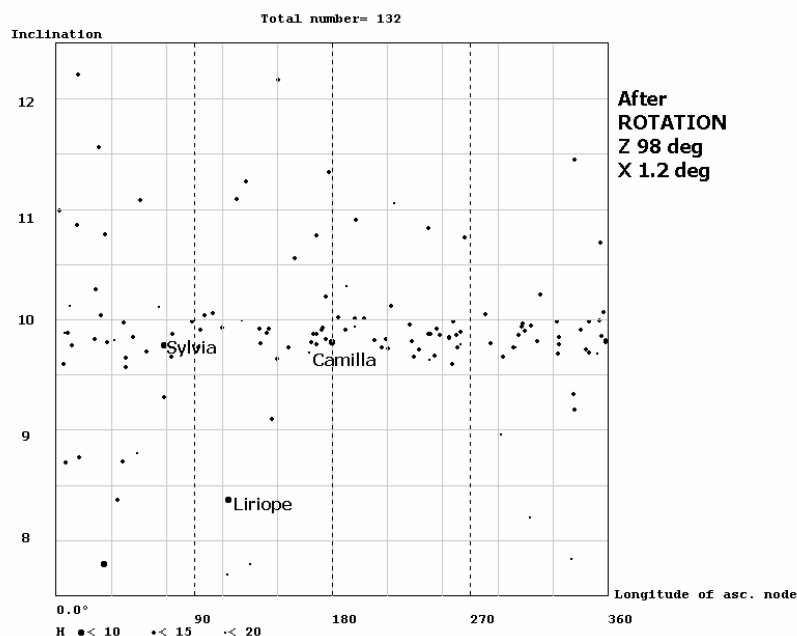


Рис. 2.

Семейство 87 Сильвии

Рассмотрим область фазового пространства $a-e-i$, ограниченную большими полуосями 3.46-3.58 а.е., (это соответствует резонансам среднего движения 11:6 и 7:4), эксцентриситетами до 0.15 и наклонами к эклиптике эпохи 2000.0 от $7^\circ.5$ до $12^\circ.5$.

Состав многочисленного кластера Sylvia-Camilla очевиден и без ротационного преобразования: например, астероид Liriope явно чужой в этом семействе (рис. 1). Однако для удобства и точности выборки переход к новой системе координат необходим.

Нами выделено семейство Сильвии в составе 74 астероидов. В таблице 1 для десяти из них, имеющих наименьшие номера, приведены абсолютная звездная величина H, большая полуось a, эксцентриситет e и наклон орбиты I_r к новой основной плоскости. В данном случае эта плоскость близка к современной плоскости орбиты Юпитера. Заметим, что небольшая ошибка или намеренная вариация углов поворота (например, $\psi=100^\circ$ вместо 98° и $\theta=1.25^\circ$ вместо 1.2°) практически не меняют состав выборки. На-

клоны I_r для всех планет немного изменятся, но внутри семейства останутся очень близкими. Получено среднее значение наклона для 74 астероидов $\bar{I}_r = 9^\circ.850 \pm 0^\circ.005$.

Таблица 1. Первая десятка астероидов семейства Сильвии.

Номер	Имя	H	a	e	I_r
87	Sylvia	6.9	3.4896	0.0798	9.779
107	Camilla	7.1	3.4776	0.0786	9.807
18959	2000 QG129	13.4	3.5014	0.0629	9.756
19689	1999 RX205	13.3	3.5075	0.0860	9.672
20664	1999 UV4	12.9	3.4771	0.0690	9.784
25847	2000 EV97	13.2	3.5062	0.0964	9.723
28912	2000 NL26	13.6	3.4898	0.0984	9.921
30517	2001 LJ15	13.0	3.4834	0.0983	9.829
32394	2000 QL210	13.6	3.4922	0.1035	10.219
34411	2000 RR96	12.8	3.4827	0.1011	9.667

Группа Сильвии ранее выделялась Л.Г. Карачкиной и В.В. Прокофьевой [6] в составе четырнадцати ярких астероидов ($H=6^m.9 \div 11^m.3$) в интервале больших полуосей 3.38-3.49 а.е. В выделенное нами семейство из них попадают только 87, 107 и, возможно, 5914. Остальные одиннадцать объектов находятся с внутренней (ближней к Марсу) стороны соизмеримости 11:6 в зоне динамического хаоса, где для идентификации структуры требуется более подробное исследование. В частности, там необходим анализ распределения эксцентриситетов орбит. В избранной нами зоне пояса астероидов нет сильно вытянутых орбит, выходящих в процессе динамической эволюции за величину $e=0.15$.

Подсемейство Сильвии, отделенное резонансом 9:5

Довольно многочисленное подсемейство сравнительно небольших ($H > 14^m$) и, кроме двух первых, нумерованных астероидов отделено от основной части семейства Sylvia соизмеримостью 9:5 (рис. 3). На английском языке его естественно назвать *Sylvia-Outsiders*, а вот русский эквивалент найти труднее. Хорошо бы сделать титульным яркий астероид *5914 Kathywhaler*, но он не случайно вписан в таблицу 2 курсивом, как сомнительный член подсемейства, поскольку имеет заметно отличающийся наклон I_r .

Таблица 2. Первая десятка астероидов подсемейства Sylvia-Outsiders.

Номер	Имя	H	I_r	i_p
<i>5914</i>	<i>Kathywhaler</i>	<i>10.8</i>	<i>9.304</i>	<i>9.346</i>
71724	2000 GB186	14.8	10.018	9.910
117243	2004 SU25	14.2	9.744	9.834
	2000 SP102	14.1	9.825	9.730
	2001 SU157	14.7	9.827	9.567
	2001 TM45	13.9	9.876	9.695
	2001 YL149	14.5	9.780	9.712
	2001 YP149	14.0	9.850	9.735
	2002 RJ218	14.9	9.793	9.782
	2002 TR134	14.5	9.811	9.642
	2002 VD43	14.7	9.918	9.631

Для 19 выявленных астероидов подсемейства получена оценка среднего значения $\bar{I}_r = 9^\circ.826 \pm 0^\circ.115$. Надежность определения близости наклонов орбит I_r всех астероидов, кроме 5914, подчеркивается аналогичной закономерностью для определенных З. Кнежевичем и А. Милани совсем другим способом наклонов i_p из файла синтетических собственных элементов [7] (см. два последних столбца таблицы 2). Оценка среднего значения упомянутыми авторами такова $\bar{i}_p = 9^\circ.724 \pm 0^\circ.101$.

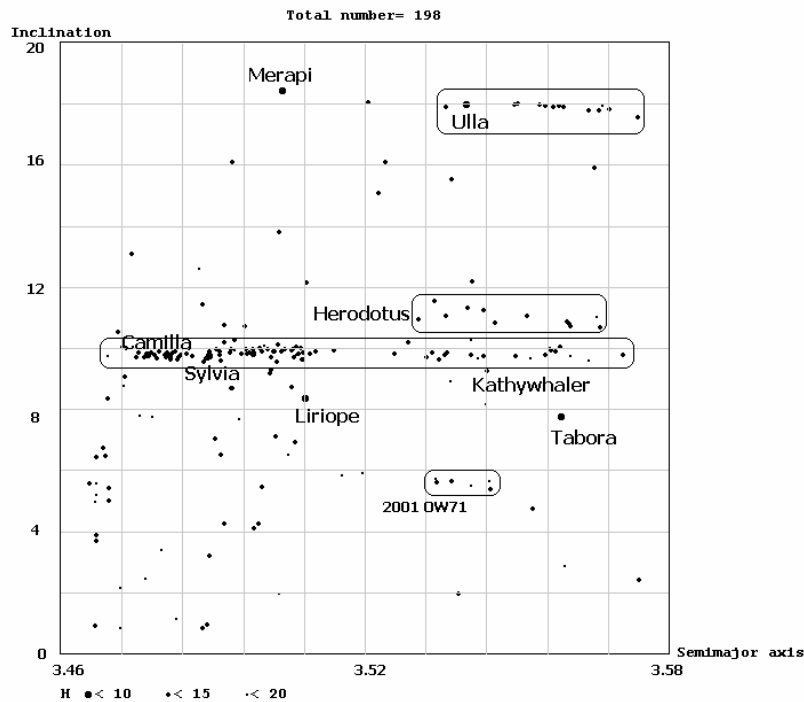


Рис. 3.

Семейство 3092 Herodotus

В семейство Herodotus выделено 10 объектов (см. табл. 3). Без процедуры ротации это семейство сливается на фазовой плоскости $a-i$ с аутсайдерами семейства Sylvia. После преобразования орбитальных элементов разделение становится очевидным. Отметим, что лидеры семейства заметно ярче, чем у Sylvia-Outsiders.

Таблица 3. Семейство Herodotus.

Номер	Имя	H	I_r	i_p
3092	Herodotus	11.0	10.994	10.760
9522	1981 DS	12.5	10.832	10.912
17427	1989 CQ2	12.9	10.913	10.929
19694	Dunkelman	12.9	11.259	10.988
25851	2000 EE120	12.8	10.859	10.964
29966	1999 JW103	13.0	10.769	10.836
76672	2000 HD56	13.6	11.086	11.210
77735	2001 OJ76	14.0	11.100	10.935
110198	2001 SV196	14.0	10.703	10.883
	2004 VN4	15.1	11.060	10.690
Среднее			10.957	10.910
			± 0.172	± 0.140

Семейство 909 Улла

Долгое время единственным известным соседом малой планеты Улла оставался 536 Мегарі. Сейчас стало возможным выделить небольшое семейство в количестве 14 объектов. Эти объекты в ходе динамической эволюции орбит не выходят из общей узкой области фазового пространства элементов **a-i-e**, в которую Мегарі и другие астероиды не попадают. Как и в большинстве ранее обнаруженных семейств в данном имеется явный лидер – Улла. Все остальные объекты существенно меньше, что возможно говорит в пользу их совместного происхождения в результате катастрофического события в истории Улла.

Таблица 4. Первая десятка астероидов семейства Улла.

Номер	Имя	H	I _r	i _p
909	Ulla	8.9	17.980	17.96
42313	2001 VH97	13.1	18.045	17.98
60042	1999 TF102	13.3	17.807	17.88
85036	4203 P-L	14.4	17.924	17.98
102698	1999 VL85	13.7	18.067	17.93
114552	2003 BF38	14.2	17.930	17.94
116516	2004 BA42	13.9	17.998	18.00
	2000 SZ364	13.9	17.992	
	2001 OD78	14.4	17.823	
	2001 YV89	13.6	17.967	

Для всех 14 астероидов семейства получено среднее значение наклона $\bar{I}_r = 17^\circ.943 \pm 0^\circ.077$. Для нумерованных астероидов Милани и Кнежевич получили $\bar{I}_r = 17^\circ.953 \pm 0^\circ.040$.

Выводы

С помощью сравнительно простой вычислительной процедуры удалось во внешней части огромной группы Кибелы выявить новые динамически устойчивые семейства астероидов. Возможно, в этой зоне существуют и другие кластеры, например, во главе с (46305) 2001 OW71 с наклоном к орбите Юпитера около 6° (рис. 3). Наконец, гигантские астероиды Сильвия, Камилла, Кибела обладают спутниками, а скорее всего еще и коорбитальными постоянными и временными попутчиками. Выявляется сложный динамический ансамбль внешней части Главного пояса астероидов с многоуровневой структурой связей, разделений, слияний и переходов по иерархическим ступеням *Крупный астероид – спутник - коорбитальный попутчик - член семейства – аутсайдер – объект фона – резонансная пауза – соседнее семейство*.

Благодарности

Работа не могла бы быть выполнена без консультаций, обсуждения и заинтересованной поддержки со стороны сотрудников ГАО РАН и ИПА РАН, НИАИ им. В.В. Соболева СПбГУ и филиалов Библиотеки РАН в ГАО и ИПА. Автор особо признателен за помощь В.Н. Львову, Р.И. Смехачевой, С.Д. Цекмейстер, В.А. Шору, О.М. Кочетовой, Н.К. Сумзиной, К.В. Холшевникову, Н.А. Петрову и Е.П. Поттер.

Литература

1. **Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.** Программная система ЭПОС. <http://neopage.nm.ru/RUS/ESUPP/main.htm>
2. **Львов В.Н., Смехачева Р.И., Смирнов С.С., Цекмейстер С.Д.** Некоторые особенности движения астероидов группы Гильды. // Изв. ГАО, 2004, № 217, с. 318-324.
3. **Смирнов С.С.** Структура пояса астероидов в окрестности соизмеримостей 3:2 и 9:5. // Всероссийская конференция «Астероидно-кометная опасность – 2005». Материалы конференции. СПб.: ИПА РАН, 2005, с. 306-308
4. **Shor V.A.** Distribution of asteroid orbital elements. // Asteroids, comets, meteors 1991, p. 553-556.
5. **Смирнов С.С.** О структуре треугольника Гильд. // Изв. ГАО, 2004, № 217, с.325-329.
6. **Карачкина Л.Г., Прокофьева В.В.** Семейство двойного астероида 423 Диотима и группа тройной системы 87 Сильвия. // Околосветная астрономия XXI века. // М.: ГЕОС, 2001, с.245-251.
7. <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdis/astibo>

NEW ASTEROIDAL FAMILIES IN THE OUTER MAIN BELT NEAR COMMENSURABILITY 9:5

Smirnov S.S.

Summary

New dynamically stable asteroidal families - 87 SYLVIA, 909 ULLA, 3092 HERODOTUS and sub family Sylvia-Outsiders (71724)-were detected in the Cybele group using the EPOS software package.

СЕМЕЙСТВО АСТЕРОИДОВ ВЫСОКОЙ НАКЛОННОСТИ 480 HANSA С УНИКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДОЛГОТ ПЕРИГЕЛИЯ

Смирнов С.С.

В Главном поясе астероидов с помощью программной системы ЭПОС исследуется структурная динамика семейства 480 HANSA, члены которого имеют большие наклонности орбит и необычную концентрацию гелиоцентрических долгот перигелия в диапазоне 50–120°. Прослежено сохранение этой концентрации на интервале 6000 лет. Выделено 875 членов семейства Hansa и 180 членов его компактного ядра.

Введение

В классических обозрениях групп и семейств Главного пояса астероидов (ГПА) очень редко рассматривалась область фазового пространства орбитальных элементов $a-i-e$ с наклонами, превосходящими 20° [1]. Это было вызвано как неопределенностью собственных элементов астероидов, искаженных сильными вековыми резонансами, так и незначительным количеством известных в этой зоне астероидов. В начале XXI века ситуация совсем другая: появились вычислительные средства изучения динамики движения астероидов на больших интервалах времени, а число объектов с уверенно определяемыми орбитами высокой наклонности значительно превысило общее количество известных в 1980-х годах астероидов [2].

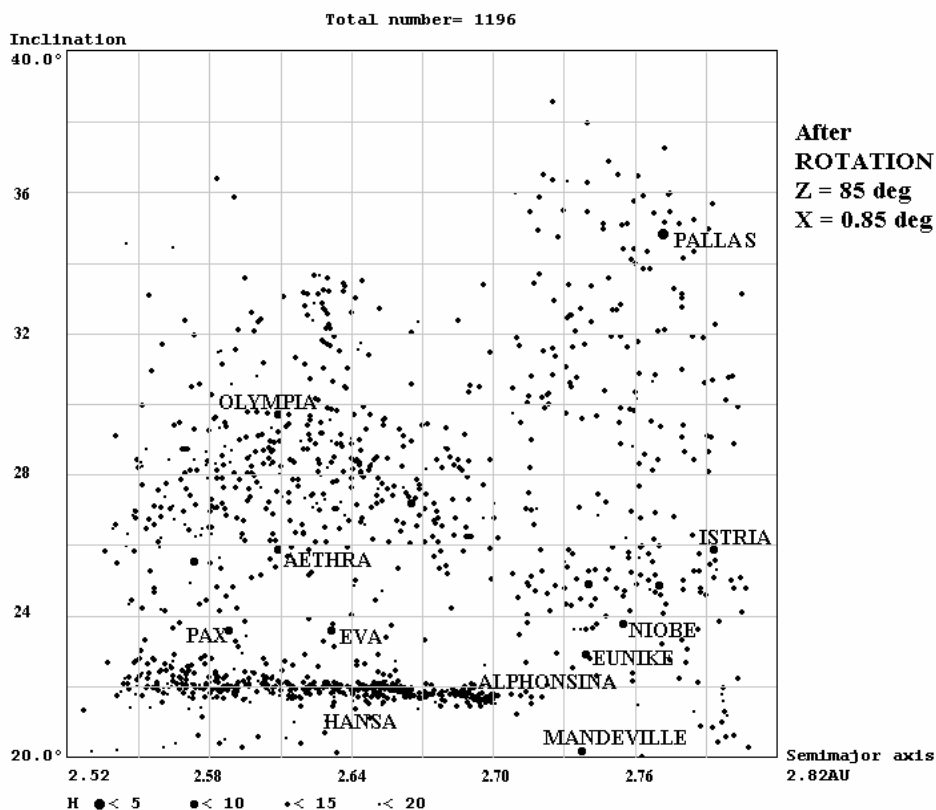


Рис. 1.

Семейство Hansa

Рассмотрим зону фазового пространства элементов орбит астероидов между резонансами среднего движения 5:2 и 3:1 с наклонами, превышающими 20° и умеренными эксцентриситетами до 0.15.

Анализ проведен с помощью программной системы ЭПОС [3] по данным каталога ASTORB [4] Э. Боуэлла по состоянию на 26 августа 2006 г.

Даже при рассмотрении распределения астероидов в пространстве оскулирующих элементов сразу обращает на себя внимание очень плотная концентрация в зоне больших полуосей 2.5–2.7 а.е. и наклонностей $21\text{--}23^\circ$. Тем ярче выявляется этот кластер после предложенной нами ранее [5], [6] процедуры ротации, приводящей наклон и долготу восходящего узла от эклиптики к плоскости симметрии известной или предполагаемой группы объектов. В данном случае использован двойной поворот на Эйлеравы углы вокруг оси Z на $\psi=85^\circ$ и вокруг оси X на $\theta=0^\circ.85$. На рис.1 представлено распределение 1196 нумерованных астероидов с наклонами $20\text{--}40^\circ$ в диапазоне средних движений $750\text{--}900''$ в новой системе координат после выполнения ротации с помощью программной системы ЭПОС. Отмечено положение наиболее ярких объектов.

Астероиды 480 Hansa и 925 Alphonsina намного превышают по размерам все остальные объекты в плотном кластере, содержащем около 900 нумерованных и нenumерованных астероидов (рис. 2). Заметим, что Alphonsina находится в соизмеримости 8:3, а Hansa – 11:4 со средним движением Юпитера.

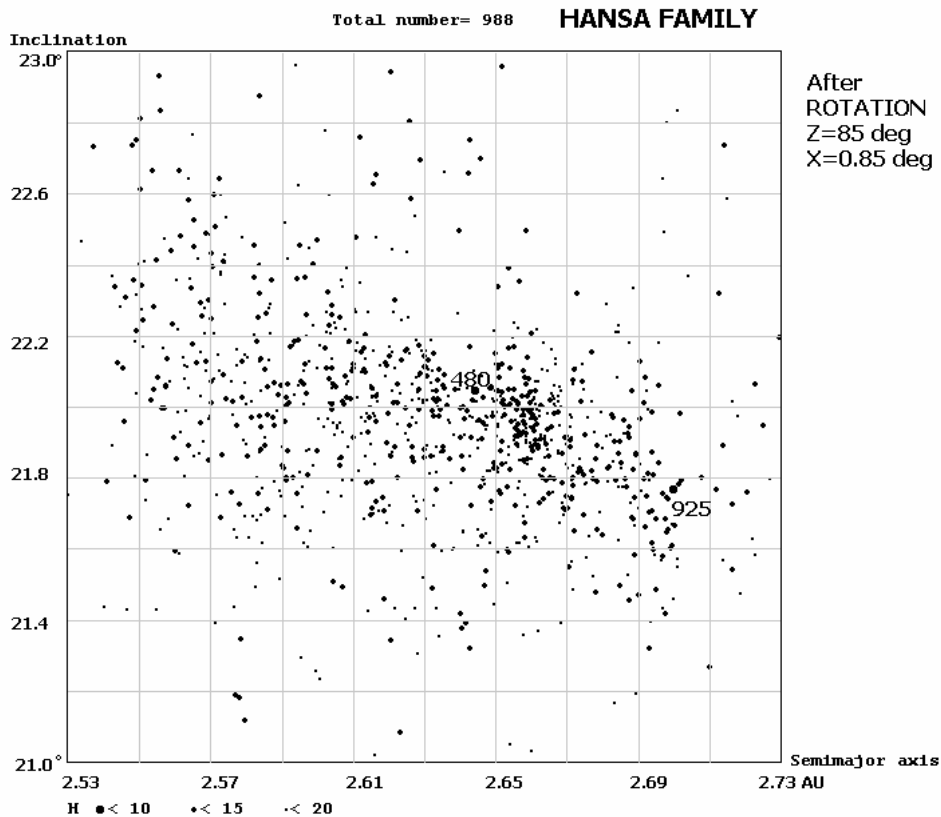


Рис. 2.

Более подробный анализ показал, что при достаточно равномерном распределении долгот восходящего узла Ω и аргументов перигелия ω существует удивительная плотность долгот перигелия ϖ данной общности, позволяющая определить ее, как *семейство астероидов HANSA* (рис. 3).

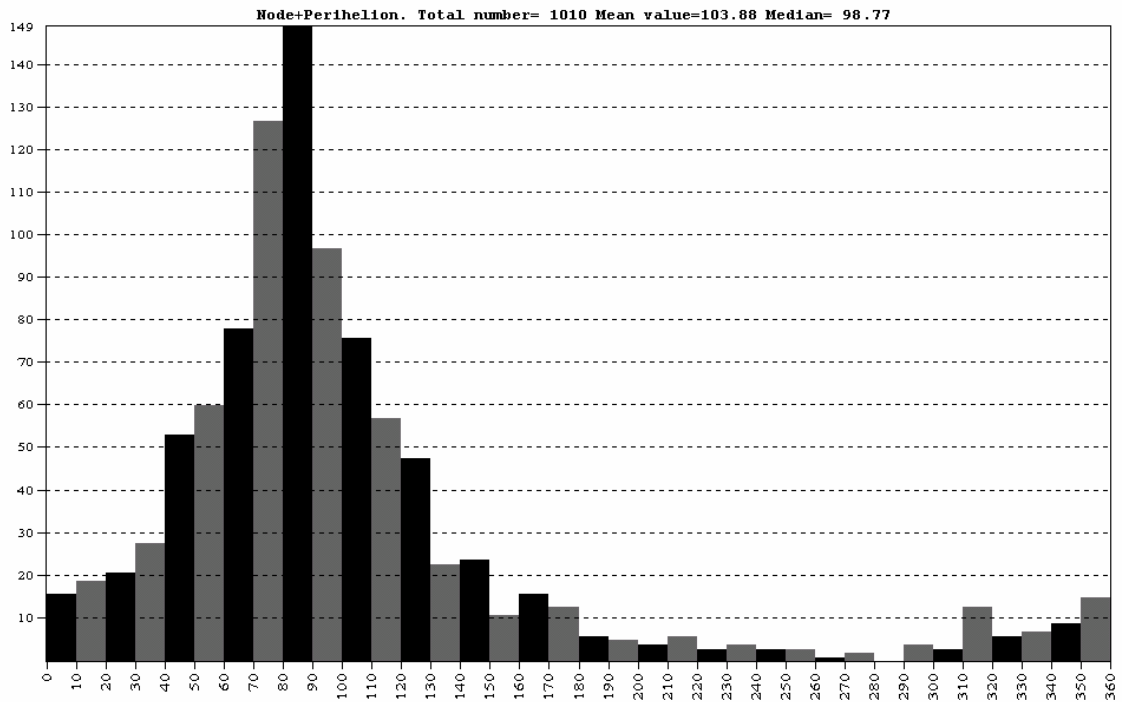


Рис. 3

Очевидно, что такая плотность долгот перигелия может объясняться либо недавним происхождением семейства Hansa, либо особыми динамическими условиями в данной области ГПА, либо комбинацией воздействия этих факторов.

Таблица 1. Первые пятнадцать астероидов семейства Hansa.

Номер	Имя	H	a	I_r
480	Hansa	8.4	2.6441	22.050
925	Alphonsina	8.3	2.6999	21.772
4880	Tovstonogov	12.1	2.6714	21.750
5725	Nordlingen	12.5	2.6807	21.835
6533	Giuseppina	13.3	2.6379	22.054
6894	Macreid	11.9	2.6516	21.900
9816	Von Matt	13.8	2.6890	21.748
10837	1994 EJ1	12.4	2.6631	21.913
12064	Guiraudon	13.2	2.5722	22.096
13290	1998 QN75	12.3	2.6609	22.209
13617	1994 YA2	13.4	2.6515	22.046
13754	1998 SB63	12.5	2.6521	22.021
14348	1985 UO3	12.8	2.6125	22.171
15100	2000 AP144	12.7	2.6425	22.174
15960	Hluboka	12.8	2.6906	21.969
Среднее				21.981 ±.155

В таблице 1 для пятнадцати членов семейства с наименьшими номерами приводятся абсолютная звездная величина H , большая полуось орбиты a и наклон орбиты к плоскости симметрии семейства I_r . Имеется существенный тренд уменьшения среднего наклона с увеличением большой полуоси. С учетом близости долгот перигелия (a зна-

чит и афелия) почти всех орбит получается, что линейное возвышение большинства членов семейства над плоскостью симметрии орбит в афелии одинаково.

Ядро семейства Hansa

На рис. 2 четко выделяется еще одна особенность – наличие *ядра семейства Hansa* в диапазоне больших полуосей орбит 2.635–2.675 а.е. В этом ядре концентрация долгот перигелия еще больше, что позволяет произвести выборку членов ядра по близости наклона к плоскости симметрии и долготам перигелия в интервале 40°-140°. Титульный астероид Hansa находится на краю ядра, состоящего из 180 объектов.

Подчеркнем, что в этой зоне определение и анализ элементов орбит сильно затруднен действием нескольких соизмеримостей, включая вековой резонанс **v6**. Поэтому, например, использование синтетических собственных элементов Z. Knežević и A. Milani [7] в данной задаче разделило бы компактную группу астероидов на несколько подгрупп. В таблице 2 приведены долготы перигелия ϖ по [4], а собственные эксцентриситеты e_p и скорость прецессии долготы перигелия g по [7]. Близость эксцентриситета астероидов к 0 делает весьма неопределенными вычисления g . Получается, что у четырех планет, включая Hansa, линия апсид смещается в одну сторону, а у пяти других, включая Jonan, - в противоположную.

Таблица 2. Некоторые элементы орбит ярких астероидов ядра семейства Hansa.

Номер	Имя	ϖ	e_p	g
480	Hansa	90.0	0.0091	-61.61
10837	1994 EJ1	82.1	0.0156	+16.28
13754	1998 SB63	84.2	0.0108	-37.50
16725	1996 CE3	79.9	0.0098	-63.74
17644	1996 TW8	81.6	0.0365	+22.72
20866	2000 VP37	109.9	0.0276	+22.92
21254	Jonan	97.9	0.0277	+23.12
23160	2000 EN201	106.8	0.0201	+22.13
32436	2000 RQ97	85.0	0.0119	-33.86

Среднее значение наклона для объектов ядра совпадает с величиной, найденной для всего семейства, но со значительно лучшей внутренней сходимостью $\bar{I}_r = 21^\circ.980 \pm 0^\circ.061$.

Проведем анализ эволюции элементов с помощью программы *Эфемериды* в составе программной системы ЭПОС [3], которая позволяет выполнить вычисление и просмотр динамики вариации элементов на 1000 лет вперед и на 5000 лет назад от эпохи 2000.0.

Рис. 4 показывает положение астероидов и перигелиев их орбит в 2981 г. до н. э., а рис. 5 – в 2995 г. н.э. относительно эклиптики и равноденствия 2000.0.

Как видим, сектор гелиоцентрических лучей, отмечающих долготы перигелиев в течение 6000 лет остается очень узким и смещается на 30° в прямом направлении.

Прецессия линии апсид составляет для Hansa 47.5° за 6000 лет или +28.5"/год. Не следует преувеличивать значение почти полного совпадения этой величины с фундаментальной частотой **g6**, т.к. наша оценка получена на интервале времени, составляющем лишь 1/8 полного цикла прецессии перигелия Hansa.

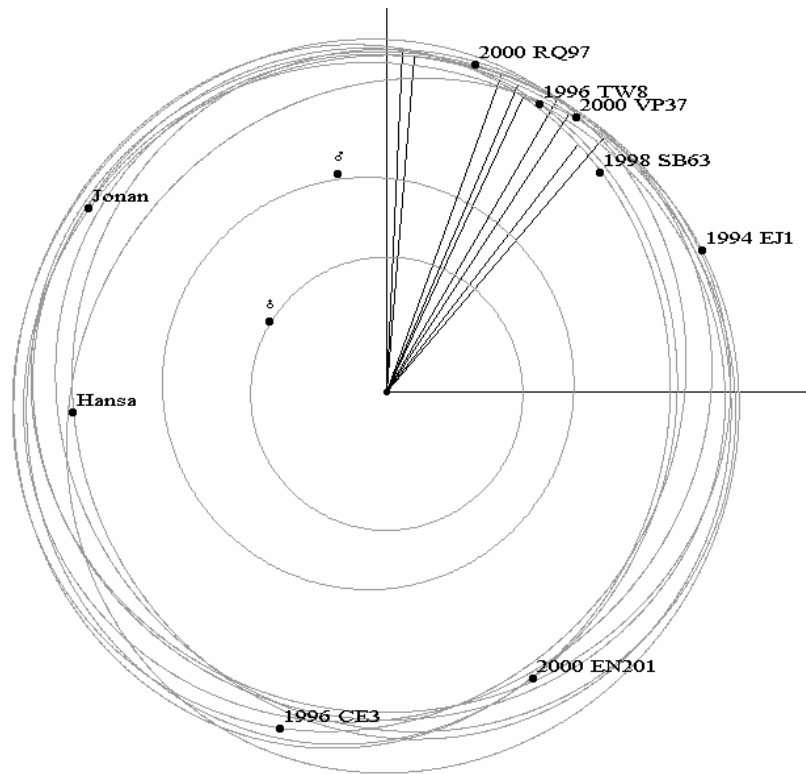


Рис. 4.

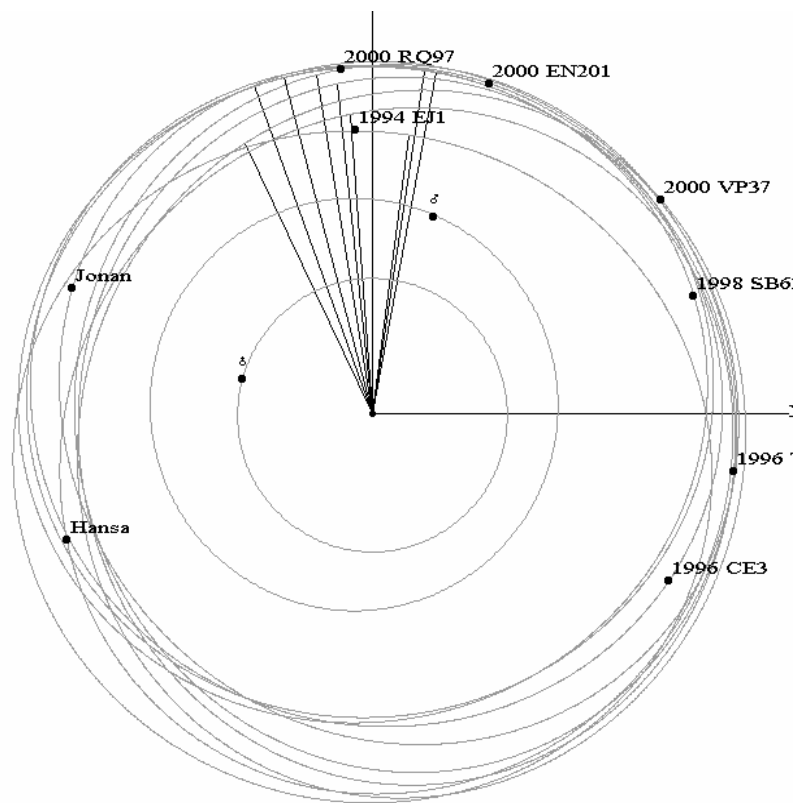


Рис. 5.

Для остальных восьми астероидов таблицы 2 скорость смещения линии апсид составила в среднем +18"/год с очень малым разбросом, что хорошо видно при сравнении рис. 4 и 5. Замечательная плотность распределения долгот перигелия сохраняется для ядра и всего семейства Hansa на протяжении, по крайней мере, десятков тысяч лет.

Выводы и перспективы

В Пулковской обсерватории с помощью Программной системы ЭПОС проводится обзор элементов орбит астероидов с целью уточнения состава семейств и подгрупп астероидов. В зоне высоких наклонов орбит удалось выявить в фазовом пространстве оскулирующих элементов удивительную динамически устойчивую плотность распределения долгот перигелиев в семействе Hansa. Состав семейства и его ядра определялся на первом этапе по трем элементам **a-i- ϖ** вместо обычных **a-i-e**.

На 26 августа 2006 г. выделено 875 членов семейства и 180 – ядра, из них соответственно 420 и 140 нумерованных астероидов и 400 и 85 объектов ярче $H=15^m$.

Заметим, что для данного случая использование синтетических собственных элементов [7] оказалось нецелесообразным. Представляется перспективным продолжение поиска астероидных кластеров в зоне высоких наклонов орбит предложенным методом.

Литература

1. **Hergenrother C.W., Larson S.M., Spahr T.B.** The Hansa family: a new high inclination asteroid family. // Bulletin of the American Astronomical Society, 1996, vol. 28, p. 1097.
2. **Foglia S., Masi G.** New Clusters for highly inclined Main Belt Asteroids.
<http://asteroidi.uai.it/family/index.htm>
3. **Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.** ЭПОС – пакет программ для работ по изучению объектов Солнечной системы. // Околосолнечная астрономия XXI века.- М.:ГЕОС, 2001, с. 235-240.
4. <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>
5. **Смирнов С.С.** Структура пояса астероидов в окрестности соизмеримостей 3:2 и 9:5. // Всероссийская конференция «Астероидно-кометная опасность – 2005». Материалы конференции. СПб.: ИПА РАН, 2005, с. 306-308.
6. **Смирнов С.С.** Новые семейства и подгруппы астероидов. // Конференция «Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее» к 125-летию АО СПбГУ. Рабочие материалы. СПб., 2006, с. 18.
7. <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdis/astibo>

HIGH INCLINATION ASTEROIDAL FAMILY 480 HANSA WITH UNIQUE CONCENTRATION OF PERIHELION LONGITUDES

Smirnov S.S.

Summary

The dynamical family 480 Hansa, having an average inclination of 22° with respect to the Main Asteroid Belt, was analyzed with the help of the software package EPOS. A very high concentration of perihelion, in the range 50-120°, was observed for asteroids in this cluster. The conservation of this concentration, over 6000 years, was traced. Hansa family consists of 875 members with a compact core of 180 members.

О ГОЛОМОРФНОСТИ КООРДИНАТ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ

Соколов В.Г.

Определены границы областей голоморфности координат невозмущенного эллиптического движения относительно эксцентриситетов планетных орбит для случаев использования эксцентрической или истинной аномалии одной из планет в качестве независимой переменной. Полученные уравнения обобщают известные уравнения границы области голоморфности координат, когда независимой переменной является время, и определяют бисимметричные овалы, размеры и форма которых зависят от эксцентриситетов и отношения средних движений планет. Показано, что использование эксцентрической или истинной аномалии внешней планеты в качестве независимой переменной может привести к существенному уменьшению области голоморфности координат внутренней планеты, при котором аналитическое продолжение исходного степенного ряда с центром в начале координат комплексной плоскости оказывается невозможным.

При построении аналитических теорий движения небесных тел, которые в дальнейшем будем называть планетами, их координаты, входящие в пертурбационные функции, обычно определяются формулами невозмущенного эллиптического движения, при этом в качестве независимой переменной, как правило, используется время t . Тогда, как известно [1–4], разложение эксцентрической аномалии, а, следовательно, и разложения координат как возмущаемой, так и возмущающей планеты в ряды по степеням эксцентриситета e в окрестности точки $e = 0$ комплексной плоскости (e) с коэффициентами, представленными в виде функций t , абсолютно сходятся в круге $C: |e| < \rho^*$, где $\rho^* = 0.6627\dots$ – предел Лапласа. Вместе с тем [3–7], поскольку эксцентрическая аномалия u голоморфна в симметричной относительно координатных осей v и w области D (рис.1), вытянутой вдоль вещественной оси v плоскости (e), то ее исходный элемент $u(e, 0)$ – ряд по степеням e , сходящийся в круге C , – можно аналитически продолжить вдоль оси v из точки $e = 0$ в точки $e = e_0 \in (0, 1)$ при помощи эквивалентных в этих точках элементов $u(e, e_0)$ – рядов по степеням $e - e_0$, сходящихся в кругах $|e - e_0| < \rho(e_0)$, радиусы которых, $\rho(e_0)$, убывают с ростом e_0 от ρ^* при $e_0 = 0$ до нуля при $e_0 \rightarrow 1$. Огибающая семейства всех окружностей с центрами в точках $e_0 \in (-1, 1)$ вещественной оси и радиусами $\rho(e_0)$ определяет границу Γ области D .

Наряду с t , в качестве независимой переменной в уравнениях возмущенного движения, нередко используются эксцентрическая – u или истинная – f аномалии возмущаемой планеты [8–11], которые обладают рядом преимуществ по сравнению с t . Во-первых, u и f (в отличие от t) позволяют выразить координаты в замкнутой форме при любых значениях $e \in [0, 1)$, а в плоскости (e) эти координаты голоморфны в круге $|e| < 1$. Во-вторых, использование u или f вместо t ускоряет сходимость рядов по степеням e [2] и приводит к расширению области голоморфности главной части пертурбационных функций планетной задачи трех тел [12]. Наконец, эксцентрическая аномалия регуляризует особенность в координатах при соударении (тесном сближении) в задаче двух тел [4] и линейно зависит от переменной, регуляризующей уравнения возмущенного движения [13, 14]. Между тем, поскольку использование аномалий u или f

возмущаемой планеты в качестве независимой переменной вместо t приводит к необходимости выражения через одну из них координат возмущающей планеты [15,16], то встает вопрос об определении области голоморфности координат последней, который до настоящего времени, вообще говоря, остается открытым: известно лишь [12], что радиус сходимости степенных разложений в окрестности нулевого значения эксцентриситета не больше ρ^* . Данная статья посвящена решению именно этого вопроса. Заметим, что голоморфность координат является необходимым условием абсолютной сходимости разложений главной части пертурбационных функций планетной задачи трех тел.

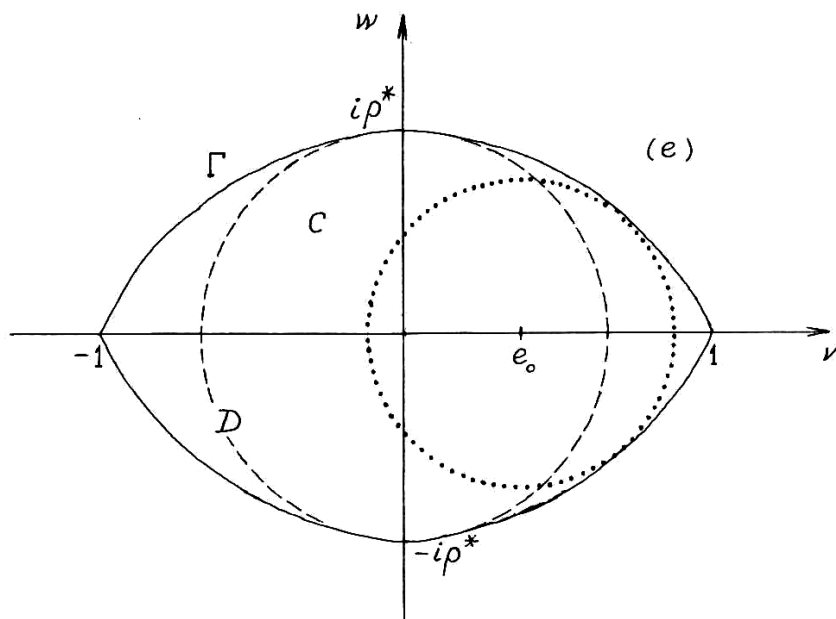


Рис. 1. Граница Γ области D и границы кругов C и $|e - e_0| < \rho(e_0)$ изображены сплошной, штриховой и пунктирной линией соответственно.

Из двух планет будем называть внутренней планету с наибольшим по модулю средним движением n , а внешней – с наименьшим – n' , так что справедливо неравенство

$$m = \left| \frac{n'}{n} \right| < 1. \quad (1)$$

В дальнейшем, если не оговорено особо, обозначения без штриха будут относиться к внутренней планете, а со штрихом – к внешней.

Примем сначала за независимую переменную одну из аномалий внутренней планеты: эксцентрическую – u , или истинную – f (внутренний вариант). Обозначим через l_0, l'_0 их средние аномалии в начальную эпоху и положим

$$u_1 = tu + c, \quad f_1 = mf + c, \quad c = l'_0 - ml_0.$$

Тогда, исключая время из уравнений Кеплера для каждой из планет, получим соотношения, связывающие эксцентрическую аномалию u' внешней планеты с u, f при $j = 1, 2$ соответственно:

$$u' - e' \sin u' = M_j, \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

где

$$M_1 = u_1 - me \sin u,$$

$$M_2 = f_1 - 2m \operatorname{arctg} \frac{e \sin f}{1 + \sqrt{1 - e^2} + e \cos f} - me \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin f}{1 + e \cos f},$$

причем M_2 получено с использованием формулы, выражающей разность $f - u$ через f [17].

Уравнения (2) определяют аномалию u' как бесконечнозначную аналитическую функцию комплексной переменной e' и параметров m, e, u, u_1 или f, f_1 при $j = 1, 2$ соответственно. Граница области голоморфности функции u' находится в результате решения системы, в которой в качестве первого уравнения берется одно из соотношений (2), а в качестве второго – уравнение

$$1 - e' \cos u' = 0. \quad (3)$$

Ограничимся выводом уравнений границы в случае использования u в качестве независимой переменной (при использовании f вывод аналогичен). Подставляя

$$e = g \exp(i\gamma), \quad e' = v + iw, \quad u' = x + iy \quad (i = \sqrt{-1})$$

в (3) и (2) при $j = 1$ и разделяя вещественные и мнимые части, получим две системы уравнений, которые в результате исключения переменной x дают

$$v^2 = \bar{y}(\operatorname{cth} y - \bar{y}), \quad w^2 = \bar{y}(\bar{y} - \operatorname{th} y), \quad (4)$$

где

$$\bar{y} = y + mg \sin \gamma \sin u. \quad (5)$$

Поскольку квадрат модуля e' , определяемый в силу (4) соотношением

$$v^2 + w^2 = \frac{2\bar{y}}{\operatorname{sh} 2y}, \quad (6)$$

минимален, с учетом (5), при условиях

$$u = \pm \frac{\pi}{2}, \quad \gamma = \mp \frac{\pi}{2},$$

то в (4) для \bar{y} следует использовать выражения

$$\bar{y} = y - z, \quad z = mg. \quad (7)$$

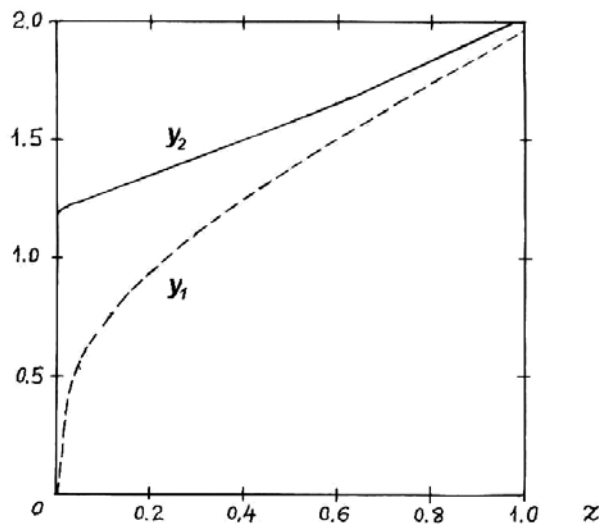


Рис. 2. Графики зависимостей y_1 (штриховая линия) и y_2 (сплошная линия) от z на отрезке $[0, 1]$.

Соотношения (4) с учетом (7) являются параметрическими уравнениями кривой $\Gamma(z)$ при изменении параметра y на отрезке $[y_1, y_2]$, где y_1, y_2 – решения уравнений

$$y_1 = \operatorname{th} y_1 + z, \quad y_2 = \operatorname{cth} y_2 + z; \quad (8)$$

y_1, y_2 можно найти методом простой итерации [18], при этом в качестве нулевых приближений удобно использовать значения

$$y_{10} = \sqrt[3]{3z} + \frac{2}{5}z, \quad y_{20} = y^* + z, \quad (9)$$

$y^* = 1.1996\dots$ – решение уравнения $y = \operatorname{cth} y$, причем с уменьшением z точность оценок (9) возрастает. Графики зависимостей y_1 и y_2 от z на отрезке $[0,1]$ представлены на рис. 2. Легко видеть, что длина отрезка $[y_1, y_2]$, равная разности $y_2 - y_1$, уменьшается с ростом z и стремится к нулю при $z \rightarrow \infty$. Область $D(z)$ в комплексной плоскости (e'), ограниченная кривой $\Gamma(z)$ и содержащая начало координат $e' = 0$, будет областью голоморфности аномалии u' внешней планеты.

Если за независимую переменную принять эксцентрическую аномалию u' внешней планеты, то, подставляя

$$e = v + iw, \quad e' = g' \exp(i\gamma'), \quad u = x + iy$$

в соотношения, аналогичные (3) и (2) при $j = 1$, получим уравнения кривой $\Gamma(z')$ вида (4), в которых

$$\bar{y} = y - z', \quad z' = m^{-1}g', \quad (7')$$

а концы отрезка $[y_1, y_2]$ определяются из уравнений

$$y_1 = \operatorname{th} y_1 + z', \quad y_2 = \operatorname{cth} y_2 + z'; \quad (8')$$

Область $D(z')$ в комплексной плоскости (e), ограниченная кривой $\Gamma(z')$ и содержащая начало координат $e = 0$, будет областью голоморфности аномалии u внутренней планеты. Отметим, что при $z = z' = 0$ уравнения (4) принимают вид

$$v^2 = y(\operatorname{cth} y - y), \quad w^2 = y(y - \operatorname{th} y),$$

и, с точностью до обозначений, совпадают с параметрическими уравнениями кривой $\Gamma \equiv \Gamma(0)$ из [5], для которых значения $y_1 = 0$ и $y_2 = y^*$ определяют границы области изменения параметра y .

При использовании истинных аномалий f и f' в качестве независимых переменных уравнения границ $\Gamma(z)$ и $\Gamma(z')$ областей голоморфности, $D(z)$ и $D(z')$, эксцентрических аномалий u' и u находятся без труда: соотношения (4), (8) и (8'), а также первые из (7) и (7') сохраняются, а выражения для z и z' заменяются формулами

$$z = mL(g), \quad z' = m^{-1}L(g'),$$

где

$$L(s) = \ln\left(\sqrt{1+s^2} + s\right) + s\sqrt{1+s^2}.$$

Ввиду симметрии кривых, определяемых уравнениями (4), относительно координатных осей, исследование границ $\Gamma(z)$ и $\Gamma(z')$ достаточно провести в первом координатном угле: $v \geq 0, w \geq 0$. Анализ и расчеты показывают, что при $z > 0$ границы представляют собой гладкие овалы, в то время как при $z = 0$ граница Γ является кусочно-гладкой, состоящей из двух гладких кривых, склеенных в угловых точках $e = -1$ и $e = 1$, в которых уравнения имеют односторонние производные, равные $\sqrt{3}$ в точке

$e = -1$ и $-\sqrt{3}$ в точке $e = 1$ для верхней ветви Γ , а также $-\sqrt{3}$ в точке $e = -1$ и $\sqrt{3}$ в точке $e = 1$ для нижней ветви (рис. 1 и 3).

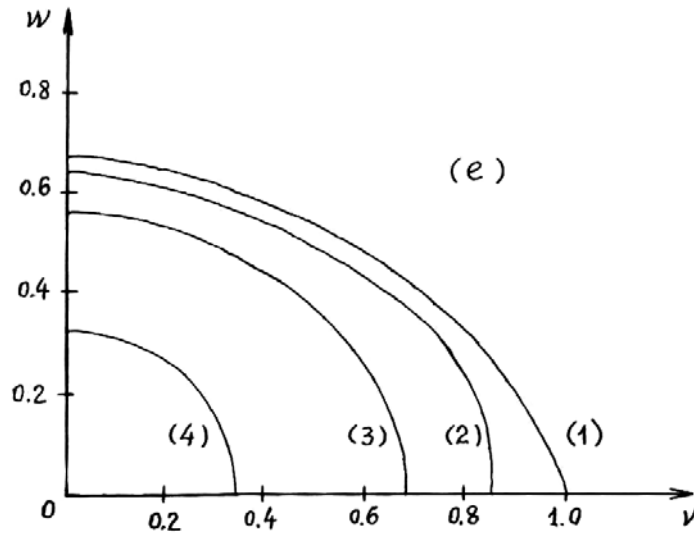


Рис. 3. Границы $\Gamma(z)$ при $z = 0, 0.05, 0.2$ и 0.8 изображены в первом координатном угле линиями (1), (2), (3) и (4) соответственно.

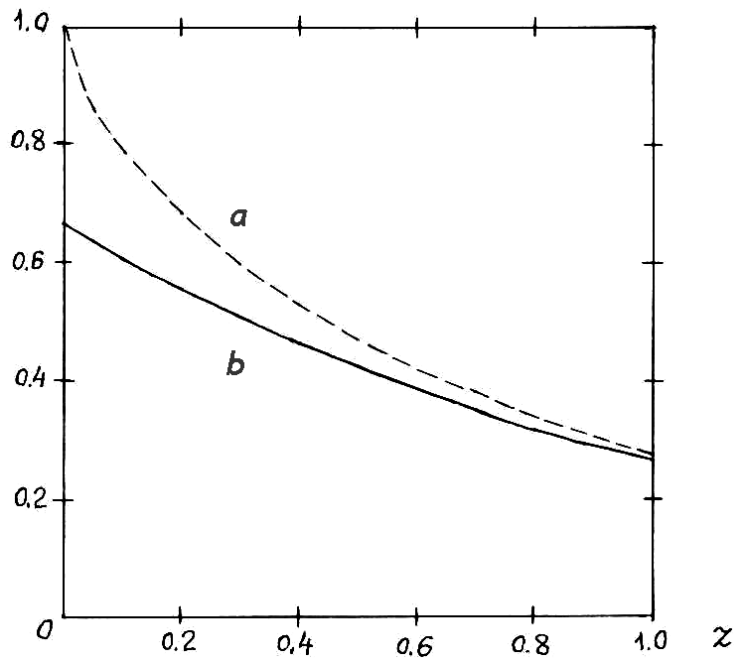


Рис. 4. Графики зависимостей a (штриховая линия) и b (сплошная линия) от z на отрезке $[0, 1]$.

Обозначим через a и b расстояния от начала координат до точек пересечения овала с вещественной v и мнимой w осями соответственно и определим сжатие ε овала формулой

$$\varepsilon = \frac{a-b}{a},$$

где

$$a = \frac{1}{\operatorname{ch} y_1}, \quad b = \frac{1}{\operatorname{sh} y_2}.$$

Как показывают расчеты, размер и сжатие овалов уменьшаются с ростом z (рис. 3 и 4), причем $a > b$ и $\lim_{z \rightarrow \infty} \varepsilon = \lim_{z \rightarrow \infty} a = \lim_{z \rightarrow \infty} b = 0$. Здесь и далее с целью сокращения записи опущены обозначения функциональной зависимости a, b и ε от z или z' .

Из (1) и выражений для z следует, что

$$\sup z = \begin{cases} 1, & j = 1, \\ L(1) \approx 2.3, & j = 2, \end{cases} \quad (10)$$

Однако, поскольку $m^{-1} > 1$, то точной верхней грани для z' не существует, при этом, если имеет место равенство

$$g = g' > 0, \quad (11)$$

то всегда справедливо неравенство $z < z'$, из которого вытекают включения

$$D(z') \subset D(z) \subset D(0) \equiv D,$$

т.е. при условии (11) области голоморфности для внешнего варианта всегда меньше, чем для внутреннего. Кроме того, при условии (11) и использовании эксцентрической аномалии в качестве независимой переменной области голоморфности, с учетом (10), будут больше, чем при использовании истинной аномалии.

Известно [4], что функция

$$\theta(e) = \frac{e \exp \sqrt{1-e^2}}{1 + \sqrt{1-e^2}} \quad (12)$$

отображает границу Γ на окружность единичного радиуса с центром в начале координат, а область D на внутренность единичного круга:

$$|\theta(e)| = 1, \quad e \in \Gamma; \quad |\theta(e)| < 1, \quad e \in D.$$

Как показывают расчеты и анализ, функция (12) отображает границы $\Gamma(z)$ при $z > 0$ на окружности радиуса $\chi(z)$, а области $D(z)$ на внутренность кругов такого же радиуса:

$$|\theta(e)| = \chi(z), \quad e \in \Gamma; \quad |\theta(e)| < \chi(z), \quad e \in D,$$

причем $\chi(z) > a$. Тогда функция

$$\theta_0(e) = \frac{\theta(e)}{|\theta(e)|} \quad (13)$$

при любых $z \geq 0$ отображает границы $\Gamma(z)$ на окружность единичного радиуса, а области $D(z)$ на внутренность единичного круга, т.е. границы и области голоморфности инвариантны относительно преобразования (13), в котором $\theta(e)$ определяется формулой (12), при этом гомотетичными оказываются только точки пересечения овалов и единичной окружности с координатными осями. Отметим, что с увеличением z отношение $a/\chi(z)$ убывает, но имеет точную нижнюю грань:

$$\inf \left\{ \frac{a}{\chi(z)} \right\} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{a}{\chi(z)} = \frac{2}{\exp(1)} = 0.7357... .$$

Поскольку границы и области голоморфности зависят только от величины z или z' , то в дальнейшем с целью упрощения записи вместо функций $u'(e', z)$ для внутреннего варианта и $u(e, z')$ для внешнего будем рассматривать функцию вида $u(e, z)$. Тогда исходный элемент $u(e, 0, z)$ с центром в точке $e = 0$ абсолютно сходится в круге $C(z)$: $|e| < b$, а поскольку $b < a$ и $C(z) \subset D(z)$, то возможно аналитическое продолжение этого элемента вдоль оси v из точки $e = 0$ в точки $e = e_0 \in (0, a)$ при помощи элементов $u(e, e_0, z)$ – рядов по степеням $e - e_0$, абсолютно сходящихся в кругах $|e - e_0| < \rho(e_0, z)$.

Обозначим через v_0, w_0 координаты точки пересечения границы $\Gamma(z)$ с нормалью к $\Gamma(z)$, которая проходит через точку e_0 и определяется уравнением

$$w = \frac{w_0}{v_0} \operatorname{cth}^2 y_0 (v - e_0), \quad (14)$$

где y_0 – значение параметра y в точке (v_0, iw_0) . Исключая v_0, w_0 из (14) при помощи (4), получим уравнение

$$(y_0 - z)(\operatorname{cth} y_0 - y_0 + z) - e_0^2 \operatorname{ch}^4 y_0 = 0. \quad (15)$$

Искомое значение y_0 можно найти из (15) методом касательных [18], причем в качестве нулевого приближения удобно использовать значение $y_{00} = y_2 - e_0$. После того как y_0 найдено, радиус сходимости, $\rho = \rho(e_0, z)$, элемента $u(e, e_0, z)$ вычисляется по формуле

$$\rho = \sqrt{(v_0 - e_0)^2 + w_0^2}, \quad (16)$$

и разложение этого элемента по степеням $e - e_0$ будет сходиться для всех вещественных e из интервала (e_{\min}, e_{\max}) , где

$$e_{\min} = \begin{cases} 0, & e_0 \leq \rho, \\ e_0 - \rho, & e_0 > \rho, \end{cases} \quad e_{\max} = e_0 + \rho.$$

Таблица 1. Радиусы и границы интервалов сходимости элементов $u(e, e_0, z)$ с центрами в точках $e_0 = 0.0 \div 0.8 (0.1)$ для $z = 0.05$.

e_0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
ρ	0.636	0.617	0.571	0.508	0.434	0.353	0.263	0.165	0.065
e_{\min}	0	0	0	0	0	0.147	0.337	0.535	0.735
e_{\max}	0.636	0.717	0.771	0.808	0.834	0.853	0.863	0.865	0.865

В таблице 1 приведены радиусы и границы интервалов сходимости элементов $u(e, e_0, z)$ для значения $z = 0.05$, при котором овал, ограничивающий область голоморфности, характеризуется параметрами $a = 0.8648$, $b = 0.6355$, $\varepsilon = 0.2651$. Из таблицы видно, что, хотя с увеличением e_0 радиус сходимости, ρ , уменьшается, длина интервала сходимости, равная разности $e_{\max} - e_{\min}$, сначала возрастает, а затем убывает, при этом, очевидно, она достигает наибольшего значения $2e_0$ при $e_0 = \rho$, или, с учетом (6) и (16), при условии

$$e_0 = \frac{y_0 - z}{v_0 \operatorname{sh} 2y_0}, \quad (17)$$

Подставляя (17) в (15), после элементарных преобразований получим уравнение

$$y_0 = \frac{1}{2} \operatorname{cth} y_0 + z, \quad (18)$$

определяющее значение y_0 , при котором окружность, представляющая границу круга сходимости элемента $u(e, e_0, z)$, проходит через точку $e = 0$. Уравнение (18) легко решить методом простой итерации, причем в качестве нулевого приближения удобно использовать значение

$$y_{00} = \frac{3}{5} y^* + z.$$

Из геометрических и аналитических соображений ясно, что искомую окружность можно вписать только в овалы, обладающие значительным сжатием, т.е. при малых z , и корень y_0 уравнения (18) должен удовлетворять неравенствам $y_1 \leq y_0 < y_2$. Найдем наибольшее значение $z = z^*$, при котором граница круга сходимости элемента $u(e, e_0, z^*)$ проходит через начало координат $e = 0$ и точку $e = (2e_0, 0)$ границы $\Gamma(z^*)$. Поскольку в этом случае имеет место равенство $y_1 = y_0$, то, приравнявая правые части первого из уравнений (8) и (18), приходим к уравнению $2 \operatorname{th}^2 y_0 = 1$, откуда, с точностью до четырех значащих цифр, имеем

$$y_0 = \operatorname{arth} \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2} - 1} = 0.8814, \quad z^* = y_0 - \operatorname{th} y_0 = y_0 - \frac{1}{2} \operatorname{cth} y_0 = 0.1743.$$

Таким образом, при $z \in [0, z^*]$ области голоморфности образуют семейство, допускающее наиболее эффективное аналитическое продолжение исходного элемента.

Условие (18) позволяет существенно упростить формулы для вычисления оптимального значения e_0 и координат v_0, w_0 точки касания границы $\Gamma(z)$ и круга сходимости элемента $u(e, e_0, z)$. Действительно, поскольку

$$\operatorname{cth} y_0 = 2\bar{y}_0, \quad \operatorname{th} y_0 = 1/(2\bar{y}_0),$$

где $\bar{y}_0 = y_0 - z$, то из уравнений (4) для v_0, w_0 в первом координатном угле находим

$$v_0 = \bar{y}_0, \quad w_0 = \sqrt{\bar{y}_0^2 - \frac{1}{2}}, \quad (19)$$

и равенство (17), с учетом первого из (19), дает

$$e_0 = \frac{1}{\operatorname{sh} 2y_0}. \quad (20)$$

Заметим, что в силу (19) при $z \in [0, z^*]$ справедливо равенство $v_0^2 - w_0^2 = 1/2$, а граница $\Gamma(z^*)$ имеет следующие параметры:

$$a = 1/\sqrt{2} = 0.7071, \quad b = 0.5714, \quad \varepsilon = 0.1920.$$

Таблица 2. Значения y_0 и e_0 , обеспечивающие наиболее эффективное аналитическое продолжение элементов $u(e, 0, z)$ при помощи разложений $u(e, e_0, z)$ по степеням $e - e_0$, для $z = 0.00 \div 0.15 (0.05)$ и $z = z^*$.

z	0.00	0.05	0.10	0.15	z^*
y_0	0.772	0.802	0.833	0.865	0.881
e_0	0.448	0.419	0.392	0.366	0.354

В таблице 2 приведены вычисленные по формулам (18) и (20) значения y_0 и e_0 , обеспечивающие наибольшую длину интервала сходимости, для пяти областей голоморфности семейства, допускающего наиболее эффективное аналитическое продолжение исходных элементов. Отметим, что оптимальное значение $e_0 = 0.445$, найденное Шарлье [3] для $z = 0$, ошибочно: в действительности $e_0 = 0.4477\dots$

При $z > z^*$ аналитическое продолжение исходного разложения $u(e, 0, z)$ по степеням e с радиусом сходимости $\rho = b$ можно осуществить непосредственно в точки $e = e_0 \in (0, a/2)$ вещественной оси при помощи рядов $u(e, e_0, z)$ по степеням $e - e_0$ с радиусами сходимости, равными $\rho = a - e_0 > a/2$. Однако, поскольку уже при $z = 1$ разность $a - b = 0.01$, то при $z > 1$ круг сходимости исходного разложения практически совпадает с областью голоморфности и его аналитическое продолжение становится невозможным.

Выше было установлено, что при условии (11) области голоморфности для внешнего варианта всегда меньше, чем для внутреннего. Поэтому использование эксцентрической или истинной аномалии внешней планеты в качестве независимой переменной может привести к существенному уменьшению области голоморфности координат внутренней планеты, при котором аналитическое продолжение исходного степенного ряда оказывается нецелесообразным или даже невозможным.

В заключение отметим, что в данной работе определены границы областей голоморфности координат невозмущенного эллиптического движения относительно эксцентриситетов планетных орбит для случаев использования эксцентрической или истинной аномалии одной из планет в качестве независимой переменной. Рассмотрены как внутренний, так и внешний варианты: в первом за независимую переменную принимается одна из аномалий внутренней планеты (планеты с наибольшим по модулю средним движением), во втором – внешней планеты. Полученные уравнения (4) обобщают известные уравнения границы области голоморфности, когда независимой переменной является время, и определяют бисимметричные овалы, размеры и форма которых зависят от эксцентриситетов и отношения средних движений планет. Показано, что при условии (11) и использовании эксцентрической аномалии области голоморфности будут больше, чем при использовании истинной аномалии. Найдена функция (13), отображающая области голоморфности при любых $z \geq 0$ на внутренность единичного круга. Описана методика определения радиусов сходимости элементов $u(e, e_0, z)$ эксцентрической аномалии одной из планет, полученных при помощи аналитического продолжения исходного элемента $u(e, 0, z)$ с центром в начале координат. Установлено, что для значений z на отрезке $[0, z^*]$ области голоморфности допускают наиболее эффективное аналитическое продолжение исходного элемента, а при $z > 1$ круг сходимости исходного элемента практически совпадает с областью голоморфности и его аналитическое продолжение становится невозможным. Полученные результаты предполагаются использовать при определении условий сходимости разложений пертурбационных функций планетной задачи трех тел.

Автор выражает глубокую благодарность Ю.В. Батракову за полезные замечания и рекомендации, сделанные в ходе выполнения данной работы.

Литература

1. *Дубошин Г.Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968.
2. *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968.
3. *Шарлье К.* Небесная механика. М.: Наука, 1966.
4. *Уинтнер А.* Аналитические основы небесной механики. М.: Наука, 1967.
5. *Герасимов И.А., Мушаилов Б.Р.* // *Вестник Московского ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2000, № 6, с. 60–64.
6. *Гурвиц А., Курант Р.* Теория функций. М.: Наука, 1968.
7. *Шабат Б.В.* Введение в комплексный анализ. М.: Наука, 1969.
8. *Уорд Дж.А.* // В сб.: *Космические траектории*. М.: ИЛ, 1963, с. 92–112.

9. *Галибина И.В.* // Бюлл. ИТА, 1958, т. 6, № 9, с. 630–670.
10. *Перлин Ф.Х.* // Бюлл. ИТА, 1962, т. 8, № 6, с. 429–443.
11. *Насозу Р.Е.* // *Astron. J.*, 1969, v. 74, № 4, p. 544–550.
12. *Соколов В.Г.* // *Известия ГАО*, 2004, № 217, с. 330–336.
13. *Штифель Е., Шейфеле Г. Л.* *Линейная и регулярная небесная механика.* М.: Наука, 1975.
14. *Бордовицына Т.В.* *Современные численные методы в задачах небесной механики.* М.: Наука, 1984.
15. *Пуанкаре А.* *Лекции по небесной механике.* М.: Наука, 1965.
16. *Павлов Г.Г.* // *Астрон. журн.*, 1979, т. 56, вып. 5, с. 1077–1082.
17. *Broucke R., Cefola P.* // *Celest. Mech.*, 1973, v. 7, № 3, p. 388–389.
18. *Калиткин Н.Н.* *Численные методы.* М.: Наука, 1979.

ON HOLOMORPHY OF COORDINATES OF ELLIPTIC MOTION WITH RESPECT TO THE ECCENTRICITIES

Sokolov V.G.

Summary

The authors have obtained the equations of borders for domains of holomorphy of the coordinates of unperturbed elliptic motion with respect to the planetary eccentricities when eccentric or true anomaly is used for one of the two planets as an independent variable. These equations extend the known equations when time is used as an independent variable. They define the bisymmetric oval curves whose dimensions and oblatenesses depend on the orbital eccentricities and the ratio of the planetary mean motions. It has been shown that the use of the eccentric or true anomaly of the outer planet as the independent variable can essentially diminish the domain of holomorphy of the coordinates of the inner planet, so that the analytic continuity of the initial power series, having the zero value as its centre, becomes impossible.

О ПОСТРОЕНИИ СВОДНОГО КАТАЛОГА КООРДИНАТ РАДИОИСТОЧНИКОВ ПО РСДБ-НАБЛЮДЕНИЯМ

Соколова Ю.Р., Малкин З.М.

В декабре 2004 г. был инициирован международный проект по подготовке новой реализации международной опорной небесной системы координат ICRF (International Celestial Reference Frame). Целями проекта являются исследование случайных и систематических ошибок каталогов радиоисточников и поиск оптимальной стратегии построения новой версии ICRF. В настоящей работе представлены первые результаты работы по этому проекту, ведущейся в ГАО РАН. Нами исследовано 8 каталогов координат радиоисточников, полученных по РСДБ-наблюдениям в центрах анализа IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry). Проведено сравнение четырех моделей аналитического представления систематических разностей между каталогами: жесткого вращения, жесткого вращения с деформацией (модель IERS), а также двух моделей ортогонального разложения – по сферическим функциям и функциям Лежандра-Фурье. Показано, что последняя модель позволяет получить наиболее точное представление систематических разностей. Построена первая версия сводного каталога. Сравнение результатов определения смещения небесного полюса с нашим каталогом и ICRF-Ext.2 показало повышение точности при применении сводного каталога.

Введение

Улучшение Международной небесной опорной системы координат ICRS, в настоящее время, практически реализуемой в виде каталога координат радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame) является предметом совместной деятельности нескольких международных организаций: Международного астрономического союза (МАС), Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS – International Earth Rotation and Reference Systems Service) и Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS – International VLBI Service for Astrometry and Geodesy, Schlueter и др., 2002).

Официальной реализацией ICRS, по решению Генеральной ассамблеи МАС в Киото (1997), был принят каталог координат радиоисточников, полученный в 1996 г. в результате обработки ~1.6 миллиона РСДБ-наблюдений, выполненных с 1979 по 1995 гг., с помощью пакета CALC/SOLVE в Годдардовском центре космических полетов НАСА (GSFC) (Ма и др., 1998). Все источники, вошедшие в каталог ICRF, были разделены на три группы. В первую группу вошли 212 опорных источников, так называемые “defining”, определяющие ориентацию осей системы. Средняя ошибка их положений ~0.25 mas (Ма и др., 1998). Здесь и далее mas обозначает миллисекунды дуги. Во вторую группу вошли 294 источника, так называемые “candidate”, которые еще не имели достаточного количества наблюдений. К третьей группе отнесли 102 источника с недостаточной стабильностью координат (“other”), включенные для заполнения пустых областей небесной сферы. Таким образом, полный каталог первой версии ICRF состоял из 608 источников, приблизительно равномерно распределенных по небесной сфере (Ма и др., 1998).

В 1998 и 2004 годах были выпущены два обновления ICRF, включающие новые наблюдения и источники: 59 новых источников в ICRF-Ext.1 и 105 в ICRF-Ext.2 (Ма, 2001; Феу и др., 2004). Координаты некоторых источников из категорий “candidate” и “other” были пересмотрены. Источники основной группы сохранили свои изначальные

координаты для сохранения преемственности между реализациями ICRF, т.е. не пересматривались с 1995 г.

В последующее десятилетия точность РСДБ-наблюдений и методов их анализа значительно улучшились, и в декабре 2004 г. совместным решением MAC, IERS и IVS был инициирован международный проект по подготовке новой реализации ICRF. Целями проекта являются исследование случайных и систематических ошибок каталогов радиоисточников и поиск оптимальной стратегии построения новой версии ICRF. В рамках этого проекта несколько центров анализа IVS подготовили каталоги координат радиоисточников (далее называемые исходными или индивидуальными).

Поскольку оригинальная версия ICRF и каталоги, предоставляемые различными центрами анализа РСДБ наблюдений, строятся разными пакетами программ по одним и тем же наблюдениям, то точность каждого такого индивидуального каталога определяется в первую очередь использованным методом обработки. Поэтому полученные координаты радиоисточников могут быть подвержены влиянию случайных и систематических ошибок, связанных не только с самими наблюдениями, но также и с особенностями программных систем, различными моделями применяемых редуций, выбранной стратегией обработки и т.д. Для ослабления влияния этих ошибок кажется целесообразным построение сводного каталога, что и явилось основной задачей настоящей работы. Для построения сводного каталога мы использовали методы, близкие к методам оптической астрометрии. Эта работа проводилась в три этапа:

1. Анализ точности и систематических ошибок каталогов, и выбор оптимального метода представления систематических разностей между каталогами.
2. Улучшение каталога ICRF в случайном отношении.
3. Улучшение каталога ICRF в систематическом отношении.

В результате была получена первая версия сводного каталога координат радиоисточников и проведено его сравнение с каталогом ICRF-Ext.2.

1. Описание и предварительное сравнение исходных каталогов

Для целей настоящей работы мы использовали 8 индивидуальных каталогов, полученных центрами анализа IVS в начале 2006 г. в рамках международного проекта по улучшению ICRF, описанного выше. Данные об этих каталогах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Каталоги представленные в рамках международного проекта.

Центр	Программное обеспечение	Интервал дат (месяц/год)	Число наблюдений	Число источников
AUS, Австралия	OCCAM	11/1979 – 12/2004	3208197	737
BKG, Германия	CALC/SOLVE	01/1980 – 01/2005	4031453	748
DGFI, Германия	OCCAM	01/1980 – 01/2005	3650771	686
GSFC, США	CALC/SOLVE	08/1979 – 01/2005	4574189	954
JPL, США	MODEST	10/1978 – 01/2005	3575847	734
MAO, Украина	SteelBreeze	10/1980 – 01/2005	3773765	685
SHAN, Китай	CALC/SOLVE	04/1980 – 01/2005	4431503	813
USNO, США	CALC/SOLVE	09/1979 – 01/2005	4252684	943

Обычно исследование систематических разностей между каталогами проводится по некоторому набору опорных источников, выбор которых в той или иной степени влияет на окончательный результат. В настоящей работе, для сравнения, были использованы два набора опорных источников: 525 источников, присутствующих во всех каталогах и 196 источников из первой группы, входящих в состав 212 опорных источников ICRF. Следует отметить, что мы принимали во внимание источники, имеющие не

менее 15 наблюдений в 2 сессиях наблюдений. Распределение выбранных опорных источников по небесной сфере показано на рис. 1. На рис. 2 и 3 приведены средние значения взвешенных среднеквадратических разностей (WRMS) между исходными каталогами (взвешивание проводилось в соответствии с ошибками координат, приведенными в исходных каталогах). Здесь и далее $\mu\text{ас}$ обозначает микросекунды дуги.

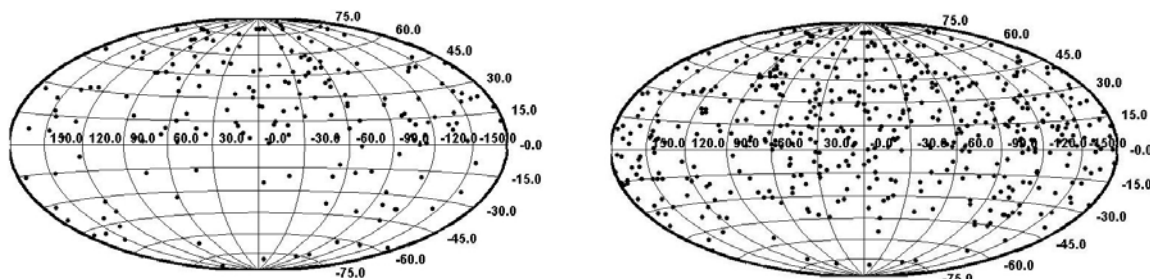


Рис. 1. Распределение общих источников на небесной сфере (196 – слева, 525 – справа).

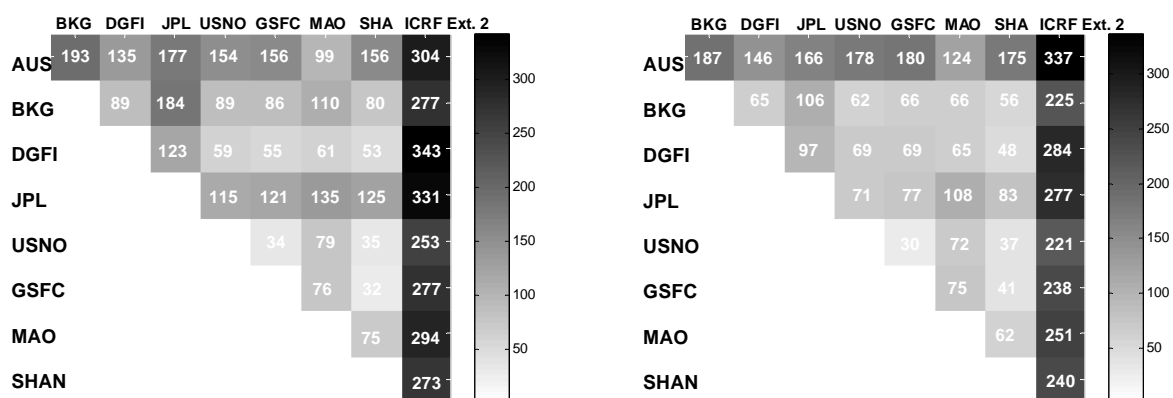


Рис. 2. WRMS разностей между исходными каталогами для 196 общих источников, $\mu\text{ас}$, слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

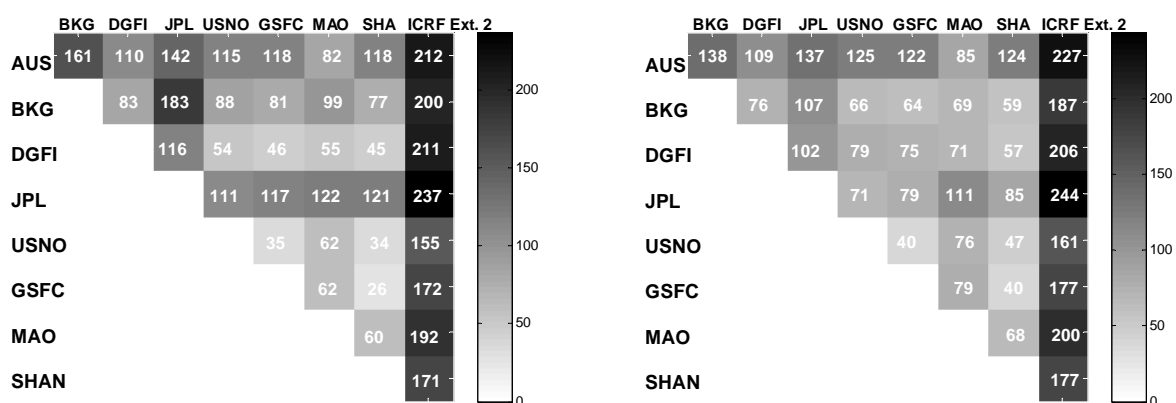


Рис. 3. WRMS разностей между исходными каталогами для 525 общих источников, $\mu\text{ас}$, слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

Из рис. 2 и 3 видно, что каталоги, полученные с использованием пакета CALC/SOLVE, имеют схожие и наименьшие отклонения в координатах источников от опорной системы ICRF-Ext.2, что, скорее всего, объясняется тем, что оригинальная

версия каталога ICRF-Ext.2 была построена с использованием пакета CALC/SOLVE. Большие отклонения координат радиоисточников в каталоге центра JPL вызваны, по-видимому, тем, что в решении фиксировались координаты двух источников, вместо наложения условия типа No-Net-Rotation на весь каталог, как практикуется в других центрах анализа. Большие отклонения каталогов AUS и DGFI, использующими один пакет обработки OCCAM, могут быть обусловлены различием в методе оценивания (AUS – среднеквадратическая коллокация; DGFI – классический метод наименьших квадратов), а также существенным различием в количестве обработанных наблюдений. Наибольший интерес, вызывают большие значения WRMS разностей с ICRF-Ext.2, которые свидетельствует о систематических различиях всех исходных каталогов с официальной системой. Эти предварительные выводы находят свое подтверждение в систематических ошибках между каталогами, полученных ниже.

2. Выбор оптимального метода представления систематических разностей

Задача об определении систематических разностей двух каталогов сводится к низкочастотной фильтрации индивидуальных разностей с целью подавления случайной компоненты. Полученные таким образом, систематические разности позволяют провести сравнение каталогов в систематическом отношении, а так осуществить приведение одного каталога в систему другого. В данной работе были проанализированы четыре модели представления систематических разностей – модель жесткого вращения, модель вращение с деформацией (модель IERS), разложение по сферическим функциям (метод Броше) (Brosche, 1966), разложение по функциям Лежандра-Фурье (Bien и др., 1978).

а) Модель жесткого вращения

Пусть имеются две системы координат $X_1Y_1Z_1(\alpha_1, \delta_1)$ и $X_2Y_2Z_2(\alpha_2, \delta_2)$. Системы α_2, δ_2 образуется из системы α_1, δ_1 путем вращения вокруг осей $X_1Y_1Z_1$ на углы A_1, A_2, A_3 . Обозначим $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ и $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$, систематические разности между двумя каталогами, обусловленные поворотом. В этом случае определяются выражением (Walter и Sovers, 2000):

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= A_1 \operatorname{tg} \delta \cos \alpha + A_2 \operatorname{tg} \delta \sin \alpha - A_3 \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha\end{aligned}\quad (1)$$

Существенным недостатком модели (1) является то, что в решении подразумевается, что $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ состоят только из вращательных компонент и шума, в то время, как систематические разности обычно также содержат и невращательные компоненты, которые могут внести искажения в определение параметров поворота.

б) Модель вращения и деформации (модель IERS)

С 1995г. центром ICRS IERS для сравнения каталогов используется модель (2), где различия координат представлены поворотом (1) и деформацией, где $D\alpha, D\delta$ – наклоны по α и δ соответственно, и $B\delta$ – сдвиг по δ (Arias и Bouquillon, 2004).

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= A_1 \operatorname{tg} \delta \cos \alpha + A_2 \operatorname{tg} \delta \sin \alpha - A_3 + D_\alpha \delta \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha + D_\delta \delta + B_\delta\end{aligned}\quad (2)$$

Как показало исследование, углы поворота, полученные по модели (1) и (2) совпадают на уровне ошибок, что говорит о том, что эти модели имеют схожую точность определения углов поворота. В ходе глобального уравнивания на опорные источники накладываются условия вида No-Net-Rotation, которые должны исключить поворот между различными реализациями ICRF, но, тем не менее, некоторые углы поворота оказались значимыми.

в) Разложение по ортогональным функциям

Для более точного описания систематических разностей, используется их представление с помощью ортогональных функций. Исходным материалом также, как и в предыдущих случаях, являются индивидуальные разности положений N общих источников двух каталогов.

$$\Delta_i = f(\alpha_i, \delta_i) = \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_i \\ \Delta\delta_i \end{Bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Основное представление индивидуальных разностей есть:

$$f(\alpha, \delta) = \sum_{j=0}^g b_j Y_j(\alpha, \delta) + \varepsilon, \quad (4)$$

где Y_j – полная система ортогональных функций, в пространстве, образованном переменными $\alpha, \delta, C_j, C'_j$ – коэффициенты разложения, ε – случайная ошибка.

Модель Броше. В оригинальном методе Броше (Brosche, 1966) базисные функции Y_j имеют вид:

$$Y_j = K_j(\alpha, \delta) \quad (5)$$

где сферические функции $K_j(\alpha, \delta)$ задаются выражением:

$$K_i(\alpha, \delta) = \begin{cases} P_{n_0}(\delta), & k = 0, l \neq 1 \\ P_{nk}(\delta) \sin(k\alpha), & k \neq 0, l = 0 \\ P_{nk}(\delta) \cos(k\alpha), & k \neq 0, l = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$P_{nk}(\delta)$ - присоединенные полиномы Лежандра, вычисляются по формуле:

$$P_{nk}(\delta) = \cos^k(\delta) \left[\sin^p(\delta) + \sum_{\mu=1}^{[p/2]} \frac{(-1)^\mu \prod_{\nu=0}^{2\mu-1} (p-\nu)}{\prod_{\nu=1}^{\mu} 2\nu(2n-2\nu+1)} \sin^{p-2\mu}(\delta) \right], \quad \begin{matrix} n = 0, 1, 2, \dots \\ k = 0, 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (7)$$

где $p = n - k$, $[p/2]$ - целая часть от деления $p/2$. А индекс j связан с индексами n, k, l соотношением: $j = n^2 + 2k + l - 1$.

Модель Лежандра-Фурье. В этом случае основное представление (4) есть:

$$f(\alpha, \delta) = \sum_{nkl} b_{nkl} Y_{nkl}(\alpha, \delta) + \varepsilon \quad (8)$$

где базисные функции задаются выражением:

$$Y_{nkl} = R_{nkl} L_n(\bar{\delta}) F_{kl}(\alpha) \quad (9)$$

Полиномы Лежандра вычисляются согласно рекуррентному соотношению:

$$L_{n+1}(\bar{\delta}) = \frac{2n+1}{n+1} \bar{\delta} L_n(\bar{\delta}) - \frac{n}{n+1} L_{n-1}(\bar{\delta}), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

$$L_0 = 1; L_1 = \bar{\delta}; \bar{\delta} = \sin(\delta)$$

функции Фурье определяются как

$$F_{kl}(\alpha) = \begin{cases} 1, & k = 0, l = -1 \\ \cos(lk\alpha), & k \neq 0, l = +1 \\ \sin(-lk\alpha), & k \neq 0, l = -1 \end{cases} \quad (11)$$

а базисные функции нормируются с помощью множителя:

$$R_{nkl} = \sqrt{2n+1} \begin{cases} 1, & k = 0 \\ \sqrt{2}, & k \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Рис. 4–11 демонстрируют степень аппроксимации систематических разностей входных каталогов с ICRF-Ext.2 (черные линии) с помощью трех аналитических моделей (три поверхности), значения по горизонтальным осям – в градусах, по вертикальной оси – в mas. Слева приведены данные по $\Delta\alpha$, справа по $\Delta\delta$. Поверхности для модели Броше не приведены, поскольку они практически совпадают с моделью Лежандра-Фурье.

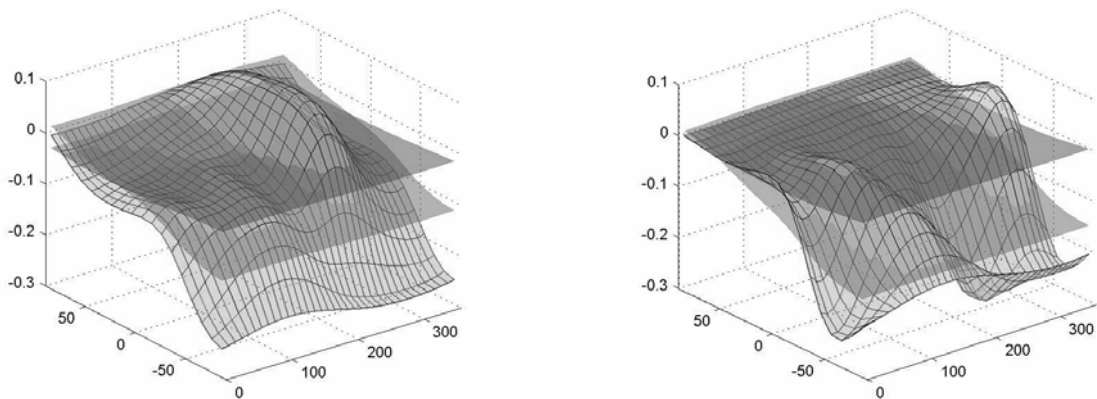


Рис. 4. Каталог AUS.

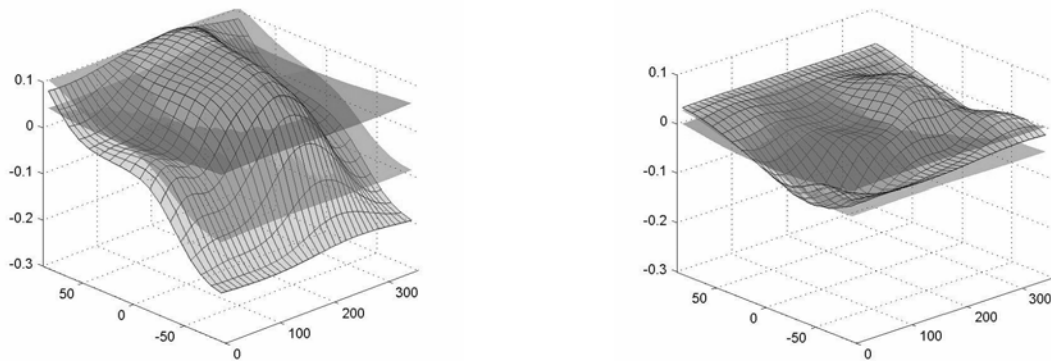


Рис. 5. Каталог BKG.

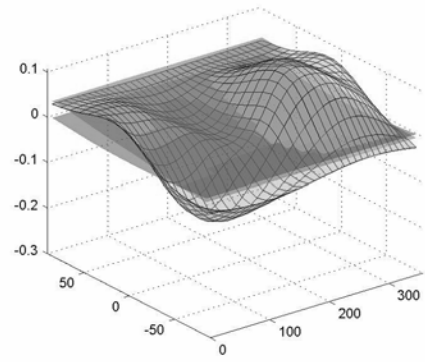
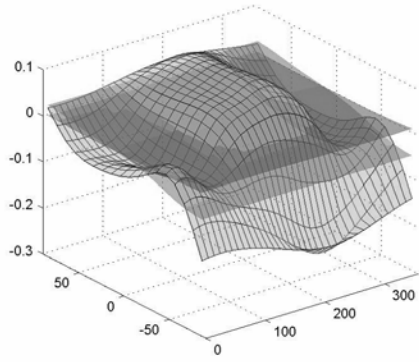


Рис. 6. Каталог DGFI.

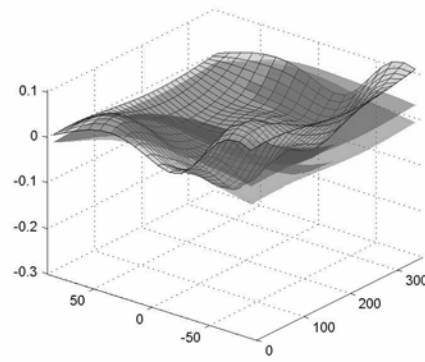
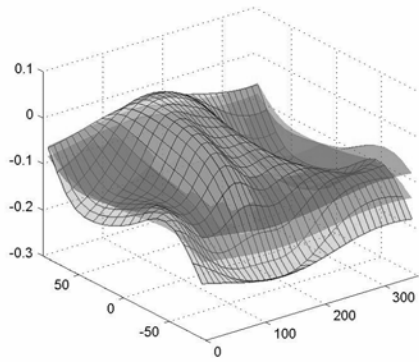


Рис. 7. Каталог JPL.

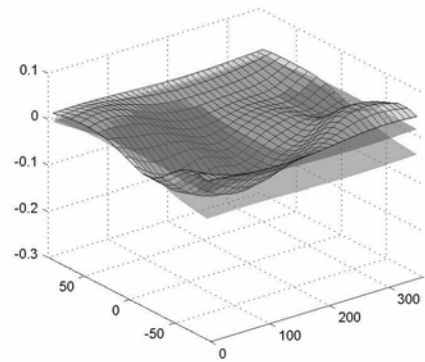
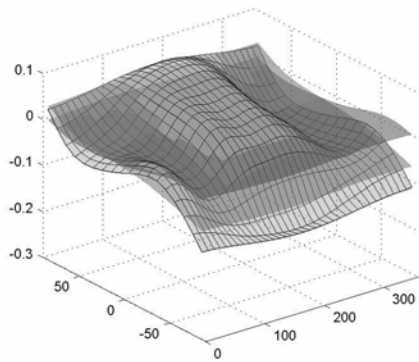


Рис. 8. Каталог USNO.

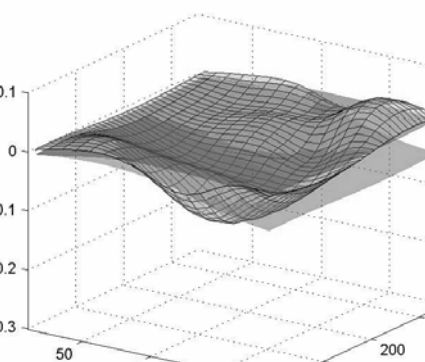
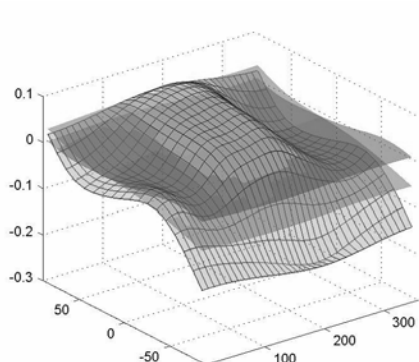


Рис 9. Каталог GSFC.

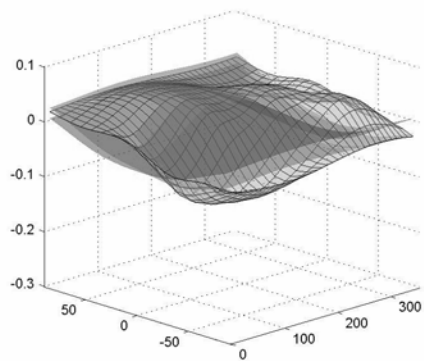
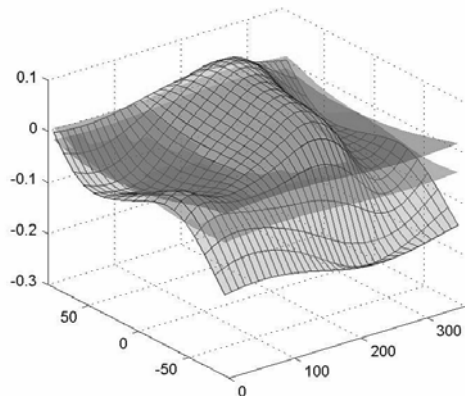


Рис. 10. Каталог MAO.

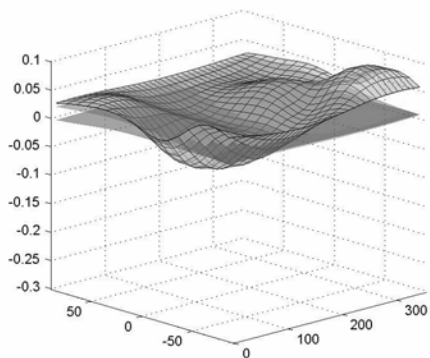
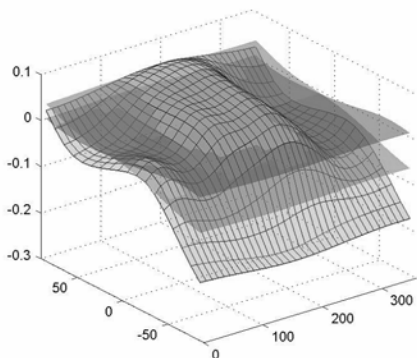


Рис. 11. Каталог SHAN.

Из табл. 2 и рис. 4-11 видно, что представление систематических разностей между каталогами с помощью разложения по функциям Лежандра-Фурье воспроизводит их наиболее точно. Следует также упомянуть, что при $n = 0$ и $k = 0, 1$ представление (8) есть:

$$f(\alpha, \delta) = b_{00-1} + b_{011} \cos(\alpha) + b_{01-1} \sin(\alpha), \quad (14)$$

Таким образом, разложение по функциям Лежандра-Фурье, в отличие от метода Броше, явным образом включает в себя члены, отвечающие за поворот системы координат.

Таблица 2. Взвешенные среднеквадратические значения разностей координат между каталогами до и после аппроксимации в μas : ROT – модель жесткого вращения, ROT+DEF – модель вращения и деформации, Brosche – разложение по сферическим функциям и LF – разложение по функциям Лежандра-Фурье.

$\Delta\alpha$, 196 общих источников

	AUS	BKG	DGFI	JPL	USNO	GSFC	MAO	SHA
Исходные	304	277	343	331	253	277	294	273
ROT	301	271	342	308	249	274	286	271
ROT+DEF	299	265	342	308	247	273	285	270
Brosche	170	177	237	238	172	191	203	193
LF	110	127	167	174	124	146	156	147

$\Delta\delta$, 196 общих источников

	AUS	BKG	DGFI	JPL	USNO	GSFC	MAO	SHA
Исходные	337	225	284	277	221	238	251	240
ROT	337	225	284	273	221	238	251	240
ROT+DEF	333	224	283	273	221	237	251	239
Brosche	180	159	178	182	152	158	169	166
LF	111	115	116	131	109	111	136	117

$\Delta\alpha$, 525 общих источников

	AUS	BKG	DGFI	JPL	USNO	GSFC	MAO	SHA
Исходные	212	200	211	237	155	172	192	171
ROT	210	178	208	211	150	167	185	167
ROT+DEF	206	178	207	211	150	167	185	167
Brosche	185	158	182	192	138	154	167	153
LF	167	146	167	173	124	142	154	143

$\Delta\delta$, 525 общих источников

	AUS	BKG	DGFI	JPL	USNO	GSFC	MAO	SHA
Исходные	227	187	206	244	161	177	200	177
ROT	227	186	206	234	158	175	196	176
ROT + DEF	227	182	204	231	154	172	195	176
Brosche	201	164	180	202	138	155	175	159
LF	186	152	162	190	126	143	163	148

3. Улучшение ICRF в случайном отношении

Следующим шагом данной работы является улучшение ICRF в случайном отношении. Для этого все исходные каталоги были приведены в систему ICRF-Ext.2 с использованием метода разложения по функциям Лежандра-Фурье, как оптимального для представления систематических разностей между каталогами. Затем была вычислена средневзвешенная система координат источников в системе ICRF-Ext.2. На рис. 12 и 13 приведены WRMS разностей между исходными каталогами, приведенными к системе ICRF-Ext.2, и сводным каталогом в системе ICRF-Ext.2 для 196 и 525 общих источников.

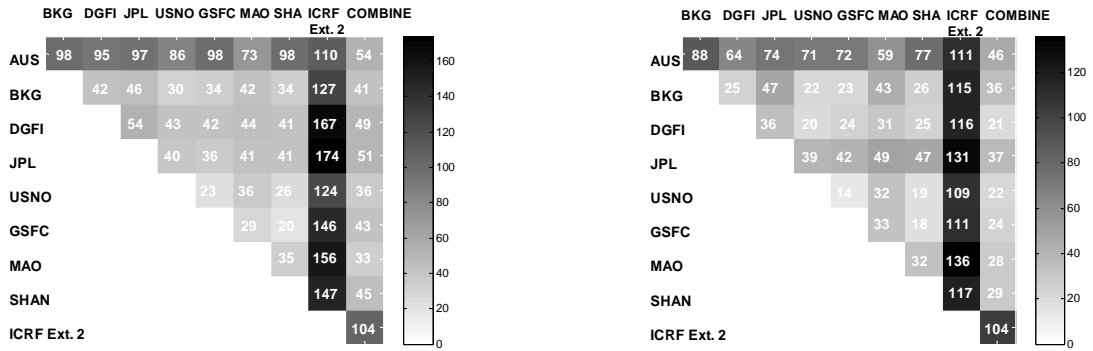


Рис. 12. WRMS разностей между исходными каталогами, приведенными к системе ICRF-Ext.2 и сводным каталогом в системе ICRF-Ext.2 для 196 общих источников, $\mu\alpha\sigma$, слева Δa , справа $\Delta \delta$.

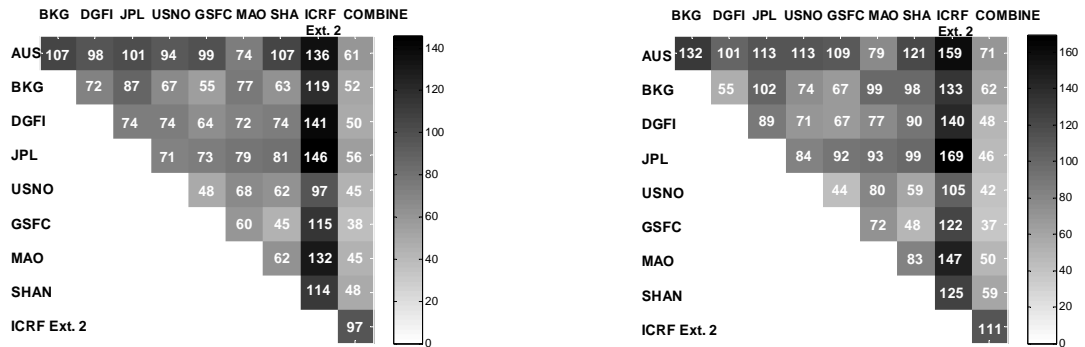


Рис. 13. WRMS разностей между исходными каталогами, приведенными к системе ICRF-Ext.2 и сводным каталогом в системе ICRF-Ext.2 для 525 общих источников, $\mu\alpha\sigma$, слева Δa , справа $\Delta \delta$.

4. Улучшение ICRF в систематическом отношении

Завершающий шаг в построении сводного каталога – улучшение ICRF в систематическом отношении. Для этого была вычислена средняя система из аппроксимирующих функций для каждого каталога по методу Лежандра-Фурье, на первом шаге без использования весов. Построенная таким образом система сравнивалась с индивидуальной системой на сетке 10° (α) \times 5° (δ), и определялось среднеквадратическое отклонение (RMS) каждой индивидуальной системы от средней. Полученные значения RMS определяли вес каждого из каталогов на следующей итерации. Окончательные веса каталогов, усредненные по небесной сфере, приведены в табл. 3 (усреднение проведено только для иллюстрации, при построении сводного каталога для различных ячеек использовались свои веса, которые, как правило, близки между собой для каждого исходного каталога).

Таблица 3. Усредненные веса индивидуальных каталогов при построении сводной системы.

Каталог	AUS	BKG	DGFI	GSFC	JPL	MAO	SHAN	USNO
Вес по α	0.271	0.713	0.485	2.073	0.215	0.588	1.104	2.160
Вес по δ	0.277	1.073	0.617	1.854	0.500	0.641	1.560	1.870

Полученная взвешенная средняя система была добавлена к сводному каталогу в системе ICRF-Ext.2 (раздел 3). На рис. 14 и 15 приведены WRMS разностей между исходными каталогами и сводным каталогом для 196 и 525 общих источников, а на рис. 16 показаны систематические разности между исходными каталогами и сводным каталогом.

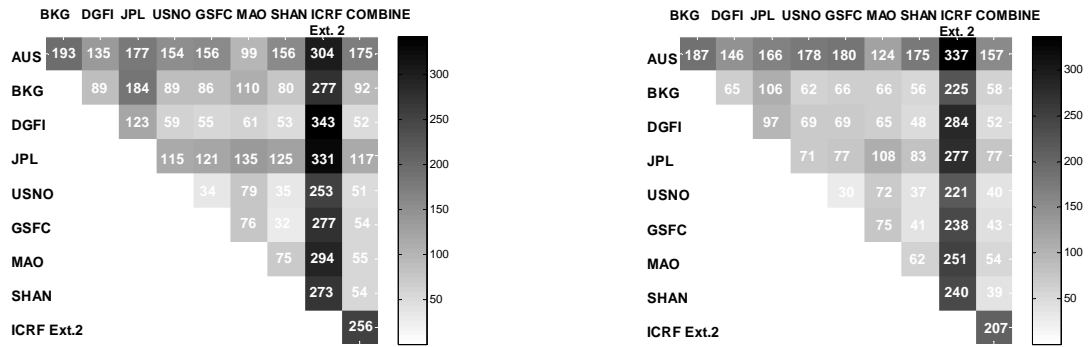


Рис. 14. WRMS разностей между исходными каталогами и сводным, μas , слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

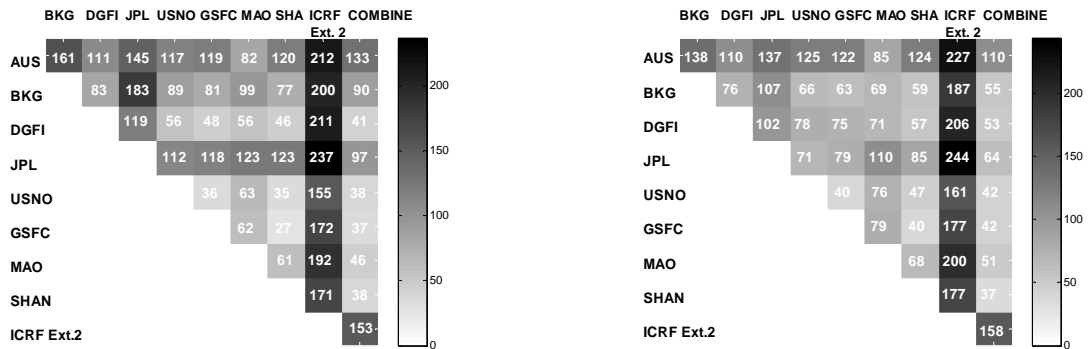


Рис. 15. WRMS разностей между исходными каталогами и сводным, μas , слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

Сравнение полученного сводного каталога с каталогом ICRF-Ext.2 в систематическом отношении показано на рис. 17. Результаты сравнения показывают, что каталог ICRF-Ext.2, который является последней реализацией ICRF (Feu и др., 2004), возможно, не лишен значительных систематических ошибок.

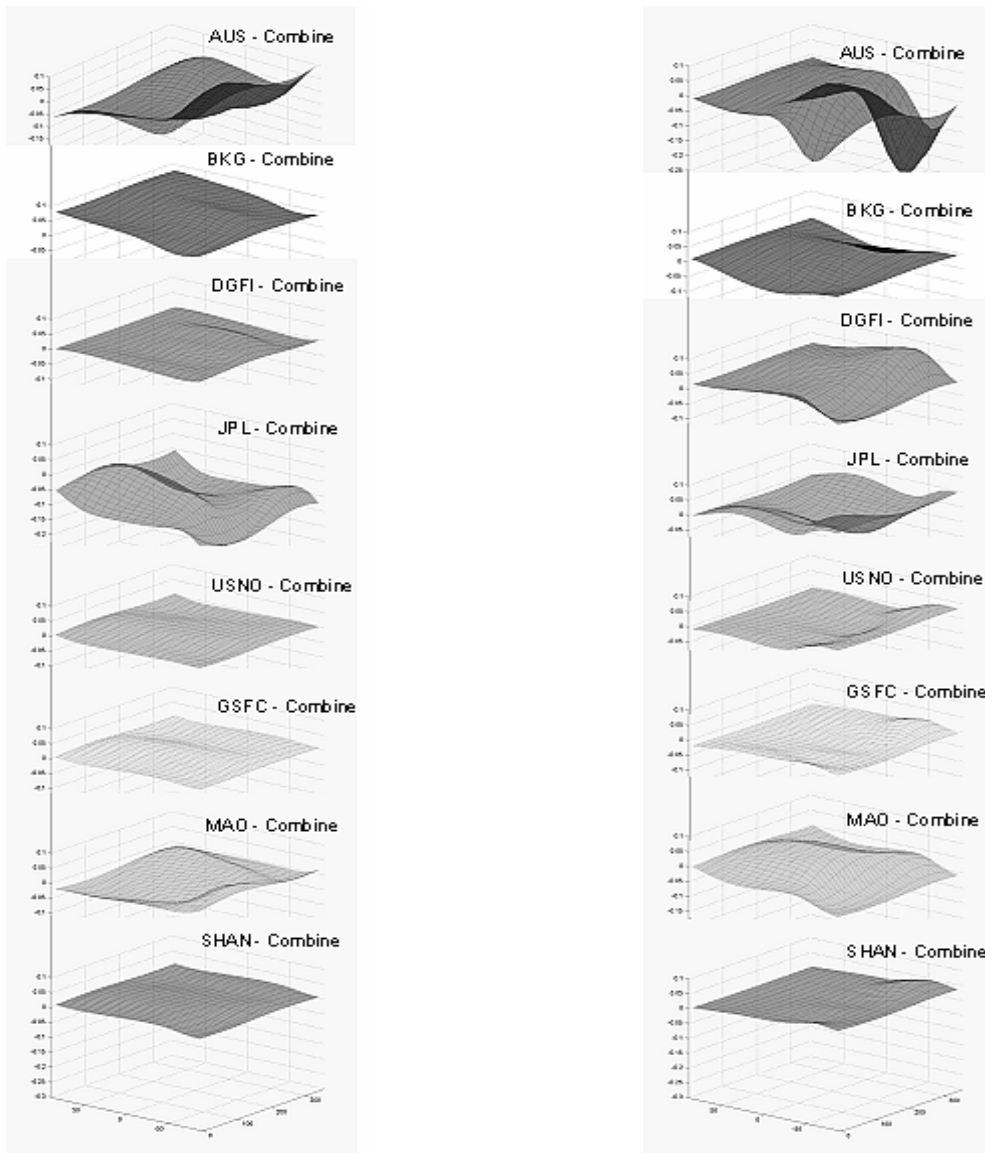


Рис. 16. Разности между исходными каталогами и сводным, mas, слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

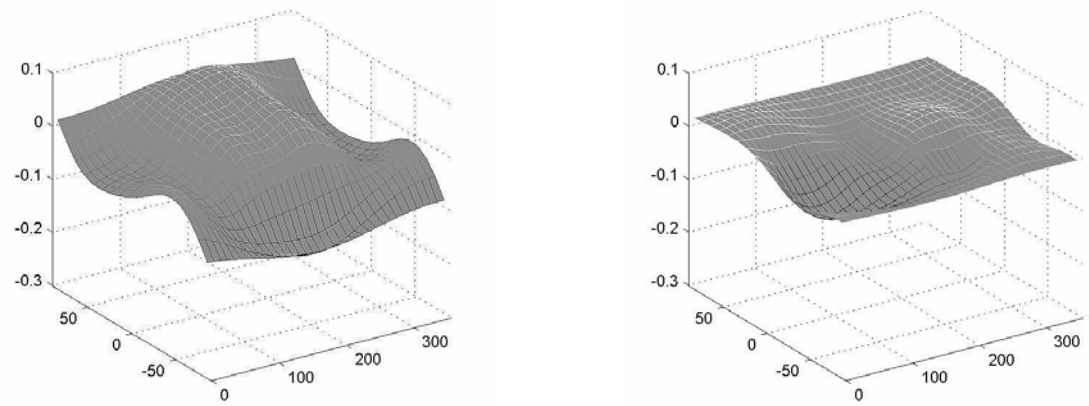


Рис. 17. Разности между сводным каталогом и ICRF-Ext.2, mas, слева $\Delta\alpha$, справа $\Delta\delta$.

5. Сравнение с наблюдениями

Для проверки качества полученного сводного каталога были вычислены два ряда определения смещения небесного полюса (углов нутации) по программам IVS R1 и R4, специально предназначенным для высокоточного определения параметров вращения Земли, за период 2002-2006 гг. (всего 451 суточная серия наблюдений), один с каталогом ICRF-Ext.2, другой с полученным сводным каталогом. По каждому ряду было вычислено среднеквадратическое значение разности с моделью нутации IAU2000A с коррекцией за вклад свободной нутации ядра по модели (Malkin, 2004). Результаты сравнения приведены в табл. 4, данные которой показывают повышение точности определения нутации при применении сводного каталога.

Таблица 4. WRMS разностей между двумя рядами координат небесного полюса, мас.

Каталог	Xc	Yc
ICRF-Ext.2	104	102
Сводный	98	99

6. Заключение

В настоящей работе мы сделали попытку получить сводный каталог координат радиоисточников, используя методы, близкие к тем, которые применяются в оптической астрометрии для построения звездных каталогов. Для исследования были использованы 8 исходных каталогов, полученных в центрах анализа IVS в рамках международного проекта по ревизии системы ICRF.

В проведенном сравнении аналитических методов представления систематических разностей между каталогами было показано, что методы разложения по ортогональным функциям позволяют представить систематические разности намного лучше, чем методы, применяемые в IERS. Из исследованных методов лучший результат был получен при использовании разложения по функциям Лежандра-Фурье.

В результате работы были получены два сводных каталога. Первый из них получен объединением исходных каталогов, приведенных к системе ICRF-Ext.2, и является улучшением ICRF в случайном отношении. Путем учета средней системы исходных каталогов был получен второй сводный каталог, который улучшает ICRF как в случайном, так и в систематическом отношении. Сравнение этого каталога с ICRF-Ext.2 показывает, что даже последняя официальная реализация ICRF, возможно, не лишена значительных систематических ошибок. Применение полученного сводного каталога к обработке РСДБ-наблюдений показало улучшение точности оценки углов нутации. Таким образом, уже первая версия сводного каталога координат радиоисточников показала перспективность данного подхода к улучшению ICRF.

Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на более детальный анализ случайных и систематических ошибок исходных каталогов и существующей реализации системы ICRF, а так же на выбор оптимальной схемы назначения весов. Интересно также провести сравнение двух методов построения сводных каталогов координат радиоисточников – примененного в настоящей работе и метода дуг, применяемого в работах ГАО НАНУ (Курьянова и Яцкив, 1993).

В настоящее время существуют различные взгляды на методы построения и улучшения ICRF. В этой связи представляется важным дальнейшая разработка объективных критериев оценки качества получаемых каталогов координат радиоисточников, поскольку существующие методы сравнения каталогов направлены, в основном, на изучение лишь *разностей* между ними.

Литература

- Курьянова А.Н., Яцкив Я.С.* (1993), Кинемат. и физ. неб. тел, т. 9, с. 15-25.
- Arias, E. F., S. Bouquillon* (2004), *Astron. Astrophys.*, V. 422, pp. 1105-1108.
- Bien R., Fricke W., Lederle T., Schwan H.* (1978), *Veroffen. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg*, No. 29, 21 p.
- Brosche P.* (1966), *Veroffen. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg*, No. 17, pp. 1-27.
- Fey A.L., C. Ma, E.F. Arias, P. Charlot, M. Feissel-Vernier, A.-M. Gontier, C.S. Jacobs, J. Li, D.S. MacMillan* (2004), *Astron. J.*, V. 127, pp. 3587-3608.
- Ma C., E.F. Arias, T.M. Eubanks, A.L. Fey, A.-M. Gontier, C.S. Jacobs, O.J. Sovers, B.A. Archinal, P. Charlot* (1998), *Astron. J.*, V. 116, pp. 516-546.
- Ma C.* (2001), In: *Proc. of the 15th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, Eds. D. Behrend, A. Rius, pp. 187-193.
- Malkin Z.* (2004), In: *Proc. Journees 2003: Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds*, Eds. A. Finkelstein and N. Capitaine, pp. 24-31.
- Schlueter, W., E. Himwich, A. Nothnagel, N. Vandenberg, A. Whitney* (2002), *IVS and Its Important Role in the Maintenance of the Global Reference Systems. Advances in Space Research*, Vol. 30, pp. 145-150.
- Walter H.G., Sovers O.J.* (2000), *Astrometry of fundamental catalogues. The evolution from optical to radio reference frames. Astronomy and Astrophysics Library. Springer-Verlag, Berlin.*

ON CONSTRUCTION OF A COMPILED CATALOG OF RADIO SOURCE POSITIONS OBTAINED WITH VLBI OBSERVATIONS

Sokolova Ju.R., Malkin Z.M.

Summary

An international Project for the re-determination of the ICRF was initiated in December 2004. The purpose of this project is to compare the individual VLBI CRF solutions and to analyze their systematic and random errors with focus on the selection of the optimal strategy for the next ICRF realization. Eight CRF solutions provided by the IVS Analysis Centers were analyzed. In the present study, four analytical models were used to investigate the systematic differences between solutions: solid rotation, rotation and deformation, and expansion by orthogonal functions - Legendre-Fourier polynomials and spherical functions. It was found that expansions by orthogonal function describe the differences between individual catalogues better than the two other models. Finally, the first version of a compiled CRF was generated. The use of the radio source positions from this catalog allowed to obtain more accurate estimates of universal time and nutation.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ИЗБРАННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Хруцкая Е.В., Калинин С.И., Киселева Т.П.

Приводятся описания баз данных с результатами наблюдений тел Солнечной системы и результатами наблюдений визуально-двойных звезд, полученных в Пулковской обсерватории. Базы включают наблюдения тел Солнечной системы, полученные в период 1898 - 2006 гг., в соответствии с отечественными и международными программами, такими, как ЦЕРЕРА, ЮПИТЕР, ОРБИТА, HALLEY WATCH, PNOBOS, RHESAT, RHEMU, а также данные каталогов, созданных на основе фотографических и ПЗС-наблюдений избранных визуально-двойных звезд. Широкий спектр представленных объектов, однородность и длительность рядов наблюдений позволяют использовать представленный материал для различных исследований в области небесной механики, астрометрии, изучения эволюции Солнечной системы и исследований кинематики и динамики звездных систем. Базы доступны по адресу: www.puldb.ru. Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ № 04-07-90081.

Наблюдения тел Солнечной системы и избранных визуально-двойных звезд всегда занимали значительное место в наблюдательных программах Пулковской обсерватории.

Тела Солнечной системы наблюдаются в обсерватории с 1898 года по настоящее время. Целью наблюдений является определение точных координат тел Солнечной системы, необходимых для создания и уточнения теорий движения, для изучения строения и эволюции Солнечной системы. Основные инструменты: нормальный астрограф (D=330, F=3467 мм) и 26-дюймовый рефрактор (D=650, F=10413 мм). Кроме этих инструментов в разное время для наблюдений использовались: двойной короткофокусный астрограф (АКД, D=100, F=700 мм), двойной астрограф Цейсса в Абастумани (D=400, F=3000 мм.) и длиннофокусный лунно-планетный телескоп (D=600, F=10000 мм). На последнем, в 70-80-х годах прошлого века проводились наблюдения спутников Марса и Юпитера в Ордубадской экспедиции Пулковской обсерватории (Кавказ). На телескопе Шмидта в Балдоне (Латвия, D = 1200, F=2400 мм) и телескопе Цейса в Зеленчуке (D=400, F=2000 мм) проводились наблюдения Плутона. Комета Галлея наблюдалась на Кубе (камера Цейса, D = 160, F = 700 мм) и в Боливии (экспедиционный астрограф, D = 200, F=2260 мм).

Особенностью пулковских наблюдений тел Солнечной системы является широкий спектр наблюдаемых объектов (большие планеты, их естественные спутники, малые планеты, кометы), регулярный характер наблюдений и длительные периоды наблюдений. Такие наблюдения могут использоваться при решении многих актуальных задач современной астрометрии и небесной механики, таких как создание, улучшение и контроль теорий движения тел Солнечной системы, необходимых для обеспечения космических полетов и решения проблем, связанных с эволюцией Солнечной системы, установлению связи динамической и космической систем координат в астрономии.

Наблюдения визуально-двойных звезд в Пулкове ориентированы на традиционные для Пулковской обсерватории исследования в области звездной астрономии, начатые еще в XIX веке В.Я.Струве. Научная задача Пулковской программы комплексных исследований визуально-двойных звезд состоит в определении основных кинематических и динамических характеристик двойных и кратных звезд в окрестностях Солнца

непосредственно из наблюдений. Ближайшая цель этой программы – выявление близких (до 100 парсек) двойных звезд, обладающих заметным орбитальным движением. В дальнейшем - накопление плотных, однородных рядов относительных положений компонент двойных звезд для определения их орбит, масс и выявлению возможных невидимых спутников.

До 1941 г. наблюдения визуально-двойных звезд проводились, в основном, на нормальном астрографе, а начиная с 1960 г. по настоящее время - на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории.

До 1995 г. в обсерватории проводились только фотографические наблюдения. С 1995 г. на 26-дюймовом рефракторе, а с декабря 2004 г. и на нормальном астрографе стали вестись ПЗС-наблюдения.

Для обеспечения доступа к имеющемуся материалу широкого круга пользователей были созданы базы данных с результатами наблюдений тел Солнечной системы и результатами наблюдений избранных визуально-двойных звезд. Это вторая (II) и третья (III) базы в системе астрометрических баз данных, в которых представлены пулковские наблюдения [1]. В настоящее время созданные базы данных открыты для пользователей и доступны по адресу: www.puldb.ru. На рис. 1 представлен первый лист сайта с базами данных, на котором пользователь может выбрать интересующую его базу.

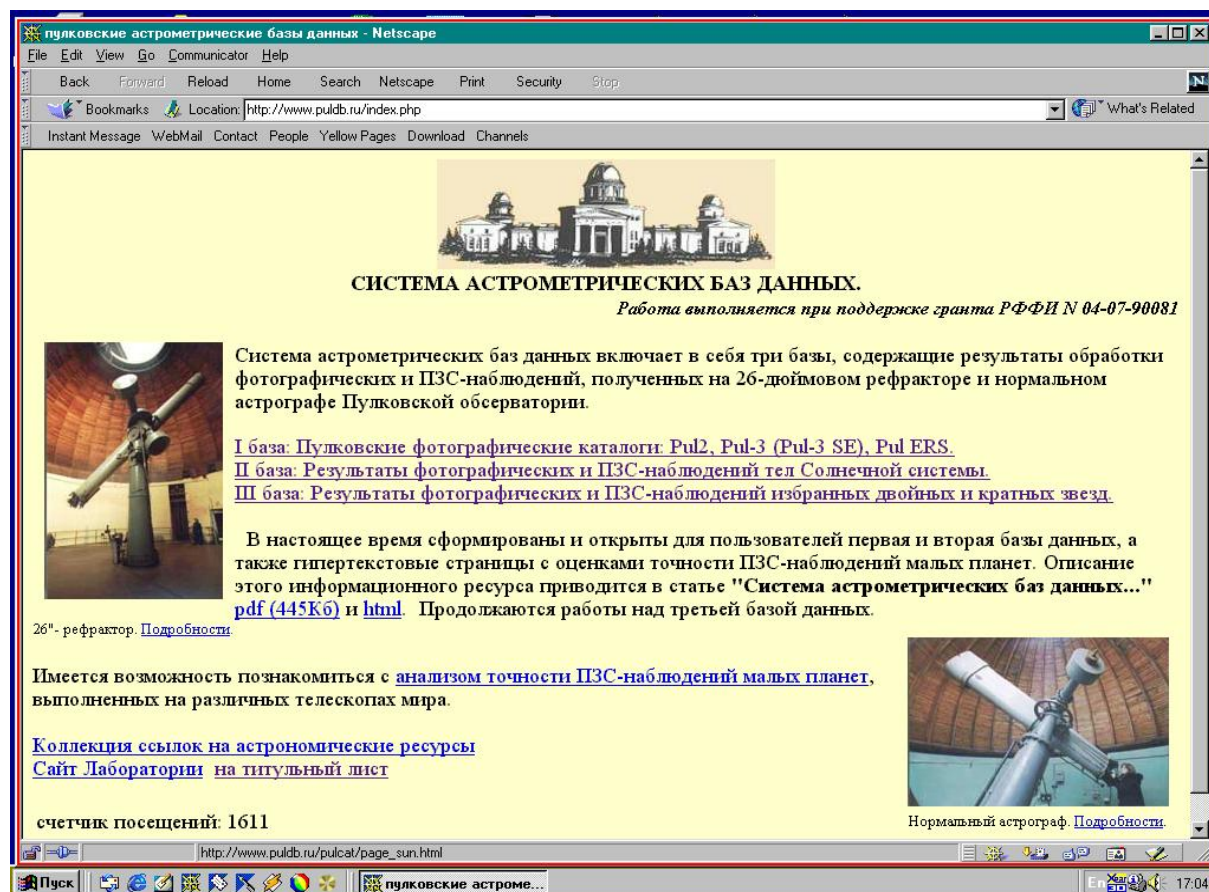


Рис.1. Первый лист сайта с базами данных.

Вторая база с результатами наблюдений тел Солнечной системы состоит из двух разделов: большие планеты и их спутники и малые тела Солнечной системы (астероиды и кометы). В базы вошли все наблюдения, полученные до настоящего времени. Основная масса наблюдений больших планет и их спутников выполнялась в период 1956-2006 гг., отдельные объекты имеет и более длительные периоды наблюдений. Так, Неп-

тун наблюдался с 1898 г, Уран с 1919 г, Плутон с 1930 г. Малые планеты наблюдались в период 1949-2006 гг. По мере получения новых наблюдений база будет регулярно пополняться.

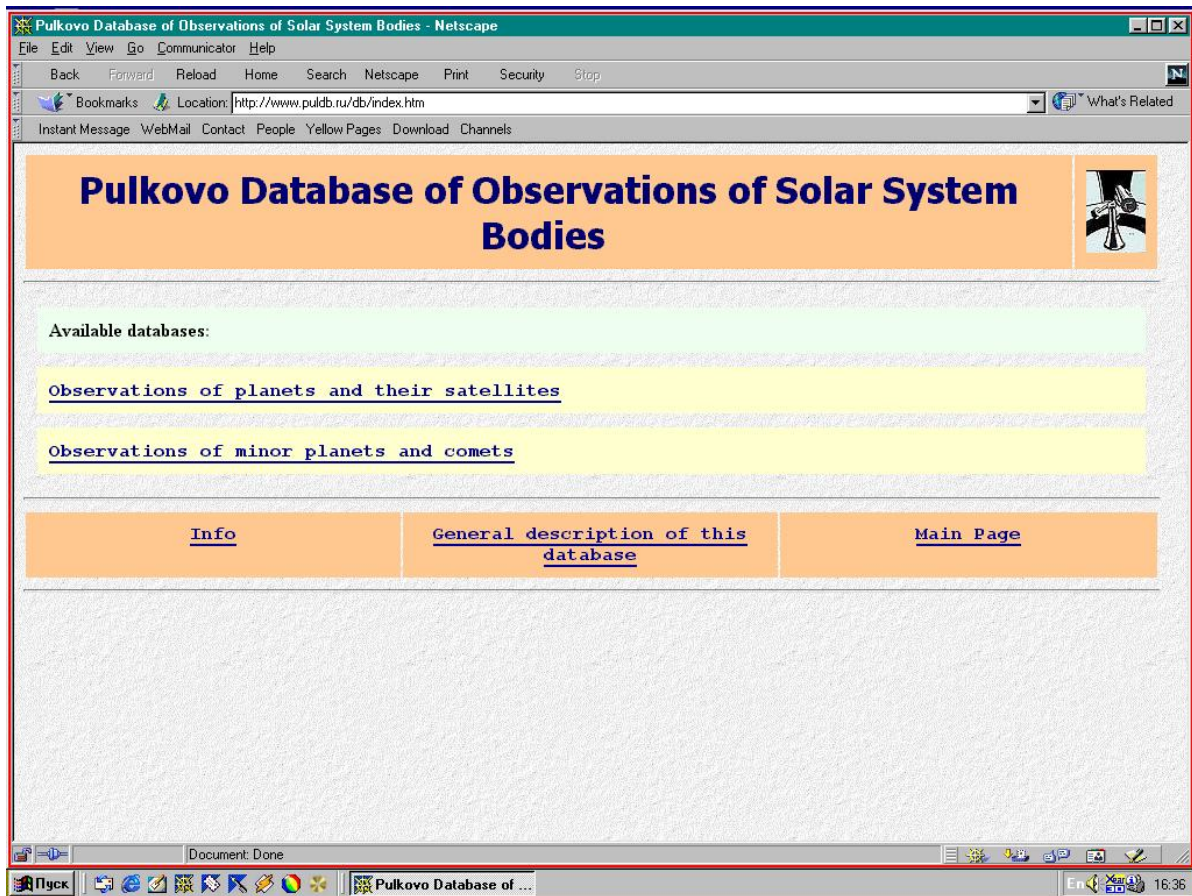


Рис.2. Web-форма для выбора раздела базы с телами Солнечной системы.

На рис.2 показана web-форма для выбора нужного раздела базы данных с телами Солнечной системы. Выбрав соответствующий раздел, пользователь выбирает в нем интересующий его объект и временной интервал (рис.3). Если годы наблюдений не заданы, то будут выбраны все имеющиеся наблюдения выбранного объекта. После этого, перейдя на web-форму с дополнительными характеристиками объекта, пользователь имеет возможность уточнить выборку (рис.4). А именно: выбрать инструмент, на котором были проведены наблюдения, вид наблюдений (фото или ПЗС), а также отобразить выходные данные, взяв только необходимые пользователю (по умолчанию выдаются все).

Для спутников больших планет, в зависимости от примененного типа наблюдений (с опорными звездами или без них), могут приводиться либо экваториальные координаты объекта (α , δ) в системе опорного каталога, либо относительные положения спутников ($X = \Delta\alpha\cos\delta$ и $Y = \Delta\delta$) относительно планеты или другого спутника. Имеется возможность выбрать нужный тип наблюдений (рис.3).

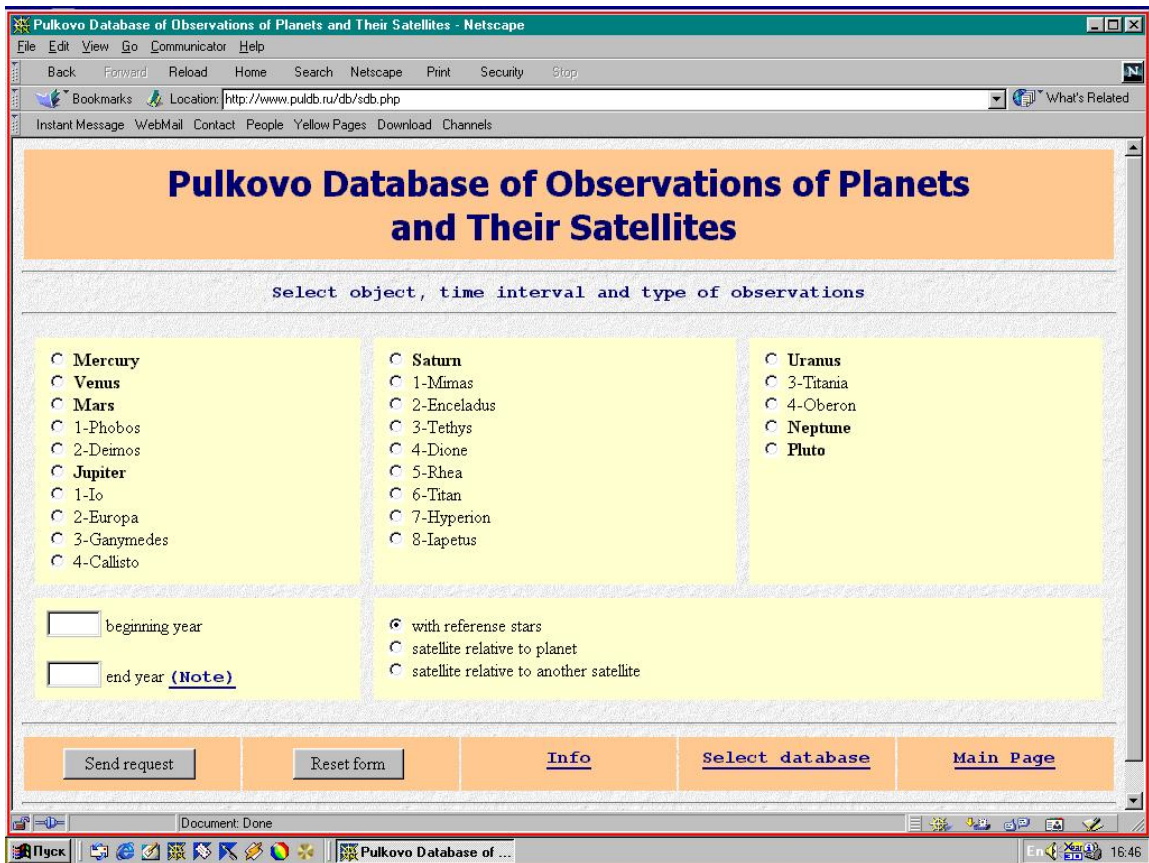


Рис.3. Web-форма для выбора объекта, времени наблюдений и типа наблюдений.

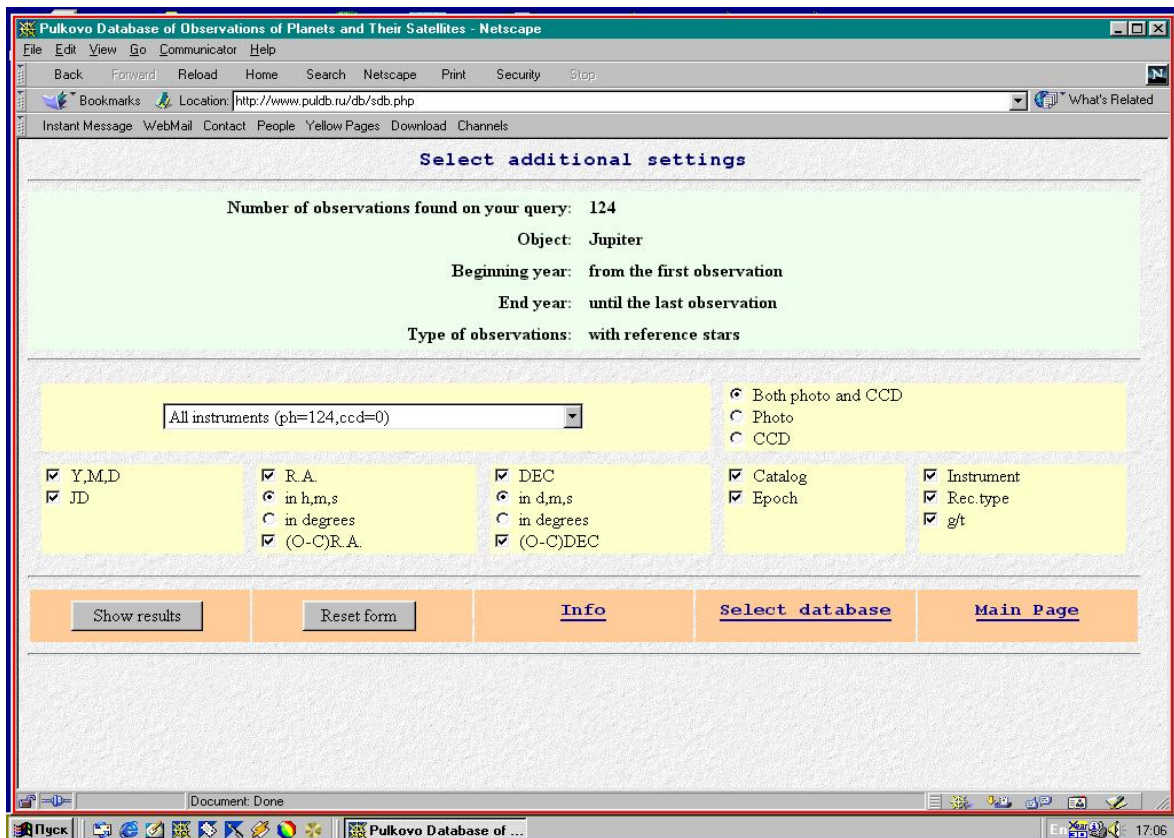


Рис.4. Пример Web-формы с дополнительными параметрами для выборки.

Доступ к данным осуществляется посредством скриптов, написанных на языке PHP, которые реализуют интерфейс с базой данных MySQL. Результаты выборки представляют собой текстовые файлы.

Для удобства пользователей на каждой web-форме в разделе “Info” можно посмотреть формат данных, а также ознакомиться с общей характеристикой наблюдений по объектам. В общей характеристике для каждого объекта приводится: телескоп, период наблюдений, тип наблюдения, вид координат (α , δ , или X, Y), опорный каталог, эпоха и равноденствие, начало отсчета (топоцентрические или геоцентрические координаты), среднеквадратические ошибки, источник эфемериды, по которым вычислялись (O-C), номер публикации, приводимой в разделе “List of Publication” по объектам. В этом разделе даны полные ссылки на опубликованные статьи. Для большинства статей методического содержания (из раздела “Статьи содержащие описание методик редукций наблюдений”) можно получить полный текст статьи.

В таблице 1 ПРИЛОЖЕНИЯ приведена общая информация о наблюдениях, загруженных в базу данных тел Солнечной системы. Планируется регулярное дополнение базы результатами новых наблюдений.

Обновленные оценки точности ПЗС-наблюдений малых планет, по наблюдениям на различных телескопах мира, можно посмотреть с первой страницы сайта (рис.1).

База данных с результатами наблюдений двойных звезд содержит данные двух пулковских каталогов – каталога относительных положений визуально-двойных звезд, наблюдавшихся фотографическим способом на 26-дюймовом рефракторе с 1960 г. по расширенной программе и аналогичного каталога, построенного на материале ПЗС-наблюдений, начатых с 1995 года. Приводится полный список статей, опубликованных в ходе работ над этими каталогами.

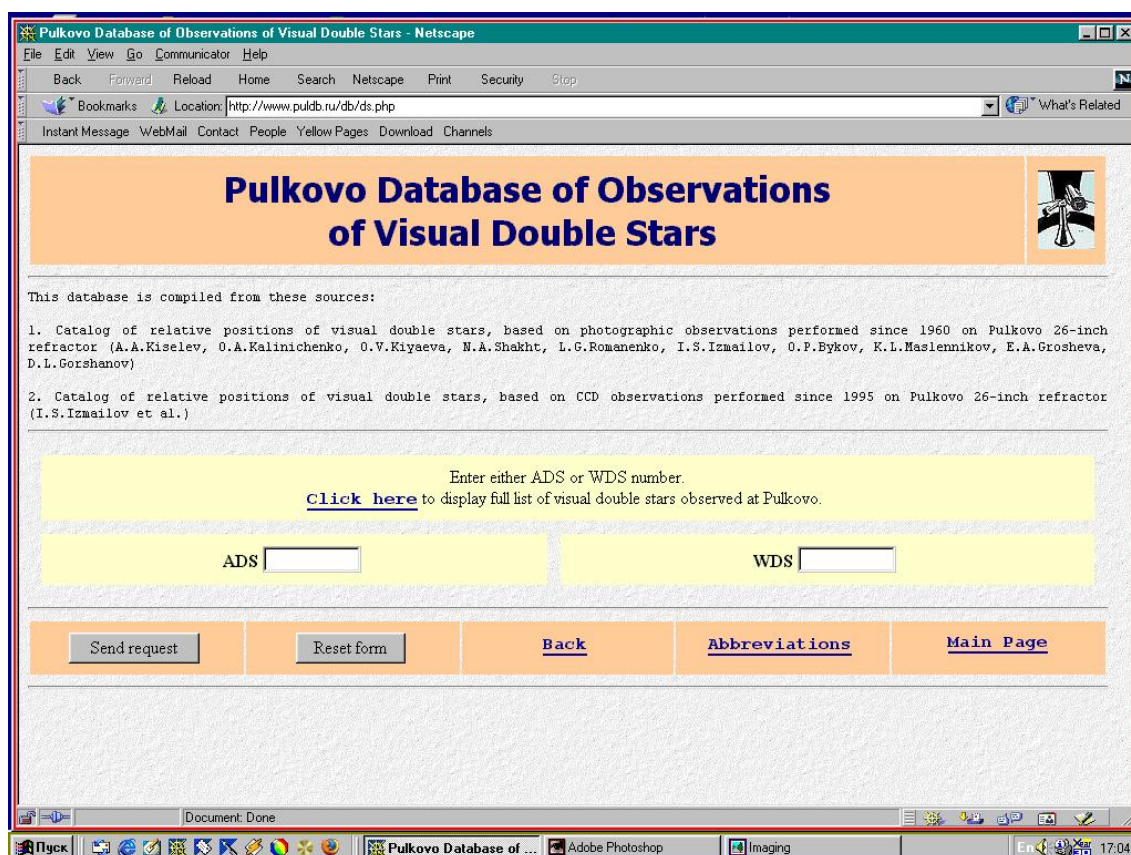


Рис. 5. Web-форма для выборки данных из каталогов двойных звезд.

На рис. 5 приведена web-форма для выборки данных из пулковских каталогов визуально-двойных звезд. Выбор данных осуществляется путем набора номера двойной звезды (по каталогам ADS или WDS), либо из полного списка, содержащего номера двойных звезд, наблюдавшихся в Пулковской обсерватории. Помимо номера звезды список содержит ее приближенные координаты, звездные величины и спектральные классы. Если звезда наблюдалась фотографическим способом, указывается измерительная машина, на которой были проведены измерения фотопластинок.

По аналогии со второй базой данных, доступ к данным каталогов осуществляется посредством скриптов, написанных на языке PHP. Результаты выборки получаются в виде текстовых файлов (ASCII).

В разделе “**Abbreviations**” пользователь может ознакомиться с форматом приводимых данных.

Литература

1. *Хруцкая Е.В, Ховричев М.Ю, Измайлов И.С.* Система астрометрических баз данных Пулковской обсерватории: фотографические каталоги и оценки точностей современных ПЗС-наблюдений малых планет. //Изв. ГАО в Пулкове. 2004. N 217. С.343-349.
2. *Хруцкая Е.В, Ховричев М.Ю, Калинин С.И.* Первые результаты ПЗС-наблюдений малых тел Солнечной системы на Нормальном астрографе и астрометрическая база данных тел Солнечной системы Пулковской обсерватории. //Материалы Всероссийской конференции “Астероидно-кометная опасность – 2005”, СПб, 2005. С.328-331.

ASTROMETRIC DATABASES OF THE PULKOVO OBSERVATORY WITH RESULTS OF OBSERVATIONS OF THE SOLAR SYSTEM BODIES AND SELECTED VISUAL DOUBLE STARS

Khrutskaya E.V, Kalinin S.I, Kiseleva T.P.

Summary

Pulkovo astrometric databases of the Solar system bodies and selected visual double stars (www.puldb.ru) were constructed. These databases have been made available for wide access to the results of the astrometric photographic and CCD- observations of the minor planets, big planets, selected bright comets, natural satellites and visual double stars that were obtained in the 20 century. The PHP web-interface of the MySQL database is being developed.. The html-pages that contain results of analysis of accuracy of CCD-astrometric observations of the minor planets obtained at the different observatories of the world were updated. The databases of the Solar system bodies and selected visual double stars are currently available. The research is supported by RFBR grant № 04-07-90081.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Общая информация о наблюдениях тел Солнечной системы, загруженных в базу данных.

(1) Объект	(2) Телескоп	(3) Период	(4) Вид наблюд.	(5) Вид коорд.	(6) Опорный каталог	(7) Эпоха	(8) Нач. отсчета	(9) СКО Ср. квад. ошибка 1-го набл.	(10) Источ. эфемерид
<i>Малые планеты:</i> 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 18, 39, 40, 532, 704	PNA	1974-1994	Фото	RA, DEC.	AGK3 PRM	1950.0 2000.0	топоц.	0".3; 0".4	ИТА
<i>Малые планеты:</i> 1, 2, 3, 4, 6, 7, 18, 40	PNA	1957-1959	Фото	RA, DEC.	Yale	1950.0	топоц.	(0".12 - 0".19) (0".12 - 0".38)	Amer.Eph.
<i>Малые планеты:</i> 1, 2, 3, 4, 6, 11, 18, 39, 40, 389, 532, 704, 148	PNA	1994-1997	Фото	RA, DEC	PRM	2000.0	топоц.	0".22; 0".18	ЭПОС
3385 – Бронина	PNA	1994	Фото	RA, DEC	PRM	2000.0	геоц.	1".72; 0".34	ЭПОС
39 – Летиция	PNA	1998	Фото	RA, DEC	Tycho-2	2000.0	геоц.	0".37; 0".28	ЭПОС
2 – Паллада	PNA	1987-1992	Фото	RA, DEC	Tycho-2	2000.0	топоц.	0".20; 0".20	ЭПОС
762 – Пулкова	PNA	1994-2000	Фото	RA, DEC	PRM, Tycho-2	2000.0	геоц.	0".30; 0".30	ЭПОС
3 – Юнона	PNA	1998-2002	Фото	RA, DEC	Tycho-2	2000.0	топоц.	0".23; 0".22	ЭПОС
4179 – Тоутатис	PNA, P26	1992	Фото	RA, DEC	PRM	2000.0	топоц.	0".60-(PNA); 0".53-(P26)	ИТА

Малые планеты: 13 объектов.	PNA	2005	ПЗС	RA, DEC	UCAC2	2000.0	топоц.	m<15.5 0".07; 0".07 m>15.5 0"19; 0".15	ЭПОС
Малые планеты: 28 объектов.	PNA	2006	ПЗС	RA, DEC	UCAC2	2000.0	топоц.	m=9.0-14.6 0"065; 0".060	ЭПОС
Комета Хейла-Боппа	P26	1997	фото	RA, DEC	PRM	2000.0	топоц.	0".35; 0".37	ИТА
Комета Галлея	PNA	1985-1986	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	0".8	ИТА
Комета Галлея	P26	1985-1986	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	0".6	ИТА
Комета Галлея	FAS	1985-1986	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	1".3; 1".6	ИТА
Комета Галлея	EA	1985-1986	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	1".0; 0".8	ИТА
Комета Галлея	Z160	1985-1986	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	3".0	ИТА
Комета Мацхольца	PNA	2004-2005	ПЗС	RA, DEC	UCAC2, USNO-A2.0	2000.0	топоц.		
Меркурий	P26	1973, 2003	фото						
Венера	AKD	1969, 1972	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	0".40; 0".30	AE
Марс	AKD	1960-1967	фото	RA, DEC	Yale	1950.0	геоц.	0".30; 0".40	Клеменс
Марс	AKD	1973-1982	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".40; 0".35	ИТА
Марс	PNA	1979-1980	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".24; 0".30	AE
Марс	PNA	1981-1982	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".36; 0".26	V SOP82
Марс и спут. 1, 2	P26	1982	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".14; 0".08	V SOP82

Спутники Марса 1, 2	P26, PNA	1973	фото	RA, DEC X, Y	AGK3	1950.0	геоц.	(1) 0".50; 0".50 (1/2) 0".46; 0".46	ИТА
Марс и спутники 1, 2	LPT	1986	фото	X, Y RA, DEC	FOCAT	Дата 2000.0	геоц.	(1/М) 0".47; 0".47 (2/М) 0".50; 0".50 (1/2) 0".30; 0".50 (1) 0".29; 0".37 (М) 0".43; 0".50	ИТА
Спутники Марса 1, 2	P26, LPT	1988	фото	X, Y		Дата	топоц.	P26: (1/М) 0".39; 0".29 (2/М) 0".44; 0".44 (1/2) 0".33; 0".43 LPT: (1/М) 0".35; 0".38 (2/М) 0".45; 0".50 (1/2) 0".41; 0".39	ИТА
Марс и Деймос	PNA	1988	фото	RA, DEC	FOCAT	2000.0	геоц.	(М) 0".42; 0".41 (Д) 0".36; 0".36	ИТА DE200
Спутники Марса 1, 2	LPT	1988	фото	RA, DEC X, Y	FOCAT	2000.0	топоц.	(1) 0".26; 0".26 (2) 0".27; 0".25 (1/2) 0".26; 0".25	ИТА
Спутники Юпитера 1-4 (sat/Jupiter)	P26	1976-1981	фото	X, Y		Дата	топоц.	X: (0".10-0".15) Y: (0".12-0".22)	G5

Спутники Юпитера 1-4 (sat/Jupiter)	LPT	1984-1986	фото	X, Y		Дата	топоц.	(1) 0".13; 0".13 (2) 0".10; 0".15 (3) 0".10; 0".17 (4) 0".13; 0".37	G5
Юпитер	AKD	1974-1978	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	топоц.	0".40; 0".35	DE200
PHEMU-2003	P26	2003	ПЗС						
Спутники Юпитера 1-4	PNA	1978-1979	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".30; 0".40	Сэмсон
Сатурн	PNA	1973-1984	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	гео/топ.	0".25; 0".22	ИТА
Сатурн	P26	1975-1981	фото	RA, DEC	AGK3 PPM	1950.0 2000.0	гео/топ.	0".28; 0".27	ИТА
Сатурн	P26	1994-2003	фото	RA, DEC	Tycho-2	2000.0	топоц.	0".12; 0".16	DE405
Спутники Сатурна 1-6, 8	PNA	1973-1984	фото	RA, DEC	AGK3 PPM	1950.0 2000.0	топ/гео	0".20-0".40 0".20-0".40	ИТА
Спутники Сатурна 1-6, 8	P26	1975-1981	фото	RA, DEC	AGK3 PPM	1950.0 2000.0	топ/гео	0".20-0".40 0".20-0".30	ИТА
Спутники Сатурна 1-6, 8 (sat/Saturn)	P26	1975-1981	фото	X, Y	сл/м	Дата	топоц.	X: 0".15-0".37 Y: 0".11-0".25	ИТА

Спутники Сатурна 2-6, 8 (sat/sat)	P26	1994-2003	фото	X, Y	сл/м	Дата	топоц.	0".15; 0".15	JPL
Спутники Сатурна 2-8 (sat/sat)	P26	1995-2003	ПЗС	X, Y	сл/м	Дата	топоц.	0".045; 0".055	IMCCE
Сатурн, Титан	AKD	1973-1975	фото	RA, DEC	AGK3	1950.0	геоц.	0".30; 0".40	DE200
Уран	PNA	1919-1967	фото	RA, DEC	Yale	1950.0	геоц.	0".24; 0".18	AE
Уран	PNA	1968-1974	фото	RA, DEC	FOCAT-S	1950.0	геоц.	0".24; 0".29	DE200
Уран	PNA	2002-2004	фото	RA, DEC	Tycho-2	2000.0	геоц.	0".25; 0".30	DE200
Уран	ZDA	1987-1994	фото	RA, DEC	PPM	2000.0	геоц.	0".18; 0".24	DE404
Спутники Урана 3, 4	ZDA	1987-1994	фото	RA, DEC	PPM	2000.0	геоц.	0".42; 0".46	GUST86
Спутники Урана 3, 4 (sat/Uran)	ZDA	1987-1994	фото	X, Y	PPM	2000.0	геоц.	0".41; 0".43	GUST86
Спутники Урана 3, 4 (4/3)	ZDA	1987-1994	фото	X, Y	PPM	2000.0	геоц.	0".52; 0".51	GUST86
Нептун	PNA	1899-1955	фото	RA, DEC	Yale	1950.0	геоц.	0".24; 0".17	AE

<i>Плутон</i>	PNA	1930-1994	фото	RA, DEC	FK5*	2000.0	геоц.	0" .27; 0" .33	Новая
<i>Плутон</i>	BSch	1991-1994 1995,1996	фото	RA, DEC	FOCAT-S	2000.0	геоц.	0" .23; 0" .34	DE200
<i>Плутон</i>	Z400	1985-1994	фото	RA, DEC	FOCAT-S	2000.0	геоц.		DE200

Примечания к некоторым колонкам таблицы 1.

Колонка 2 – приняты следующие обозначения инструментов:

- PNA – нормальный астрограф (Пулково)
- P26 – 26-двоймовый рефрактор (Пулково)
- AKD – двойной короткофокусный астрограф (Пулково)
- LPT – лунно-планетный телескоп Ордубадской экспедиции
- BSch – телескоп Шмидта в Балдоне (Латвия)
- ZDA – двойной астрограф Цейсса в Абастумани
- EA – экспедиционный астрограф в Боливии
- FAS – камера ФАС-3А в Ордубадской экспедиции
- Z160 – камера Цейсса на Кубе
- Z400 – телескоп Цейса АОЭ в Зеленчуке

Колонка 8 – Начало отсчета: топоцентрические или геоцентрические координаты. "Дата" – координаты даны на момент наблюдения.

Колонка 9 – СКО: среднеквадратичная ошибка одного положения, вычисляемая на основании сравнения наблюдений с эфемеридами, т.е. по (O-C), для всего ряда наблюдений.

Колонка 10 – Источник эфемерид. Приводится указание на источник, из которого бралась эфемерида для проведения сравнений с наблюдениями и оценок точности.

- ИТА, АЕ, Amer.Eph. – эфемерида вычислена в ИТА или опубликованная в АЕ СССР или в Astronomical Ephemeris.
- ЭПОС – эфемерида вычислена, используя программную систему ЭПОС, позволяющую вычислять разнообразные эфемериды объектов Солнечной системы. 1999 - ЭПОС, Руководство пользователя, СПб, ГАО РАН, 28 стр. Львов В.Н., Смахачева Р.И., Цекмейстер С.Д.
- DE200, DE405 – эфемериды JPL.
- Клеменс – эфемериды опубликованные в United States Naval Observatory Circular, № 90, 1960.
- G5 – эфемериды Арлота - Arlot J.E., 1982, Astro.& Astrophys., v. 107, p.305.
- Сэмпсон – эфемерида Сэмпсона для галилеевых спутников Юпитера.
- VSOP82, IMCCE - эфемериды, разработанные в Институте небесной механики в Париже (Бюро долгот).
- GUST86 – эфемерида спутников Урана: J.Laskar, R.A.Jacobson, 1987, Astron. & Astrophys., № 1, v.188, p.212.
- Для ряда наблюдений Плутона на нормальном астрографе в Пулкове использовалась новая эфемерида, вычисленная с учетом уточнения системы орбитальных элементов Плутона, полученного после привлечения 211 пулковских наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2005-2006 ГГ. И ПЛАНИРУЕМЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

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

Приводятся первые результаты ПЗС-наблюдений, полученных на нормальном астрографе Пулковской обсерватории. Объектами наблюдений стали кометы Мачхолца, Поймански и Швассман-Вахман (73P, фрагменты В и С), а также 37 малых планет от 9.0 до 16.5 звездной величины. Полученная точность ПЗС-наблюдений (30 – 50 mas) существенно превысила точность фотографических наблюдений, проводимых ранее на этом же инструменте, и позволила значительно расширить наблюдательную программу. В новую программу наблюдений помимо традиционно наблюдавшихся малых планет и спутников больших планет вошли астероиды, сближающиеся с Землей, двойные астероиды и астероиды, среди которых предполагается поиск неизвестных пока двойных астероидов. Работа выполняется при поддержке грантов РФФИ № 04-02-16157 и № 04-07-90081.

В декабре 2004 года на нормальном астрографе Пулковской обсерватории (D/F=330/3467 мм) была установлена ПЗС-матрица производства ГУП НПП “Электрон Оптроник” (S2C-017AP), рабочее поле которой составило 18'×16', размер пикселя 16x16 мкм, число эффективных пикселей 1040x1160. Регистрация точного времени осуществлялась на основе минутных сигналов UTC Службы времени обсерватории посредством специального устройства, подключенного через LTP-порт компьютера и программного модуля AccuTime [1].

Астрометрическая редукция ПЗС-кадров выполнялась методом шести постоянных. Использовался программный пакет, разработанный в ГАО И.С.Измайловым [2]. Точность полученных результатов оценивалась из сходимости величин (О-С), представляющих разности наблюденных координат с эфемеридой, вычисленной с помощью программной системы ЭПОС [3].

Первым объектом ПЗС-наблюдений стала комета C/2004 Q2 (Machholz). С 31 декабря 2004 г. по 9 февраля 2005 г. за 7 вечеров было получено 138 ПЗС-кадров с кометой, блеск которой менялся в диапазоне $4.3^m \rightarrow 4.1^m \rightarrow 5.2^m$, склонения – от $+8^\circ$ до $+70^\circ$. При обработке, в качестве опорных, использовались звезды из каталога UCAC2 и каталога USNO-A2.0 для полей со склонением больше $+50^\circ$. Внутренняя точность полученных наблюдений (по сходимости (О-С) в пределах одной серии ПЗС-наблюдений) в среднем составила 108 mas по RA и 175 mas по DECL. Точность по внешней сходимости (по сходимости (О-С) в разные ночи) - 181 mas по RA и 274 mas по DECL. Полученные экваториальные координаты кометы отправлены в Международный центр малых планет [4].

Последующие ПЗС-наблюдения велись параллельно с исследованием матрицы. Основная цель наблюдений 2005 г. заключалась в определении новых возможностей инструмента в плане предельной звездной величины, качества изображения и точности результатов. Выполнялись наблюдения малых планет ранее наблюдавшихся на нормальном астрографе фотографическим способом: из списка 13-ти избранных малых планет, а также более слабые астероиды из известных двойных или подозреваемых на двойственность. На данном этапе обработка наблюдений выполнялась по упрощенной схеме (без коррекции плоского поля и без введения поправок за различные систематические эффекты). В качестве опорного использовался каталог UCAC2. Пробные на-

блюдения показали, что на данный момент при экспозиции 2 минуты уверенно можно наблюдать объекты до 16.5^m - 17^m .

Несмотря на упрощенный характер обработки изображений и то, что наблюдения, нередко, проводились «сквозь легкую облачную пленку», полученная точность оказалась значительно выше точности аналогичных фотографических наблюдений, выполненных ранее на данном инструменте. Так, среднеквадратическая ошибка одного наблюдения по внутренней сходимости, в среднем, составила $56/60$ mas для ПЗС-наблюдений против $173/195$ mas, полученных по фотографическим наблюдениям малых планет в 1995-2000 гг. на том же инструменте [5]. Средняя точность по внешней сходимости соответственно составила $92/96$ mas для ПЗС-наблюдений и $310/290$ mas для фотографических наблюдений [5]. Оценки точности ПЗС-наблюдений 2005 г, а также средние значения величин (О-С) представлены в Таблице 1. Внутренняя среднеквадратическая ошибка (СКО) характеризует сходимость результатов в рамках одной ночи, внешняя СКО – сходимость за весь период наблюдений.

Таблица 1. Средние значения величин (О-С) по прямому восхождению и склонению и среднеквадратические ошибки (СКО) одного наблюдения для координат малых планет по внутренней и внешней сходимости. Результаты наблюдений 2005 г. Единицы: mas.

Номер объекта	Число набл./ночей	Среднее (О-С) $\alpha \cos \delta$	Среднее (О-С) δ	Внутренняя СКО по α / δ	Внешняя СКО по α / δ	Интервал зв. величин
6	46/5	23 \pm 13	-14 \pm 15	40/39	91/102	9.9-10.2
29	29/3	-87 \pm 13	-101 \pm 12	53/46	72/62	9.9-10.2
45	10/1	79 \pm 10	-258 \pm 17	31/54	-	11.4
65	5/1	58 \pm 13	76 \pm 13	29/30	-	13.1
121	90/6	-132 \pm 5	109 \pm 8	36/37	48/66	13.0-13.8
130	41/2	-90 \pm 8	122 \pm 9	36/35	53/59	12.5-12.7
129	18/2	263 \pm 15	-157 \pm 15	51/49	92/88	9.9-10.1
283	22/3	47 \pm 24	87 \pm 18	113/69	114/84	14.0-14.5
564	10/1	-155 \pm 17	-135 \pm 23	53/73	-	14.7
617	42/8	-292 \pm 66	177 \pm 59	111/161	228/202	15.8-16.3
762	77/6	-75 \pm 6	-11 \pm 9	47/61	51/75	13.6-13.9
816	10/1	-418 \pm 25	45 \pm 22	59/73	-	15.0
1062	11/1	19 \pm 44	-55 \pm 29	144/95	-	15.1

Полученная точность позволяет использовать инструмент для решения ряда актуальных задач современной астрономии в связи с чем, в 2006 г. программа наблюдений была расширена. Помимо традиционно наблюдавшихся малых планет и спутников больших планет в программу наблюдений вошли астероиды, сближающиеся с Землей, известные двойные астероиды, астероиды подозреваемые на двойственность, а также астероиды, среди которых предполагается поиск неизвестных ранее двойных астероидов.

Программа наблюдения предполагаемых двойных астероидов и поиска неизвестных еще двойных астероидов имеет конечной целью определение количества таких объектов и суммы масс их компонент. В настоящее время для наблюдений отобрано 279 астероидов до $16^m.0$. Отобраны астероиды, располагающиеся вблизи противостояния со склонениями севернее -10° . Средняя точность ПЗС-наблюдений (~ 50 mas) по-

зволяет детектировать на нормальном астрографе линейное расстояние (фотоцентр-центр масс) для двойных астероидов в пределах главного пояса от 100 км. до 150 км. Поэтому, исходя из статистики двойных астероидов главного пояса, в программу не включались объекты размером меньше 10-20 км. Так как периоды обращения двойных астероидов колеблются от нескольких часов до нескольких суток, наблюдения одного объекта проводилось 2-3 раза в течение ночи.

Задача поиска двойных астероидов сводится к выявлению волнообразности в движении астероидов на фоне звезд, обусловленной различным характером движения фотоцентра и центра масс. Этот эффект может быть обнаружен методом спектрального анализа величин (O-C) по длительным рядам наблюдений, учитывая высокую точность ПЗС-наблюдений на нормальном астрографе (~20-50 mas) [6]. В таблице 2 приводятся результаты наблюдений 28 астероидов, наблюдавшихся в период январь-май 2006 г.

Таблица 2. Средние значения величин (O-C) по прямому восхождению и склонению и среднеквадратические ошибки (СКО) одного наблюдения для координат малых планет по внутренней и внешней сходимости. Результаты наблюдений 2006 г. Единицы: mas.

Номер Объекта	Число набл./ночей	Среднее (O-C) _{$\alpha \cos \delta$}	Среднее (O-C) _{δ}	Внутренняя СКО по α / δ	Внешняя СКО по α / δ	Интервал зв. величин
9	242/2	-33 ± 4	21 ± 4	46/38	61/61	9.0-11.4
712	8/1	114 ± 11	-79 ± 11	32/31	-	11.5-12.6
71	133/11	-218 ± 7	35 ± 6	52/55	71/67	10.5-14.6
65	125/11	8 ± 5	67 ± 4	31/29	56/44	11.9-14.1
64	143/12	21 ± 5	133 ± 5	54/55	62/59	9.9-12.3
60	112/7	162 ± 5	106 ± 5	34/27	50/48	10.2-13.5
53	74/7	-52 ± 6	-27 ± 6	38/42	48/50	11.1-13.4
52	58/5	-53 ± 11	-18 ± 11	69/69	86/87	12.3-12.9
505	77/5	-88 ± 9	-68 ± 7	70/61	75/61	12.5-13.6
481	20/1	33 ± 5	126 ± 4	21/16	-	12.2
472	8/1	33 ± 31	-134 ± 33	86/92	-	14.5
40	145/14	45 ± 6	29 ± 6	45/42	68/66	10.4-12.1
38	11/1	-185 ± 7	-22 ± 10	22/33	-	12.2
354	282/26	173 ± 3	18 ± 3	47/47	58/59	9.5-13.3
283	39/3	-4 ± 12	-122 ± 11	68/72	74/70	13.8-14.2
245	8/1	-165 ± 23	-74 ± 23	66/64	-	13.7
202	58/4	-153 ± 9	194 ± 10	56/48	70/74	12.0-12.6
2	73/5	-14 ± 7	108 ± 6	38/42	59/53	10.7-11.3
192	7/1	-6 ± 27	-1 ± 27	71/71	-	12.2
185	128/11	-217 ± 7	101 ± 6	61/50	78/70	12.9-13.5
181	117/10	-80 ± 6	-75 ± 5	46/47	66/59	12.4-12.7
173	74/3	39 ± 13	-6 ± 13	42/37	74/45	11.3-12.2
16	19/1	-43 ± 4	21 ± 4	16/19	-	10.1
130	206/18	-200 ± 5	-27 ± 4	54/47	67/58	12.8-13.2
121	49/3	-100 ± 10	-13 ± 8	63/53	67/57	12.9-13.8
111	72/4	-274 ± 5	30 ± 6	38/36	44/52	10.6-13.8
11	10/1	-207 ± 7	-43 ± 8	22/25	-	10.4
1021	9/1	-342 ± 29	-124 ± 28	88/85	-	14.4

Для астероидов $9^m.0 - 14^m.6$ величины средних значений ошибок по внутренней сходимости составили $0''.049$ для прямого восхождения и $0''.048$ для склонения. Ошибки по внешней сходимости соответственно равны $0''.065$ и $0''.060$.

Кроме астероидов в 2006 г. были выполнены наблюдения двух комет – C/2006 A1 (Pojmanski) и 73P (Schwassmann-Wachmann) (фрагменты В и С). В таблице 3 приводятся результаты этих наблюдений в период март-май 2006 г.

Таблица 3. Средние значения величин (О-С) по прямому восхождению и склонению и среднеквадратические ошибки (СКО) одного наблюдения для координат комет по внутренней и внешней сходимости. Результаты наблюдений 2006 г. Единицы: mas.

Номер объекта	Число набл./ночей	Среднее (О-С) $\alpha \cos \delta$	Среднее (О-С) δ	Внутренняя СКО по α / δ	Внешняя СКО по α / δ	Интервал зв. величин
06A01	27/3	343 ± 63	-51 ± 123	258/498	325/637	7.9–10.1
73P-B	167/10	-3872 ± 214	-4449 ± 86	586/600	2771/3699	8.8–6.8
73P-C	204/13	62 ± 51	-1205 ± 34	115/79	722/483	10.9–6.5

При наблюдениях астероидов, сближающихся с Землей, наибольшее внимание планируется уделить наблюдениям покрытий звезд такими астероидами и наблюдению тесных сближений астероидов со звездами космических каталогов. Как показал опыт, такие наблюдения позволят с точностью порядка $0''.003 - 0''.01$ получить минимальное расстояние (r_{\min}) и время максимального сближения (покрытия) (t_0). Полученные данные могут быть использованы для уточнения элементов орбит таких астероидов.

В настоящее время проводится ревизия наблюдательной программы для получения материала пригодного для изучения эволюции орбит астероидов, уточнения динамических характеристик двойных астероидов и астероидов, подозреваемых на двойственность, а также для установления связи динамической и космической систем координат.

Все полученные результаты наблюдений малых планет отправлены в Международный центр малых планет [7] и размещены в Пулковской базе данных с результатами наблюдений тел Солнечной системы (www.puldb.ru) [8].

Литература.

1. *Канаев И.И., Девяткин А.В., и др.* Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном телескопе ЗА-320. 2002. Известия ГАО в Пулкове. № 216. С. 128-156.
2. *Измайлов И.С.* <http://www.izmccd.puldb.ru>
3. *Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.* ЭПОС- пакет программ для работ по изучению объектов Солнечной системы. 2001. Сб. трудов конференции “Околоземная астрономия XXI века”. С. 235-240.
4. *Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., Narizhnaja N.V., Izmailov I.S.* The observations of Machholz comet in 2004-2005 years at the Pulkovo observatory. Minor Planet Circular 2005. 54797. 2.
5. *Бронникова Н.М., Васильева Т.А.* Анализ точности позиционных фотографических наблюдений малых планет в Пулкове. 2002. Известия ГАО РАН в Пулкове. № 216. С. 66–72.
6. *J.B. Kikwaya et. al.* Does 146 Lucina have a satellite? An astrometric approach. *Lunar and Planetary Science XXXIV*. 2003.

7. *Devyatkin A.V., Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., et. al.* The observations of minor planets in 2005 year at the Pulkovo observatory. 2005. Minor Planet Circular 54966. 8.
8. *Е.В. Хруцкая, М.Ю. Ховричев, С.И. Калинин.* Первые результаты ПЗС-наблюдений малых тел Солнечной системы на Нормальном астрографе и астрометрическая база данных тел Солнечной системы Пулковской обсерватории. 2005. Материалы Всероссийской конференции “Астероидно-кометная опасность - 2005”, С.328-331.

THE RESULTS OF THE CCD-OBSERVATIONS OF SOLAR SYSTEM MINOR BODIES WITH THE NORMAL ASTROGRAPH OF THE PULKOVO OBSERVATORY DURING 2005-2006 AND PLANNING OF FUTURE OBSERVATIONS

Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu, Berezhnoj A.A.

Summary

The CCD-detector produced by Electron Optronics (Saint-Petersburg) had been installed on the Pulkovo Normal astrograph focal plane in December 2004. The comet C/2004 Q2 was the first object of the astrometric observations (138 frames during 7 nights were obtained). Thirty seven asteroids of the main belt were observed in 2005- 2006. The UCAC2 astrometric catalog was used as a reference catalog for reduction of the CCD-frames. The limiting magnitude is 16.5 to 17.0 (with a 4 minutes' exposure). The internal (within one night) astrometric accuracy of the minor planet is mainly 30 to 100 mas and the external (within the whole observational period) accuracy is 40 to 200 mas. It is significantly better than the asteroids photographic observation results with the same instrument in 2000 (250 to 300 mas).

A new observational program of the CCD-observations with normal astrograph includes observations of the double asteroids, occultations of stars by asteroids, NEOs., apparent close approaches of the asteroids to the stars, and planetary natural satellites.

This research was carried out with the support of the Russian Foundation of Basic Research, projects № 04-02-16157 and № 04-07-90081.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НЕПТУНА И ТРИТОНА В АБАСТУМАНИ В 1985-1993 гг.

Чантурия С.М.¹, Киселева Т.П.²

¹*Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузии*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН*

В работе приводятся результаты позиционных фотографических наблюдений Нептуна и его спутника Тритона на двойном широкоугольном астрографе Цейсса (ДШАЦ) в Абастумани в период 1985-1993 гг. В таблицах 1 и 2 даются геоцентрические экваториальные координаты планеты и спутника в системе опорного каталога ГУСНО-1. Произведено сравнение наблюдений с теорией DE405 для Нептуна и теорией Якобсона (1991) для Тритона. Внешняя точность наблюдений Нептуна оценивается величинами 0.13" и 0.24" по прямому восхождению и склонению, для Тритона: 0.42" и 0.44".

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № № 04-02-16157, 04-07-90081.

Введение

С 1983 г Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузии совместно с ГАО РАН ведет работу по позиционным наблюдениям тел Солнечной системы согласно договору о научном сотрудничестве. Работа направлена на определение точных абсолютных и относительных координат больших планет и их спутников, необходимых для разработки и уточнения теорий движения тел Солнечной системы. Программа наблюдений включает системы спутников планет Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. В цикле работ [1-5] представлены результаты наблюдений систем спутников Марса, Юпитера, Сатурна и Урана и описана методика наблюдений и редукции. Данная работа представляет результаты фотографических позиционных наблюдений Нептуна и его спутника Тритона в период 1985-1993 гг. в АБАО на двойном астрографе Цейсса.

Наблюдения

Двойной астрограф Цейсса (D/F = 400/3000 mm) имеет две трубы (камеры) с практически одинаковыми объективами с максимумом пропускания в фотографической части спектра. При наблюдениях использовались фотопластинки ZU-21 фирмы ORWO размером 18 x 24 см, покрывающие поле 3.5 x 4.5 градуса. Фотографирование производилось одновременно на двух камерах. Светофильтры для ослабления блеска планеты при наблюдениях Нептуна и Тритона не применялись ввиду трудности изготовления таких фильтров, которые бы закрывали планету без ущерба для изображений слабого и очень близкого к планете спутника (расстояние в среднюю оппозицию не превышает 17"). Нептун наблюдался на двух камерах с экспозициями в 1 минуту по 2-3 экспозиции на каждой пластинке. Тритон наблюдался с экспозициями в 6-8 минут, по 2 экспозиции на каждой камере. Наблюдения производились в течение 3-х месяцев в году симметрично около противостояния планеты. За весь период наблюдений получено 240 астронегативов, по которым получены 454 положения Нептуна и Тритона.

Астрометрическая редукция и результаты наблюдений

Измерения астронегативов производились на Аскорекорде. Астрометрическая редукция измеренных координат выполнялась методом шести постоянных [6] с помощью

опорных звезд каталога ТУСНО-1. Производился учет дифференциальной рефракции. Опорные звезды выбирались в поле 1.5 x 1.5 градуса с целью минимизации влияния ошибки оптического центра. В результате получены экваториальные координаты Нептуна и Тритона в системе экватора и равноденствия J2000.0 по фотографиям на двух камерах астрографа, которые затем усреднялись. Результаты наблюдений приведены в таблицах 1 и 2, где даются на моменты наблюдений по шкале времени UTC - геоцентрические прямые восхождения и склонения Нептуна и Тритона, а также O-C, полученные в результате сравнения с теориями DE405 [7] и Якобсона (1991) [8] с использованием программы Н.В. Емельянова: <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/servicer.htm>.

Таблица 1. Результаты наблюдений Нептуна.

Дата и момент наблюдений UTC		R.A. (2000.0)			Dec. (2000.0)			(O-C)RA	(O-C)D
		<i>h</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>o</i>	<i>'</i>	<i>"</i>	<i>a r c s e c</i>	
1985	6 16.856432	18	11	21.363	-22	15	4.69	-0.16	0.26
1986	6 10.922526	18	21	43.754	-22	14	12.33	-0.15	0.11
1987	7 27.809418	18	26	9.206	-22	15	36.06	0.16	0.64
1987	7 28.828298	18	26	3.206	-22	15	41.96	0.26	0.16
1987	8 20.785178	18	24	12.498	-22	17	33.52	-0.15	0.33
1987	8 22.783768	18	24	5.506	-22	17	42.29	0.12	0.15
1987	9 14.750097	18	23	21.749	-22	19	3.32	0.06	0.27
1987	9 15.743544	18	23	21.469	-22	19	6.16	0.01	0.13
1987	9 20.726664	18	23	22.204	-22	19	18.64	0.08	0.11
1987	9 21.730417	18	23	22.772	-22	19	20.89	-0.04	0.14
1987	9 23.728794	18	23	24.355	-22	19	25.25	0.00	0.08
1987	9 24.713412	18	23	25.349	-22	19	27.38	0.06	-0.04
1987	9 25.710541	18	23	26.498	-22	19	29.33	0.12	-0.05
1988	8 16.799008	18	33	57.893	-22	13	57.98	0.08	0.43
1988	9 2.746302	18	33	2.869	-22	15	19.86	-0.12	0.27
1988	9 13.729039	18	32	46.940	-22	15	58.95	0.26	0.27
1988	9 14.731163	18	32	46.300	-22	16	2.03	0.04	0.15
1988	9 15.722986	18	32	45.820	-22	16	4.75	0.03	0.25
1989	7 1.917372	18	48	14.332	-22	2	18.96	0.19	0.86
1989	7 3.866461	18	48	0.706	-22	2	36.09	0.08	0.64
1989	7 28.815278	18	45	13.934	-22	6	9.12	0.05	0.22
1989	8 1.807636	18	44	50.013	-22	6	40.53	0.09	0.64
1989	8 25.782027	18	42	55.866	-22	9	25.35	-0.11	0.32
1989	8 26.771140	18	42	52.468	-22	9	30.75	-0.01	0.51
1989	8 27.783186	18	42	49.113	-22	9	36.49	0.09	0.39
1989	8 29.765480	18	42	42.888	-22	9	47.21	0.05	0.34
1989	8 30.765170	18	42	39.935	-22	9	52.13	0.06	0.62
1989	9 4.764166	18	42	27.074	-22	10	16.70	-0.00	0.31
1989	9 5.762216	18	42	24.894	-22	10	20.90	-0.05	0.58
1989	9 22.731091	18	42	8.629	-22	11	17.75	-0.04	-0.10
1989	9 25.719626	18	42	9.940	-22	11	23.41	-0.04	0.06
1990	8 20.821372	18	52	47.477	-22	1	26.35	0.07	0.56
1990	9 16.700995	18	51	34.351	-22	3	54.50	-0.04	0.28
1990	9 18.696991	18	51	32.690	-22	4	1.53	-0.12	-0.18
1990	9 21.717384	18	51	31.250	-22	4	09.87	-0.12	0.10
1990	9 22.718265	18	51	31.064	-22	4	12.45	-0.03	0.04
1990	10 7.693125	18	51	45.246	-22	4	29.26	-0.25	-0.16
1990	10 18.664855	18	52	15.853	-22	4	15.61	-0.14	-0.03
1991	8 8.807518	19	3	22.184	-21	49	59.05	-0.05	0.49
1991	8 31.755014	19	1	36.740	-21	53	17.00	-0.15	0.54
1991	9 5.737685	19	1	21.482	-21	53	49.46	-0.12	0.49
1991	9 11.729020	19	1	7.298	-21	54	22.89	-0.18	0.20
1991	9 29.700220	19	0	54.004	-21	55	20.97	-0.02	0.13

1991	9	30.697518	19	0	54.593	-21	55	22.14	-0.00	0.29
1991	10	4.669966	19	0	58.335	-21	55	25.23	-0.16	0.40
1991	10	5.689115	19	0	59.670	-21	55	25.58	-0.05	0.35
1991	10	7.686672	19	1	2.705	-21	55	25.52	-0.06	0.31
1991	10	12.708302	19	1	12.872	-21	55	21.80	0.06	0.03
1992	7	1.876256	19	17	2.257	-21	30	8.35	-0.34	0.51
1992	7	3.874653	19	16	48.548	-21	30	34.57	-0.07	0.51
1992	7	7.864878	19	16	20.982	-21	31	27.33	-0.20	0.48
1992	8	3.822504	19	13	21.218	-21	37	15.93	-0.09	0.07
1992	8	4.829892	19	13	15.106	-21	37	27.46	0.06	0.61
1992	8	21.756832	19	11	43.980	-21	40	31.12	-0.09	0.73
1992	8	22.747644	19	11	39.456	-21	40	41.00	0.05	0.31
1992	8	29.749328	19	11	10.350	-21	41	42.75	-0.44	0.62
1992	8	30.783356	19	11	6.540	-21	41	51.42	-0.15	0.36
1992	9	28.704323	19	10	14.523	-21	44	17.08	-0.09	0.02
1992	9	29.693420	19	10	14.760	-21	44	18.65	-0.14	0.08
1992	9	30.710880	19	10	15.151	-21	44	20.01	-0.17	0.17
1992	10	1.697188	19	10	15.671	-21	44	21.46	-0.21	-0.11
1993	8	23.857538	19	21	6.030	-21	27	13.49	-0.05	-0.13
1993	9	12.755164	19	19	55.511	-21	30	3.52	-0.11	0.33
1993	9	18.703084	19	19	43.892	-21	30	37.10	0.06	0.16
1993	10	6.690631	19	19	38.306	-21	31	22.92	0.14	-0.05
1993	10	15.709737	19	19	52.700	-21	31	12.86	-0.07	0.12

Таблица 2. Результаты наблюдений Тритона.

Дата и момент наблюдений UTC		R.A. (2000.0) <i>h m s</i>			Dec. (2000.0) <i>o ' "</i>			(O-C)RA <i>a r c s e c</i>	(O-C)D	
1986	6	10.926927	18	21	44.604	-22	14	8.22	-0.05	-0.64
1987	7	28.832326	18	26	3.792	-22	15	53.28	-0.69	0.66
1987	7	28.837471	18	26	3.851	-22	15	53.74	0.71	0.26
1987	8	20.792828	18	24	13.525	-22	17	41.70	-0.25	-0.32
1987	8	22.793617	18	24	4.519	-22	17	46.95	-0.73	-0.10
1987	9	14.757942	18	23	21.386	-22	19	13.80	0.13	-0.27
1987	9	15.748284	18	23	20.390	-22	19	5.44	0.27	-0.59
1987	9	20.734140	18	23	21.715	-22	19	27.93	-0.21	-0.08
1987	9	21.738145	18	23	21.723	-22	19	18.65	0.76	-0.50
1987	9	23.736528	18	23	24.884	-22	19	16.81	-0.27	0.09
1987	9	24.720414	18	23	26.436	-22	19	30.82	-0.36	-0.00
1987	9	25.716777	18	23	26.986	-22	19	40.98	-0.87	0.22
1988	9	2.753380	18	33	1.768	-22	15	14.76	0.03	-0.77
1988	9	13.733721	18	32	45.990	-22	16	2.95	0.32	-0.07
1988	9	14.735619	18	32	45.356	-22	15	54.20	0.72	-0.52
1988	9	15.727350	18	32	45.766	-22	15	54.03	-0.65	-0.83
1989	7	3.873423	18	48	0.316	-22	2	47.93	-0.14	-0.11
1989	7	28.822112	18	45	12.743	-22	6	4.40	-0.22	-0.62
1989	8	1.814604	18	44	50.187	-22	6	53.36	-0.10	0.33
1989	8	25.778796	18	42	55.527	-22	9	36.57	-0.48	-0.17
1989	8	26.778226	18	42	51.321	-22	9	31.95	0.00	-0.82
1989	8	30.771855	18	42	40.550	-22	10	4.42	-0.97	-0.40
1989	9	4.770738	18	42	28.232	-22	10	20.17	0.40	-0.61
1989	9	5.769091	18	42	25.414	-22	10	33.81	-0.73	-0.54
1989	9	22.737734	18	42	9.665	-22	11	24.05	-0.62	0.12
1989	9	25.726157	18	42	8.922	-22	11	17.12	0.37	-0.65
1990	9	16.705365	18	51	35.075	-22	4	6.01	-0.37	-0.54
1990	9	18.702274	18	51	31.608	-22	4	0.89	0.72	-0.17
1990	9	21.711461	18	51	32.356	-22	4	12.01	-0.69	-0.46
1990	9	22.711393	18	51	31.660	-22	4	23.25	-0.43	0.56
1990	10	18.661528	18	52	14.854	-22	4	8.31	0.18	-0.11

1991	8	8.814207	19	3	21.326	-21	49	49.77	-0.31	-0.47
1991	8	31.761273	19	1	35.609	-21	53	13.38	0.28	-0.40
1991	9	5.744005	19	1	20.652	-21	53	56.78	0.59	-0.12
1991	9	11.735208	19	1	6.366	-21	54	28.00	0.20	0.45
1991	9	29.706186	19	0	52.889	-21	55	23.16	-0.11	-0.98
1991	9	30.704046	19	0	53.841	-21	55	13.31	0.51	-0.93
1991	10	4.676028	19	0	57.957	-21	55	36.17	-0.13	0.01
1991	10	7.693138	19	1	3.199	-21	55	16.36	0.03	-0.49
1991	10	12.714740	19	1	12.336	-21	55	11.26	-0.21	-0.87
1992	7	1.884485	19	17	1.132	-21	30	11.60	0.89	-0.73
1992	7	7.870884	19	16	19.772	-21	31	29.09	-0.04	-0.78
1992	8	3.829568	19	13	22.246	-21	37	22.81	-0.43	-0.48
1992	8	4.836658	19	13	15.182	-21	37	40.63	0.11	-0.00
1992	8	21.750342	19	11	44.898	-21	40	41.65	-0.24	-0.65
1992	8	22.753666	19	11	39.173	-21	40	53.02	-0.15	0.05
1992	9	28.711324	19	10	13.472	-21	44	11.18	-0.21	-0.74
1992	9	30.716934	19	10	16.136	-21	44	15.51	-0.19	-0.22
1992	10	1.701522	19	10	16.711	-21	44	28.64	0.14	-0.06
1993	8	23.851238	19	21	5.021	-21	27	7.14	-0.09	-0.87
1993	9	12.748246	19	19	56.667	-21	30	3.22	-0.19	-0.80
1993	9	18.699884	19	19	45.010	-21	30	37.81	-0.59	-0.97
1993	10	6.687364	19	19	39.368	-21	31	27.04	-0.72	-0.04
1993	10	15.706554	19	19	51.642	-21	31	6.92	-0.35	-0.35

Анализ точности наблюдений

Сравнение наблюдений с теорией позволяет сделать анализ точности наблюдений. Внешняя точность наблюдений оценивалась по уклонениям О-С от средних значений за весь период наблюдений. (1985-1993). В таблице 3 приведены средние значения О-С и средние квадратичные ошибки одного наблюдения.

Таблица 3. Оценка точности наблюдений.

Объект	N	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ a r c s e c	$(O-C)_\delta$ a r c s e c	$\sigma_{1\alpha} \cos \delta$ a r c s e c	$\sigma_{1\delta}$
Нептун	66	-0.03 ± 02	+0.27 ± 03	±0.13	±0.24
Тритон	54	-0.09 ± 06	-0.33 ± 06	±0.42	±0.44
Контрольные Звезды	101	+0.04 ± 02	+0.00 ± 02	±0.22	±0.24

Как видно из таблицы, положение Тритона определяется с меньшей точностью, чем положения Нептуна. Причина этого заключается в увеличении ошибки измерений в 2-3 раза для слабых, недодержанных изображений Тритона (13.6 зв. вел.) по сравнению с изображениями Нептуна (8 зв. вел.).

Для контроля астрометрической редукиции на фотопластинках одновременно с Нептуном и Тритоном определялись положения контрольных звезд, расположенных вблизи центра пластинок, не далее 30 секунд дуги. Всего было измерено 458 изображений 23-х контрольных звезд, положения которых были известны из каталога ГУСНО-1. Из анализа О-С контрольных звезд определена средняя квадратичная ошибка одного наблюдения (среднего по нескольким изображениям и по двум камерам). Средние О-С и ошибки наблюдений приведены в третьей строке таблицы 3. Ошибки определения

координат контрольных звезд и Нептуна близки по значениям, для Тритона они в 2 раза больше. Ошибки редукции в методе шести постоянных, зависящие только от измерений и каталожных положений опорных звезд в среднем по всему материалу равны $\pm 0.12''$. Таким образом, величина ошибки измерений Нептуна и звезд должна равняться $\pm 0.21''$ (или 3.5 мкм), а Тритона: $\pm 0.42''$ (или 7 мкм). Однако, точность теории движения Тритона на 2 порядка выше [8], чем точность данного ряда фотографических наблюдений. Повышения точности до требуемого уровня можно ожидать при переходе от фотографических наблюдений к ПЗС-наблюдениям.

Литература

1. **Т.П. Киселева, С.М. Чантурия, С.А. Лепешенкова, Е.В. Лапина, С.Л. Сулейманова, С.В. Толбин.** Фотографические позиционные наблюдения Юпитера, Сатурна и их спутников в Абастумани в 1983-1984 гг. Бюлл. АБАО, 62, 1987, с.117-130.
2. **Т.П. Киселева, С.М. Чантурия.** Фотографические позиционные наблюдения Фобоса в Абастумани в 1986 г. Бюлл. АБАО, 63, 1988, с.31-34.
3. **О.А. Калиниченко, Т.П. Киселева, Г.Н. Салуквадзе, С.М. Чантурия.** О фотографических позиционных наблюдениях спутников Марса в Абастумани во время великого противостояния 1988 г. Бюлл. АБАО, 1990, 68, с.99-110.
4. **Т.П. Киселева, С.М. Чантурия.** Определение положений спутников Сатурна - Дионы, Реи, Титана, Гипериона и Япета по наблюдениям в Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузии. Известия ГАО в Пулкове, 2001, N 214, с.356-360.
5. **С.М. Чантурия, Т.П. Киселева, Н.В. Емельянов.** Фотографические позиционные наблюдения Урана и его спутников - Титании и Оберона в Абастумани в 1987-1994 гг. Известия ГАО в Пулкове, 2002, N 216, с 349-362.
6. **А.А. Киселев.** Теоретические основания фотографической астрометрии. Москва, Наука, 1989, 260 с.
7. **Standish E.M., Jr.** 1998, JPL Interoffice Memo. 312f-98-048.0 (Pasadena: JPL)
8. **Jacobson R.A., Riedel J.E. and Taylor A.N.** (1991). The orbits of Triton and Nereid from spacecraft and Earthbased observations. Astronomy and Astrophysics, v.247, p.565.

PHOTOGRAPHIC POSITIONAL OBSERVATIONS OF NEPTUNE AND TRITON IN ABASTUMANI IN 1985-1993

Chanturiya S.M., Kiseleva T.P.

Summary

The paper presents the results of photographic observations of the positions of Neptune and Triton with the double Zeiss astrograph in Abastumani in 1985-1993. The geocentric equatorial coordinates of the planet and satellite in the system of the catalogue TYCHO-1 are given in tables 1 and 2. A comparison of observations with theories DE405 for Neptune and Jacobson (1991) for Triton have been made. The accuracy of observations in right ascension and declination was estimated as 0.13" and 0.24" for Neptune and 0.42" and 0.44" for Triton. The research has been carried out with the support of RFBR №№ 04-02-16157, 04-07-90081.

ГЕОДИНАМИКА

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 21 СЕНТЯБРЯ 2004 ГОДА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Ассиновская Б.А.

В статье изложены результаты изучения макросейсмических проявлений Калининградского землетрясения 2004 года в Санкт-Петербурге. Установлено, что, в среднем, для города следует принять значение интенсивности, равное 2-3 балла МСК. Показана связь уровня сотрясений с инженерно-геологическими особенностями строения верхних горизонтов земной коры гордской территории.

Землетрясение 21 сентября 2004 года в Калининградской области (второй толчок в 13 32 GMT, Mw 4.9, H = 10 -15 км) ощущалось в эпицентре, расположенном в северо-западной части Самбийского полуострова, силой более 6 баллов согласно нормативному документу, принятому при оценке сейсмической опасности - макросейсмической шкалы МСК-64, на расстояниях 500-600 км интенсивность сотрясений составила 2 балла. Затухание интенсивности проявлений данного сейсмического явления оказалось аномально малым по сравнению с затуханием от других региональных землетрясений с той же магнитудой и глубиной очага. Изосейсты события особенно вытянуты в двух направлениях: вдоль Балтийского побережья на север, а также на северо-запад – юго-восток. Интересно, что в северном направлении спадание балльности до единицы имело место уже в восточной Эстонии. Однако интенсивность сотрясений вновь усилилась в Сосновом Бору, в Санкт-Петербурге и локально в некоторых точках Ленинградской области.

Специализированное изучение макросейсмических проявлений Калининградского землетрясения в Санкт-Петербурге и окрестностях было проведено нами непосредственно по следам данного события.

Следует отметить, что в городе и прежде ощущались некоторые сильные мировые и региональные землетрясения. Например, все Карпатские глубокие землетрясения обычно проявляются в Санкт-Петербурге силой 2-3 балла МСК-64. С той же интенсивностью ощущались некоторые сравнительно близкие события прошлого, такие, как Осмуссаарское (Эстонское) землетрясение 1976 года [Никонов, 2002] или землетрясение в Осло-грабене в 1904 году. В Известиях ПЦСК за 1906 год [Coptes rendus des séances de la commission seismique permanente de l' Academie imperiale des sciences, 1906] так описано это последнее событие: « Петербург. На Садовой улице. В 11 ч. 29 м. во время обеда замечено было колебание стульев. Одновременно замечено было волнообразное колебание и сотрясение стены».

Первыми свидетельствами макросейсмических проявлений Калининградского землетрясения в городе были звонки на сейсмостанцию «Пулково» из Московского района и района завода «Большевик». Далее в Интернете появилось сообщение о том, что землетрясение ощущалось в Смольном. Нами был сделан запрос в МЧС и в районные властные органы, откуда последовали ответы, что должностные инструкции не предусматривают проведения каких-то мероприятий в случаях, не повлекших за собой повреждений строительных объектов и массовой паники. На следующем этапе был осуществлен опрос по телефону представителей районных администраций, в основном, западных районов области, с использованием стандартного опросного листа. Этот опрос везде, кроме пос. Сосновый Бор, дал отрицательный результат. Далее последовала

всего лишь получасовая передача по Санкт-Петербургскому радио с рассказом о землетрясении и просьбой к жителям города и области позвонить и рассказать о своих впечатлениях. Всем дозвонившимся во время передачи были заданы стандартные вопросы о том, где они находились во время события и что ощущали. В результате была собрана информация о наблюдениях, в основном, для города и ближайших пригородов. 30 точек были признаны кондиционными. Все люди, кроме наблюдателей из Синявино и Мги, были внутри многоэтажных домов. Последние двое, проживая в одноэтажных деревенских домах, находились снаружи. Все наблюдатели чувствовали качание и дрожание. 11 наблюдателей были в состоянии покоя. Восемь человек заметили дребезжание посуды. Два человека были испуганы. Несколько примеров макросейсмических описаний представлено в таблице.

Таблица.

Примеры макросейсмических проявлений Калининградского землетрясения в Санкт-Петербурге

Пункты	Этаж	Тип строения	Описание
Мга	Вне дома		Ощущали толчок
Гражданский, 94	4	5 –этажный панельный дом постройки 70-х годов 20 века	Ощущал лежа, вздрогнул диван, трепетали листья комнатных цветов, посуда звякнула
Загородный пр., д. 5	5	5-этажный дом дореволюционной постройки	Все люди в доме ощущали сотрясения. Кресло качалось, стол дрожал.
Ленинский пр., д.151	7	8-этажный 80-х годов 20 века	Внутри дома. Наблюдатель ощущал качание и дрожание. Пол двигался. Висячее зеркало колебалось с амплитудой... «Это было как движение поезда». Чувствовал себя плохо.
ул. Кораблестроителей, 46	13	14-этажный современный дом	Очень сильно качало и трясло. Испуг многих людей. Все ощущали два толчка. Люстра дребезжала.

Можно утверждать, что уровень воздействий в городе и ближайших пригородах меняется от 2 баллов до 3 –4 – х, в первую очередь, в зависимости от этажа, на котором находился наблюдатель. В качестве средней наблюдаемой интенсивности непосредственно на грунтах для Санкт-Петербурга в целом было принято значение 2-3. Основанием для выбора данного значения послужили следующие соображения. Во-первых, макросейсмическая шкала МСК –64 однозначно указывает, что интенсивность 2 - это «слабо ощутимое землетрясение, дрожание, ощутимое отдельными чувствительными людьми в покое, особенно на верхних этажах». Во-вторых, сравнение данных об этажности домов и значений интенсивности на этих уровнях (рис.1) демонстрирует линейную связь между указанными параметрами. Нулевое значение абсциссы («нулевой» этаж) дает нам значение 2-3 для грунта. В-третьих, на заседании специальной Рабочей

группы по обобщению данных, проходившей в мае 2005 года в Тарту [Assinovskaya, 2004], было принято решение оценить как 2 балла все наблюдения на этажах выше второго.



Рис.1.

Как сказано выше, мы получили, главным образом, отрицательные результаты в населенных пунктах, расположенных на юге Ленинградской области. Метод опросов не всегда до конца информативен в случаях слабой интенсивности сотрясений. Следует отметить, правда, что в России местные власти не обязаны собирать данные, если нет повреждений и паники. Например, на основе личных контактов было установлено, что Калининградское землетрясение было все же ощутимо в некоторых точках города Соновый Бор. Кроме того, имеются ненулевые точки в Рыбацком, Пушкине, Всеволожске, Мге, Синявино.

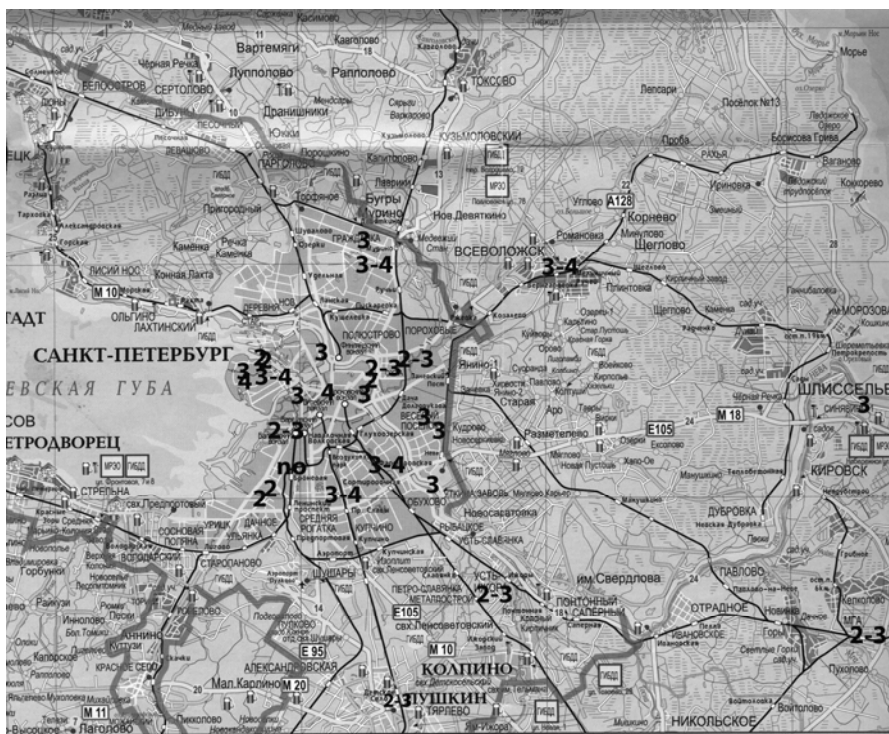


Рис.2.

Карта интенсивности сотрясений в Санкт-Петербурге и окрестностях.

Все собранные данные показаны на карте. Собранной информации недостаточно для детального районирования. Очевидно, однако, что некоторые локальные области

сотрясались больше, чем остальные, например, Васильевский остров, центральная часть города, север Выборгского района, правый берег Невы, Московский район - ул. Одоевского, Каховского, Железноводская, Наличная, Суворовский пр., Загородный пр., ул. Римского-Корсакова и др.

Особенности макросейсмических проявлений Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года в Санкт-Петербурге определено связаны как с тектонической позицией региона, инженерно-геологическими особенностями грунтов естественной и техногенной природы, так и со степенью сохранности строительных сооружений. Известно, что Санкт-Петербург расположен вблизи региональной тектонической зоны (сочленение Фенноскандинавского щита и Русской плиты), которая проявляется на территории города высокой плотностью разломов различных порядков и направлений. Большинство разломов активны на современном этапе, смещения по ним достигают 2 мм в год [Рудник, Мельников, Мусийчук, 1998]. Активность тектонических нарушений подтверждается наличием повышенного теплового потока, газовыделениями, поступлением радионуклеидов в грунты, прослой и грунтовые воды. Коренные осадочные породы вендского и раннекембрийского возрастов имеют, кроме того, локальные структурные особенности, которые выражаются в существовании погребенных долин различной глубины и протяженности. В целом долины занимают 30 % города. Наиболее глубокие бассейны имеются на Васильевском острове, площади Мужества, В районе Мурино ручья. Максимальная мощность четвертичных песчано-глинистых отложений в палеобассейнах достигает 120 м. Отложения содержат напорные воды. Имеются некоторые грунты, подверженные возникновению текучести [www.georec.spb.ru]. Интенсивность сейсмических проявлений возрастает в этих районах (Гражданский пр. 94, Светлановский 107, Одоевского 29 и др. адреса).

В дельте Невы отмечены две неотектонические террасы, ограниченные разломами и флексурами. Мощность дельтовых отложений достигает 25 метров, в среднем она составляет 1- 15 метров. Литологически это пылеватые пески в верхней части и суглинки в нижней части разреза. Отложения содержат прослой торфа. Грунты подобного рода относятся к категории слабых. Они распространены практически на всей территории города. Более жесткие, но не всегда стабильные (флювивиогляциальные отложения с озами, камами и зандрами) грунты расположены в области с абсолютными отметками 8 м на севере и юге города [www.georec.spb.ru]. Калининградское землетрясение проявилось большей частью в области распространения слабых грунтов.

С сейсмологической точки зрения гидрогеологическая ситуация в Санкт-Петербурге также очень неблагоприятна. В разрезе подземного пространства СПб установлено от 6 до 8 горизонтов подземных вод различного напора, приуроченных к четвертичным отложениям и коренным породам. Самый высокий из них расположен на глубине всего 3-3,5 метра. Данный водный источник имеет техногенную природу, то есть возник в результате плохого состояния канализационной сети, которое оказывает долговременное негативное влияние на загрязнение подземного пространства города. Во многих случаях глинистые грунты при взаимодействии с канализационными стоками становятся текучими [www.georec.spb.ru].

Кроме того, в коренных и в четвертичных отложениях установлены обширные зоны биохимического газогенерирования геологической и техногенной природы. Активизация метанообразования отмечается в пределах исторического центра, в Красногвардейском и Фрунзенском районах. Она сопровождается накоплением газа, выбросом газонасыщенных разжиженных пород, самовозгоранием метана. Такое газовыделение фиксировалось при строительстве метро, оно осложняло проходку шахтных стволов и эскалаторных тоннелей метрополитена. К образованию биохимических газов приводит активная микробиологическая деятельность в анаэробных условиях. Понятно, эти про-

цессы приводят к переходу водонасыщенных песчано-глинистых пород в подвижное и разуплотненное состояние. Области макросейсмических проявлений совпадают местами выброса газа, например, в центральной части города [www.georec.spb.ru].

В настоящее время наиболее высокие строения в Санкт-Петербурге, как правило, возводятся на сваях, заглубленных в морену. Однако в прошлом здания высотой до семи этажей обычно возводились на ленточных фундаментах, опирающихся на верхний слой пылеватых песков. Много старых зданий возведено на плитах без свай, что при неглубоком заложении ведет к возникновению осадки грунтов до 50 см и повреждению построек. В настоящее время вследствие описанных выше техногенных проблем возведение новых сооружений в исторической части города вызывает повреждения уже существующих строений из-за появления во время котлованных работ воронок проседания [Фадеев, 1999, Дашко, 1999].

Таким образом, практически все Петербургские старые дома и значительное число новых конструкций имеют высокую степень уязвимости (класс А) при возможных землетрясениях.

Полученные результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что даже относительно слабые по силе (М 5) и достаточно удаленные землетрясения, каким является Калининградское землетрясение, оказывают 2-3 балльные воздействия на грунты и строения города, несмотря на то, что согласно теоретическим расчетам при магнитуде 5 и расстоянии 800 км интенсивность сотрясений должна была бы составить менее балла. Приходится констатировать, что «уникальные» инженерно-геологические условия создают в городе реальную сейсмическую опасность.

Можно показать также, что, во-первых, описанное событие отнюдь не максимально возможное в Балтийском регионе, во-вторых, вблизи Санкт-Петербурга существуют собственные сейсмогенерирующие зоны.

Литература

1. **Никонов А.А.** Осмуссаарское землетрясение 25.10.1976 г.: макросейсмика, сейсмо-тектоника, механизм очага. // Физика Земли. 2002. № 8. С. 74-88.
2. **Assinovskaya B.A.** Macro seismic effect of September 21 2004 Kalinigrad earthquake around the Saint-Petersburg region. // Kalinigrad earthquake September 21, 2004 workshop materials. Institute of geol. Univers. of Tartu. Geol. Surv. of Estonia..P.9. 2005.
3. **Coptes rendus des séances de la commission seismique permanente de l' Academie imperiale des sciences.** Т.2. Livr. II. St Petersburg 1906. S. 169-178.
4. **Рудник В.А., Мельников Е.К., Мусийчук Ю.И.** Геологический фактор: состояние и здоровье человека.// Минерал 1998. № 1. С. 41-51.
5. **Заварзин Л.Г.** Слабые грунты на территории Санкт-Петербурга.// Реконструкция городов и геотехническое строительство.2000. № 2. www.georec.spb.ru .
6. **Фадеев А.Б.** Геотехнические аварии в Петербурге// Реконструкция городов и геотехническое строительство 1999.N1. www.georec.spb.ru.
7. **Дашко Р.Э.** Проблемы геоэкологической безопасности освоения и использования подземного пространства мегаполисов (на примере Санкт-Петербурга) 1999. N1. www.georec.spb.ru

MACROSEISMIC EFFECT OF SEPTEMBER 21 KALINIGRAD EARTHQUAKE ON SAINT-PETERSBURG

Assinovskaya B.A.

Summary

The results of a study of the 2004 Kalinigrad earthquake macroseismic manifestation are reported. It is established that the average intensity value for Saint Petersburg and surrounding area is 2-3 MSK. A connection is shown between the intensity level and the ground geological features.

О ТЕПЛОВОЙ АКТИВНОСТИ В ОЧАГОВОЙ ЗОНЕ КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Ассиновская Б.А.

В работе описаны полученные термofизическая и реологическая характеристики земной коры в районе очаговой зоны Калининградского землетрясения. Проведенное моделирование дало возможность установить, что возникновение землетрясения обусловлено региональными флуктуационными мантийными процессами, повышенным выделением тепла по активным разломам и возникновением вследствие этого дифференциальных напряжений в локальных зонах. «Сейсмогенная зона» в Калининградском регионе вряд ли распространяется глубже 15 км.

Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года является уникальным событием для Балтийского региона по силе и местоположению очаговой зоны. Землетрясение проявило себя целым рядом толчков, из которых наиболее сильными были первый в 11 ч 03 мин и второй в 13 ч 32 м с магнитудами Mw 4.8 и 4.9 соответственно. К настоящему времени землетрясение хорошо изучено, особенно в макросейсмическом плане (Никонов, Аптикаев, Алешин и др. 2005). Однако некоторые важные характеристики сейсмотектонической позиции остались неясными, особенно это касается природы землетрясения и глубинного положения очаговой зоны.

Априори, Калининградское сейсмическое событие отнесено к землетрясениям внутриплатформенного типа, возникновение которых в пределах Балтийского щита и Восточно-Европейской платформы (ВЭП) в целом, связывают с деструкцией коры как под давлением расширяющейся Северо-Атлантической рифтовой зоны, так и вследствие гляциоизостатических процессов.

Современная тепловая активность на платформе очень слабая, поверхностный тепловой поток не превышает 30–40 мВт/м². В северной и центральной Фенноскандии также отмечаются очень низкие значения этого параметра (Balling, 1995). Тепловой режим здесь считается стационарным с однородным стабилизированным во времени тепловым полем. Между тем, собранные нами геотермические данные свидетельствуют о довольно высоком поверхностном тепловом потоке в южной части Восточной Балтики, в том числе Калининградской области, (Гордиенко, 1998, Шустов, Семенов, Фадеев и др., 1977). Повышенная, но меньшей интенсивности тепловая активность обнаружена также в некоторых южных районах Норвегии и Швеции.

Тепловая аномалия, приуроченная к Неманской зоне разломов (Клайпедская) характеризуется интенсивностью более 80 мВт/м², повышенная тепловая активность до 60–70 мВт/м² отмечена на расстояниях до 70-ти км от аномалии в северных районах Калининградской области, в том числе, в очаговой зоне. Установлено также, что в скважинах области в интервале глубин 0–1900 м температура увеличивается от 0 °С до 60°С, температурный градиент составляет 31,7°/км. Такой уровень температур типичен для тектонически активизированных осадочных бассейнов, что может быть объяснено внутренними процессами осадконакопления, однако при этом невозможно исключить и латерального распространения тепла от Клайпедской аномалии.

При макросейсмическом обследовании последствий Калининградского землетрясения в северных районах области около пос. Романово и на Куршской косе нами были обнаружены свидетельства повышенной тепловой активности – извержение горячего

пара из неглубокой скважины, появление горячей воды в колодце в пос. Лесное еще в 2002 году и т.д.

Анализ геотермических данных позволяет выдвинуть иную гипотезу сейсмогенеза, а расчет прочностных параметров коры по известным температурным характеристикам дает возможность установить нижнюю границу распространения хрупких деформаций.

Приведенные выше фактические данные были использованы нами в качестве критериев для геотермического моделирования.

Геолого-геофизическая характеристика

Эпицентральная зона землетрясения 21 сентября 2004 года приурочена к Западно-Литовскому гранулитовому массиву - региональной структуре архейско-протерозойского фундамента, расположенной на склоне ВЕП. Массив, сложенный глиноземистыми гнейсами, включающими тела метабазитов, имеет линейно-блоковое строение. В северной части массива блоки наклонены круто на север, к югу их падение выполаживается. Породы метаморфизованы, интенсивно дислоцированы и чарнокитизированы, и, судя по геофизическим данным, прорваны гранитоидными интрузиями. Складчатоблоковые структуры массива рассечены молодыми разломными зонами северо-западного и северо-восточного направлений (Сувейздис (ред.), 1979).

Геодинамику области определяет уже упомянутая глубинная Неманская тектоническая зона свекофено-карельского возраста протяженностью около 1000 км. Она характеризуется дифференцированным характером движений, ее тектоническая активность предопределила геологическое развитие соседних территорий на протяжении длительного времени вплоть до современного. Область нарушений вытянута в северо-западном направлении и захватывает широкую полосу, осложненную сбросами амплитудой до 100 м, разбивающими ее на небольшие блоки (Гуделис (ред.), 1976, Загородных, Довбня, Жамойда, 2001). В пределах разломной зоны фундамент погружается к западу от 1.0 до 2.0 км и более, достигая в пределах моря глубины 2.5 км.

По сейсмическим данным (EUROBRIDGE Seismic Working Group, 1999, 2001) в разрезе земной коры этой области выделяется слой пониженных на 0.15 км /s скоростей пробега продольных волн на глубине 9-12 км, отмечается подъем границы Мохо, имеются границы с промежуточными скоростями 7.2-7.4 км/сек. Современная активность Неманской зоны разломов подтверждается приуроченностью к ней описанной выше тепловой аномалии, по-видимому, связанной с региональным разогревом коры вследствие конвективного привноса глубинного тепла.

Глубинное строение земной коры северной части Калининградского блока точно не известно, однако вблизи района исследования в разные годы проводились сейсмические исследования методом глубинного сейсмического зондирования по уже упомянутому профилю в Литве, отработанному по простиранию Неманской зоны, геотраверсу POLONAISE -97 в Польской впадине (Sroda P., POLONAISE Profile P3 Working Group, 1999), а также профилю «Черное море – Балтийское море», подходящему к региону с юга (Lund S. E., Grad M., Guterich A., 1991). Профиль «Балтийском море» был пройден в море к северо-западу от Калининградской области, (Островский, 1995). Геотрансект ЕВРО-3 -Кохтла-Ярве – Советск – Торунь (Ankudinov, Sadov, Brio, 1994, Смыслов (ред.), 1983) является единственным, проходящим через южную часть Калининградской области. Согласно этим исследованиям мощность земной коры в регионе составляет 40–45 км, мощность осадочного слоя до 3 км. Мощность верхней коры со скоростями V_p менее 6.5 км/с по данным литовского профиля – до 20 км, по геотраверсу «Черное море – Балтийское море», также 20 км, на профиле Кохтла-Ярве – Советск толщина верхней коры составляет 15 км в районе Советска, в Польской впадине также

15 км. На юге области граница с V_p 6.5 находится на глубине 15 км, на глубине 38 км имеются промежуточные границы с V_p 7.3 км/с. Усредненная модель строения земной коры, принятая при термofизическом моделировании, приведена в таблице 1.

Основные характерные черты геологической истории региона - это подъем Балтийского щита и прогибание Балтийского авлакогена. Тектонические события новейшего этапа происходили в плиоцене 5 – 3 миллионов лет назад, когда Балтика оказалась сушей - структурно-денудационной равниной, расположенной ниже окаймляющей ее территории. Далее неотектоническая эпоха характеризуется сменой, по крайней мере, четырех ледниковых периодов, сменяемых межледниковьями. Считается, что регион вовлечен в молодую активизацию, связанную как с гляциоизостатическими причинами, так и с альпийским тектогенезом (Гуделис (ред.), 1976).

Термofизическое моделирование

Предыдущими исследованиями установлена связь температуры и возраста тектонических деформаций в рамках трехкомпонентного состава плотности поверхностного теплового потока (Vitarello, Pollack, 1980). Согласно этой модели главная компонента – это радиогенное тепло, которое составляет до 40% общего объема, второй по величине считается остаточное тепло, связанное с временными тепловыми возмущениями, возникающими во время тектогенеза, оно составляет 30% в кайнозойских областях, в районах развития докембрийских деформаций, как правило, эта часть потока минимальна. Третья часть – фоновый мантийный поток. Известно, что высокий тепловой поток на юге Балтийского щита имеет именно радиогенную природу (Slagstad, 2006). Имеющиеся данные о тепловом поле в районе Калининграда были использованы для термofизического моделирования, т.е. оценки температуры в земной коре на различных глубинах, расчета поверхностного теплового потока и сравнения его с наблюдаемым. Температурные данные позволяют получить прочностной разрез земной коры в районе очаговой зоны и установить глубину залегания границы между хрупкой и пластичной частями коры, тем самым оценить предельную глубину возникновения землетрясений.

Расчеты проводились по известным методикам (Slagstad, 2006). Применялось решение стационарного уравнения теплопроводности для одномерного случая и 3-х слойной модели земной коры с полиномиальным сглаживанием. Принятые входные параметры о теплогенерации H_0 , теплопроводности K_0 и мощности слоев приводятся в таблице 1. Поскольку определения термofизических параметров пород конкретно для Калининградского региона отсутствуют, в процессе моделирования были использованы опубликованные данные для Балтийского щита и Датского бассейна.

Таблица 1. Термofизические параметры, использованные в расчете.

	H_0 , (мВт/м ²)	K_0 , (Втм ⁻¹ К ⁻¹)	Мощность, км	ссылки
Осадки	1	2.2	0 - 3	Balling, 1995
Верхняя кора	2	3.0	3 - 15	Balling, 1995,
Нижняя кора	0.3	2.3	15 - 42	Slagstad, 2006

В таблице H_0 – теплогенерация на поверхности слоя, $H = H_0 \exp(-z/D)$ для осадочного слоя и верхней коры, где Z – глубина, $D = 10$ км. Теплогенерация в нижней коре считалась постоянной. Теплопроводность уменьшалась с глубиной по закону $K=K_0=(1+0.001T)$ (Balling, 1995). Мантийный тепловой поток принят повышенным $19 \mu\text{W}/\text{m}^2$.

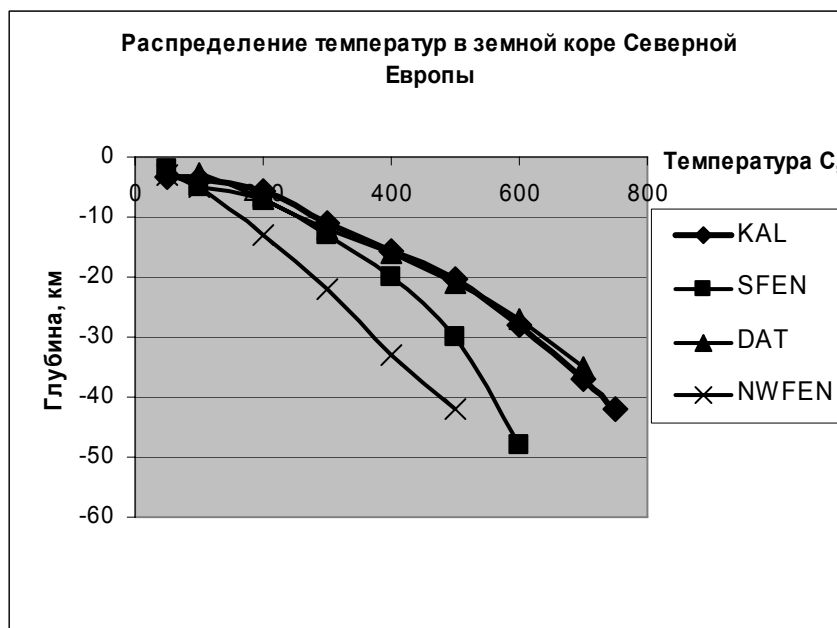


Рис.1. Условные обозначения: KAL – Калининградский регион, SFEN – северная Фенноскандия, DAT – Датский бассейн, NWFEN – северо-западная Фенноскандия.

На рис.1 показано полученное распределение температуры в земной коре Калининградской зоны (кривая KAL), откуда следует, что на глубине 5 км температура около 200°C, на глубине 10 км – это уже 300°C. Начиная с глубин около 15 км, т.е. в области перехода от верхней коры к нижней резко меняется температурный градиент и на глубине 20 км температура возрастает до значений 550°C и более. Полученные результаты сопоставлены с распределением температур в литосфере севера и юга Балтийского щита (кривые NWFEN, SFEN), а также Датского осадочного бассейна (DAT) (Balling, 1995). Видно, что рассчитанная кривая более всего близка кривой DAT, т.е. тепловая активность в регионе существенно больше, чем на Балтийском щите в целом. Из рисунка следует, что различия в распределении температур в верхней коре до глубин 10 км незначительны, далее температурный параметр регулируется глубиной верхней кромки нижней коры. Геотермические градиенты, рассчитанные по кривой KAL для 3-х слоев земной коры, позволили получить значения теплового потока, который составил на границе нижней и верхней коры 30 мВт/м², на границе верхней коры и осадков – 36 мВт/м², на поверхности – 65 мВт/м², что соответствует описанным выше наблюдаемым данным.

Реологическая модель

Полученное распределение температур было использовано для оценки предельных дифференциальных напряжений в хрупкой и пластичной областях коры как функции температуры и давления. Известно, что при низких и средних температурах породы деформируются хрупко по закону Кулона-Мора (Byerlee, 1978). При трехосном поле напряжений, доминирующем в литосфере, касательное напряжение пропорционально геостатическому давлению (Sibson, 1974):

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \geq \alpha \rho G Z (1 - \lambda),$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное принципиальные напряжения,
 Z – глубина, км,

$G - m/sm^3$ – ускорение свободного падения, $\rho - kg/m^3$ – средневзвешенная плотность пород выше заданной глубины, λ – флюидный фактор – отношение порового давления флюидов к давлению вышележащих пород, принято 0.75 (гидростатическое давление),

α – коэффициент сцепления, равный 3, 1.2, 075 для взбросов, сдвигов, сбросов, промежуточное напряжение равно $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$. Принято $\alpha = 1.2$. Вообще говоря, коэффициент сцепления зависит от величины предела прочности на сдвиг, который определяется вещественным составом пород (Assinovskaya, 2003). Принятое значение является максимальным из возможных для данного вида дислокаций. Хрупкая прочность не зависит от температуры, тогда как, напротив, прочность при крипе, т.е. пластическом деформировании определяется напряжением течения, необходимым для установки стабильной скорости деформирования.

В пластическом режиме породы деформируются нелинейно, при этом величина касательного напряжения будет зависеть от скорости деформирования следующим образом (Ranalli, Murphy, 1987):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\dot{\epsilon}/A)^{1/n} \exp(E/nRT),$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, принято значение $10^{-14} s^{-1}$,

A, n, E, R – реологические константы (см. табл.2),

T - абсолютная температура.

Таблица 2. Реологические параметры

	литология	$A(MPa^{-n}s^{-2})$	n	$E (kJmol^{-1})$	ссылка
Верхняя кора	1. гранодиориты	$1,3 \cdot 10^{-3}$	2.4	219	Carter and Tsenn, 1987
	2. влажные граниты	$2 \cdot 10^{-3}$	1.9	141	
Нижняя кора	Влажные диабазы	2	3.4	260	Kirby and Kronenberg, 1987

На рис.2 представлен реологический разрез земной коры как в ее хрупкой части, так и в пластичной, в двух вариантах. В первом случае было принято, что верхняя кора состоит из увлажненных гранитоидов, и тогда сдвиговая прочность катастрофически уменьшается уже на глубинах 6-7 км. Во втором случае расчет производился для, предположительно, гранодиоритового состава, в этом случае переход от хрупких деформаций к пластическим происходит на глубинах 15-16 км.

Обсуждение результатов

Аномалии тепловых потоков, т.е. отклонения от установленных средних величин, несут информацию о строении земной коры и верхней мантии. Тепловой поток определяется природой и мощностью источников тепла, а также его переносом через горные породы посредством молекулярной теплопроводности горных пород, конвекции и излучения. На больших глубинах (свыше 10 км) передача тепла осуществляется в основном за счет излучения нагретого вещества недр и конвекции, обусловленной движением блоков земной коры. На меньших глубинах перенос тепла связан с молекулярной теплопроводностью и конвекцией подземными водами (<http://geo.web.ru>). Локальные флуктуации могут быть вызваны также влиянием геотермических процессов, происходящих в нефтегазоносных горизонтах.

В результате термofизического моделирования мы получили, в общем-то, парадоксальный результат - несмотря на древний архейско-протерозойский возраст коры

региона только достаточно высокий уровень температур соответствует наблюдаемому тепловому потоку. Для получения температурной кривой, которая бы соответствовала бы исходному тепловому полю повышенной интенсивности, пришлось задать определенные, в общем, увеличенные значения теплопроводности, что свидетельствует о повышенной подвижности и проницаемости коры, а, следовательно, ее неотектонической активности. Важным фактором оказались структурные особенности глубинного строения, когда именно в области перехода от гранитоидов к базитам, происходит резкий скачок температуры. Как сказано выше, интенсивность теплового поля в Калининградской области такая же, как в Датском осадочном бассейне, но в последнем случае возраст фундамента намного меньше, а кора значительно тоньше.

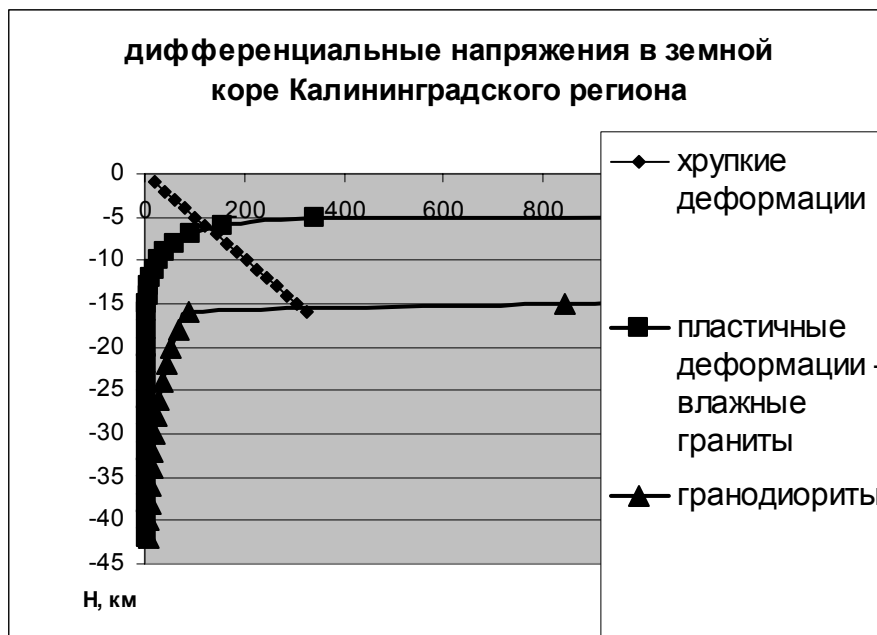


Рис.2.

По данным (Гордиенко, 1993) регион вовлечен в неотектоническую активизацию наряду с другими плитами, расположенными на окраине ВЕП. В результате три миллиона лет назад в пределах Неманской разломной зоны возник молодой источник тепла с неглубокой кровлей и локальная аномалия = 85-90 мВт/м². Кровля источника расположилась на глубине, примерно, 12 км, а его длина составила 400-450 км, захватив Калининградскую зону. Изменение температуры в течение плиоцен–четвертичного этапа развития предопределило возникновение избыточных напряжений на периферии аномалии, которые привели к возникновению землетрясений в Калининградской области. Следует, правда, отметить, что предложенная В.В. Гордиенко модель литосферы в районе Клайпеды не вполне подтверждается последующими сейсмическими исследованиями. Так, согласно (EUROBRIDGE'95 seismic working group, 2001) на профиле, ориентированном по простиранию Неманской зоны, верхняя кромка нижней коры с V_p 6.5 лишь немного перемещается вверх по разрезу с 20 км до 18 км, а не до 12 км, как предполагал В.В. Гордиенко. Напротив, в диапазоне 10 -12 км, как уже указывалось, выделяется слой пониженных скоростей.

На наш взгляд, Клайпедская аномалия может быть смоделирована тектонически обусловленным повышенным до 40 мВт/м² мантийным тепловым потоком, который в фоновом случае составляет только 15 мВт/м². Подобная тепловая модель предложена в (Balling, 1995) для активизированных южных районов Фенноскандии, а также зоны

Торнквиста – области перехода от Восточно-Европейской платформы к Западно-Европейской.

Как показывают полученные результаты, глубина хрупко-пластичного перехода существенно зависит от вещественного состава верхней коры, а также от такого плохо изученного для Фенноскандии параметра, как скорость тектонических деформаций. В случае гранитного состава и повышенной флюидонасыщенности верхней части коры, такое строение, можно предположить на севере Самбийского полуострова, нижняя граница распространения сейсмичности находится на гораздо меньших глубинах, чем в случае гранодиоритовой литологии, которая, вероятно, имеет место в центральной части Калининградского блока. Вследствие неопределенности положения очага землетрясения в плане к настоящему времени его глубину следует принять равной 7–15 км. Тогда аномально большие параметры изосейст Калининградского землетрясения (Никонов, Аптикаев, Алешин и др., 2005) могут быть объяснены не значительной глубиной очага, а тектоникой и плохими инженерно-геологическими условиями Восточно-Балтийского побережья.

Скорость тектонических деформаций обычно увязывают со скоростью усредненных медленных движений в разломных зонах, которая в свою очередь, предопределяется геометрическими размерами зон дислокаций, в частности ее шириной. Если предположить, что ширина разлома 1 км и более, а скорость скольжения (slip rate) 0.3 мм/год, то получим принятое нами в расчете значение 10^{-14} s^{-1} , в случае, если скорость скольжения принять равной 0.03 мм/год, скорость тектонических деформаций, составит 10^{-15} s^{-1} , но при этом граница вязко-пластичного перехода поднимается с 15 до 10 км (Iio Y., Kobayashi Y., 2005). Следует заметить, что по геодезическим данным изучаемый регион опускается со скоростью до -1 мм/год.

Таким образом, настоящими исследованиями установлено, что возникновение Калининградского землетрясения обусловлено флуктуационными мантийными процессами, вызвавшими и вызывающими как повышенное выделение тепла по разломным зонам, так и возникновением вследствие этого дифференциальных напряжений на краях тепловой аномалии. «Сейсмогенная кора» в Калининградском регионе вряд ли распространяется глубже 15 км.

Автор выражает благодарность Ю.К. Щукину и Н.К. Булину за помощь в сборе геофизических материалов по Калининградскому региону.

Литература

- Гордиенко В.В.* Тектоносфера Прибалтики // Геофизический журнал. 1993. Т.15. № 5. С.16-23.
- Сувейдис П. (ред.)* Тектоника Прибалтики. Вильнюс. Моклас.1979. 90 с.
- Гуделис В.К., Емельянов Е.М. (ред.)* Геология Балтийского моря. Вильнюс: Моклас. 1976. 383 с.
- Григалис А.А. (ред.)* Геология и геоморфология Балтийского моря. Сводная объяснительная записка к геологическим картам масштаба 1: 500 000. Л.: Недра.1991. 420 с.
- Загородных В.А., Довбня А.В., Жамойда В.А.* Стратиграфия Калининградского региона. Калининград: 2001. 226 с.
- Никонов А.А., Аптикаев Ф.Ф., Алешин А.С., Ассиновская Б.А., Погребченко В.В.* Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года как модельное для Восточно-Европейской платформы // Сб.трудов. 7-х геофиз. чтений имени В.В. Федынского (3-5 марта 2005. Москва. С.282-289.
- Островский А.А.* Зона древнего рифтообразования под Балтийским морем // ДАН. 1995. Т.342. N 5. С.680-685.

- Смыслов А.А. (ред.)** Глубинное строение и геодинамика литосферы. Л.: Недра. 1983.
- Чекунов А.В., Старостенко В.И., Красовский С.С. и др.** Геотрансект ЕВРО-3 (EU-3) // Геофизический журнал. 1993. Т. 15. № 2. С. 3-31.
- Assinovskaya B.** On the Method of Assessment of seismotectonic Potential // Bolletino di Geofisica, teorica ed applicata. An International Journal of Earth Sciences. 2003. V.44. №. 2. P.87-101.
- Ankudinov S., Sadov A., Brio A.** Crustal structure on the basis of deep seismic sounding data. // Proceeding of Estonian academy of Sciences. 1994. P.129-136.
- Balling N.** Heat flow and thermal structure of the lithosphere across the Baltic Shield and northern Tornquist Zone // Tectonophysics. 1995. V.244. P.13-50.
- Byerlee J.D.** Friction of rocks. Pure and Applied Geophysics. 1978. V.116. P.615-625.
- Ranalli G., Murphy D.** Rheological stratification of the lithosphere. // Tectonophysics.1987. V.132. № 4. P.281-295.
- Carter N.L., Tsenn M.C.** Flow properties of continental lithosphere // Tectonophysics.1987. V.36. P.27-63.
- Chopra P.N. Paterson M.S.** The role of water in the deformation of dunite // JGR. 1984.V.89. P.7861-7876.
- EUROBRIDGE Seismic Working Group** Seismic velocity structure across the Fennoscandia–Sarmatia suture of the East European Craton beneath the EUROBRIDGE profile through Lithuania and Belarus // Tectonophysics. 1999. V.314. P.193–217.
- EUROBRIDGE'95 seismic working group, Yliniemi J., Tiira T., Luosto U. et al.** EUROBRIDGE'95 deep seismic profiling within the East European Craton. // Tectonophysics 2001. V.339. P.153-175.
- Iio Y., Kobayashi Y.** Is the plastic flow uniformly distributed below the seismogenic region? // Tectonophysics. 2003. V.364. P.43-53.
- Kirby S.H. Kronenberg A.K.** Rheology of the lithosphere-selected topics // Reviews of Geophysics. 1987. V.25. P.1219-1244.
- Lund C.E., Grad M., Guterich A.** Seismic structure of the Earth's crust and lower lithosphere beneath the southern part of the Baltic sea // Publ. Inst. Pol. Acad. Sc. 1991. A-19 (236).
- Sibson R.H.** 1974 Frictional constraints on thrust, wrench, and normal faults // Nature. V. V.249. P.542 -544.
- Slagstad T.** Did hot, high heat-producing granites determine the location of the Oslo Rift? //Tectonophysics. 2006. V.412. P.105-119.
- Sroda P., POLONAISE Profile P3 Working Group** P- and S-wave velocity model of the southwestern margin of the Precambrian East European Craton; POLONAISE'97, profile P3 // Tectonophysics. 1999. V.314. P.175–192.
- Vitorello I., Pollack H.** On the variation of the continental heat flow with age and thermal evolution of continents // JGR.1980. V.85. № B2. P.983-995.

ON HEAT ACTIVITY IN THE KALINIGRAD EARTHQUAKE SOURCE ZONE

Assinovskaya B.A.

Summary

The crust thermophysical and geological characteristics of the 2004 Kalinigrad earthquake source area were obtained and described in this paper. The modeling revealed that earthquake occurrences, caused by local core differential stresses, arise due to regional mantle fluctuations and heightened heat release within the fault structures. It was determined that the Kaliningrad seismogenic zone is unlikely to extend deeper than 15 km.

ОБ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Горшков В.Л.

В работе рассмотрен возможный механизм низкочастотной амплитудной модуляции чандлеровского движения полюса (ЧДП) и синхронных колебаний скорости вращения Земли. В случае переменного трения между литосферой и мантией, возбуждающие ЧДП факторы будут воздействовать на тело с соответствующим образом меняющимися моментами инерции. При слабом трении возбуждающие факторы будут действовать в большей степени на внешний слой с меньшим моментом инерции, при «жестком» сцеплении – на всю Землю, т.е. будет иметь место стандартно рассчитываемая ситуация. В случае такой переменности моментов инерции, наблюдаемое на поверхности чандлеровское колебание полюса и скорость вращения Земли будут испытывать соответствующие вариации амплитуды. В рамках этой модели анализируются данные международной службы вращения Земли.

Введение

Механизм возбуждения чандлеровского колебания полюса Земли (свободной нутации) остается одним из наиболее дискутируемых в геодинамических исследованиях. Продолжается как поиск других геофизических источников его возбуждения помимо метеорологического (Dumberry, Vloxham, 2002; Спиридонов, Акименко, 2003), так и разработка моделей, в которых чандлеровское движение полюса (ЧДП) рассматривается, фактически, как вынужденная нутация (Авсюк, 1996; Курбасова, Рыхлова, 2001; Акуленко и др., 2002). В целом, на основании анализа многих геофизических данных, собранных и проанализированных за последние десятилетия (Gross et al., 2003; Liao et al., 2003), можно считать, что основными факторами, поддерживающими ЧДП, являются атмосферный (ААМ), океанический (ОАМ) и гидрологический (НАМ) угловые моменты.

Заметим, что в большинстве геофизических моделей возбуждения свободной нутации не находят объяснения факт значительной переменности амплитуды ЧДП и изменения его фазы в 20-х годах прошлого столетия. По-видимому, должны существовать механизмы, модулирующие соответствующую динамику ЧДП. В работах (Воротков, Горшков, 2002; Горшков, Воротков, 2004) исследована модель возбуждения свободной нутации за счет нелинейного трения между внутренними слоями Земли. Это же переменное трение также может приводить к наблюдаемой картине изменения амплитуды ЧДП, что и является предметом настоящего исследования.

Геофизические предпосылки механизма амплитудной модуляции ЧДП

Для предлагаемого механизма существенно наличие взаимной подвижности слоев в недрах Земли с внутренним трением (динамической вязкостью η) между ними, которое может изменяться за характерное время порядка десятка и более лет. Наиболее подходящие для этого условия имеют место на границе литосферы и верхней мантии или астеносферы. Литосфера и астеносфера различаются состоянием вещества в них, т.е. это различие реологическое - астеносфера пластична по сравнению с хрупкой литосферой, представленной многочисленными плитами разных размеров, иногда расположенных одна под другой с флюидной «смазкой» между ними.

В активно развиваемой сейчас на основе последних геофизических данных флюидной геодинатике (Павленкова, 2004), характеризуемой переходом к геофизике много-

фазных сред и термодинамике неравновесных систем, все верхние слои Земли оказываются реологически расслоенными. Для них характерны обширные по площади слои толщиной $10 \div 30$ км с пониженными скоростями распространения сейсмических волн и с повышенной электропроводностью. Разрабатываемая во флюидной геодинамике модель представляет верхнюю оболочку Земли ($\sim 100 - 200$ км) как серию жестких пластин, разделенных ослабленными слоями. Горизонтальные движения представимы в виде относительных подвижек этих пластин и течения вещества между ними по ослабленным зонам. Процесс просачивания флюидного материала идет в основном вдоль плоскостей этих пластин и на порядок превосходит его перенос по вертикальным зонам трещиноватости.

На наш взгляд это может объяснять различие «вертикальной» вязкости, определяемой по послеледниковому «всплытию», и «горизонтальной», ответственной за дрейф плит. При этом, ввиду постоянных горизонтальных взаимных движений этих пластин, локальные потоки эндогенного тепла также могут меняться и, следовательно, менять свойства «смазочного» материала, т.е. его вязкость. Возникающие при взаимных движениях этих пластин вязкие течения как раз и являются термически активируемым процессом с коэффициентом вязкости $\eta \sim \exp(-E_a/kT)$, где k – постоянная Больцмана, E_a – энергия активации, T – абсолютная температура.

Могут быть и другие причины регионального характера (океаническая или континентальная принадлежность, наличие поднятий, тектонических зон и т.д.), ответственные за региональный характер распределения вязкости.

Глубинный профиль основных реологических параметров по современным оценкам (Mogency, Doin, 2004) показывает на глубинах около 100 км минимум эффективной вязкости ($\eta \approx (0.5 \div 1) \times 10^{19}$ пуаз (дин·с/см²)) и жесткость $\mu \approx (0.3 \div 1) \times 10^{12}$ дин/см². Вторичный минимум вязкости ($\eta \approx 10^{20}$ пуаз) наблюдается на глубинах около 50 км. Несмотря на некоторую условность глобальной оценки (тем более в рамках флюидной геодинамики), по этим данным можно оценить предельные значения времени релаксации $\tau = \eta / \mu$. В рассматриваемых слоях 50 и 100 км значения времени релаксации находятся в пределах $1 < \tau < 20$ лет. Таким образом в этих зонах возможны достаточно быстрые изменения агрегатного состояния вещества, сопоставимые с характерным временем амплитудной модуляции ЧДП.

Амплитудно-фазовые вариации ЧДП

Для исследования использовались наиболее продолжительные данные международной службы вращения Земли EOP(IERS)C01 (1846-2005 гг.) и ряд эксцесса продолжительности суток (LOD) LUNAR97 (1832-1997 гг.) (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>). Более надежные данные о движении полюса начинаются с момента образования международной службы широты в 1896 году, когда за счет равномерного распределения станций по долготе ошибки обеих координат полюса (X,Y) стали меньше $\pm 0.05''$. Ряд среднегодовых значений LOD до формирования в 1956 году службы атомного времени основан на наблюдениях покрытий звезд Луной и имеет в конце XIX века ошибки более ± 0.4 мсек, а в конце XX века уже менее ± 0.03 мсек.

Для исследования необходимы выделенные из общего движения полюса основные его моды – чандлеровское и годичное колебания полюса. Ранее нами (Воротков и др., 2002) были продемонстрированы возможности сингулярного спектрального анализа (SSA) (Данилов, Жиглявский, 1997) для выполнения декомпозиции этих рядов, имеющих ярко выраженную нестационарную природу. Среди первых по вкладу, помимо годичной составляющей, присутствуют две близкие по периоду к ЧДП составляющие – основная ($T = 1.191$ года) и «слабая» ($T = 1.11 - 1.28$ года).

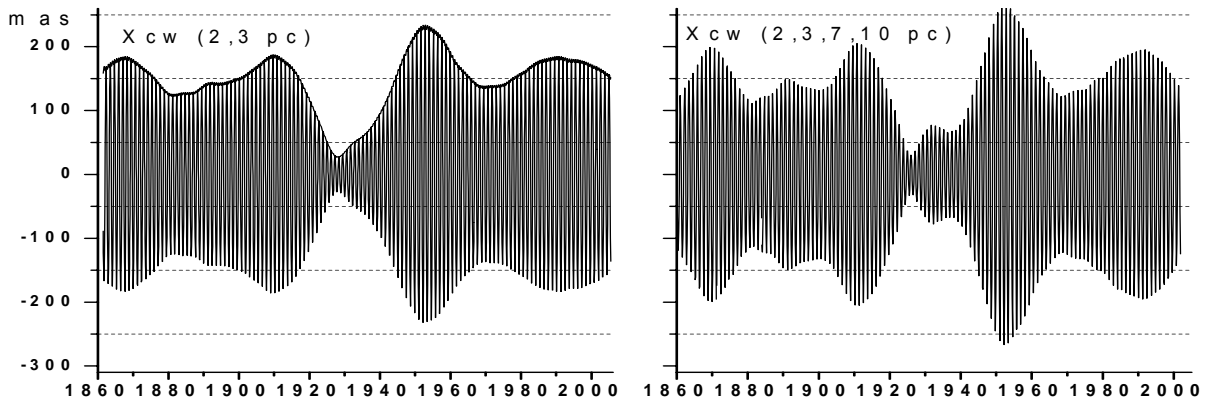


Рис. 1.

На **рис.1** представлено восстановленное с помощью SSA чандлеровское движение полюса только по координате **X**, слева по основной составляющей (2 и 3 главные компоненты разложения), справа по обеим (2, 3, 7 и 10 компоненты). Слабый компонент можно интерпретировать как воздействие некоторого зашумляющего (модулирующего) процесса, приводящего к уширению спектральной линии на частоте ЧДП, хотя это и не единственно возможная интерпретация (Манк, Макдональд, 1964). Так в работе (Vondrak, 1989) исследуется модель с переменной частотой свободной нутации, возникающей из-за слабой нелинейности отклика океана на изменение оси вращения внутри тела Земли. В работе (Воротков, Горшков, 2002) предложена модель дополнительного (к атмосферно-океаническому) возбуждения свободной нутации за счет нелинейного трения между внутренними слоями Земли. Это переменное, например, из-за вышеупомянутых эндогенных процессов, трение также может приводить к наблюдаемой картине изменения амплитуды ЧДП.

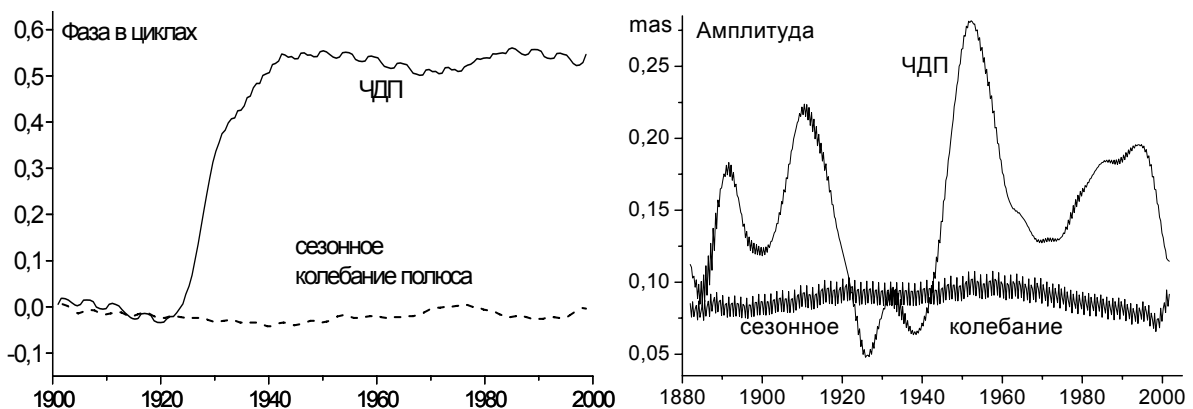


Рис. 2.

Проведенное разделение компонент позволило определить амплитудные и фазовые вариации чандлеровской и годичной составляющих движения полюса Земли, представленные на **рис. 2**. Видно, что свободные колебания испытывают сильные возмущения как тормозящего, так и разгоняющего свойства. Потеря фазы ЧДП на полпериода в 1920-х годах связана с почти полным затуханием этого колебания – за десять с небольшим лет амплитуда упала почти на 200 mas. Примерно за такое же время этот «маятник» был раскачан до еще больших амплитуд – в 1950-х годах амплитуда возросла более чем на 200 mas. При этом годичная составляющая движения полюса не претерпела за это время серьезных изменений ни фазы, ни амплитуды, как видно из того же **рис.2**.

Известно, что годовая составляющая движения полюса определяется, в основном, возбуждающим действием атмосферного, океанического и гидрологического угловых моментов. Некоторые вариации их годовичного периода, приводящие к уширению спектральной линии годичной составляющей возбуждающих движение полюса угловых моментов, оказываются почти достаточными для возбуждения близкой по частоте свободной нутации. Однако глобальные оценки этих угловых моментов имеются только с 1948 года и не покрывают вышеописанный критичный для верификации моделей интервал времени. На основании более продолжительных, но не глобальных, данных из метеорологического центра Хэдли (Великобритания) был промоделирован в прошлое ряд ААМ. На **рис. 3** из работы (Rosen, Salstein, 2000) приведены «реставрированные» до 1920 года данные ААМ с помощью разных моделей (широкая полоса на рисунке представляет размах этих моделей). Данные масштабированы в единицах 10^{25} кг·м²/с.

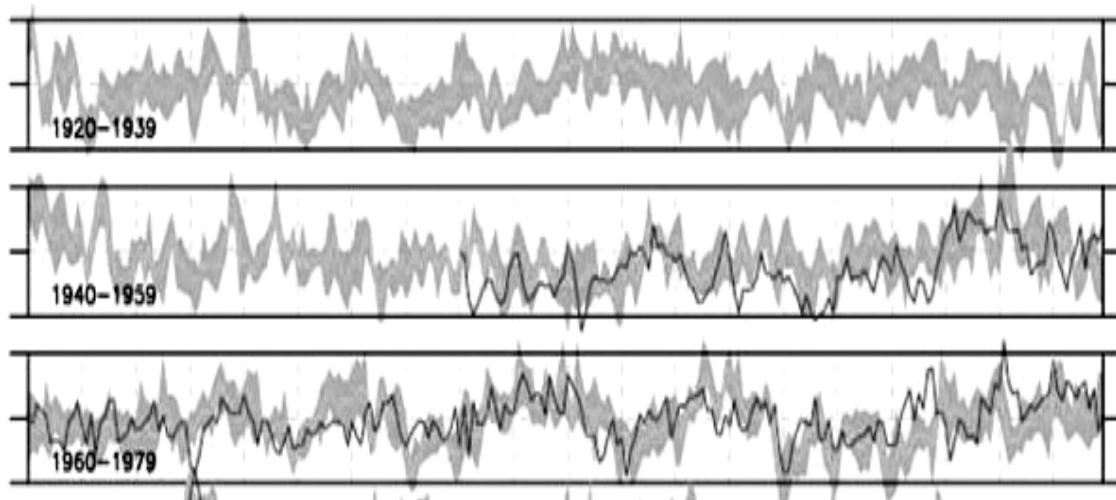


Рис. 3.

Видно, во-первых, значительное расхождение модельных рядов (жирной линией, начиная с 1948 года, представлены результаты глобальной переработки метеорологических данных в проекте «NCEP/NCAR reanalysis»). Во-вторых, и это главное для нашего рассмотрения, заметно отсутствие в 1920-х годах какой-либо особенности в поведении ААМ, которая могла бы объяснить соответствующую реакцию ЧДП. Заметим, что данные об ОАМ, вычисляемые на основе данных о глобальных океанических течениях и придонном давлении, могли бы оказать более существенное влияние на поведение ЧДП ввиду того, что по текущим оценкам их относительное влияние на возбуждение колебаний полюса больше чем влияние ААМ. Однако эти данные в настоящее время доступны в прошлое только до 1970 года (Ponte, Stammer, 1999) и вряд ли могут быть продолжены в еще более раннее время с приемлемой точностью.

Связь амплитудных вариаций ЧДП и вариаций продолжительности суток

Нетрудно рассчитать затраты на вышеупомянутые затухание и последующее возбуждение ЧДП в первой половине XX века. Кинетическая энергия (при постоянстве энергии упругих деформаций) пропорциональна квадрату амплитуды колебания (Lambek, 1980):

$$E \approx 0.5A\Omega^2(X^2+Y^2)(C-A)/C, \quad (1)$$

где X и Y - координаты полюса в радианах за вычетом движения среднего полюса, $C = 8.0365 \times 10^{37}$ и $A = 8.0101 \times 10^{37}$ кг·м² – осевой и экваториальный моменты инерции

Земли, $\Omega = 7.292115 \times 10^{-5}$ радиан/сек – средняя угловая скорость вращения Земли. Из данных о вариациях амплитуды ЧДП в XX веке следует:

$$(X^2+Y^2)_{1910,1950}/(X^2+Y^2)_{1920-1930} \approx 20 \div 28. \quad (2)$$

Таким образом, энергия чандлеровского колебания полюса Земли изменялась в этот период более чем в 20 раз.

Естественно задаться вопросом – на что была затрачена эта энергия при торможении и откуда взята при очередном разгоне ЧДП? Стандартный ответ, в рамках геофизического (ААМ + ОАМ + НАМ), в основном сезонного (т.е. годового), возбуждения колебания полюса, должен предполагать значительные и продолжительные вариации частоты (ω) и/или амплитуды (a) возбуждающего колебания ввиду пропорциональности амплитуды возбуждаемого колебания (на частоте ЧДП ω_{cw}) величине $a \cdot e^{i\omega t} \cdot \omega_{cw} / (\omega - \omega_{cw})$ (Lambeck, 1980). Так при наблюдаемом увеличении амплитуды ЧДП должно также наблюдаться и стремление частоты возбуждающего колебания ω к резонансной частоте $\omega_{cw} = 0.84$ и/или существенное увеличение его амплитуды a , а при уменьшении – наоборот. Однако столь продолжительных и заметных вариаций атмосферных параметров согласно **рис.3** не наблюдалось и, с точки зрения геофизических причин возбуждения, можно рассчитывать только на отсутствующие данные ОАМ.

Однако согласно (1) можно предложить и иную интерпретацию вариаций энергии – изменяться могли также и моменты инерции. Примечательно, что приблизительно такое же, как в (2), соотношение имеет место между моментами инерции литосферы и всей Земли. Согласно оценкам, приведенным в (Артюшков, 1979), мощность континентальной литосферы $d \approx 80 \div 100$ км, а океанической $d \approx 50 \div 70$ км. Поскольку ошибки этих величин составляют 20-25 км, то можно положить в среднем для всей литосферы $d \approx 70$ км. Тогда, не прибегая к интегрированию по сфере, используя среднюю плотность литосферы $\rho \approx 3$ г/см³ и полагая одинаковым динамическое сжатие литосферы и мантии ($H_L \approx H = (C - A)/C$), получим приближенную оценку для момента инерции литосферы $C_L \approx (8/3) \pi R^4 \rho d = 2.94 \times 10^{36}$ кг·м². Сравнивая ее с главными моментами инерции всей Земли, получим $C/C_L \approx A/A_L \approx 27$. В некоторых работах мощность литосферы оценивается в 100 – 120 км, и тогда $C/C_L \approx A/A_L \approx 17$. Таким образом:

$$C/C_L \approx A/A_L \approx 17 \div 27. \quad (3)$$

Принятые допущения не меняют широкий диапазон полученного соотношения, замечательно совпадающего с вариациями энергии колебания полюса по (2).

Следовательно, можно предположить, что в 1910-х годах по каким-то причинам произошло более жесткое сцепление литосферы с верхней мантией, которое потом сильно уменьшилось и к 1960 году вышло на среднее состояние. Тогда, согласно (1), энергия, затрачиваемая геофизическими угловыми моментами на возбуждение ЧДП, может оставаться практически постоянной, будучи, условно говоря, приложена либо ко всей Земле, как, например, в интервале 1910 – 1930 годов, либо только к ее верхнему наиболее жесткому слою (литосфере) в зависимости от внутреннего трения между слоями Земли. Разумеется, таких экстремальных значений вязкости не может быть обеспечено состоянием вещества в глобальном масштабе в зоне между литосферой и мантией. Однако региональные проявления процесса взаимных движений между этими слоями Земли, очевидным образом отражающиеся в сейсмичности Земли (накопления и сброса напряжений), вполне могут приводить к изменению соотношения моментов инерции в приведенном в (3) интервале.

Это предположение должно касаться также и аксиальной составляющей вектора вращения Земли. На **рис. 4**, приведены декадные вариации LOD, обычно объясняемые

взаимодействием мантии и ядра, в сопоставлении с амплитудными вариациями ЧДП из **рис. 2**. Очевидна синфазность графиков в интервале 1908-1942 гг., т.е. увеличению скорости вращения Земли (уменьшение LOD) соответствовало уменьшение амплитуды колебания полюса и наоборот. В остальное время графики этих процессов приблизительно противофазны.

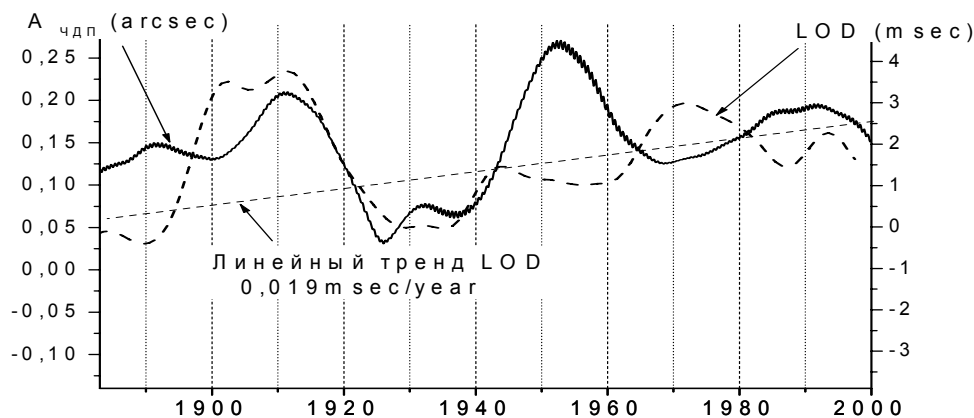


Рис. 4

В принятой сейчас концепции тектоники литосферных плит предполагается наличие взаимного вращения литосферы относительно астеносферы (Bostrom, 1971). При этом литосфера как бы отстаёт во вращении от астеносферы, то есть смещается к западу по разным оценкам от 5 до 20 см в год на экваторе (Smith, Lewis, 1998). Взяв среднее из этих оценок и переведем их в угловую меру получим, что **мантии вращается быстрее литосферы в среднем на 0.28 msec/год**. Ввиду западного дрейфа внешней оболочки Земли увеличение её трения с более быстро вращающейся и значительно более массивной мантией (более чем в сто раз) должно приводить к наблюдаемому на поверхности увеличению скорости вращения Земли.

Из **рис. 4** видно, что с 1912 по 1929 год **наблюдаемое на поверхности ускорение вращения Земли** (по нашему предположению, за счет увеличения сцепления с мантией) **оказалось равным 0.26 msec/год**. Если учесть что вышеупомянутая оценка дрейфа относится к экваториальной части Земли и теоретически должна исчезать в полярных областях, то совпадение соответствующих оценок удивительное. Уменьшение трения в зонах раздела этих слоев постепенно возвратило процесс вращения к доминированию диссипативных процессов во вращении Земли, т.е. к вековому замедлению вращения Земли на 2 msec в столетие, отмеченному на **рис. 4** пунктирной линией.

Понятно, что это идеализированная схема, в которой не учтены сопутствующие процессы и обратные связи. В частности, более жесткое сцепление верхних слоев должно приводить к незначительному торможению вращения самой мантии (в обратном отношении моментов инерции (3) мантии и литосферы), что в среднем, как фоновый процесс, и происходило во второй половине XX века и до 1910 года, как это видно из **рис. 4**.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что данные о вариациях амплитуды чандлеровского колебания полюса в начале XX века и синхронные с ними вариации скорости вращения Земли находятся в хорошем согласии с гипотезой о переменном внутреннем трении между мантией и литосферой с характерным временем порядка 10 и более лет. Причиной переменности этого трения может быть изменение вязкости в широкой зоне сопряжения этих слоев, возникающее из-за переменности потока эндогенного тепла.

Литература

Авсюк Ю.Н., Приливные силы и природные процессы, М., 1996, ОИФЗ РАН.

- Акуленко Л.Д., Кумакиев С.А., Марков Ю.Г., Рыхлова Л.В., 2002, Прогноз движения полюса деформируемой Земли, АЖ, т.79, № 10, с.952-960.*
- Артюшков Е.В., 1979, Геодинамика, М., Наука, 328 с.*
- Спиридонов Е.А., Акименко Я.В., 2003, Чандлеровское качание полюса, инициированное движением внутреннего ядра Земли, Физика Земли, № 11, с.74-78.*
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.), 1997, Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница», СПбГУ, с.308.*
- Воротков М.В., Горшков В.Л., 2002, Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли, Изв. ГАО, №216, с.415-425.*
- Воротков М.В., Горшков В., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я., 2002, Исследование основных составляющих в движении полюса Земли, Изв. ГАО РАН. № 216, с.406-414.*
- Горшков В.Л., Воротков М.В., 2004, Динамика движения полюса и сейсмический процесс, Изв. ГАО РАН. № 217, с.379-387.*
- Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., 2001, АЖ, Свободные колебания полюса Земли в системе Земля-Луна, т.78, №11, с.1049-1056.*
- Манк У., Макдональд Г., 1964, Вращение Земли, Мир, М., 385 с.*
- Павленкова Н.И., 2004, Эмпирические основы ротационно-флюидной гипотезы глобального тектоногенеза, Геофиз. Журнал, т.26, №6, с.41-60.*
- Bostrom R., 1971, Westward displacement of the lithosphere, Nature, v.234, p.536-538.*
- Dumberry M., Bloxham J., 2002, Inner core tilt and polar motion, Geophys. J. Int., V.151, p.377-392.*
- Gross R., Fukumori I., Menemenlis D., 2003, Atmospheric and Oceanic Excitation of the Earth's Wobbles during 1980-2000, J. Geophys. Res., 108(B8), 2370, doi: 10.1029/2002JB002143.*
- Lambeck K., 1980, The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences, Cambridge Univ. Press, NY, 450 p.*
- Liao Dechun, Liao Xinhao, Zhou Yonghong, 2003, Oceanic and atmospheric excitation of the Chandler wobble, Geophys. J. Int, V.152, p.215-227.*
- Morency C., Doin M.-P., 2004, Numerical simulations of the mantle lithosphere delamination, J. Geophys. Res., Vol. 109, B03410, doi:10.1029/ 2003JB002414.*
- Ponte R., D. Stammer, 1999, Role of ocean currents and bottom pressure variability on seasonal polar motion, J. Geophys. Res., 104, № C10, 23,393 – 23,409.*
- Rosen R., D. Salstein, 2000, Multidecadal signals in the interannual variability of atmospheric angular momentum., Climate Dynamics, 16, 693-700.*
- Smith A., Lewis C., 1998, Differential rotation of lithosphere and mantle and the driving forces of plate tectonics, J. Geodynamics, 28, 97-116.*
- Vondrak J., 1989, Prediction of polar motion from air and water excitations, Rep. № 402, Dep. of Geodetic Science and Surveying the Ohio State Univ., p.60.*

ON THE AMPLITUDE MODULATION OF THE CHANDLER WOBBLE

Gorshkov V.L.

Summary

A possible mechanism of the low-frequency amplitude modulation of Chandler Wobble (CW) and synchronous length of day (LOD) variations was studied. If the variable friction acts between the mantle and the lithosphere of the Earth, CW and LOD excitation factors act on the body with the corresponding variable moments of inertia. When friction is weak excitation factors act only on outer layer with smaller moments of inertia and when there is mantle and lithosphere coupling, common excitation is used. If such variability of the moments of inertia takes place, the observed CW and LOD will have corresponding amplitude variations. This model was tested by IERS data.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ ВАЛААМ

Карпинский В.В.¹, Ассиновская Б.А.², Горшков В.Л.², Иванов В.Ю.³

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

³Метеостанция «Валаам» Карельского УГМС

Приведено описание, задачи и первые результаты мониторинга с помощью стационарной сейсмической станции, установленной силами Геофизической службы РАН и Главной астрономической обсерваторией РАН на острове Валаам. Приведены также результаты координатных GPS наблюдений, проводившихся параллельно с установкой станции.

19 июня 2006 года в истории изучения сейсмичности северо-запада России произошло знаменательное событие. В центральной части Ладожского озера на Валаамском архипелаге силами Геофизической службы РАН и Главной астрономической обсерватории РАН начаты стационарные сейсмические наблюдения регионального типа. Их настоятельная необходимость была обоснована нами еще 10 десять лет назад (Ассиновская, Никонов, 1998), однако планы оказались неосуществимыми вследствие известных финансовых проблем.

Интересно, что 90 лет тому назад в данном месте станция уже существовала. Первые наблюдения над сейсмическими явлениями и микроколебаниями атмосферного давления были начаты в 1916 году по указанию Б.Б. Голицына после докладов из Валаамского монастыря о многократно повторяющихся гулах и сотрясениях в Ладожском озере (Новожилова, Ассиновская, 2002). Ввиду возникших технических сложностей и последующих социальных потрясений того времени сейсмическая станция просуществовала не более полугода. Материалы ее регистрации не сохранились.



Рис. 1.

Стационарные сейсмические наблюдения 2006 года организованы в крайней юго-западной точке о. Валаам на мысу на территории одноименной метеостанции. Цифровая сейсмическая станция установлена в подземном бетонном бункере, сохранившемся со времен советско-финской войны, на специальном устроенном бетонном постаменте, жестко связанном с коренными кристаллическими породами (**рис.1**). Сейсмическая аппаратура позволяет осуществлять производство сейсмических наблюдений в широком диапазоне частот с возможностью подключения различных типов сейсмических датчиков. Сбор информации ведется в одном частотном диапазоне с программно задаваемыми коэффициентами усиления. Регистрация информации производится в непрерывном режиме. Станция состоит из блока сбора и выделения сейсмического сигнала DASS, системы точного времени и комплекта короткопериодных сейсмометров Teledyne Geotech GS-13. Динамический диапазон информационных каналов 96 ДБ (16 разрядов АЦП). Рабочий частотный диапазон при частоте квантования 50 отсчетов за секунду составляет 1-20 Гц.

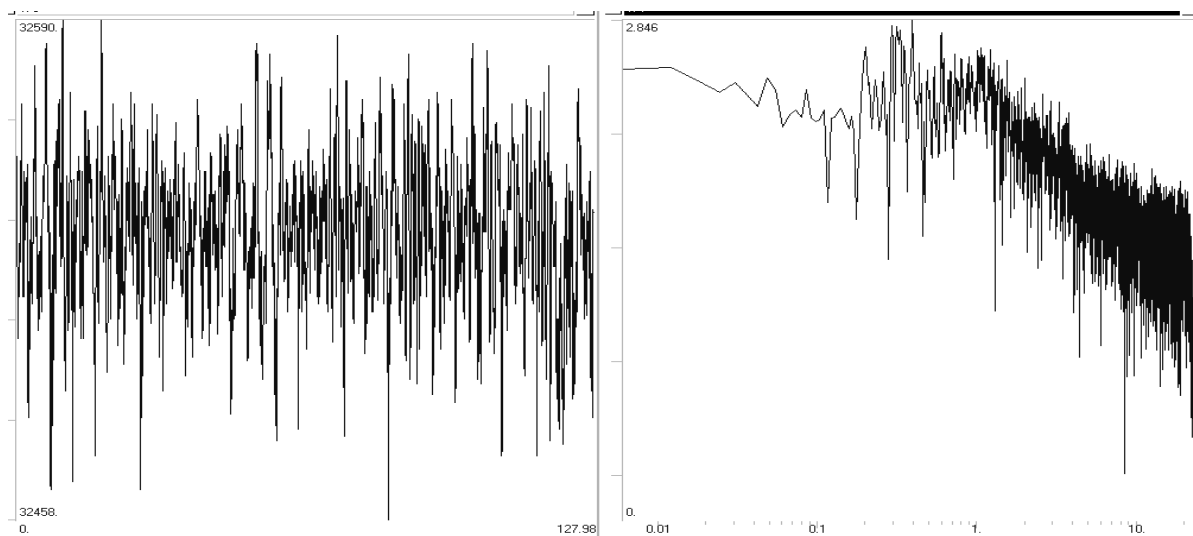


Рис.2.

На **рис.2** показаны пример записи фона, а также его амплитудный спектр. Видно, что максимум спектра фоновых колебаний расположен в интервале частот 0.01 -1 Гц, далее амплитудный уровень вероятных помех резко уменьшается. Рабочий диапазон записи 1-10 Гц.

Основной задачей сейсмической станции Валаам является регистрация сейсмических событий местного и регионального характера с удалений до 100 - 500 км в интервале магнитуд 1 - 4. С тектонической точки зрения, станция расположена в пределах региональной Ладожско-Ботнической геологической структуры, некоторые участки которой проявляют сейсмическую активность на современном этапе (Ассиновская, Новожилова, 2002). Будущие материалы регистрации станции должны подтвердить потенциальную сейсмогенность данной зоны разломов, а также некоторых других тектонических структур Карельского перешейка. В фундаментальном плане результаты наблюдений помогут установить или опровергнуть сейсмическую природу Ладожских звуковых явлений – «барантид». С целью решения последней задачи, кроме инструментальных, на острове организован систематический сбор макросейсмической информации (степень ощутимости событий по макросейсмической шкале МСК-64).

Интересно, что во время проведения экспедиционных работ 19 июня 2006 года зарегистрирован ряд сейсмических событий, ощущавшихся в районе метеостанции силой до 3-х баллов. Все наблюдатели, находившиеся на метеостанции, слышали низкие

раскатистые звуки, ощущали сотрясения деревянного строения, звон и дрожание стекол, вибрацию дверей и т.д. Направление прихода звуковой волны определялось как запад-юго-западное. Сам толчок был как бы «из-под земли». Природа событий, скорее всего, техногенная. Запись самого сильного события приводится на **рис. 3**.

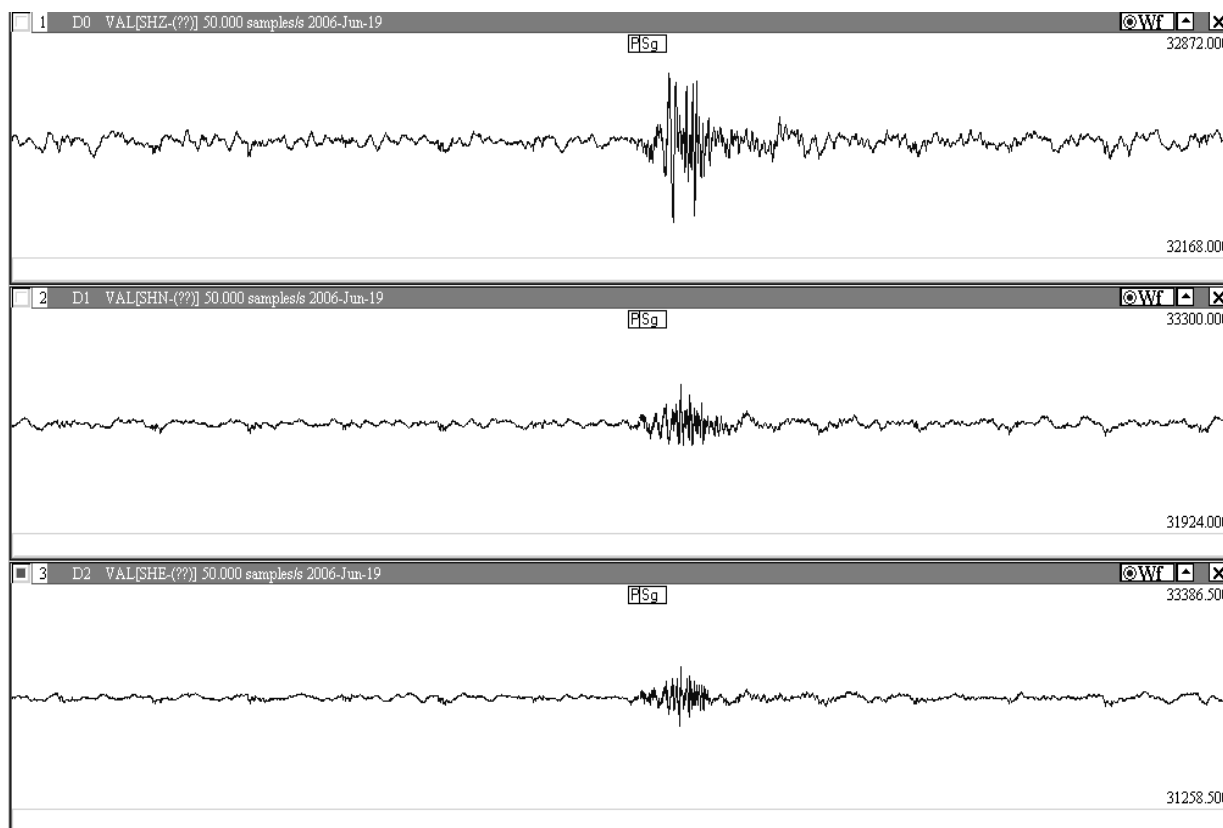


Рис.3.

В материалах наблюдений метеостанции Валаам был обнаружен целый ряд подобных ощутимых событий, имевших место в предыдущие годы. Кроме того, со слов С.А.Недошивина 2 августа 2005 года во многих точках Валаамского архипелага синхронно возникли деформации горных пород в виде обвалов и выколов. Интересно также, что 2004 и 2005 годы характеризовались близкими к максимальным амплитудам знакопеременных колебаний уровня воды в Ладожском озере за весь период наблюдений.

В будущем с помощью установленной аппаратуры возможно изучение тонкой структуры микроимпульсов и сейсмоакустических шумов, выявление влияния земных приливов изменений атмосферного давления и ветра, исследование характера реакции сейсмоакустического поля на инициирующие процессы, т.е. оценка степени и ритма внешней синхронизации и хаотизации в зависимости от интенсивности и режима инициирующего и частоты инициируемого процессов, разработка методов оценки степени неустойчивости динамических процессов, протекающих в геофизической среде. Кроме того, Валаам, в силу особенностей своей геофизической среды является естественным полигоном для изучения взаимосвязанных электромагнитных и акустических явлений в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

Одновременно с установкой сейсмической станции в течение 17-19 июня 2006 года на территории метеостанции производились GPS-ГЛОНАСС наблюдения с помощью приемника JAVAD с антенной MARANT, любезно предоставленные нам сотрудниками АИ СПбГУ. Антенна была закреплена на фундаментальном столбе, установленном на

скальном основании в 100 метрах от сеймостанции. Соответствующие координатные измерения ежегодно в летний сезон в течение 3-4 дней производятся на этой точке с 1999 года силами лаборатории спутниковой геодезии (http://www.ifz.ru/div_6_ru.html) ИФЗ РАН для изучения движений глобальных тектонических плит и внутриплитовых деформаций в северо-западном регионе России. На основе их измерений станция Валаам (VALM), как и другие станции от Кольского п-ва до южного берега Финского залива, имеют в системе ITRF2000 среднегодовое движение около 3 см в направлении ВСВ.

Для вышеописанных целей региональной геодинамики необходимы синхронные координатные измерения территориально более плотно расположенных пунктов (до 100 км) с последующей их обработкой в дифференциальном режиме с выбранной опорной станцией. При этом для воспроизводимости установки антенн на выбранных точках должны быть заложены полноценные марки. В этом случае возможно достижение максимальной точности ($\pm 2-4$ мм) взаимных подвижек пунктов и, следовательно, внутриплитовых деформаций.

Наши измерения при обработке в режиме PPP (точное определение координат станции) дали по суточным измерениям для координат пункта X,Y точность ± 8 мм, а по координате Z ± 13 мм. Среднесуточные расстояния до GPS антенны в Пулковке (база 179,5 км) за эти трое суток имело размах 2.4 мм, что позволяет надеяться при более продолжительных сессиях получать с достаточной точностью оценки региональных подвижек в указанных выше пределах. Это, совместно с вышеописанными возможностями сейсмической аппаратуры, позволяет комплексно решать широкий круг геодинамических задач, в частности, значительно расширяет прогностические возможности данного геодинамического пункта.

Литература

Ассиновская Б.А., Никонов А.А. 1998, Загадочные явления на Ладожском озере, Природа, № 5, с. 49-52.

Ассиновская Б.А., Новожилова Т.В., 2002, К вопросу о степени сейсмической опасности Санкт-Петербургского региона, Изв. ГАО РАН, №. 216, с. 394-401.

Новожилова Т.В., Ассиновская Б.А. 2002, Новые данные из архивов Б.Б. Голицына, Изв. ГАО РАН, №. 216, с. 609-618.

VALAAM SEISMIC STATION

Karpinsky V.¹, Assinovskaya B.², Gorshkov V.², Ivanov V.³

¹*SPb State University,*

²*Pulkovo Observatory,*

³*Meteostation «Valaam» of the Karelian hydrometeorological office*

Summary

The description, the tasks and the first results of seismological monitoring by permanent seismic station are given. This station was organized on the Valaam Island by efforts of the Geophysical service of RAS and the Main astronomical observatory of RAS. The GPS coordinate measuring was made when the observatory was mounted and the results of these measurements are also presented.

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ О МЕТКАХ ВЫСОТ НАВОДНЕНИЙ НЕВЫ В НЕВСКИХ ВОРОТАХ ПЕТРОПАВЛОВСКОЙ КРЕПОСТИ

Малова Т.И.

С 2002 г. геодинимическая экспедиция ГАО РАН неоднократно обследовала метки катастрофических и сильных наводнений Невы 1777-1975 гг. в Невских воротах Петропавловской крепости. Эти обследования сопровождались планомерными архивными, фондовыми и библиотечными поисками новых сведений о них. На протяжении XVIII-XX вв. метки наводнений служили наглядной эталонной шкалой в научных и прикладных исследованиях, а также гидрографическими и геодезическими реперами (знаками) и широко использовались в просветительских целях. Неизменность их высотного положения контролировалась в разное время организациями Академии наук, Военно-морского ведомства, Гидрометеорологической и Геодезической служб России. Ниже изложены основные итоги исследований автора по этой тематике, выполнявшихся в рамках плановых и договорных НИР ГАО РАН.

Закрепление экстремальных, средних или даже ежедневных уровней рек, озер и морей практиковалось во многих странах, например в Египте, с незапамятных времен. В России, в частности, известно распоряжение Петра I «о метках высокой воды в Макарьеве на Волге» [26]. Однако в завершенном виде идея закрепления высот примечательных наводнений сформировалась, по-видимому, позднее, после ознакомления с аналогичным опытом в Голландии и со шведским опытом закрепления ординарных уровней в Балтийском море. На Рис. 1-3 сопоставлены репродукции фотографий камней с метками наводнений в Нидерландах (*flood stones*), установленных в стене дома в Виллемштадте [32, р. 218], и памятных дощечек в Санкт-Петербурге, установленных в Невских воротах Петропавловской крепости.



Рис. 1. Метки высот наводнений в Виллемштадте (Нидерланды), 1775-1953 гг., по J. Van Veen'y [32, с. 218].



Рис. 2. Метки высот наводнений в Невских воротах, 1777-1975 гг. Фото С.Д. Гордина, рекогносцировка ГАО РАН, 2003 г.



Рис. 3. Метки наводнений в Невских воротах, по состоянию на 12 / IX - 2006 г. Фото В.И. Богданова.

Однако, реализации идеи сохранения для последующих поколений меток высот наводнений в этих странах свойственны существенные различия. Так, феномен веково-

го понижения уровня земной поверхности в Нидерландах издавна диктовал необходимость надежного закрепления меток путем установки в стенах домов специальных камней, тогда как в Санкт-Петербурге, особенно с XIX в., на кирпичной стене крепились каменные или металлические дощечки (таблички), которые, как это было продемонстрировано позднее, легко было снять, что-то изменить под влиянием различных обстоятельств, и поставить на то же или новое место, зачастую, без участия в этих работах специалистов, в том числе и геодезистов. Так, 12 сентября 2006 г. было зафиксировано, что в результате ремонтных работ в Невских воротах полностью заштукатурены стена и существовавшая ранее дверь, заложенная кирпичом, с еще одним, неизвестным камнем; изменена форма арки с метками наводнений XVIII в.; сняты для реставрации все дощечки с метками наводнений XIX-XX вв. (Рис. 3).

На фронте Невских ворот Петропавловской крепости указан год их постройки – 1782. Однако Д. О. Святский отметил [25, с. 222], что внутренняя их часть была построена еще в 1734 г., и что при входе в них, на SW стене, ниже самой верхней таблички с меткой наводнения 1824 г., «видна небольшая арка – след бывшей двери, заделанной кирпичом, со вставленным в нее белым четырехугольным камнем», под которым «видна еще одна метка, не описанная в литературе, сделанная на сером камне прихотливой вязью». На Рис. 4, 5 приведены схема и кроки расположения в Невских воротах табличек (досок, дощечек, камней) с метками наводнений, по состоянию на 1924, 1986 и 2003 гг., а в Таблице 1 сопоставлены превышения между метками за период 1924-2006 гг.

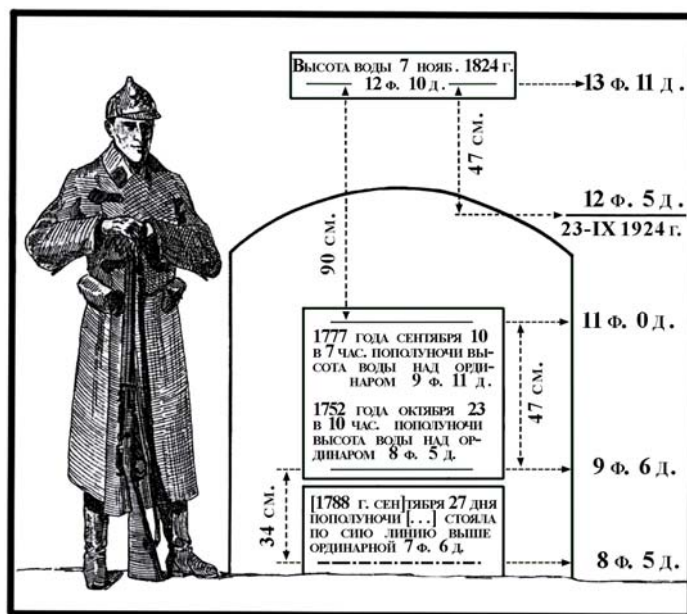


Рис. 4. Схематический рисунок (автор – Д.О. Мохнач, 1924 г.) расположения табличек с метками высот наводнений 1752, 1777, 1788, 1824 и 1924 гг. в Невских воротах, с указанием измененных между ними превышений и высот, редуцированных к исходному уровню нивелирования 1890-1891 гг. Е.А. Гейнца [8, с. 53], по Д.О. Святскому [25, с. 221].

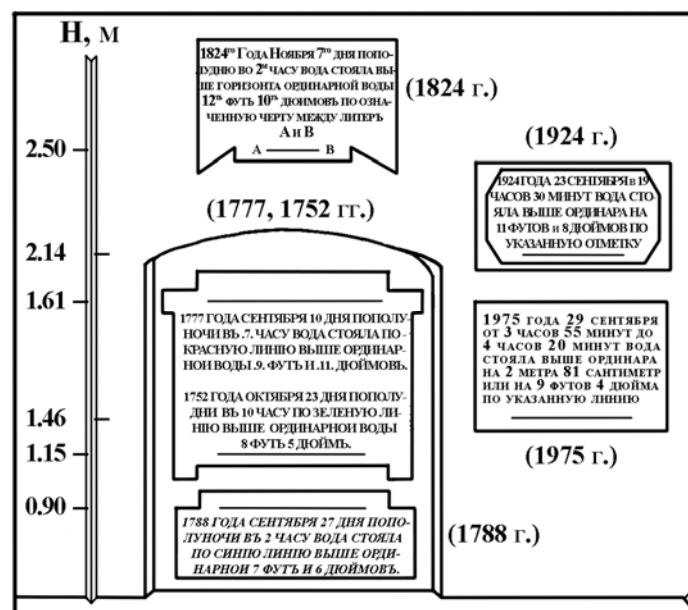


Рис. 5. Кроки меток 6 наводнений 1752-1975 гг. в Невских воротах, по состоянию на 1986 и 2003 гг., по данным ГУП «Трест ГРИИ» Комитета по градостроительству и архитектуре Правительства Санкт-Петербурга. Кроки, предоставлены экспедиции ГАО РАН Г. А. Лукиной – Начальником 1 экспедиции Отдела № 2 ГУП «Трест ГРИИ». Публикуются с незначительными изменениями впервые.

Таблица 1. Сопоставление превышений (ΔH) меток наводнений, рассчитанных по указанным на дощечках высотам, с измерениями 1924, 1986, 2003 гг. (Рис. 4, 5) и 2006 г. (ГАО РАН).

Годы	Высоты, ф. д.				Превышения, см					
	H_1	H_2	H_3	H_4	ΔH_1	ΔH_2	ΔH_3	ΔH_4	ΔH_5	ΔH_6
1824	12	10	13	11						
					89	89	90	89	89	–
1777	9	11	11	0						
					46	46	47	45	46	47
1752	8	5	9	6						
					28	33	34	23	25	28
1788	7	6	8	5						
1824	12	10	13	11						
					–	46	47	35	36	–
1924	–	–	12	5						
					–	–	–	75	68	–
1975	–	–	–	–						

Примечание: H_1 – по надписям на дощечках (Рис. 4); H_2 – по надписям в системе нивелирования Е. А. Гейнца (Рис. 4); ΔH_1 – превышения между высотами H_1 ; ΔH_2 – то же, H_2 ; ΔH_3 – измеренные превышения, 1924 г. (Рис. 4); ΔH_4 – превышения по надписям на памятных дощечках (кроки 1986, 2003 гг., Рис. 5); ΔH_5 – измеренные превышения (кроки 1986, 2003 гг., Рис. 5); ΔH_6 – измеренные превышения (ГАО РАН, 2006 г.).

Как следует из Таблицы 1, для различных превышений разных эпох характерен фоновый разброс значений порядка 1-2 см. Существенные расхождения между метками наводнений 1752 и 1788 гг. (до 11 см); 1824 и 1924 гг. (до 12 см) и 1924 и 1975 гг. (на 7 см), превышают фоновые значения в 5-10 раз. Различия для 1824-1924 и 1924-1975 гг. связаны с последующими изменениями высот катастрофических наводнений 1824 и 1924 гг. Расхождения же между превышениями меток наводнений XVIII в. в течение 1752-2006 гг. могут быть объяснены разными причинами:

- 1) Смещениями или заменами в прошлом разных плит (камней) с меткой наводнения 1752 г.
- 2) Смещениями, заменами каменной плиты с меткой наводнения 1788 г., изменением положения самой метки на плите, ошибочной идентификацией года наводнения.
- 3) Применением различных модификаций линейных мер при установке меток наводнений.
- 4) Изменением представлений о реальной точности определения высот сильных и катастрофических наводнений и методических приемов редуцирования их к единому пункту.

Рассмотрим эти причины несколько подробнее.

1) Первое известное нам упоминание о метке наводнения 1752 г. (22 октября / 2 ноября) в Невских воротах, высотой 8 футов и 5 дюймов, приведено в каталоге В.Л. Крафта, 1780 г.: «Высота наводнения, случившагося в сей день означена на Южных воротах крепости» [10, с. 48; 30, р. 46]. Следовательно метка этого наводнения, по крайней мере в XVIII в., существовала не на одной плите с меткой наводнения 1777 г. Первое же использование меток высот наводнения 10 (21) сентября 1777 г. в нивелирных работах Иоганна фон Бауера относится к 1778-1779 гг.: «в сем нивелировании за первую горизонтальную линию принята высота ординарной воды реки Невы по наблюдениям, сделанным от Адмиралтейства, а за вторую горизонтальную линию принята высота самой большой воды, примеченной во время бывшего ее наводнения 10 сентября 1777 года» [3; 13, с. 13]. Была ли высота этого наводнения «означена» в Невских воротах по результатам нивелирования И. фон Бауера, по результатам измерений «на валах Петропавловской крепости», или по футштоку, установленному там же [9-11, 14, 30-32, и др.], – выяснить не удалось.

2) Наибольшая интрига связана с меткой наводнения 1788 г., о которой впервые, по нашим сведениям, сообщил в 1924 г. Д. О. Святский: метка, «не описанная в литературе», сделана «на сером камне прихотливой вязью, которую можно разобрать лишь с большими усилиями. Она гласит: “...тября 27 дня по полуночи... стояла по сию линию выше ординарной 7 ф. и 6 д.”. Эта метка находится почти у самой поверхности земли...». Однако, из сопоставления Рис. 4 и Рис. 5 следует, что за период 1924-1986 гг. эта метка изменила свое положение и «переместилась» из нижней части «серого» камня в верхнюю (!). При этом расстояние между метками 1752-1788 гг. уменьшилось с 34 до 23-25 см (Таблица 1). Далее Д. О. Святский уточнил, что 27 числа (юлианская календарная система) «было только одно наводнение, именно 27 сентября 1788 г., высота которого оценена в 7 ф. 5 д.» [25, с. 222].

В 1932 г. А.И. Мордухай-Болтовской сослался, в частности, на архивное дело бывшего Морского Министерства (№ 4422/258-302, 1777 г.) и опубликовал 2 чертежа, «вероятно, предназначавшиеся для вычисления превышения уровня наводнения 1777 года над уровнем наводнения 1752 в связи с предполагавшеюся установкою памятной доски на Невских воротах...» [14, с. 18-19]. Эти чертежи воспроизведены ниже в Таблице 2 (ознакомиться с оригиналом нам не удалось).

Таблица 2. Два чертежа XVIII в. с указанием превышений между метками наводнений в Невских воротах, в футах (') и дюймах ("), по А.И. Мордухаю-Болтовскому [14, с. 19].

Чертеж I

Футы, дюймы		Вода стояла сего 1777 года, Сентября 10 дня по утру.
9'11"	1'7"	1752 года Октября 23 дня после полудня
	1'	1721 Ноября 5, а в 1726 году Ноября 1 числа
	7'4"	Ординарная вода в реке Неве.

Чертеж II

Футы, дюймы		Вода стояла сего 1777 года, Сентября 10 дня по утру.
9'7"	1'7"	1752 года Октября 23 дня после полудня
	1'	1721 Ноября 5, а в 1726 году Ноября 1 числа
	7'	Ординарная вода в реке Неве.

«Сопоставляя первый чертеж с расположением меток на досках Невских ворот – писал А.И. Мордухай-Болтовской, – мы видим лишь одну ошибку: расстояние между уровнями 1777 и 1752 годов указано 1'7" вместо 1'6". Разница уровней 1721 года – 1'4" и 1726 – 1'6" – упущена, вероятно, вследствие ее малости. Второй же чертеж, судя по меньшей аккуратности его, заметной на подлиннике и по ошибке в уровне 1721 года (7' вместо 7'4") – является черновиком первого. Заметим, что Сенатский указ 1721 года подтверждает существование отметки наводнения 1721 года 7'4" еще до установления Лейтманом отметки наводнения 1726 года» [14, с. 19]. Однако, в Именном указе генерал-полицеймейстера Девиера высота наводнения 1721 г. не указана [28, с. 455, № 2853]. Во всяком случае, на чертежах Таблицы 2, ниже метки 1752 г., фигурируют уровни наводнений 1721 и 1726 гг.

В 1988 г. С.Н. Шабаров [29, с. 35-36], подчеркнув, со ссылкой на [13], что заложение под плитой с метками наводнений 1777 и 1752 гг. «марки с поздней датой и более низкой отметкой не имело логического смысла», заключил: результаты наблюдений и анализ имеющихся материалов свидетельствуют о том, что этой меткой «был закреплен уровень наводнения 1721 года. Все это говорит о том, что одна из главных ценностей памятников прошлого заключается в подлинности действительного времени их установки». К.С. Померанец [20, с. 28] в 1995 г., касаясь причин «увекочения довольно заурядного наводнения» 1788 г., заметил, однако: «Вероятно, это сделали не случайно, поэтому к предложению (С.Н. Шабарова – Т. М.) о снятии посвященной ему доски следует отнестись с осторожностью».

3) Значительные недоразумения связаны с использованием В.Л. Крафтом «десятичных дюймов» [10, с. 43; 30, р. 43]. В 1932 г. А.И. Мордухай-Болтовской [14, с. 17-18], подчеркнув, что «восстановление выщербленной на доске даты соответствующего наводнения», которое он отнес к 1721 г., «оказывается несколько затруднительным», обратил внимание на «любопытное несоответствие приводимой отметки наводнения

1721 года с указанною Крафтом величиною превышения над ним наводнения 1726 года», и на то, что «если отметка 1726 года есть 8'2", то, учитывая превышение ее над наводнением 1721 года, равное 8", – мы получаем отметку последнего 8'2" – 8" = 7'6", а не 7'4", как показано у Крафта». Далее, А.И. Мордухай-Болтовской процитировал «оговорку» В.Л. Крафта о том, «что уровень наводнения 1726 г. измерен “в английских футах и десятичных дюймах” – “8 pieds anglois 2 pouces dècimals”». Его вывод категоричен: «самые тщательные наши розыски не дают никаких указаний на то, чтобы в русской или иностранной метрологии было отмечено существование системы мер, в которой на 1 фут приходилось бы 10 дюймов. Таким образом, сделанная Крафтом оговорка является простой попыткой объяснить получаемую им невязку в отметке наводнения 1721 года, вычисляемой по восьмидюймовому превышению, с отметкою, приводимую по данным Лейтмана. Что указанная Крафтом отметка 7'4" не является простою опечаткою, видно из вычисляемой им отметки наводнения 1723 года: 7'4" + 3" = 7'7". Отсюда, естественно, возникает мысль, что приводимое Крафтом превышение в 8" уровня 1726 над уровнем 1721 года, заимствованное из цитируемой им работы Лейтмана, относится к чему то совершенно другому, и лишь по ошибке принято им за разность уровней. При этом наиболее простым толкованием может служить предположение, что величина 8" была указана Лейтманом как некоторая поправка к приводимой им отметке наводнения 1726 года – 8'2". Исходя из этого предположения, мы видим, что получаемая отметка 7'6" в точности совпадает с отметкою, нанесенною на нижней доске Невских ворот (...). В дальнейшем же Крафт, может пользуясь неудачным переводом работы Лейтмана, истолковал эту поправку как разность горизонтов и, чтобы объяснить себе получаемую невязку уровней 1721 года, ввел в свою работу отмеченную выше странную оговорку о “д е с я т и ч н ы х дюймах”».

Однако, автор этой интерпретации, как показал В.И. Богданов [5-7, и др.], ошибается в отношении использования «десятичных дюймов» и не был знаком с первыми публикациями о наводнениях Невы членов Петербургской Академии наук И.Г. Лейтмана и Л. Эйлера [11, 31], которые в 1729 г. привели те же значения высот наводнений Невы «в футах и десятичных дюймах», а также в аршинах и вершках. Десятичные дроби, существенно облегчавшие вычисления в любой системе мер, были предложены в XVII в. голландским купцом и выдающимся математиком и инженером Симоном Стевиным (Stevin Simon, 1548-1620). Десятичными дюймами широко пользовались астрономы, моряки и многие ученые Европы. Использование этой меры оправдывалось также тем, что разность «десятичного» и обыкновенного дюймов составляла всего лишь 3,05 – 2,54 ~ 0,5 см и не превосходила реальную точность измерения высот сильных и катастрофических наводнений. Но уже в XVIII в., как это следует из надписей в Невских воротах, десятичные дюймы воспринимались и как обыкновенные. В качестве примера курьезной «смешанной меры», употреблявшейся иногда в обиходной речи, сошлемся на высказывание М.И. Пыляева о наводнении 1726 г.: «профессор Лейтман нашел, что оно было на восемь английских футов и 2 вершка выше обыкновенного уровня воды» [23, с. 119]. Обратим также внимание на ошибочность предположения А.И. Мордухая-Болтовского о том, что наблюдения за наводнениями велись И.Г. Лейтманом до 1726 г. (И.Г. Лейтман прибыл в Петербург из Саксонии по приглашению Академии наук 2 июля 1726 г.), и на некорректность приписывания академику В.Л. Крафту, немцу по национальности, необходимости иметь «удачный перевод» немецкой же статьи другого немца, профессора И.Г. Лейтмана. В Таблице 3 сопоставлены превышения меток наводнений в футах и дюймах, а также в десятичной футовой и в метрической системах мер.

Таблица 3. Сопоставление превышений меток наводнений в футах (') и дюймах (")
в десятичной футовой и метрической системах мер.

Годы	А.И. Мордухай-Болтовской, футы, см, [14]		И.Г. Лейтман, В.Л. Крафт, футы, см, [10-11, 30-31]		Д.О. Святский, см, [25]	Р.А. Нежиховский, К.С. Померанец, см, [17, 21-22]	
	Н	ΔН	Н	ΔН	ΔН _{измер.}	Н	ΔН
1824	12'10"		–			421	
		2'11" = 89 см		–	90		100
1777	9'11"		(10,7') ¹⁾			321	
		1'6" = 46 см		2,2' = 67 см	47		41
1752	8'5"		8,5'			280	
		11" = 28 см		1,1' = 34 см	34		(43) ²⁾
1721	7'6"		7,4'			–	
(1788)	(7'6") ³⁾	–	–	–	–	(237)	–

Примечания: 1) В Невских воротах высота наводнения 1777 г. указана равной 9'11", что в десятичной футовой мере составляет $9^{11}/_{12} = 9,9'$, т. е. на ~24 см меньше величины, приводимой В. Л. Крафтом; 2) Здесь и ниже значения в круглых скобках относятся к наводнению 1788 г.; 3) Если принять высоту наводнения 1788 г. равной 7 футам и 5 дюймам по Д. О. Святскому [25, с. 222], то она совпадет с высотой наводнения 1721 г., равной 7,4 футам, согласно И. Г. Лейтману и В. Л. Крафту [10-11, 30-31].

4) Расхождения между превышениями меток наводнений XVIII-XXI вв. (Таблицы 3-4) могут быть объяснены также изменением точности определения высот сильных и катастрофических наводнений и недостатками методических приемов редуцирования их к единому нуль-пункту. Реальная точность определения высот не изменилась с XVIII в., однако, в многочисленных перечнях XX-XXI вв. она была постулирована равной ± 1 см [14, 17, 22, и др.].

Таблица 4. Сопоставление высот наводнений, отмеченных в Невских воротах (Н₁), с перечнями В.Л. Крафта (Н₂) [10, 30], М.А. Рыкачева (Н₃) [24], Р.А. Нежиховского и К.С. Померанца (Н₄) [17, 21-22]

Годы	Н ₁			Н ₂		Н ₃			Н ₄	Н ₄ -Н ₁	Н ₄ -Н ₂	Н ₄ -Н ₃
	ф.	д.	см	ф.	см	ф.	д.	см	см			
1721	–		–	7,4	226	7	4	224	265	–	+39	+41
(1788)	7	6	229	–	–	7	10	239	237	+8	–	–2
1752	8	5	257	8,5	259	8	5	257	280	+23	+21	+23
1777	9	11	302	10,7	326	10	7	323	321	+19	–5	–2
1824	12	10	391	–	–	13	7	414	421	+30	–	+7
1924	11	8	356	–	–	–		–	380	+24	–	–
1975	9	4	284	–	–	–		–	281	–3	–	–

Примечания: 1) Высота наводнения 1721 г. измерена, вероятно, «на валах» Петропавловской крепости [9, 11, 31], а высоты наводнений 1752 и 1777 гг. – на р. Мойке [10, 30]; 2) Высота наводнений 1824 г. для Адмиралтейского футштока оценена post factum, поскольку положение самого футштока во время наводнения было нарушено; 3) Высота наводнения 1924 г. оценена для уровнемерного поста «Горный институт», но сам уровнемер во время подъема воды был поврежден и не функционировал; 4) На памятной металлической пластине в Невских воротах, посвященной наводнению 1975 г., указана его высота в футовой (9 футов 4 дюйма) и в метрической (281 см) мерах, однако 9 ф. 4 д. = 284 см.

При этом не учитывалось, что оценки высот получены по наблюдениям на различных пунктах; представлены измерения в различных неоднородных системах отсчета (от локальных, зачастую неизвестных, ординаров; от несохранившихся условных отметок и высот реперов разных эпох), изменяющихся во времени и пространстве; деформированы в результате экстраполяции более поздних или даже современной Балтийской системы счета высот на десятки и сотни лет назад [6]. Так, например, высота наводнения 1788 г. (237 см) в Балтийской системе высот из перечня [22], – согласуется с высотой, указанной на камне в Невских воротах (7 ф. 6 д. = 226 см), с учетом муссируемой нивелирной «добавки» к ней, равной 11 см, призванной привести наблюдения на уровнемерном посту «Горный институт» к Балтийской системе высот. Однако, каким же образом уровни у Горного института редуцируются к ординару Петропавловской крепости? Когда была определена величина 11 см? Кто и как установили ее неизменность во времени? Почему, в условиях сложного гравитационного поля в пределах Санкт-Петербурга, определения превышения уровней наводнений выполняется в линейных мерах, а не в геопотенциальных отметках? Вопросов – более, чем достаточно...

Существенное значение имеет стабильность меток высот всех катастрофических наводнений. В Таблице 5 сопоставлены высоты повышения уровней Невы с 1752 по 1777 гг. по каталогу В.Л. Крафта [10, 30] с современными перечнями [17, 21-22]. Из таблицы следует, что из 34 случаев разница между высотами наводнений, приведенными в Балтийской системе высот 1948 г. и в системе ординара на р. Мойке в 29 случаев равна 21 см (85,3%), в 1 случае – 23 см (2,9%), в 2 случаях – 20 см (5,9%), а для 2 случаев, в том числе для катастрофического наводнения 1777 г., – соответственно, –2 и –5 см (5,9%). Таким образом, если считать правильными определения высот в каталогах Р.А. Нежиховского и К.С. Померанца [17, 21-22], то высота наводнения 1777 г. должна быть увеличена, примерно, на 20 см.

Таблица 5. Сопоставление сведений о наводнениях Невы 1752-1777 гг., по В.Л. Крафту [10, 30] (H_1), Р.А. Нежиховскому и К.С. Померанцу [17, 21-22] (H_2).

№№ п.п.	Годы	Даты наводнений	H_1		H_1 , см	H_2 , см	$\Delta H = H_2 - H_1$
			ф.	д.			
1	1752	22 октября (2 ноября)	8	5	257	280	23
2	1752	25 октября (5 ноября)	6	0	183	204	21
3	1752	26 октября (6 ноября)	7	0	213	234	21
4	1752	28 октября (8 ноября)	6	0	183	204	21
5	1752	11 (22) декабря	7	0	213	234	21
6	1754	7, 8 (18, 19) мая	5	0	152	173	21
7	1756	29 сентября (10 октября)	7	3	221	242	21
8	1757	16 (27) октября	6	0	183	204	21
9	1758	18 (29) ноября	4	9	145	166	21
10	1759	6 (17) октября	6	1	185	206	21
11	1760	8 (19) октября	5	3	160	181	21
12	1762	28 октября (8 ноября)	5	10	178	199	21
13	1762	10 (21) декабря	5	10	178	199	21
14	1763	8 (19) октября	6	6	198	219	21
15	1763	28 ноября (9 декабря)	5	4	163	183	20
16	1764	6 (17) ноября	4	10	147	168	21
17	1764	18-22 ноября (29 ноября – 3 декабря)	7	4	224	244	20

18	1765	28 октября (8 ноября)	4	9	145	166	21
19	1765	24-26 ноября (5-7 декабря)	5	6	168	189	21
20	1766	19 (30) ноября	4	8	142	163	21
21	1767	16 (27) июня	5	1	155	176	21
22	1767	29 сентября (10 октября)	5	5	165	186	21
23	1767	9 (20) октября	4	10	147	168	21
24	1767	6 (17) ноября	4	11	150	171	21
25	1771	25 октября (5 ноября)	4	9	145	166	21
26	1771	30 октября (10 ноября)	5	0	152	173	21
27	1771	8 (19) ноября	4	8	142	163	21
28	1772/3	31 декабря (11 января)	5	2	157	178	21
29	1773	29 июля (9 августа)	–	–	–	181	–
30	1773	14 (25) октября	5	9	175	196	21
31	1775	15 (26) июня	5	2	157	178	21
32	1777	16 (27) августа	5	0	152	173	21
33	1777	9, 10 (20, 21) сентября	10	7	323	321	–2
34	1777	25 сентября (6 октября)	4	10	147	168	21
35	1777	17 (28) октября	6	0	183	178	–5

Примечания: 1) H_1 – высоты наводнений по наблюдениям г-на Шретера на р. Мойке [10, 30];
2) H_2 – высоты, определенные в Балтийской системе высот, согласно [17, 21-22, и др.];
3) Из статьи В. Л. Крафта [30] можно сделать вывод, что и высота наводнения 1777 г. приведена им в десятичных дюймах. В таком случае имеем: 10,7 фута = 326 см.

Учитывая, что вышеприведенная оценка порождает сомнения в постулируемой величине уровня первого катастрофического наводнения Невы, приведем несколько высказываний современников этого события. Так, Елизавета Алексеевна (супруга Александра I), писала 7 (19) ноября 1824 г. своей матери: «Я пишу вам, любезная маменька, посреди ужасающего бедствия и даже не знаю, уйдет ли завтра мое письмо, поелику теперь мы в Зимнем дворце все равно как на корабле (...). Наше поколение не видывало ничего подобного, однако, рассказывают, что в 1777 году вода поднималась на целый фут выше, чему, возможно, способствовало меньшее в то время число каналов и набережных». Однако вечером того же дня она отметила: «Оказалось все-таки, что она [вода] была выше на два дюйма, чем в 1777 году» [19, с.79]. Ю.Н. Беспярых и Н.Л. Сухачев в статье «Самое разрушительное» опубликовали описание катастрофы 1777 г., принадлежащее секретарю французского посланника при русском дворе Мари-Даниэлю Буре (впоследствии барону де Корберону) [4, с.197]. «Запись, датированная по новому стилю воскресеньем 21 сентября 1777 года, сообщает: “В четыре часа утра просыпаюсь от криков матросов и страшного урагана... Встаю и вижу в окно, что на дворе ходят по пояс в воде. Иду в кабинет, выходящий окном на Неву, на Галерную, и не вижу ничего, кроме бушующего моря (...). Юго-западный ветер гнал с ужасающей силой воду залива и вкатывал воды в Неву, так что вода в ней поднялась на десять-двенадцать футов (на ~305-366 см – *Т. М.*) выше обычного уровня”». Некий анонимный автор писал о наводнении 1777 г., что «Вода была прямой пропорции в 2 сажени (~426 см – *Т. М.*); на взморье острог опровергнуло, и в нем было людей до 300 человек; в гостином дворе, в лавках, вода была вышиною в 1½ сажени (~3,2 м – *Т. М.*); в мучных лавках в 2 куля с половиною вышиною, в большой Коломне и малой, и Мещанской, более 100 домов со всем строением и с людьми разнесло» [15, с. 39]. Приведенные выше сведения аналогичны тем, которые приводятся в копии некоего письма, полученного неизвестным адресатом 14 сентября 1777 г. [4, с. 196; 18, с. 210]. Сопоставление «куля» с

линейной мерой нам не известно, однако, полагая, что 1,5 сажени \approx 2,5 куля, получаем допустимую оценку: высота 1 куля \sim 0,6 сажени \sim 1,3 м. В трудах Императорского общества истории и древностей российских за 1874 г. было отмечено, что «страшное, поразительное явление» наводнения 1777 г. «опустошило преимущественно Части столицы: Петербургскую, Выборгскую, частью дальняя линии Васильевской, в особенности Галерную гавань, которую почти всю разрушило (...). Вода в этих Частях подымалась выше двух сажен (\sim 426 см – Т. М.), а в Галерной еще более. Ветер был столько силен, что ни как нельзя было устоять на ногах: большая деревья гнуло до земли, при чем одновременно дул с двух противоположных сторон, с моря и Ладожского озера, и гнал воду, от чего река Нева, переполнившись, хлынула вся на Петербург, и затопила его» [16, с.86]. В Летописях Петропавловской крепости записано: «Ноября 7^{го} вода в Неве при сильном морском ветре вышла из берегов и в продолжении нескольких часов стояла выше ординара на 12 фут. 4 дюйм.» [12, с.123], что на 6 дюймов (\sim 15 см) меньше высоты, указанной на памятной дощечке в Невских воротах. Приведем также высказывание А.П. Старкова [27, с.542], который допускал, «судя по размерам залитой части Петербурга», что наводнение 1777 г. превосходило наводнение 1824 г., и объяснял это тем, «что с 1777 года произошел некоторый подъем почвы (...) и очень интенсивно производится подсыпка местности».

Известны также изменения высот и памятных табличек двух других катастрофических наводнений Невы 1824 и 1924 гг. В 1932 г. А.И. Мордухай-Болтовской [14, с. 16] воспроизвел текст на первой из них: «1824 года ноября 7 дня, пополудни в 2 часа, вода выше ординарной 12'10"», и далее подчеркнул: «Существование этой доски засвидетельствовано многочисленными ее упоминаниями в работах предшествующих исследователей». Последнее замечание А.И. Мордухая-Болтовского свидетельствует о том, что в его время оригинальная памятная «доска» или отсутствовала, или была заменена на другую. В 1978 г. П. Антонов записал, что «на стене под аркой Невских ворот Петропавловской крепости воссоздана бронзовая доска с отметкой высоты воды 19 ноября 1824 года» [2, с. 25]. Экспедиция же ГАО РАН зафиксировала в 2003 г. следующую надпись: «1824 Года Ноября 7^{го} дня пополу- / дни во [2] часу вода стояла вы- / ше горизонта ординарной воды / 12^{тв} футъ 10^{тв} дюймовъ по означен- / ную черту между литеръ А и В / А ————— В». Таким образом, в 2003 г. мы имели дело, по меньшей мере, уже с третьей памятной доской. Неоднократные последующие переоценки высоты наводнения 1824 г. поражают. В конце XIX в. М. И. Алтухов [1, с.459] указал диапазон их изменений – 365-442 см, – и пояснил, что разброс может быть связан с коррекцией в 1865 г. ординара Невы на 6,48 дюйма (\sim 16 см), но разницу в 2 фута (\sim 60 см) «объяснить чем-нибудь представляется очень трудным». К 30-м годам XX в. этот разброс оценивался уже в интервале 411-426 см [17, с.32]. В частности, А.И. Мордухай-Болтовской [17, с.32] считал в 1932 г. высоту наводнения 1824 г. равной 375 см над ординаром у Горного института, наблюдения у которого были начаты лишь в 1878 г., а в 1988 г. Р.А. Нежиховский переопределил ее «с 375 см» на «410 см над ординаром, или 421 см БС» (имеется в виду тот же ординар у Горного института и Балтийская система высот, введенная в практику геодезических и гидрографических работ Постановлением СМ СССР № 760 от 7 апреля 1946 г.).

Известны также перипетии с высотой наводнения 1924 г. Так, самописец Главной геофизической обсерватории, после измерения высоты подъема воды в 9 фут, был залит, и к нему было «невозможно пробраться», а измерения были прекращены [21, с.45]. Д.О. Святский писал, что в Невских воротах, кроме четырех меток (Рис. 4), «сделана (увы, пока карандашом) и метка наводнения 23 сентября 1924 г. на уровне арки задланного хода» [25, с.222]. Однако высота этой метки в дальнейшем была изменена

примерно на 4 дюйма (Таблица 1). В 1932 г. А.И. Мордухай-Болтовской [14, с.16] процитировал текст памятной таблички этого наводнения: «23 сентября 1924 года, в 19 часов 30 минут уровень воды на р. Неве был 11¾ фута выше ординара и вода стояла по черную линию доски. Комендатура крепости». В 1988 г. С.Н. Шабаров писал: «Десять лет назад в Невских воротах были завершены реставрационные работы. Обновлены отметки наводнений 1752 и 1777 годов, восстановлены марки 1824 и 1924-го, установлена марка 1975 года» [29, с.36]. В 2003 г. экспедиция ГАО РАН зафиксировала следующий текст: «1924 года 23 сентября в 19 часов / 30 минут вода стояла выше ординара на 11 футов и 8 дюймов по / указанную отметку».

В заключение отметим, что «каменная летопись» высот наводнений Невы в Петропавловской крепости имеет огромное культурное, историческое и естественнонаучное значение. Однако, совершенно неудовлетворительно инструментальное и информационное обеспечение этой роли. Необходимо обратить внимание руководства Музея истории города и Правительства Санкт-Петербурга на необходимость регулярного и полного геодезического контроля за всеми изменениями, связанными с перестановкой или заменой памятных дощечек и изменениями текстов и положения меток на них. Необходимо организация целенаправленных поисков новых материалов в архивах Музея истории Санкт-Петербурга и в архивах ведомственных организаций, имевших или имеющих в настоящее время отношение к этой проблеме. Необходимо просить Правительство Санкт-Петербурга финансировать прецизионную нивелирную и гравиметрическую связи меток наводнений в Петропавловской крепости с сохранившимися реперами и пунктами соответствующих официальных съемок территории города в XIX-XXI столетиях.

Литература

1. *Алтухов М.И.* О наводнениях в С.-Петербурге и средствах борьбы с ними // Записки Императорского Русского технического общества. 1899. № 8-9. С.453-485.
2. [*Антонов П.*]. Когда гневалась Нева // Ленинград без наводнений. – Л.: Лениздат. 1984. 127 с.
3. [*Бауер*]. Нивелирование города С.-Петербурга, сочиненное генерал-квартирмейстером и многих Российских орденов кавалером Иоганом фон Бауером в 1779 году. Рукопись. Перевод Ивана Липгарда, 1798.
4. *Беспярых Ю., Сухачев Н.* Самое разрушительное // Нева. 1987. № 6. С.195-198.
5. *Богданов В.И.* Методологические аспекты изучения наводнений Невы // Астрономия и история науки. – СПб.: ГИПП «Искусство России». 1999. С.113-127.
6. *Богданов В.И.* О репрезентативном каталоге наводнений Невы как фундаментальной научной и практической проблеме (к 300-летию Санкт-Петербурга и Кронштадта) // Известия Русского географического общества. 2002. Т. 134. Вып. 6. С.23-34.
7. *Богданов В.И., Малова Т.И.* О системах счета высот в геодезии и отсчета измерений в метрологии уровневых наблюдений // Геодезия и картография. 2003. № 5. С.11-16.
8. *Гейнц Е.А.* Нивелировка Васильевского острова и Петербургской стороны 1890 и 1891 гг. Сравнение нулей водомерных реек на Большой Неве и марок наводнения 7 ноября 1824 года // № 14. Бесплатное приложение к «Известиям Спб. Городской Думы». – СПб., 1909. 56 с., с планом и 50 рисунками реперов.
9. *Георги И.Г.* Описание Российско-Императорского столичного города Санкт-Петербурга и достопамятностей в окрестностях онаго / Перевод с нем. П. Безака. – СПб., 1794. ХІС, [14], 727 с., план.
10. [*Крафт В.Л.*]. Известия и примечания г. Академика Крафта о разливах Невы в Санкт-Петербурге с присовокуплением таблицы прибывания и убывания воды в

- Кронштадтском канале каждого дня 1777 году // Новые ежемесячные сочинения. – СПб. 1795. Ч. СІХ. С. 37-50. Ч. СХІ. С.74-93.
11. [*Лейтман И. Г., Эйлер Л.*]. [О прибывании воды в реке Неве и о приливе и отливе] // Примечания к Ведомостям. 1729. № 86, 88-91. С.345-348, 353-368.
 12. *Летопись* Петропавловской крепости 1703-1879 / Архив Музея истории Санкт-Петербурга. – СПб., Петропавловская крепость. 255 с.
 13. *Мордухай-Болтовской А.И.* Исследование гидрометрических материалов реки Невы. Часть I / Под ред. Е. И. Иогансона // Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. Вып. XV. Серия I. Сведения об уровнях воды и гидрометрическая сеть. – Л.-М.: Госэнергоиздат. 1932. 264 с.
 14. *Мордухай-Болтовской А.И.* Уровни некоторых Ленинградских наводнений XVIII и начала XIX века // Известия Государственного гидрологического института. № 48. (июль). – Л., 1932. С.14-35.
 15. *Наводнение в Петербурге 1777 года* // Журнал современного искусства и образованности, в духе народности русской. 1842. Т. IV. Кн. VII. Смесь. С.38-39.
 16. *Наводнение 7 Ноября 1824 года, в Петербурге* // Чтения в Императорском обществе истории и древностей российских. – М., Типография Университета. 1874. Кн. I. С.86-87.
 17. *Нежиховский Р.А.* Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. – Л.: Гидрометеоздат. 1988. 224 с.
 18. *Петербургское наводнение* Екатерининского времени в описании очевидца // Русский архив. Издаваемый Петром Бартеневым (младшим). 1916. Книга первая. М., Синодальная типография. С.209-210.
 19. *Письма Императрицы Елизаветы Алексеевны* к матери, маркграфине Баденской Амалии (1797-1826) / Предисловие Великого князя Николая Михайловича, Перевод с французского, послесловие и примечания Д.В. Соловьева // Звезда. 2001. № 1. С.60-84.
 20. *Померанец К.С.* О знаках наводнений в Петропавловской крепости // Краеведческие записки (Музей истории Санкт-Петербурга). Исследования и материалы. Вып. 3. – СПб.: «Акрополь». 1995. С.26-30.
 21. *Померанец К.С.* Наводнения в Петербурге 1703-1997. – СПб.: ТОО «Компания Балтрус», ТОО «Балтрус-бук». 1998. [1], 171 с.
 22. *Померанец К.С.* Дополнение и уточнение сведений о наводнениях в Санкт-Петербурге // Сборник работ по гидрологии / Под ред. В. С. Вуглинского. – СПб.: Гидрометеоздат. 2004. С.97-110.
 23. *Пыляев М.И.* Старый Петербург. Рассказы из былой жизни столицы / Вступительная статья А.А. Алексеева. – СПб.: «Паритет». 2002. 480 с.
 24. *Рыкачев М.А.* О наводнениях в С.-Петербурге и о возможности их предсказывать на основании метеорологических наблюдений // Записки по гидрографии. 1898. Вып. XIX. С.99-124.
 25. *Святский Д.О.* Наводнение в Ленинграде 23 сентября 1924 г. // Мирозведение. 1924. № 2 (47). С.218-223.
 26. *Святский Д.О.* Исторический очерк развития метеорологических и гидрологических наблюдений в России (до учреждения Главной Физической Обсерватории в 1849 г.) / План заявленной на публикацию книги (25 мая 1934 г.) // ПФА РАН, ф. 154, оп. 2, д. 103.
 27. *Старков А.П.* О периодичности Петербургских наводнений и средствах борьбы с ними // Записки Императорского Русского технического общества. 1900. № 7-8. С.535-575.

28. **Указ** «О наблюдении, чтобы в Санктпетербурге в низких местах, где вода была, во всяком строении, нижние полы были выше прибылой воды» / Именной, объявленный Генерал-Полицеймейстером *Девьером* // Полное собрание законов Российской Империи с 1649 года. Т. VI. 1720-1722. – [Спб.]. Печатано в Типографии II Отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии. 1830. [2], 815, [3] с.
29. **Шабаров С.Н.** Летопись наводнений // Ленинградская панорама. 1988. № 5. С.35-36.
30. **Krafft W.L.** Notices et remarques sur les debordemens de la Néva à St.Petersbourg, accompagnées d'une carte representant la crue et la diminution des eaux du canal de Kronstadt, pour chaque jour de l'année 1777 // Acta Academiae Scientiarvm Imperialis Petropolitanae, pro Anno MDCCLXXVII. – Petropoli: Typis Academiae Scientiarvm. MDCCLXXX. P.39-62.
31. [**Leutmann J. G., Euler L.**]. Ein Heftiger Sturm aus der See, welcher sich (den 12 October) um 10 Uhr Morgens anhub, und die Insuln dieser Stadt mehrentheils unter Wasser aetzte // Historische, genealogische und geographische Anmerckungen über die Zeitungen. 1729. St. LXXXVI. LXXXVIII-XCI. S. 437-440. 445-460.
32. **Van Veen J.** Tide-gauges, subsidence-gauges and flood-stones in the Netherlands // Geologie en Mijnbouw. Nieuwe Serie. 1954. Number 6. P.214-222.

AN ANALYSIS OF THE MATERIALS ABOUT HEIGHT MARKS OF NEVA'S FLOODS IN THE NEVA GATE OF THE PETER AND PAUL FORTRESS

Malova T.

Summary

The Geodynamic expedition has studied height marks of Neva's floods that were established after the floods of 1752, 1777, 1788, 1824, 1924 and 1975 on the Neva Gate wall in the Peter and Paul fortress. The results of investigations are the followings:

1) It was shown that the contemporary position of height marks differs greatly from the position, described by D. Swyatsky in 1924. The discrepancy can be explained by: 1) the replacements of height mark of 1752; the replacements of height mark of 1788 as well as incorrect identification of this flood's date; and the use of different modifications of the linear measures during the marks' establishing.

2) The Geodynamic expedition got preliminary results about the necessity of revision the height of the flood of 1777. According to some archive documents it was, perhaps, the biggest flood with the highest water level in the history of Saint-Petersburg.

3) It is necessary to continue different searches, connected with Neva's floods. Also, it is necessary to attract specialists to all kind of works, associated with replacements of the height marks, because they have a great cultural importance.

ФЕНОМЕН БЛОКИРОВАНИЯ И ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Медведев М.Ю.

Представлен необходимый минимум сведений о мезомасштабной бифуркации, эпизодически возникающей в умеренных широтах нижней атмосферы и порождающей один из типов так называемых блокирующих ситуаций. Намечен подход к исследованию этого явления в контексте проблемы солнечно-атмосферных связей.

Введение

Главной особенностью баротропной циркуляции в умеренных широтах нижней атмосферы (тропосферы) является динамическая сбалансированность эффектов внутренней неустойчивости и самоорганизации. Теоретическое исследование соответствующих процессов выполняется на основе существенно нелинейных моделей. Как правило, здесь применяются редуцированные гидродинамические модели, допускающие качественную интерпретацию, что, вообще говоря, облегчает сопоставление теоретических выводов с фактическими данными. Сама возможность интерпретации связана с существованием модели – прототипа, роль которой выполняет уравнение, выражающее свойство лагранжевой инвариантности нормальной компоненты векторной величины, называемой потенциальным вихрем [1,2,3].

Рабочие модели подобного рода давно используются в практике краткосрочных прогнозов, а также при исследовании общих вопросов динамической метеорологии. Некоторые из них впервые были сформулированы Россби в работе [4], имевшей программный характер. Не последнее место в этом ряду занимает вопрос о физической природе и климатической значимости синоптических ситуаций, которые получили название блокирующих ввиду происходящего в подобных случаях радикального изменения характера среднеширотной циркуляции.

Тип блокирующей ситуации, рассматриваемый в настоящей статье, изучен полнее и глубже остальных, поскольку с ним связано формирование резко выраженных региональных аномалий климата (засух и т.п.) [5,6]. В следующем разделе представлен краткий обзор сведений, касающихся диагностики и теоретической интерпретации этого явления. В заключительной части намечен подход к его исследованию в контексте проблемы солнечно – земных связей.

Блокирующие ситуации (БС) – феноменология и теория

В числе основных источников информации об интересующем нас явлении до сих пор остаются работы [7,8], где впервые были четко определены его диагностические признаки и на этой основе выполнен анализ массива аэрологических данных, относящихся к северному полушарию и полученных в период с 1933 по 1949 гг. В результате изучения ежесуточных карт изобарической поверхности, соответствующих уровню 500 гПа, удалось выявить более ста случаев блокирования,

Речь идет о синоптической ситуации, возникающей при разветвлении зонального (ориентированного с запада на восток) течения в пределах ограниченного участка пояса умеренных широт. Причем такая бифуркация рассматривается как диагностический признак блокирования только при выполнении следующих условий:

- а) интенсивность вторичных потоков должна быть примерно одинаковой;

- б) протяженность по долготе участка с двухструйной конфигурацией течения не должна быть меньше 45 градусов;
- в) непосредственно перед этим участком течение должно сохранять первичную направленность;
- г) описанная выше картина должна существовать не менее 10 суток.

Последнее требование отвечает представлению о «персистентности» блокирующих ситуаций.

В [8] все обнаруженные случаи блокирования включены в каталог, содержащий сведения о месте и дате возникновения бифуркации, а также о свойствах, перемещениях и продолжительности существования мезомасштабной циркуляционной системы, появляющейся одновременно с перестройкой течения непосредственно за «развилкой». Эта система, называемая блокирующим образованием, имеет «дипольную» структуру: она включает в себя высотный антициклон и сопутствующий ему при перемещениях циклон.

Статистическая обработка данных каталога позволила установить существование очагов блокирующей активности, т.е. тех сегментов пояса умеренных широт, где блокирование происходит чаще, чем в других местах. Оказалось, что в северном полушарии главный очаг расположен в районе, включающем значительную часть Европы и восточную окраину Атлантического океана. Аналогичным образом было установлено, что в зимние месяцы и в начале весны блокирование наблюдается заметно чаще, чем в другие сезоны.

В рассматриваемых работах значительное внимание уделяется также вопросу об инициации блокирующих событий. При этом за основу принята полуэмпирическая теория Россби [9], который исходил из аналогии между бифуркацией, выражающейся в разветвлении зонального течения, и гидравлическим скачком, образующимся при определенных условиях в неглубоком русловом потоке. Заслуживают упоминания концептуальные аспекты теории, которые дают некоторое представление о сложности феномена блокирования как физического явления. В этом плане особенно важен сам выбор аналога, продиктованный пониманием необходимости учета нелинейных проявлений эффекта дифференциального вращения (или « β – эффекта»). Соответствующая концепция получила дальнейшее развитие в исследованиях по синергетике океана и атмосферы. Примером здесь может служить работа [10], где показано, что β – эффект играет ведущую роль в процессе самоорганизации статистического ансамбля двумерных вихрей синоптического масштаба.

Другой концептуальный аспект теории Россби, также повлиявший на выбор аналога, связан с предположением о том, что блокирующая активность в каждом очаге стимулируется интенсивным циклогенезом в месте расположения ближайшей к нему высокоширотной барической депрессии, играющей роль полуперманентного ЦДА («центра действия атмосферы»). Фактическое подтверждение указанного предположения получено в [8] на основе специальной обработки многолетних данных о блокирующей активности в атлантико-европейском регионе.

В работе [11], посвященной блокирующим ситуациям того же типа, предложена диагностическая методика, допускающая компьютерную реализацию. Она использована при анализе аэрологических данных с суточным разрешением, полученных на станциях северного полушария в период с января 1950 г. по декабрь 1979 г. Как и в рассмотренных выше работах, эти данные относятся к высотам, где атмосферное давление равно 500 гПа. Результаты анализа показали, что схематизация диагностической процедуры, обеспечивающая возможность автоматизированной обработки исходных данных, практически не сказывается на тех выводах, которые касаются расположения очагов блокирующей активности и повторяемости блокирующих событий в разные месяцы года. В другой работе тех же авторов [12] затронут вопрос о персистентности блоки-

рующих ситуаций. Это свойство трактуется ими с вероятностной точки зрения, причем соответствующий показатель задается на основе предельно упрощенной модели (марковская цепь 1-го порядка). Для каждого очага блокирующей активности показатель персистентности оценивается по многолетним данным о продолжительности наблюдавшихся здесь событий. Результаты, полученные при обработке двух выборок, представляющих разные полушария, показывают, что в северном полушарии блокирующие ситуации более стабильны, чем в южном. Однако вопрос о причинах такого различия остается открытым.

В [13, 14] свойство персистентности блокирующих ситуаций исследовано с позиций нелинейной динамики и в связи с проблемой формализации понятия «режим атмосферной циркуляции», которая имеет фундаментальное значение для математической теории климата. (Современное состояние этого раздела климатологии обсуждается в [15]). Определяя понятие «режим блокирования» авторы подчеркивают его региональный характер, а свойство персистентности интерпретируют как форму поведения динамической системы в условиях, когда фазовая траектория проходит вблизи неустойчивого стационарного решения соответствующей системы дифференциальных уравнений. Время жизни квазистационарного регионального режима такого типа оценивается в [13] методами классической теории устойчивости, адаптированными к тем способам спектральной (галеркинской) аппроксимации базовых гидродинамических моделей, которые применяются при изучении баротропных возмущений зональной циркуляции. Аналогичный подход использован в работе [16], где исследуется устойчивость «модона» – солитонной модели блокирующего образования, наделенного дипольной структурой.

Роль БС в системе солнечно – атмосферных связей

Согласно [5] существует три основных типа блокирующих ситуаций, среди которых тот, который рассматривается здесь, выделяется отсутствием определенной связи с орографическими или термическими неоднородностями подстилающей поверхности. Интерес, проявляемый к соответствующему («дипольному») типу блокирующих образований, вызван тем, что в его свойствах находит отражение важнейшая особенность баротропной циркуляции нижней атмосферы: взаимообусловленность эффектов внутренней неустойчивости и самоорганизации.

Вместе с тем уровень понимания механизмов формирования, стабилизации и последующего распада этой мезомасштабной вихревой структуры остается примерно таким же, как в период появления самых первых теоретических работ, посвященных блокирующим ситуациям с разветвлением зонального течения. То же, если судить по специальным обзорам (см., например, [17,18]), можно отнести к изученности данного феномена в контексте проблемы солнечно-атмосферных связей. Одна из причин такого положения состоит в том, что указанная проблема в части, касающейся тропосферной циркуляции, традиционно разрабатывается применительно к флуктуациям метеополей, имеющим сравнительно малую продолжительность.

В случае климатически значимых метеорологических явлений, подобных блокированию, задача выявления эффектов, обусловленных гелио- и (или) космофизическими факторами, намного усложняется. Это связано с относительной автономностью таких явлений, что, по необходимости, сопряжено со слабой восприимчивостью к воздействию фоновых факторов.

По сегодняшним представлениям влияние изменений солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы передается посредством сопутствующих им вариаций интенсивности галактических космических лучей. Предполагается также, что воздействие жесткого корпускулярного излучения на атмосферу как многофазную и многокомпонентную среду сказывается, в конечном счете, на прозрачности нижнего слоя и на

структуре облачного покрова [19]. Последнее, в свою очередь, отражается на характеристиках радиационного баланса, играющего ключевую роль в формировании общей циркуляции атмосферы. Эта концепция используется в работе [20], где изучается вопрос о влиянии вариаций галактических космических лучей на ритмику Северо-Атлантического Колебания (САК) – макромасштабного процесса, характеризующего квазициклическую изменчивость современного климата. Цель исследования представляет интерес и в отношении блокирующей активности, поскольку, как показано в [21], она зависит от фазы САК. Однако его результаты не позволяют судить с достаточной уверенностью о характере влияния учитываемых внеатмосферных факторов. Это служит еще одним свидетельством неоднозначной реакции климатической системы на односторонние изменения обстановки в околоземном космическом пространстве.

Вместе с тем, учитывая специфику блокирующих событий, соответствующий тип баротропной неустойчивости естественно рассматривать в числе причин такой неопределенности. Исходя из этого, при изучении феномена блокирования в контексте проблемы солнечно – атмосферных связей следует уделить особое внимание выяснению его роли в качестве помехообразующего фактора. При такой постановке вопроса первостепенное значение приобретает факт существования постоянного обмена энергией между тропосферой и стратосферой. Перенос энергии обеспечивается вертикально распространяющимися планетарными волнами, причем согласно [22], тот же механизм причастен к формированию стратосферного отклика на квазипериодические изменения интенсивности зональной циркуляции, характеризующиеся индексом Россби или его аналогами. Важно отметить отчетливость отклика, поскольку это позволяет предположить, что реакция стратосферы на возникновение блокирующей ситуации также окажется достаточно определенной.

Изучение вопроса о функции блокирующей активности в системе солнечно – атмосферных связей, учитываемых при исследовании процессов в верхних слоях атмосферы, целесообразно начинать с проверки данного предположения. Что касается методики проверки, то здесь за образец можно было бы принять версию метода наложения эпох, разработанную Э.Р. Мустелем и его сотрудниками при изучении влияния вспышечной активности Солнца на флуктуации приземного атмосферного давления (см., например, [23]).

Литература

1. **Обухов А.М.** Адиабатические инварианты атмосферных процессов. // Метеорология и гидрология, 1964, N 2. С.3-9.
2. **Курганский М.В., Татарская М.С.** Применение понятия потенциальный вихрь в метеорологии. // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1987, т. 23, N 8, С.787-814.
3. **Должанский Ф.В., Крымов В.А., Манин Д.Ю.** Устойчивость и вихревые структуры квазидвумерных сдвиговых течений. // Успехи физ. наук, 1990, т.160, N 7. С. 1-47.
4. **Rossby C.-G.** Current problem in meteorology. // in «The Atmosphere and the Sea in Motion», New-York, the Rockefeller Institute Press in association with Oxford University Press, 1959, pp.9-50.
5. **Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С.** Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий. // Метеорология и гидрология, 1984, N10, С.5-13
6. **Шапвалова Н.С.** Статистика блокирующих образований в атмосфере. // Метеорология и гидрология, 1990, N 8, С.20-29.
7. **Rex D.F.** Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. 1. An aerological study of blocking action. // Tellus, 1950, v.2, N 3, pp.196-211.

8. **Rex D.F.** Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. 2. The climatology of blocking action. // *Tellus*, 1950, v.2, N 4, pp.275-301.
9. **Rossby C.-G.** On the dynamics of certain types of blocking waves. // *J. Chinese Geophysical Soc.*, 1950, v.2, N 1, pp.1-13.
10. **Larichev V.D.** Differential rotation (β – effect) as an organizing factor in mesoscale dynamics. // in «Mesoscale/synoptic coherent structures in geophysical turbulence», Elsevier Oceanol. Ser. N 50, Amsterdam, 1989, pp.141-148.
11. **Lejenäs H., Økland H.** Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. // *Tellus*, 1983, v.35A, N 5, pp.350-362.
12. **Økland H., Lejenäs H.** Blocking and persistence. // *Tellus*, 1987, v.39A, N 1, pp.33-38.
13. **Дымников В.П., Казанцев Е.В., Харин В.В.** Характеристики устойчивости и время жизни режимов атмосферной циркуляции. // *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 1990, т.26, N 4. С.339-349.
14. **Дымников В.П., Казанцев Е.В., Харин В.В.** Информационная энтропия и локальные показатели Ляпунова баротропной атмосферной циркуляции. // *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 1992, т.28, N 6. С.563-573.
15. **Дымников В.П., Грицун А.С.** Современные проблемы математической теории климата. // *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, 2005, т.41, N 3. С.294-314.
16. **Neven E.C.** Linear stability of modons on a sphere. // *J. Atmos. Sci.*, 2001, v.58, N16, pp.2280-2305.
17. **Герман Дж.Р., Голдберг Р.А.** Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеиздат, 1981, 319 с.
18. **Benestad R.E.** Solar activity and earth climate. – Springer and Praxis Publishing, Chichester (UK), 2002, 287 p.
19. **Пудовкин М.И., Распопов О.М.** Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. (Обзор.) // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1992, т.32, N 5.
20. **Артамонова И.В., Пудовкин М.И., Гальцова Я.В., Зайцева С.А.** Циклические вариации северо-атлантических осцилляций (NAO) и солнечная активность. // «Климатические и экологические аспекты солнечной активности». (Труды международной конференции. ГАО РАН, Пулковое, 7-11 июля 2003 г.). Санкт-Петербург, 2003. С.23-32.
21. **Полонский А.Б., Башарин Д.В.** О влиянии Северо-Атлантического и Южного Колебаний на изменчивость температуры воздуха в европейско-средиземноморском регионе. // *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, 2002, т.38, N 1. С. 135-145.
22. **Холтон Дж.Р.** Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы – Л.: Гидрометеиздат, 1979, 224 с.
23. **Чертопруд В.Е., Мустель Э.Р., Мулюкова Н.Б.** О нестабильности тропосферы, связанной с солнечной активностью. // *Астрономический журнал*, 1979, т.56, вып.1. С.106-117.

BLOCKING AS METEOROLOGICAL PHENOMENON AND THE PROBLEM OF THE SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONSHIPS

Medvedev M.Yu.

Summary

Basic information on the so-called blocking situations is given. These situations appears episodically as a result of mesoscale bifurcation of the normal circulation pattern existing in the middle latitudes of the troposphere. It is suggested that the phenomenon be studied in the context of the solar-terrestrial relationship.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ШИРОТЫ

Миллер Н.О.¹, Литвиненко Е.А.¹, Прудникова Е.Я.¹, Соколова Н.В.²

¹ГАО РАН

²БШЛ ОРУГ

Для исследования были использованы ряды наблюдений широты, полученные на следующих инструментах: ЗТФ-135 (Пулково), ЗТЛ-180 (Благовещенск), ФЗТ (Китаб). Выполнены исследования неполярных вариаций широты, полученных с использованием современных систем координат полюса. Точность этих систем позволяет находить свободные от сглаживания, т.е. не искаженные фильтрацией, неполярные изменения широты. С помощью метода Диминга для неравномерных рядов были выделены короткопериодические колебания и сделаны оценки их возможной связи с атмосферными и геофизическими процессами. Было выполнено определение комбинации чисел Лява ($1 + k - l$) по суточным колебаниям отвеса. Кроме того, была выполнена оценка для значения числа Лява k .

В данной работе используются ряды наблюдений на ЗТФ-135 (1904-2004) Пулковской обсерватории, ЗТЛ-180 (1969-1991) Благовещенской обсерватории и ФЗТ (1981-1994) Китабской международной широтной станции.

Программы наблюдений на ЗТФ-135, рассчитанные на 20 лет, составлялись таким образом, чтобы обеспечить максимальную преемственность. Кроме того, наблюдения в периоды 1915-1928 и 1955-1962 проводились по расширенным широтным программам в течение всей ночи, что даёт возможность выполнять исследования короткопериодических неполярных изменений широты.

Все наблюдения обработаны в системе ICRS с применением прецессионно-нутационной модели IAU2000A [1]. Точность использованных наблюдений характеризуется следующими ошибками мгновенных широт: $\pm 0.18''$ для Пулкова (1904-2004 гг.), $\pm 0.20''$ для Благовещенска (1969-1991 гг.), $\pm 0.18''$ для Китаба (1979-1991). При обработке наблюдений была произведена отбраковка резко выделяющихся значений способом, предложенным З.Малкиным [2].

Неполярные вариации широты вычислялись с использованием координат полюса, полученных международной службой вращения Земли EOP(IERS): C01 (1904-2004 гг.) и C04 (1962-2004гг.) [3] и ряда, полученного в Астрономическом институте Академии наук Чехословакии под руководством Я. Вондрака [4].

Спектральным анализом по методу Диминга [5] были получены оценки амплитуд для различных приливных волн по мгновенным широтам для рядов наблюдений ЗТФ-135 за 1955-1962 гг., Благовещенска за 1969 год и Китаба за 1978-1991 гг. При использовании этого метода неравномерность распределения данных по времени негативного влияния не оказывает. Особенно важно это в случае исследования высокочастотной области спектра.

В **таблице 1** приводятся периоды (P) и амплитуды (A) приливных волн, полученные в результате спектрального анализа изменений широты, а также их значения из [6].

Таблица 1. Характеристики приливных волн, полученных из рядов наблюдений методом Диминга.

[6]	[6]	Пулково		Благовещенск		Китаб	
		1955-1962		1969		1978-1991	
		2784 пар		2574 пар		2210 групп	
Символ приливной волны	P (сут)	P (сут)	A (mas)	P (сут)	A (mas)	P (сут)	A (mas)
S _{sa}	182.622	182.587	0.032	183.458*	0.014	182.596	0.027
M _m	27.5545	27.5520	0.005	27.5518	0.016	27.4543	0.032
M _f	13.6608	13.6626	0.027	13.6656	0.020	13.6717	0.021
Q ₁	1.1195	1.1193	0.016	1.1188	0.008	1.1195	0.038
O ₁	1.0758	1.0759	0.024	1.0763	0.007	1.0757	0.037
M ₁	1.0347	1.0347	0.014	1.0347	0.009	1.0348	0.035
P ₁	1.0027	1.0023	0.036	1.0028	0.053	1.0028	0.042
K ₁	0.9973	0.9974	0.030	0.9973	0.050	0.9972	0.043
J ₁	0.9624	0.9624	0.023	0.9595	0.008	0.9625	0.032
N ₂	0.5274	0.5275	0.051	0.5276	0.037	0.5274	0.039
M ₂	0.5175	0.5173	0.033	0.5176	0.040	0.5175	0.033
S ₂	0.5007	0.5000	0.042	0.5000	0.047	0.5000	0.044
K ₂	0.4986	0.4985	0.035	0.4986	0.046	0.4986	0.027

*S_{sa} было получено по наблюдениям 1969-1991 года, интерполированным на 20 суток.

Кроме этих волн были обнаружены в широтных рядах волны **P_{i1}, psi₁, fi₁, OO₁, S₁, 2N₂, Lambda₂, L₂, T₂, R₂**.

Для оценки комбинаций чисел Лява $\Lambda = 1 + k - l$ использовалось следующее уравнение модели [6]:

$$D\varphi = \Delta\varphi_{\varphi}(t) - \Lambda y(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где

$y(t)$ – полигармонические функции колебаний отвесных линий, взятые из работы [4],

$\varepsilon(t)$ – шумовая компонента,

$\Delta\varphi_{\varphi}(t)$ – стандартно редуцированная величина уклонений широты

$$\Delta\varphi_{\varphi}(t) = (\varphi - \varphi_0) - (x\cos\lambda_0 + y\sin\lambda_0) + d\varepsilon + d\psi$$

При вычислении $\Delta\varphi_{\varphi}(t)$ учитывалось влияние внутрисуточных океанических нагрузок и лунно-солнечных возмущений на ПВЗ.

Оценка числа Λ по всем рядам наблюдений была выполнена двумя способами с использованием метода наименьших квадратов (МНК) с разными вариантами поправок за движение полюса.

Ряд ЗТФ-135 (Пулково) несмотря на достаточно сложные климатические условия отличается высокой устойчивостью и однородностью, особенно в период с 1948 по 1994 годы. Это может быть связано с наличием двух шестилетних периодов наблюдений 1948-1955 и 1955-1961, имеющих высокую плотность наблюдений. Наблюдения широты Благовещенска также характеризуются большой плотностью наблюдений. В связи с хорошими погодными условиями мало пропущенных дней и в течение вечера наблюдается большое количество пар.

Наблюдения широты Китаба даже на интервале в 14 лет 1981-1994 сразу дали приемлемые значения Λ , что безусловно говорит о хорошем качестве ряда. Действительно, проводившееся в свое время сравнение каталога, полученного по наблюдениям на китабской ФЗТ, с каталогом HIPPARCOS, показало очень хорошую систему ФЗТ [7].

В **таблице 2** приведены результаты расчётов двумя разными методами. В первом способе вычисления производились по каждой из приведённых в **таблице 1** приливных волн. При этом для лучшего выделения выбранной волны проводилась редукция исследуемого ряда за наложение остальных волн при допущении тождественности теоретических и наблюдаемых приливных волн.

Таблица 2. Значения числа Λ для отдельных приливных волн, вычисленные для уклонений широты.

Символ приливной волны		Пулково (С04)	Благовещенск (С04)	Китаб (С04)
Годы		1962-2004	1969-1991	1981-1994
число широт		147945	52824	29881
Дисперсия		0,215	0,202	0,244
Метод 1	Ssa	1,216±0,053	1,225±0,068	1,105±0,051
	Mm	1,234±0,053	1,245±0,067	1,149±0,051
	Mf	1,205±0,053	1,205±0,066	1,204±0,053
	Q1	1,220±0,054	1,232±0,066	1,139±0,052
	O1	1,276±0,053	1,219±0,066	1,266±0,054
	M1	1,210±0,054	1,221±0,067	1,121±0,052
	P1	1,472±0,063	0,953±0,070	1,103±0,052
	K1	1,231±0,052	0,148±0,090	1,116±0,052
	J1	1,209±0,053	1,223±0,067	1,129±0,052
	N2	1,217±0,053	1,147±0,068	1,143±0,051
	M2	1,128±0,059	2,288±0,074	2,867±0,063
	S2	0,880±0,063	2,184±0,093	1,423±0,053
	K2	1,183±0,054	1,351±0,072	0,639±0,059
Среднее		1,206±0,052	1,280±0,065	1,261±0,053
Метод 1		1,212±0,054	1,202±0,068	1,172±0,052
Метод 2		1,210±0,054	1,215±0,071	1,131±0,052

Во втором способе выбиралась комбинация приливных волн и вычисления производились одновременно для всех составляющих. Подробные результаты расчётов этим способом приведены в работе [8]. В **таблице 3** приводятся значения Λ , вычисленные как средние значения по различным комбинациям приливных волн для разных поправок за движение полюса [8]. N – число пар широт, используемое в вычислениях, σ – дисперсия ряда.

В работе [4] по ряду наблюдений 1904-1992.0 ЗТФ-135 было получено $\Lambda_{\text{пул}}=1.12$ (± 0.11), $\Lambda_{\text{благ}} = 1.30$ (± 0.11). В наших вычислениях среднее по двум методам $\Lambda_{\text{пул}}=1.21$ (± 0.05), $\Lambda_{\text{благ}} = 1.21$ (± 0.07). Полученный результат согласуется с принятым значением $\Lambda = 1.2$ [1;6], для модели нежесткой Земли.

Таблица 3. Значения числа Λ для уклонений широты ЗТФ-135 в разных решениях ПВЗ методом 2.

Инструмент	Решения ПВЗ	N	σ	Λ
<i>Пулково, ЗТФ-135, (1904-2004)</i>	C01	162481	0.197	1.214±0.078
<i>Пулково, ЗТФ-135, (1904-2004)</i>	C01;C04	164116	0.198	1.211±0.081
<i>Пулково, ЗТФ-135, (1904-2004)</i>	Vondrak	147479	0.197	1.217±0.154
<i>Пулково, ЗТФ-135, (1962-2004)</i>	C04	71650	0.215	1.210±0.054

На рисунках 1, 2 представлены кривые изменения значений числа Λ для моментов времени, являющихся средним для выбранного интервала. Интервал для вычислений всегда состоял из 30000 значений $d\varphi$ (формула 1). Сдвиг интервала составлял 1 год.

На **рисунке 1** представлена динамика изменения оценки числа Λ , вычисленная методом 1, т.е. отдельно по каждой волне с использованием C01 (до 1962 года) и C04. Разрыв в наблюдениях ЗТФ-135 за военные годы был заполнен с помощью моделирования изменений широты методом “Гусеница” для анализа временных рядов с пропусками”, разработанным в СПбГУ[9].

Был получен приближенный результат МНК, интерполированный затем на мгновенную сетку наблюдений, после чего была добавлена теоретическая приливная волна. Выполнялись вычисления числа Λ для данной модели, которая корректировалась таким образом, чтобы Λ находилось в интервале от 1 до 1.3. Некоторые интересные особенности можно отметить по полученным результатам. Например, имеется наличие квазипериодичности с периодом около 20 лет практически во всех построенных нами кривых.

Величина Λ имеет более высокое значение (в среднем от $\Lambda = 1.30$ до $\Lambda = 1.35$) для наблюдений приблизительно до 1950 года. Это хорошо согласуется с приведёнными Н.Н. Парийским вычислениями, выполненными Сугавой по наблюдениям в 1935-1954 гг. на зенит-телескопе в Мицузаве [10]. Полученные вариации комбинации Λ могут отражать не упругие свойства Земли в целом, а региональные особенности места наблюдений или недостатки метода вычислений.

На **рисунке 2** изображена динамика изменения оценки числа Λ (по волнам Mf M2 S2 K1 O1 M1), вычисленная вторым методом с использованием EOP(IERS) C01. Ошибки вычисленных значений колеблются от 0.075 до 0.092. Были выполнены вычисления для разных сочетаний волн, и все они носят нестабильный характер. В работе [8] была приведена динамика изменения оценки числа Λ по волнам M2 и O1, вычисленная методом 2 с использованием C01.

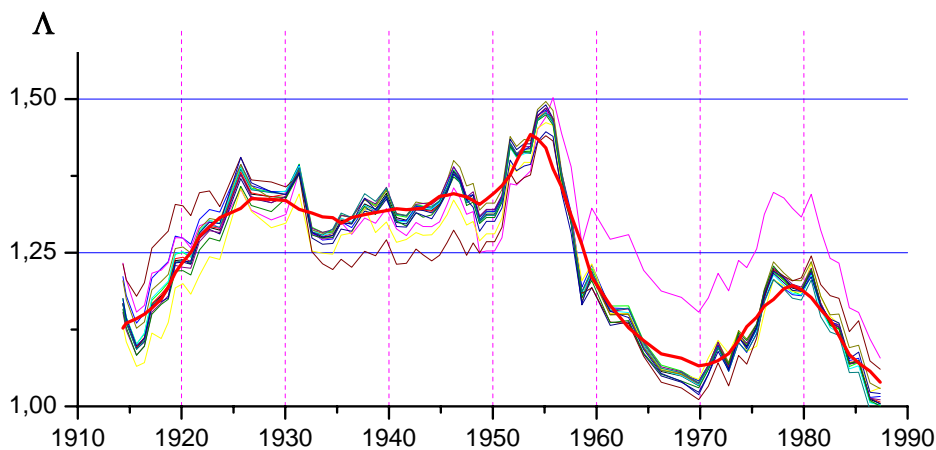


Рис.1. Динамика изменения Λ , полученная методом 1 с использованием модели (модель 1941-1948 гг).

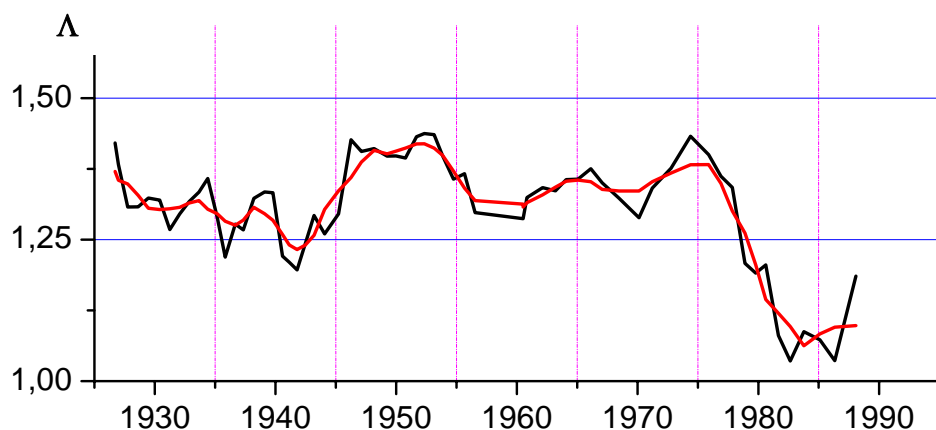


Рис.2. Динамика изменения Λ , полученная методом 2.

Кроме того, из 100-летнего ряда наблюдений ЗТФ-135 удается выделить спектральными методами чандлеровскую и годовую составляющие так же качественно, как и из международных рядов ПВЗ (С01, Вондрак). С помощью динамического Фурье-анализа можно оценить наличие и динамику имеющихся гармоник, но при этом возникают сложности с выделением отдельных квазирегулярных составляющих, спектральная оценка которых даёт лишь усреднённую характеристику. При строгом разделении компонентов появляется возможность исследовать как сами компоненты, так и их взаимосвязь. В рамках данной работы для разделения составляющих в движении полюса использовался модифицированный метод главных компонент, разработанный и программно реализованный в Санкт-Петербургском государственном университете и в дальнейшем называемый SSA [11]. Подробное описание способов использования этого метода для рядов ПВЗ неоднократно приводилось в других работах авторов [12].

С помощью этого метода из ряда среднесуточных наблюдений ЗТФ-135, интерполированного на равномерную сетку шагом 5 суток, была выделена чандлеровская компонента.

Для данной задачи был выбран лаг 24 года на интервале 96 лет (1904-2000). Этим методом при любом лаге надёжно отделяются две гармоники, близкие к чандлеровскому периоду, представленные второй и третьей кривыми на **рисунке 3**. Первая кривая – чандлеровская компонента, являющаяся их суммой. Заметим, что в результате анализа практически всех достаточно продолжительных, точных и подробных рядов ПВЗ вы-

шеописанным методом чандлеровская составляющая колебания полюса уверенно раскладывается на две компоненты [12]. Слабая компонента имеет нестационарный период в пределах 1.1–1.3 года, в то время как период основной компоненты устойчив (1,19 года). В обеих компонентах амплитуды испытывают значительные колебания.

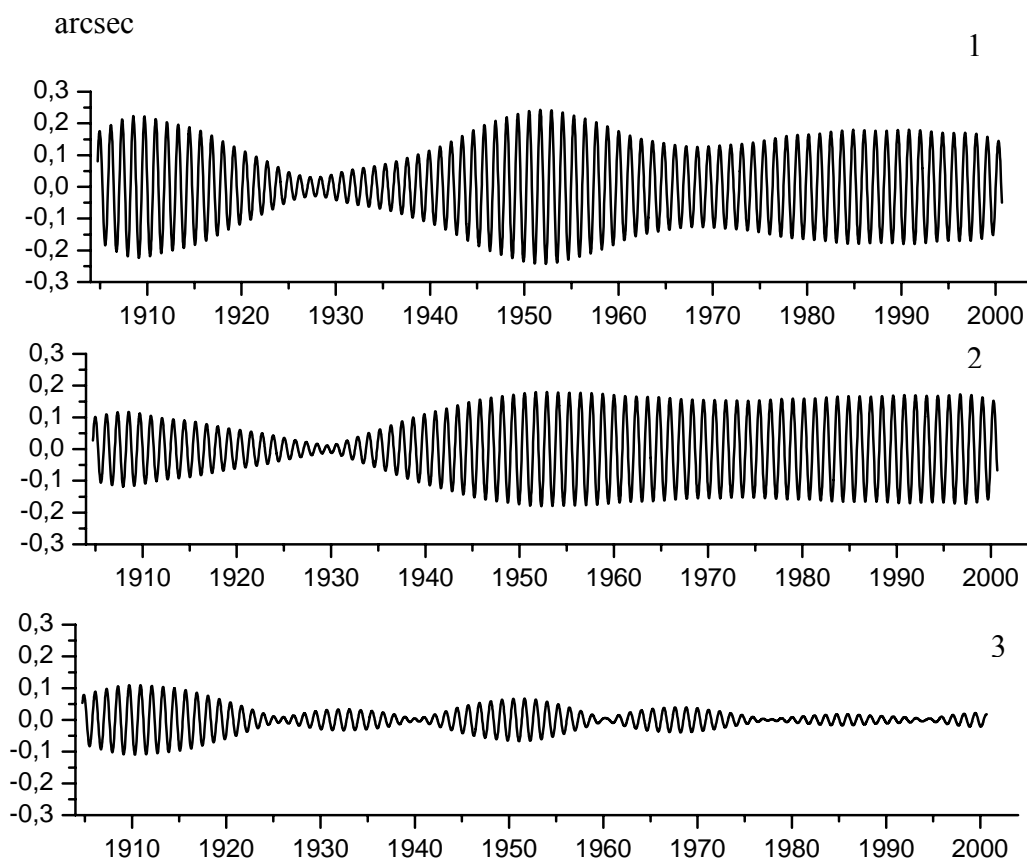


Рис.3. Чандлеровская компонента, полученная из наблюдений широты методом SSA. 1 - чандлеровская компонента (сумма 1-й и 2-й), 2 – 1-я чандлеровская, 3 – 2-я чандлеровская компонента.

Основная компонента со стабильным периодом может быть объяснена в рамках общепринятой теории как результат свободной нутации Земли. Лишним подтверждением этому может служить потеря фазы этого колебания с последующим возбуждением. Природа же слабой компоненты, скорее всего, не являющейся артефактом метода [12], пока остаётся не выясненной.

В заключение отметим, что ряд наблюдений, выполненных в Пулковской обсерватории на ЗТФ-135 в течение XX столетия, несмотря на наличие вынужденного разрыва в 1941-1948 годах, позволяет оценить достоинства и недостатки различных методов анализа, провести исследования динамики различных составляющих движения полюса, а также выполнить оценки для чисел Лява Λ и k .

Из неполярных вариаций столетнего ряда наблюдений широт ЗТФ-135 была получена комбинация чисел Лява $\Lambda = 1 + k - l = 1.21$.

Для реальной модели Земли коэффициент Шида $l = 0.08$ [6], отсюда $k = 0.29$.

Имеется еще один способ, позволяющий из наших наблюдений оценить постоянную Лява k по периодическому чандлеровскому колебанию широты. Средний период чандлеровского колебания, полученный из наблюдений широты Пулкова, равен 435 суткам. Подставив это значение в формулу Лява–Лармюра [13], получим $k = 0.29$. Для

исследуемого ряда наблюдений получается согласованный результат, который соответствует принятым значениям $k = 0.3$, $\Lambda = 1.21$ [6].

Литература

1. *Convention 2000*, IERS, <http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>.
2. *З.М. Малкин*. Об исключении резко выделяющихся измерений. Астрон.Цирк., 1993, №1555, с.33-34.
3. *Bizouard C.*, 2002, (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>).
4. *J. Vondrak, I. Pesek, C. Ron, A. Cepek*, Earth orientation parameters 1899.7-1992.0 In the ICRS based on the HIPPARCOS reference frame, Pub.N87,1998.
5. *Deeming T.J.* Fourier analysis with unequally-spaced data //Astrophys. And Space Sci. - 1976.36.P137-158
6. *Г. Мориц, А. Мюллер*. Вращение Земли: теория и наблюдения, Киев, Наукова думка, 1992, 511 с.
7. *Е.А. Литвиненко*. Неполярные изменения широты по наблюдениям на ФЗТ-2 в Китае. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. С-Петербург, 1998.
8. *Н.О. Миллер, Е.Я. Прудникова*. Приливные вариации из столетнего ряда наблюдений широты на ЗТФ-135, Изв. ГАО, №217, с.415-419, 2004.
9. *Н. Голяндина, Е. Осипов*, Метод "Гусеница"-SSA для анализа временных рядов с пропусками. В сб. Математические модели. Теория и приложения, СПб, НИИХ, 2005.
10. *Н.Н. Парийский*. Геофизика. Избранные труды. – М.:ОИФЗ РАН, 2000 -236с.
11. *Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.)*, Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница», 1997, СПбГУ, 308 с.
12. *М.В. Воротков, В.Л. Гориков, Н.О. Миллер, Е.Я. Прудникова*. Исследование основных составляющих в движении полюса земли - Изв.ГАО, №216, 2002,с.406-414.
13. *К.А. Куликов*. Изменяемость широт и долгот. – М.: Изд.физ-мат. лит., 1962. – 400 с.

ON THE TIDAL VARIATIONS OBTAINED WITH LATITUDE OBSERVATIONS

Miller N.O.¹, Litvinenko E.A.¹, Prudnikova E.Ja.¹, Sokolova N.V.²

¹Pulkovo Observatory

²BLL

Summary

Latitude observations obtained with the zenith-telescopes ZTF-135 (Pulkovo) and ZTL-180 (Blagoveschensk) and photographic zenith tube PZT (Kitab) were used for the investigations of non-polar latitude variations. The accuracy of modern polar coordinate systems permits to considerate nonpolar variations as free from smoothing effect. Using the Deeming method from non-equally spaced data the tidal short-periodical components were determined and their probable connection with atmospheric and geophysical processes was estimated. The Love numbers combination $(1 + k - l)$ with its dynamic was obtained from diurnal variations of the vertical. Love number k was also estimated.

ШИРОТА ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ЗЕНИТ-ТЕЛЕСКОПАХ ЗТФ-135, ЗТЛ-180 И НА БОЛЬШОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КРУГЕ

Наумов В.А., Прудникова Е.Я.

По наблюдениям звезд на двух Пулковских зенит-телескопах и большом вертикальном круге Эртеля, переведенным на систему HIPPARCOS и исправленным за вековое движение полюса и движение литосферных плит, выведено средневзвешенное значение широты центра Круглого зала Пулковской обсерватории с ошибкой 0.01".

В известиях ГАО РАН № 217 опубликованы две статьи [1,2], посвященные определениям широты центра Круглого зала Пулковской обсерватории по столетнему ряду наблюдений на зенит-телескопе ЗТФ-135 и по абсолютным наблюдениям пулковских рядов склонений звезд на Большом вертикальном круге (БВК). Получены значения:

$$\begin{aligned}\varphi &= 59^{\circ}46'18.660'' \\ &\pm 0.009'', \\ \varphi &= 59^{\circ}46'18.627'' \\ &\pm 0.023''\end{aligned}$$

соответственно.

В этих статьях использована следующая формула приведения широты на эпоху J2000.0:

$$\varphi_{2000} = \varphi_{T_i} - \Delta\varphi_{T_i} + \Delta\varphi_{2000} + \Delta\varphi^1_{T_i}.$$

Здесь φ_{T_i} - значение широты, полученное на эпоху наблюдений T_i на зенит-телескопах или при создании каталога на эпоху T_i при наблюдениях на БВК, $(-\Delta\varphi_{T_i} + \Delta\varphi_{2000})$ - перевод значений средней широты с эпохи T_i на J2000.0 за вековое движение полюса (за изменение средних координат полюса X, Y), которое вычисляется по формуле:

$$\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i} = (X_{2000} - X_{T_i})\cos\lambda + (Y_{2000} - Y_{T_i})\sin\lambda,$$

где X_{2000} и Y_{2000} - средние координаты полюса на эпоху J2000.0, X_{T_i} и Y_{T_i} - средние координаты полюса на эпохи наблюдений; долгота Пулкова при этих вычислениях принята отрицательной. Мгновенные координаты X, Y взяты из [3]: EOP C01 в системе IERS на интервале с 1846г до настоящего времени (вторая редакция). $\Delta\varphi^1_{T_i}$ - поправка широты Пулкова за тектоническое движение плит Земли, вычисленная по геофизической модели Nuvel-1 NNR и равная $+0.034''$ в столетие [4,5]. Принимаем $\Delta\varphi^1_{2000} = 0$, тогда $\Delta\varphi^1_{T_i} = +0.034''(2000 - T_i)$.

В известиях ГАО РАН № 216 [6] опубликованы результаты исследований наблюдений широты на зенит-телескопе ЗТЛ-180, где широта павильона ЗТЛ-180 представлена в виде:

$$\begin{aligned}\varphi_z &= 59^{\circ}46'15.446'' + 0.076'' \text{ sec}^2 z. \\ &\pm 0.033'' \pm 0.016''\end{aligned}$$

Это значение получено при использовании склонений звезд исходных каталогов и может считаться лишь предварительным, поэтому были выполнены дополнительные

вычисления. Получены новые значения широт по зонам наблюдений с поправкой за приведение склонений наблюдаемых звезд на систему HIPPARCOS. Вновь вычислено значение широты и коэффициента рефракционной поправки вида $a \text{ sec}^2 z$, который оказался равным

$$a = + 0.055'' \pm 0.014''.$$

Отметим, что как значение коэффициента, так и его ошибка уменьшились по сравнению с величинами, использованными в [6].

Затем получены новые значения широт и их среднеквадратических отклонений (СКО) по зонам зенитных расстояний с новым значением коэффициента рефракционной поправки. Средневзвешенное значение широты павильона ЗТЛ-180, вычисленное с весами обратно пропорциональными СКО, оказалось равным $59^\circ 46' 15.483'' \pm 0.020''$ на эпоху 1983.0. Поправка за перевод на эпоху J2000.0 за вековое движение полюса и плит составляет $- 0.004''$, следовательно, широта павильона ЗТЛ-180 на эпоху J2000.0 равняется $59^\circ 46' 15.479'' \pm 0.020''$. Необходимо также иметь в виду, что при приведении значения широты Пулковской обсерватории к Центру круглого зала по наблюдениям на ЗТЛ-180 используется поправка $\Delta\varphi(\text{цкз-павильон ЗТЛ 180}) = +3.156''$.

В итоге по наблюдениям на трех инструментах имеем **широту ЦКЗ ГАО РАН**

по наблюдениям на зенит-телескопе ЗТФ-135:	$\varphi = 59^\circ 46' 18.660''$ $\pm 0.009''$,
по наблюдениям на зенит-телескопе ЗТЛ-180:	$\varphi = 59^\circ 46' 18.635''$ $\pm 0.020''$,
по наблюдениям на БВК:	$\varphi = 59^\circ 46' 18.627''$ $\pm 0.023''$.

Для вычисления средневзвешенного значения широты круглого зала Пулковской обсерватории по этим трем результатам и его ошибки использовались формулы:

$$\sigma_{[\varphi]} = \sqrt{[1/p(n-1)] \sum p_i (\varphi_i - [\varphi])^2}, \quad p_i = \sigma_1^2 / \sigma_i^2 \quad p = \sum p_i.$$

В результате вычислений имеем средневзвешенное значение широты центра круглого зала Пулковской обсерватории и среднюю ошибку средневзвешенного после уравнивания:

$$\varphi = 59^\circ 46' 18.652'' \pm 0.009''.$$

Учитывая замечание, высказанное в [1] на стр. 403, о возможном влиянии ошибок собственных движений звезд системы HIPPARCOS, примем ошибку результата $\pm 0.01''$, получаем окончательно:

$$\varphi = 59^\circ 46' 18.65'' \pm 0.01''.$$

Литература

1. *Л.Д. Костина, Н.О. Миллер В.А. Наумов, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова, И.А. Зыков.* Изв. ГАО РАН, № 217, С-Петербург, 2004, с.402-405.
2. *Наумов В.А.* Изв. ГАО РАН, № 217, С-Петербург, 2004, с.420-425.
3. <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
4. TECNIKAL NOTE 21
5. *Y. Vondrak, C. Ron, I. Pesec,* A. Sepec. Earth orientation parameter 1899.7-1992.0 in the ICRS based on the Hipparcos reference frame. Pub. № 87,1998.

6. *Наумов В.А., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.* Изв. ГАО РАН, №216 С-Петербург, 2002, с. 227-234.

**THE LATITUDE OF PULKOVO OBSERVATORY
FROM OBSERVATIONS WITH ZENITH-TELESCOPES ZTF-135 AND ZTL-180
AND BIG VERTICAL CIRCLE**

Naumov V.A., Prudnikova E.Ja.

Summary

From the latitude observations with two Pulkovo zenith-telescopes and big Ertel vertical circle transferred to the HIPPARCOS system with addition of secular polar motion and motion of lithospheric plates the latitude of the center of the Pulkovo Round hall with mse 0.01 "was obtained.

АСТРОФИЗИКА
И
ФИЗИКА СОЛНЦА

РЕЗУЛЬТАТЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАДИОИСТОЧНИКА J0433+0521 ПО VLBA+ ДАННЫМ 2002 г. С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ “VLBIImager”

Байкова А.Т., Пушкарев А.Б.

Представлены карты радиоисточника J0433+052 по VLBA+ наблюдениям на частоте 8.4 ГГц в период с января по сентябрь 2002 г. Данные получены из архива NRAO. Обработка данных произведена с использованием пакета программ “VLBIImager” развиваемого в настоящее время в Пулковской обсерватории. Карты получены на основе метода самокалибровки с применением метода максимальной энтропии. Построены гауссовы модели структуры источника. Прослежена эволюция компонент джета, для которых вычислены видимые скорости движения.

Введение

В настоящее время в Пулковской обсерватории ведется работа по развитию пакета программ “VLBIImager”, разработанного одним из авторов статьи в рамках Российского РСДБ-проекта “КВАЗАР” [1] для картографирования внегалактических радиоисточников с высоким угловым разрешением, достигающим долей миллисекунды дуги.

Уникальность пакета программ “VLBIImager”, по сравнению с такими известными пакетами картографирования как AIPS и DIFMAP, заключается в том, что он основан на методе максимальной энтропии (ММЭ) и его модификациях [2]. Кроме того, пакет включает бесфазовые методы картографирования, которые безальтернативны в случае отсутствия какой-либо фазовой информации о функции видности [3,4]. В настоящее время пакет программ дополнен новыми программами самокалибровки и гибридного картографирования, а также методами подгонки результатов восстановления гауссовыми моделями.

Преимущества метода максимальной энтропии, одним из которых является гладкость решения, хорошо известны [5]. А такой недостаток стандартного ММЭ как смещенность решения преодолен благодаря разработке обобщенного метода максимальной энтропии.

Целью данной работы является астрофизическое картографирование с использованием пулковского пакета программ “VLBIImager” внегалактического радиоисточника, показывающего сложную протяженную структуру на масштабах десятков миллисекунд дуги и исследование кинематики отдельных компонент структуры на длительном интервале времени. В качестве такого источника была выбрана радиогалактика J0433+0521, представляющая собой хорошо известный сверхсветовой источник с протяженным оптически тонким, слабо осциллирующим джетом. Так, наблюдения на длине волны 18 см позволяют проследить джет вплоть до 200 миллисекунд дуги (мсд) [6].

1. Данные VLBA+ наблюдений

Общие сведения об избранном для картографирования радиоисточнике приведены ниже в таблице 1.

Данные наблюдений были получены из архива NRAO. Наиболее общая информация о данных наблюдений, охватывающих пять эпох 2002 г., представлена в таблице 2.

Заполнения UV-плоскости и радиальное распределение амплитуды функции видности представлены на рис.1 (левая и правая колонки соответственно).

Таблица 1. Общие сведения о радиоисточнике J0433+0521.

другое имя	прямое восхождение (J2000)	склонение (J2000)	плотность полного потока	оптическая идентификация	красное смещение
3C120	4h 33m 11.0955s	+5° 21' 15.62"	3.8 Ян	галактика	0.33

Таблица 2. Данные VLBA+ наблюдений J0433+0521.

N	Дата/ эпоха	Частота ГГц	Поляризация	Число станций	Наименование станций	Число измерений
1.	16.01.2002 2002.044	8409.97	RR-POL	18	BR,FD,GC,HN,KP,LA,MC, MK,NL,NY,ON,OV,PT,SC, TS,WF,KK,WZ	4287
2.	06.03.2002 2002.178	8409.97	RR-POL	18	BR,FD,GC,HN,KP,LA,MC, MK,NL,NT,ON,OV,PT,SC, TS,WF,KK,WZ	4784
3.	08.05.2002 2002.351	8409.97	RR-POL	17	AR,BR,FD,GC,HN,HN,KP, LA,MA,MC,NL,OV,PT,SC, WF,KK,WZ	5682
4.	24.07.2002 2002.562	8409.97	RR-POL	15	BR,GC,HN,KP,LA,MA,MK, NL,NY,OV,PT,SC,TC,WF, KK	16556
5.	27.09.2002 2002.740	8409.97	RR-POL	15	BR,FD,GC,KK,KP,LA,MA, MC,MK,NL,ON,OV,PT,TS, WZ	1186

2. Методы обработки

Для преодоления фазовой неопределенности функции видности использован метод самокалибровки, алгоритм которого в наиболее общем виде описан в [5]. В операции деконволюции карт использован метод максимальной энтропии в форме Шеннона, основные модификации которого подробно рассмотрены в [2].

3. Результаты обработки

Ниже на рис. 2 показаны результаты картографирования источника для пяти эпох 2002 г., причем, в левой колонке показаны ММЭ-карты, а в правой – гауссовы приближения карт, полученные методом максимального правдоподобия. На контурных картах уровни изолиний составляют 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 90% от пикового значения. Параметры построенных карт приводятся в таблице 3, а на рис. 3 показаны центры гауссовых компонент. Карты показывают хорошее согласие с результатами обработки других авторов с использованием пакетов AIPS и DIFMAP [7]. Для примера, карта, полученная для данных первой эпохи (2002.044) Пушкаревым А.Б. с использованием пакета DIFMAP, приводится на рис.4. Как видно, ММЭ- и CLEAN- изображения на эту эпоху очень близки.

Параметры гауссовых компонент моделей приводятся в таблице 4. На рис.3 цифрами указаны номера гауссовых компонент в соответствии с таблицей 4. Анализ гауссовых моделей показывает движение компонент джета, которое для каждой компоненты отражено на рис.5, где цифрами над линиями указаны номера компонент. Центральная (первая) компонента, представляющая собой ядро источника, практически стоит на месте, поэтому ее движение на рисунке не показано. Ошибки определения координат компонент были оценены методом Монте-Карло путем варьирования отсчетов спектра источника в пределах заданных ошибок измерения функции видности. Верхняя оценка ошибок составила примерно ± 0.1 мсд.

Таблица 3. Параметры карт в зависимости от эпохи.

Эпоха	Размер чистого луча (мсд×мсд)	Размер карты мсд	Пиковый поток (Ян/луч)	Полный поток (Ян)
2002.044	1.71×0.63,-5.63°	128x128x0.2	0.48	1.88
2002.178	1.93×0.66,-1.88°	128x128x0.2	0.64	2.39
2002.351	1.75×0.94,10.80°	128x128x0.2	1.09	2.52
2002.562	1.65×0.82, 5.53°	128x128x0.2	0.91	2.07
2002.740	1.50×0.80, 0°	128x128x0.2	0.79	1.71

Таблица 4. Параметры гауссовых моделей источника в зависимости от эпохи

Эпоха	N комп.	Плотность потока (Ян)	Расстояние от центра (мсд)	Позиционн. угол (°)	Большая ось (мсд)	Малая ось (мсд)	Позиционн. угол (°)
2002.044	1	0.454	0.01	21.11	1.72	0.76	-3.86
	2	0.234	4.26	-121.22	1.86	1.06	7.35
	3	0.146	1.35	-118.76	2.04	1.42	26.96
	4	0.056	8.51	-112.68	2.54	1.36	-19.71
	5	0.053	3.06	-126.63	1.62	0.58	173.35
	6	0.048	5.55	-116.37	2.26	1.81	51.11
2002.178	1	0.543	0.02	4.87	1.95	0.70	-0.75
	2	0.353	4.53	120.61	2.20	1.14	10.93
	7	0.213	0.51	-105.12	1.93	0.94	2.15
	3	0.113	1.76	-112.67	2.52	0.93	183.59
	5	0.087	3.09	-121.83	2.08	0.58	359.13
	6	0.067	5.74	-113.46	2.09	1.34	-23.85
	4	0.063	8.72	-112.06	2.44	1.55	-18.54
2002.351	1	1.080	0.01	-135.66	1.79	1.06	15.71
	2	0.257	4.81	-122.08	1.98	1.14	21.59
	6	0.083	5.95	-118.45	2.92	1.49	57.98
	3	0.057	2.37	-126.75	2.48	1.14	-21.45
	4	0.055	8.68	-112.76	2.94	1.32	-20.63
2002.561	1	0.861	0.00	33.26	1.71	0.95	11.15
	7	0.283	0.72	-120.34	1.64	0.79	2.31
	2	0.252	5.30	-122.44	1.77	1.09	15.09
	5	0.070	3.22	-126.08	1.83	1.15	22.30
	4	0.025	7.53	-129.57	2.09	0.88	9.60
2002.740	1	0.757	0.01	57.27	1.57	0.96	9.31
	7	0.373	0.85	-121.08	1.71	0.82	4.54
	2	0.139	5.32	-122.02	1.57	0.93	0.57
	6	0.046	7.48	-126.12	1.59	1.47	123.86

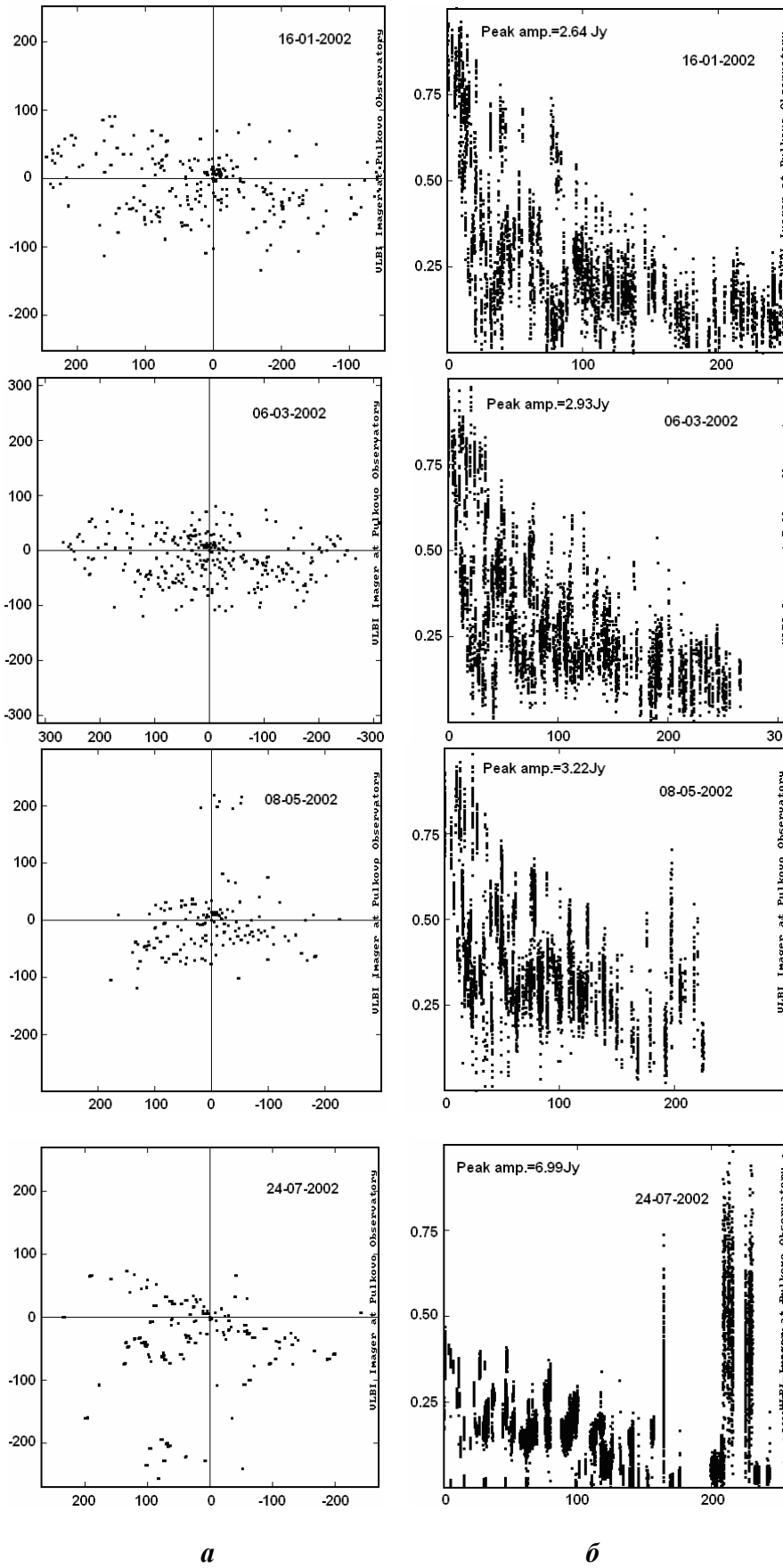


Рис.1.

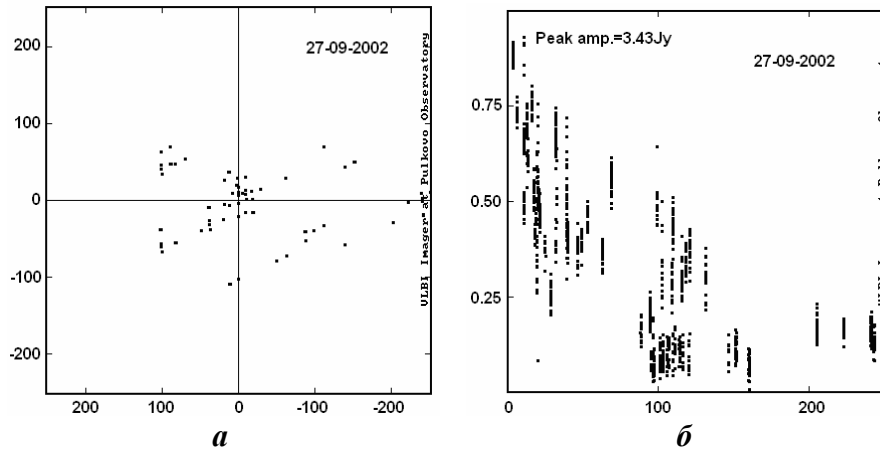


Рис.1. Продолжение.

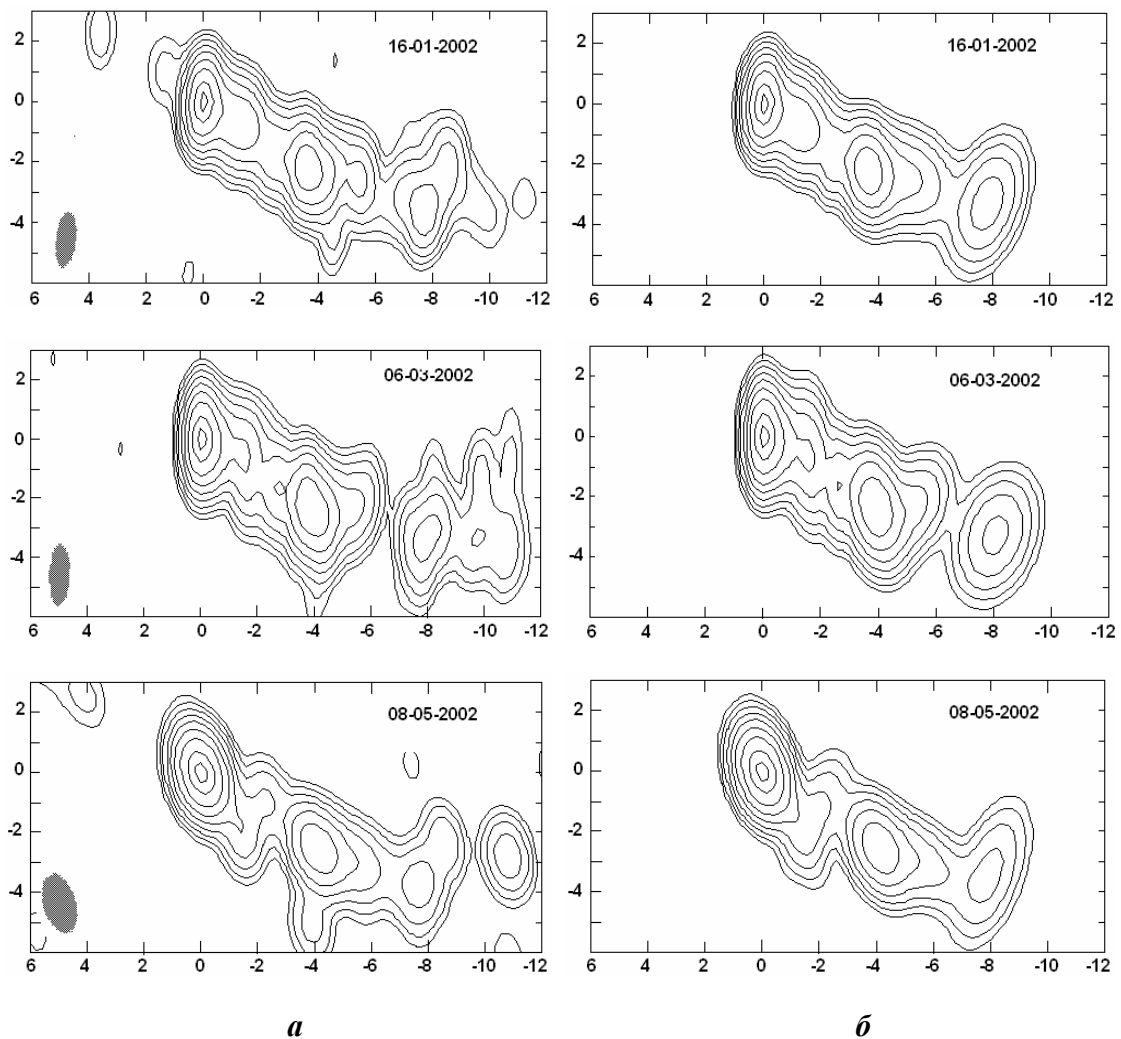


Рис.2.

ММЭ-изображения (а) и их гауссовы приближения (б).

Заполнения UV -плоскости (а) и зависимость амплитуды функции от длины базы (б). На рисунках (а) по горизонтальной и вертикальной осям отложены величины пространственных частот U и V соответственно, в единицах 10^6 длин волн. На рисунках (б) по горизонтальной оси отложены длины баз в единицах 10^6 длин волн, по вертикальной оси – относительные величины амплитуды функции видности. Пиковые значения функции видности приведены в верхнем левом углу.

Таблица 5. Видимое движение компонент джета.

N компонента	2	3	4	5	6	7
скорость (мсд/год)	1.624	3.332	0.516	0.230	2.835	0.470
скорость (с) (Λ CDM, $H=75$ км/с/Мпс)	3.376	6.927	1.073	0.478	5.894	0.977

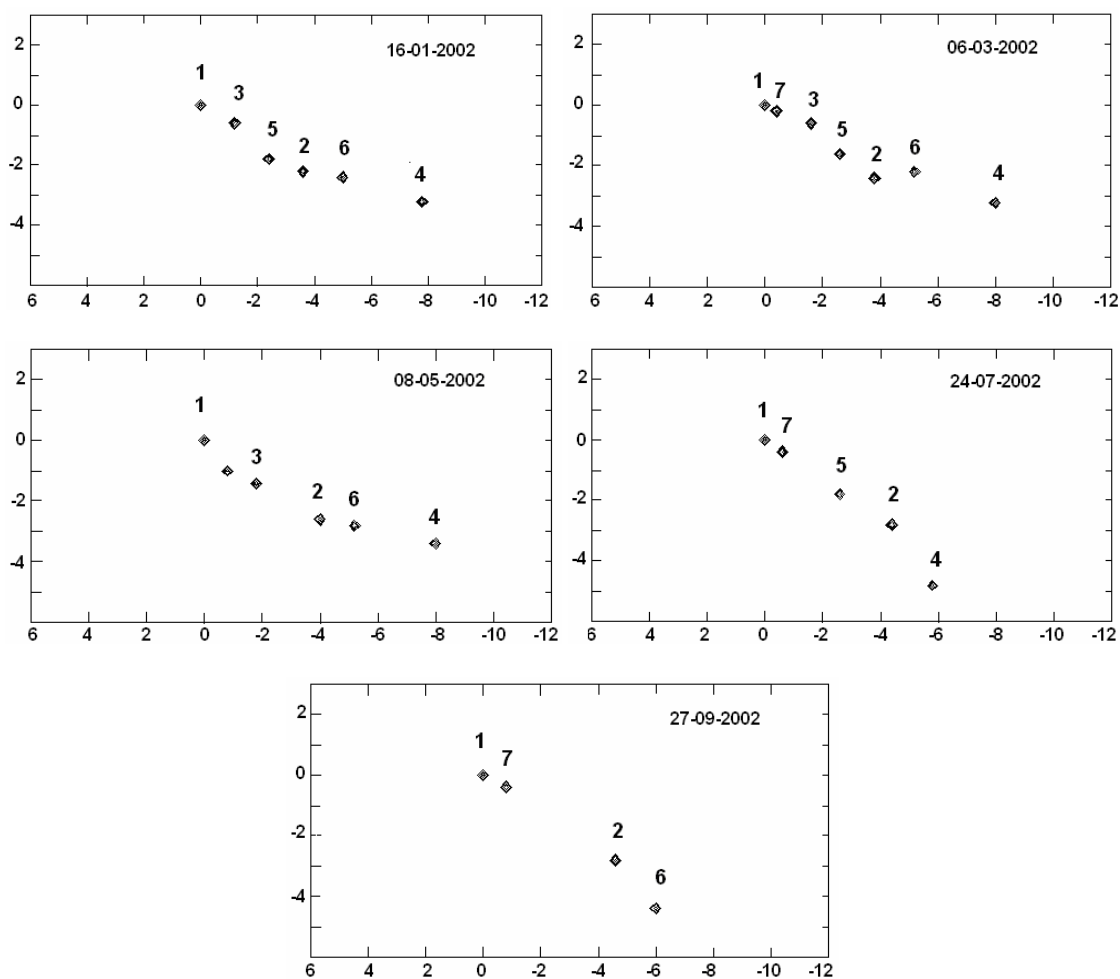


Рис.3.
 Центры гауссовых компонент
 (цифрами обозначены их номера).

Clean RR map. Array: BFGGHLMMNNOOPSTWKW
 J0433+0521 at 8.646 GHz 2002 Jan 16

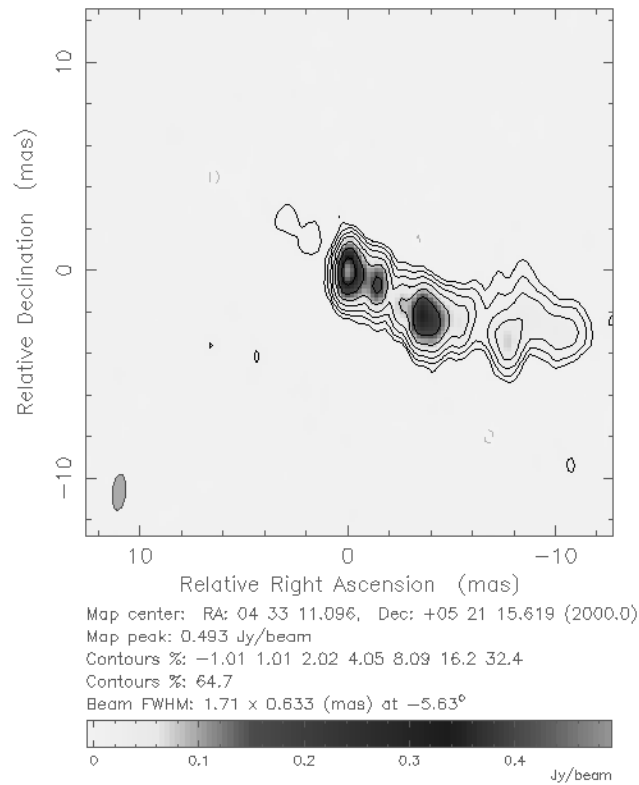


Рис.4.
 CLEAN-карта, полученная с использованием
 пакета программ DIFMAP.

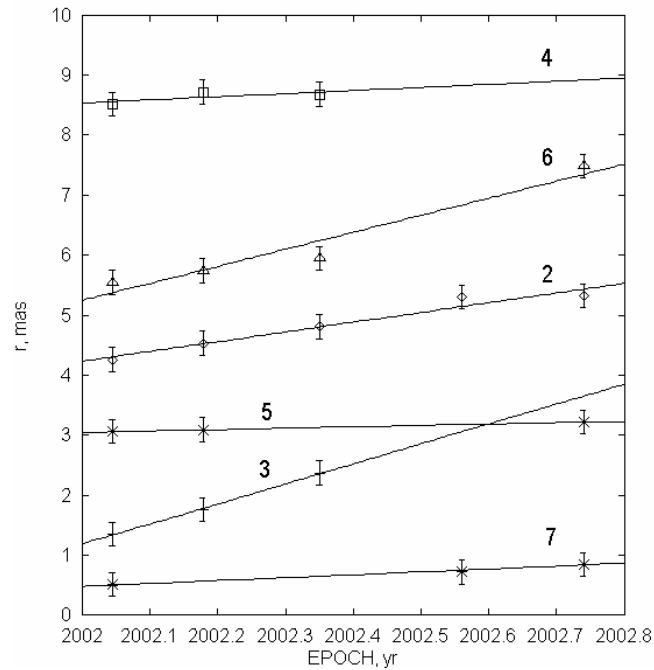


Рис.5.
 Видимое движение компонент джета
 (цифрами указаны номера компонент).

Результаты подгонки гауссовыми моделями позволяют оценить видимую скорость движения компонент джета. Значения скорости движения в единицах мсд/год и в скорости света, вычисленные для стандартной космологической модели с холодной темной материи (Λ CDM) при постоянной Хаббла $H = 75$ км/с/Мпк, приводятся в таблице 5.

Заключение

На примере радиисточника J0433+521 продемонстрирована работа пулковского пакета программ для астрофизического РСДБ-картографирования “VLBIImager”, ядро которого составляют метод максимальной энтропии и его модификации. Построены карты радиисточника по VLBA+ данным на частоте 8.4 ГГц за период наблюдений с января по сентябрь 2002 г. (всего пять эпох). Полученные карты хорошо согласуются с опубликованными в литературе. Исследована структура радиисточника. Подгонка ММЭ-карт гауссовыми моделями позволила проследить эволюцию основных компонент джета радиисточника и оценить сверхсветовые скорости их движения.

Литература

1. **Байкова А.Т.** Сообщения ИПА РАН, N 120 (1998).
2. **Байкова А.Т.** Сообщения ИПА РАН, N 58 (1993).
3. **Байкова А.Т.** Письма в АЖ, Том 30, N 4, 253-267 (2004).
4. **Байкова А.Т.** Астрономический журнал, Том 82, N 12, 1087-1098 (2005).
5. *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II.* Ed by G.B. Taylor, C.L. Carilli, and R.A. Perley, ASP Conference Series, Vol. 180 (1999).
6. **Kellermann K.I. et al.** Astron. J., Vol. 115, 1295-1318 (1998).
7. <http://rorf.usno.navy.mil/RRFID/>

MAPPING OF RADIO SOURCE J0433+0521 ON VLBA+ OBSERVATIONS OF THE YEAR 2002 USING THE “VLBIImager” SOFTWARE PACKAGE

Baikova A.T., Pushkarev A.B.

Summary

The maps of radio source J0433+052 obtained using VLBA+ observations at 8.4 GHz for the period January–September of 2002 (five epochs) are presented. The data were obtained from the NRAO archive. Data processing was carried out using “VLBIImager” software package which is currently under development at the Pulkovo Observatory. The maps were obtained on the basis of self-calibration and the maximum entropy method. Also, model fitting was performed. Superluminal motion of jet components was estimated.

АСИММЕТРИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СОЛНЕЧНЫХ МГД УДАРНЫХ ВОЛН

Гриб С.А.¹, Пушкарь Е.А.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулково, СПб, 196140, Россия

²Московский государственный индустриальный университет, Москва, 109068, Россия

Рассматривается магнитогидродинамическое наклонное столкновение солнечной быстрой ударной волны, представляющей типичный нестационарный сильный разрыв в солнечной короне и в солнечном ветре, с фронтом стоячей носовой ударной волны перед областью, являющейся планетарной магнитосферой типа земной магнитосферы. Обращается внимание на качественную и количественную (по величине концентрации протонов) асимметрию типа утро-вечер или заря-сумерки преломленных в переходный слой разрывов, возникающую в плоскости эклиптики с разных сторон по отношению к линии Земля-Солнце.

Подчёркивается экспериментальное подтверждение обсуждаемых результатов известной в космической физике газокINETической картиной ударного фронта и непосредственными измерениями концентрации заряженных частиц, проведенными на космических аппаратах WIND и ISEE 3.

Введение

Солнечная и солнечно-земная физика утверждают, что динамическое состояние Солнца и солнечной плазмы создают множество нелинейных магнитогидродинамических (МГД) возмущений, связанных с различными разрывными структурами. К этим структурам можно отнести, прежде всего, нестационарные МГД сильные разрывы типа межпланетных ударных волн и вращательных разрывов, так же, как и стационарные тангенциальные разрывы. Указанные разрывы обычно сопровождают (опережая или входя во внутреннюю структуру) корональные выбросы массы, вспышечные потоки солнечной плазмы, магнитные облака и сбалансированные по давлению структуры [Burlaga, 1995].

Важно обратить внимание на то, что солнечные сильные разрывы по мере движения через солнечный ветер в направлении к магнитосфере Земли и к границе гелиосферы, меняя свою интенсивность за счёт затухания в потоке плазмы, испытывают также различного рода МГД взаимодействия, что влияет, в частности, на приход межпланетной ударной волны на околоземную орбиту [Smith et al., 2001]. При этом затухание межпланетных ударных волн численно описывается или моделью Седова (STOA), или параметрически моделью ISPM [Smith et al., 2001], что неплохо согласуется с данными наблюдений. Существенным является то, что применяемые численные модели дают близкие результаты по определению времени прибытия межпланетной ударной волны [Dryer et al., 2001]. Представляется целесообразным также, несмотря на одномерность применяемой аналитической модели, использовать обобщенный закон Крюссара-Ландау, основанный на обобщении решения Римана, для описания затухания солнечных ударных волн [Гриб, 1968], в силу важности использования в космической физике точных МГД моделей [Пушкарь, 2001].

Нормальное, или лобовое, взаимодействие быстрой МГД ударной волны солнечного ветра с системой головная ударная волна - магнитосфера Земли рассматривалось в 70-х годах [Гриб, 1973; Grib et al., 1979]. При этом использовался метод пробного расчёта для решения задачи о распаде произвольного разрыва с учётом нормальной ком-

поненты ММП и впервые было доказано возникновение быстрых волн разрежения вследствие столкновения солнечной быстрой ударной волны с магнитопаузой, выравнивающих параметры потока плазмы в магнитопереходном слое. Этот результат с использованием экспериментальных данных был подтвержден группой Расселла [Zhuang, Russell et al., 1981].

Затем [Grib, 1982] было рассмотрено лобовое взаимодействие ударной волны солнечного ветра с системой головная ударная волна - магнитосфера Земли в присутствии наклонного ММП. Было показано возникновение волновой структуры, состоящей из преломлённых быстрых и медленных ударных волн, видоизмененной быстрой головной волны с сопутствующей ей медленной обратной волной разрежения и контактного разрыва между ними.

Кроме того, в 2001 году [Paularena et al., 2001] с использованием МГД численного моделирования рассматривалось стационарное обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли и недавно [Charman, Cairns, 2004] обращалось внимание на экспериментально наблюдаемую азимутальную асимметрию фронта носовой или головной ударной волны наряду с асимметрией утро-вечер для магнитопаузы [Dmitriev et al., 2004].

Проблема наклонного взаимодействия часто наблюдаемых межпланетных сильных разрывов (тангенциальных и вращательных, быстрых и медленных ударных волн), сопровождающих корональные извержения или выбросы массы, магнитные облака и магнитные дыры, в общем виде ещё не решена, и рассмотрение достаточно типичного наклонного взаимодействия ударных волн солнечного ветра с головной ударной волной перед планетарной магнитосферой или перед магнитным облаком для обратной волны представляет значительный интерес.

Сильные разрывы в солнечном ветре (тангенциальные и вращательные разрывы, ударные волны) в значительной мере влияют на состояние геомагнитного поля и могут вызывать сжатие магнитосферы Земли и появление внезапных импульсов SI^+ или приводить к внезапному началу геомагнитных бурь SSC [Dryer, 1975]. Взаимодействие межпланетных ударных волн с системой головная ударная волна – магнитопауза рассматривалось многими авторами в одномерном приближении. Однако двумерность и наклонность взаимодействия между сильными разрывами представляются иногда существенными для правильного понимания происходящих процессов [Burlaga, 1995; Бармин, Пушкар, 1991] и могут приводить [Grib, Pushkar, 1992; Пушкар и др., 1991] к новым эффектам при произвольной ориентации магнитного поля. Попробуем оценить их вклад с физической точки зрения. Будем использовать магнитогидродинамическое численное решение задачи наклонного столкновения сильных разрывов типа быстрых ударных волн с учетом динамических условий Рэнкина–Гюгонио [Гогосов, 1961; Пушкар и др., 1991] в приложении к околоземному космическому пространству, с учетом реальных космических данных, в отличие от чисто абстрактных условий [Пушкар и др., 1991; Бармин, Пушкар, 1992].

Указанная проблема была недавно выделена как одна из актуальных проблем геокосмоса [Гриб, 2006; Самсонов, 2006].

Метод решения и его использование

Рассмотрим падение плоского фронта межпланетной быстрой ударной волны, движущейся по потоку солнечного ветра, на фронт головной ударной волны перед планетарной магнитосферой типа магнитосферы Земли. Будем учитывать наклон межпланетного магнитного поля (ММП) к линии Земля–Солнце и соответственно к скорости солнечного ветра, представляющий величину из диапазона 45-56 градусов (по направлению к Солнцу) и примем его за 135 градусов в гелиоцентрической системе координат [Foukal, 2004] (рис.1). Предположим справедливость теоремы компланарности ММП

для всех ударных фронтов, и будем считать, что векторы нормалей к фронтам ударных волн, ММП и скорости солнечного ветра лежат в одной плоскости, т.е. задача – плоскополяризованная.

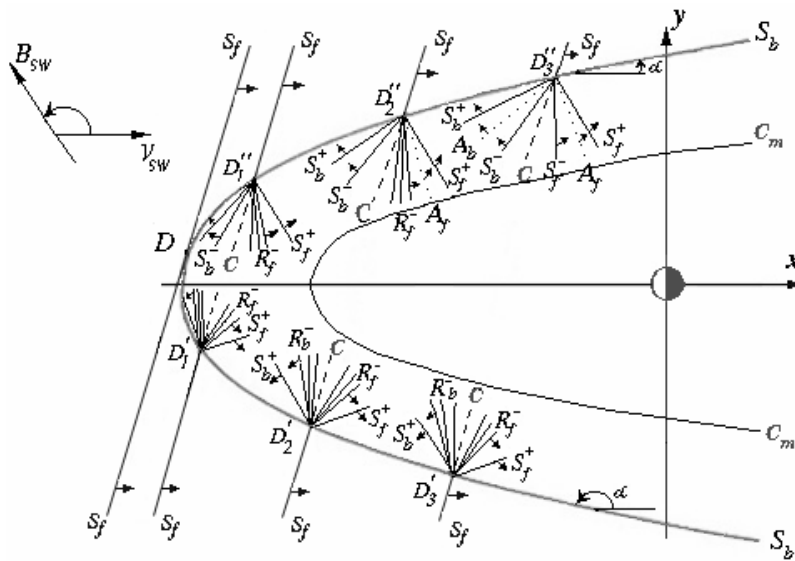


Рис.1. Перемещение ударной волны солнечного ветра S_{fa} вдоль головной ударной волны S_b , C_m - магнитопауза. S_f - последовательные положения S_a и точки пересечения с флангами S_b .

Числа Маха солнечного ветра и S_f равны: $M_{SW} = 8$, $M_f = 3$, $\psi_B = 135^\circ$, $\beta = 1$.

Каждый из взаимодействующих межпланетных сильных разрывов (ударная волна или альфвеновский разрыв) создаёт за собой некоторое состояние, которое определяется его интенсивностью. При пересечении сильных разрывов в пространстве возникает разрыв между значениями физических величин (давление, плотность частиц, объёмная скорость, индукция магнитного поля) за взаимодействующими скачками. В отличие от лобового столкновения сильных разрывов, когда они сталкиваются под нулевым углом, при косом столкновении можно ввести систему координат, связанную с точкой пересечения, в которой задача становится стационарной.

Рассматриваемая задача является автомодельной, поскольку она не содержит характерного линейного размера. Решение строится в виде двух комбинаций автомодельных стационарных решений, расходящихся от точки пересечения исходных сильных разрывов: быстрых ударных волн S^+ или простых волн разрежения R^+ , альфвеновского или вращательного разрыва A и медленных волн S^- или R^- . Состояние за медленными волнами разделено контактными разрывом, при переходе через который остаются непрерывными все величины, кроме плотности или концентрации плазмы, угол наклона которого и скачок концентрации протонов должны быть определены в процессе решения.

Для численного решения использовался пакет программ, реализующий обобщенные МГД поляры [Коган, 1959; Пушкар, 1979] с численным расчётом по модифицированному методу Ньютона.

В рамках магнитогидродинамической модели исследуем взаимодействие ударного возмущения солнечного ветра с головной ударной волной S_b , расположенной перед магнитосферой Земли. Соответственно рассматриваем поведение фронта быстрой ударной волны S_f , движущегося от Солнца под углом ξ со скоростью V_f относительно солнечного ветра, на S_b .

Предполагается, что межпланетное магнитное поле B_{SW} наклонено к скорости солнечного ветра V_{SW} под углом ψ_B , векторы нормалей к фронтам разрывов V_{SW} и B_{SW} лежат в одной плоскости (рис.1)). Нормаль к фронту S_f наклонена к солнечному ветру под углом ξ .

В системе координат XOY , связанной с Землей (ось OX направлена по солнечному ветру, ось OY в плоскости течения), головная ударная волна предполагается стационарной. Состояние всех параметров течения и магнитное поле за S_b можно определить по углу α ее наклона к солнечному ветру из соотношений на наклонной МГД ударной волне. После соприкосновения фронтом S_f и S_b в точке D падающий разрыв перемещается по фронту головной ударной волны, пересекая ее в двух точках D' и D'' (рис.1). Это перемещение происходит со сверхзвуковой скоростью, поэтому процесс столкновения двух разрывов можно рассматривать локально, считая интенсивность падающего разрыва и состояние за ним неизменными, а S_b параметрически зависящей от α . В точках D' и D'' каждый из фронтов аппроксимируется плоскостью. Эволюция глобальной картины взаимодействия ударного возмущения солнечного ветра (нестационарной быстрой ударной волны) с головной ударной волной исследована для $M_{SW} = 8$; $95^\circ < \psi_B < 135^\circ$;

$$N = \frac{a_A}{a_0} = 1,1; 1,5; \quad M_a = 2; 3; \quad -50^\circ < \xi < +50^\circ.$$

В результате столкновения происходит нелинейный распад каждого из взаимодействующих разрывов на систему из трех волн, разделенных контактными разрывами. Эта система трансформируется по мере перемещения точки взаимодействия вдоль головной ударной волны. При этом прошедшая в переходный слой быстрая ударная волна может существенно отличаться от падающих волн и зависит от угла столкновения. Найдено, что глобальная эволюция возникающего течения определяется ориентацией магнитного поля солнечного ветра и фронта падающей волны. Волновая картина может изменяться качественно.

При падении S_f в окрестности лобового столкновения при всех значениях параметров за прошедшей быстрой ударной волной следует медленная волна разрежения. За трансформированным головным скачком S_b^+ распространяется медленная ударная волна (течение вида $S_b^+, S_b^-, C, R_f^-, S_f^+$), в медленных волнах уменьшается величина магнитного поля.

При малом угле между нормалью к падающей волне S_f и B_{SW} альфвеновский разрыв возникает в прошедших и трансформированных волнах двумя способами: непрерывно в результате отщепления от медленной волны разрежения и скачкообразно при распаде медленной ударной волны, включающей касательное магнитное поле.

Нелинейная качественная перестройка течения определяет изменение физических величин. Появление вращательных или альфвеновских разрывов соответствует резкому изменению магнитного поля и скорости, которые могут оказывать раскачивающее влияние на магнитопаузу.

Очевидно, что нелинейно возникающие разрывные структуры, генерирующие взаимно противоположные изменения магнитного поля, будут сноситься на магнитопаузу, вызывая геомагнитные возмущения. При другой ориентации проходящего ударного возмущения этого не происходит. Найденный эффект позволяет объяснить причину того, что только часть ударных волн солнечного ветра, сопровождающих корональные выбросы массы и магнитные облака, являются геоэффективными.

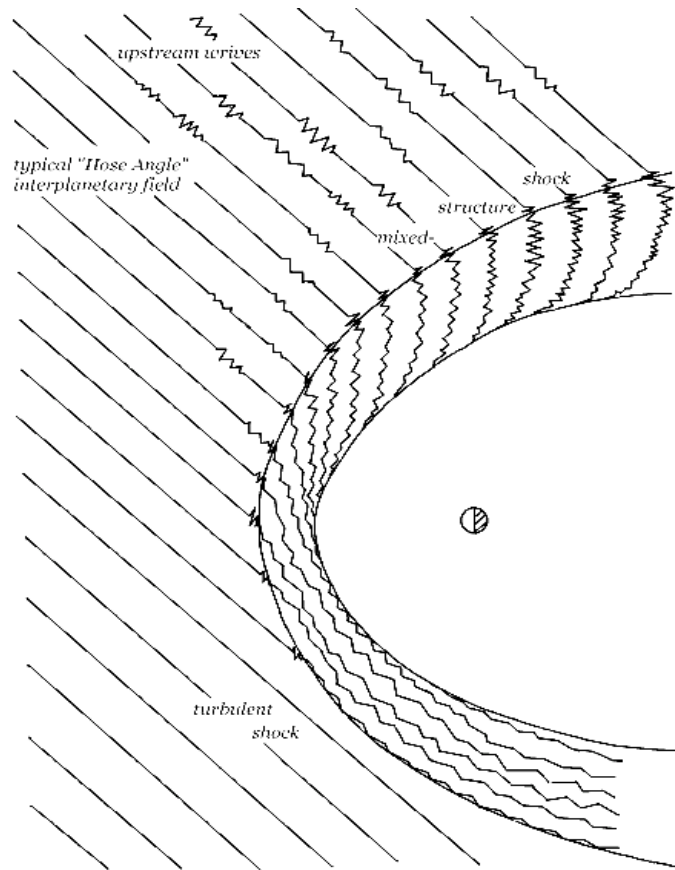


Рис.2. Типичная конфигурация магнитопереходного слоя и межпланетного магнитного поля.

Приходящий альфвеновский разрыв проходит через головную ударную волну в переходный слой не при всех углах ее наклона: в возникающем течении преломленный и отраженный альфвеновский разрывы присутствуют в некоторой окрестности лобового столкновения. При этом интенсивность преломленного вращательного разрыва увеличивается в 2-4 раза. На флангах прошедший в переходный слой вращательный разрыв исчезает различными способами: или непрерывно при уменьшающейся до нуля интенсивности, или скачкообразно при катастрофической перестройке течения. В найденном течении альфвеновские разрывы и медленные волны могут играть существенную роль, изменение магнитного поля в них может в несколько раз превышать скачок поля в быстрых волнах. При падении A_f именно медленные волны оказывают основное воздействие на магнитное поле при отсутствии прошедшего A_f . Но низкочастотные медленные волны могут быстро исчезнуть из-за затухания Ландау при значении плазменного параметра β , близком к 1 [Barnes, 1966; Richter, 1991] при частоте, меньшей ионной циклотронной частоты.

Установлен характер несимметричности глобальной картины воздействия ударного возмущения солнечного ветра на магнитосферу. Например, при падении ударной волны на верхний фланг, когда поле направлено к Солнцу и $\psi_B = -135^\circ$, альфвеновские разрывы возникают только на верхнем фланге, а на нижнем фланге альфвеновские разрывы не образуются. При падении вращательного разрыва на одном фланге формируется преломленная быстрая ударная волна, на другом - волна разрежения. Эти волны имеют газодинамический характер, а медленные волны вдали от лобового столкновения на разных флангах противоположны по типу.

Не во всех точках головной ударной волны имеет место регулярное взаимодействие. При достаточно большой интенсивности приходящей волны и ее боковом падении на один из флангов всегда возникает маховское взаимодействие на противоположном фланге.

Важно отметить, что еще в 1979 году было указано [Lemaire, Rycroft, 1979; Anderson, 1979] на наличие асимметрии во взаимодействии потока солнечного ветра с магнитосферой Земли относительно линии Земля-Солнце в плоскости эклиптики, наблюдаемой в различии структуры головного ударного фронта носовой волны со стороны сумерек и зари (рис.2 [Anderson, 1979]).

Основные результаты

В рамках МГД рассмотрения взаимодействия ударных волн «поршневого» или уединенного типа солнечного ветра с фронтом головной ударной волны перед планетарной магнитосферой типа магнитосферы Земли показано наличие качественной асимметрии преломления волн со стороны квазипараллельного (заря) и квазиперпендикулярного (сумерки) флангов (рис.1).

При перпендикулярном наклоне нормали к ММП остаются только быстрые волны, и соответственно уменьшается ударное воздействие волн.

Количественно кратко описанным выше методом для конкретного случая взаимодействия можно оценить асимметрию изменения средней величины концентрации протонов вблизи от разных флангов фронта головной ударной волны.

Пусть ударная волна солнечного ветра имеет наклон в -40 градусов и взаимодействует с «верхним» флангом (рис.1). Расчет даёт относительную величину концентрации протонов для соответствующих точек фронта головной ударной волны на «верхнем» (заря) и «нижнем» (сумерки) флангах при угле наклона к линии Земля-Солнце в 60 и -60 градусов (при меньших углах на «нижнем» фланге регулярное решение отсутствует). Число Маха для ударной волны, бегущей по солнечному ветру, $M = 3$; для стационарного потока солнечного ветра - 8 , плазменный параметр β полагается равным 1 .

Все данные отнесены к концентрации протонов в невозмущенном солнечном ветре.

В плазменной области верхнего фланга в результате преломления быстрой ударной волны солнечного ветра за преломлённой волной в сторону магнитопаузы будет следовать слабая медленная волна, в обратную же сторону по направлению к Солнцу будут направлены: фронт преломленной головной ударной волны и слабая медленная волна. Между указанными волнами будет располагаться контактный разрыв с изменением концентрации от 6.5 до 9.3 единиц в направлении от магнитопаузы. Контактный разрыв из-за диффузии частиц быстро исчезнет и концентрацию можно положить в среднем равной 7.9 .

В симметричной точке на нижнем фланге головного фронта также произойдёт возникновение двух быстрых ударных волн, двух медленных волн разрежения, направленных в разные стороны, и между ними быстро исчезающего вследствие диффузии контактного разрыва при переходе, через который концентрация будет меняться от 5.5 до 8.1 , так что в среднем она будет определяться величиной в 6.8 .

Соответственно различие величин концентрации протонов со стороны разных флангов будет оцениваться отношением $7.9 / 6.8 = 1.16$, что несмотря на различие начальных данных и отсутствие рассмотрения воздействия набегающих ударных волн в работе, говорящей об асимметрии заря-сумерки плотности частиц в магнитопереходном слое [Paularena et al., 2001], близко к значениям этого отношения, полученным по измерениям на аппарате ISEE 1 в виде безразмерной величине 1.21 , из данных

ISEE 3 как 1.26 и WIND - 1.10 и приведенным в 3 таблице в упомянутой работе [Paularena et al., 2001].

Выводы

Именно на асимметрию гипермагнитозвукового взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, продемонстрированную на рис.2, указывает уже и построенная волновая МГД модель наклонного взаимодействия ударной волны солнечного ветра с фронтом головной ударной волны перед магнитопаузой. Об этой асимметрии в рамках иных представлений говорится также в других работах [Подгорный и др., 1977; Веселовский, 1990; Szabo, 2002], в работе же, основанной на обсуждении измерений плотности плазмы в магнитопереходном слое [Paularena et al., 2001] за асимметричным по плазме головным фронтом [Charman, Cairns, 2004] перед магнитосферой Земли, утверждается преимущественно в период солнечного максимума наличие асимметрии в различии величины концентрации плазмы при большем значении со стороны зари. Важно отметить увеличение количества волн в солнечном ветре при возрастании солнечной активности. Последнее утверждение непосредственно подтверждает полученный в данной работе результат, говорящий о наличии преломленных медленных ударных волн в «утренней» области, именуемой областью зари, для плазменного магнитопереходного слоя, приводящих к увеличению значения концентрации протонов.

Следовательно, можно утверждать наличие непосредственного влияния преломления типичных, как квазипараллельных (типа волны 12 ноября 1978 года [Kennel et al., 1984]), так и квазиперпендикулярных (типа ударной волны, наблюдаемой 4 октября 1978 года [Zhuang et al., 1981]) межпланетных ударных волн солнечного ветра на возникновение плазменной асимметрии заря-сумерки в магнитопереходном слое перед магнитосферой Земли.

Представляется также важным указать на наблюдение восточно-западной асимметрии возникновения корональных выбросов массы, связанных с гало и с бегущими ударными волнами [Yuming Wang et al., 2004], воздействующими на систему головная ударная волн – магнитосфера.

В дальнейшем имеет смысл учесть в магнитопереходном слое возникновение вихрей и турбулентности, зависящих от кривизны головного фронта и направления ММП. Кроме того, можно рассмотреть возникновение подобной асимметрии для магнитосфер Юпитера и Сатурна с учётом значительного увеличения азимутальной компоненты ММП.

Авторы выражают благодарность доктору Дж. Ричардсону за полезные замечания.

Работа первого автора осуществлялась в рамках договора по программе ОФН № 16.

Литература

- Бармин А.А., Е.А.Пушкарёв.** Магнитогидродинамическое описание процесса столкновения ударного возмущения солнечного ветра и головной ударной волны. // Изв.АН СССР, МЖГ. С.140-155. 1992.
- Бармин А.А., Пушкарёв Е.А.** Пересечение ударных волн в магнитной гидродинамике. // Изв.АН СССР, МЖГ. С.132-143. 1991.
- Веселовский И.С.** Нестационарные возмущения магнитопереходного слоя, возбужденные разрывами солнечного ветра. // Геомагнетизм и аэрон. Т.30. С.221-226. 1990.
- Гогосов В.В.** Распад произвольного разрыва в магнитной гидродинамике. // ПММ. Т.25. С.108-124. 1961.

- Гриб С.А.** Затухание плоских ударных волн в поперечном магнитном поле. // Вестник ЛГУ. В.1. С.77-90. 1968.
- Гриб С.А.** Некоторые вопросы взаимодействия ударных волн солнечного ветра с магнитосферой Земли. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.13. В.5. С.788-793. 1973
- Коган М.Н.** Ударные волны в магнитной гидродинамике. // Прикл. математика и механика. Т.23. №3. С. 557. 1959.
- Подгорный И.М., Дубинин Е.М., Израилевич П.Л., Потанин Ю.Н.** Динамика плазмы в лабораторных моделях магнитосфер Земли и Урана. // Изв.АН СССР, Сер.Физич. Т.41, № 9. С.1870-1883. 1977.
- Пушкарь Е.А., Бармин А.А., Гриб С.А.** Исследование в МГД приближении падения ударной волны солнечного ветра на околоземную головную ударную волну. // Геомагнетизм и аэрон. Т.31. С.522-525. 1991.
- Пушкарь Е.А.** Газодинамические аналогии в задачах наклонного взаимодействия МГД ударных волн. // Изв.АН, МЖГ. №6. С. 153-169. 2001.
- Пушкарь Е.А.** Обобщённые поляры плоскополяризованных стационарных автомодельных течений в магнитной гидродинамике. // Изв.АН СССР, МЖГ. №3. С.111-119. 1979.
- Anderson K.A.** A review of upstream and bow shock energetic-particle measurements. // Nuovo Cim. V. 2C. P.747-771. 1979.
- Barnes A.** Collisionless damping of hydromagnetic waves. // Phys. Fluids. V.9. P.1483-1490. 1966.
- Burlaga L.F.** Interplanetary Magnetohydrodynamics. N-Y.: Oxford Univ. Press. 1995.
- Chapman, J.F., Cairns, Iver H.** Modeling of Earth bow shock: applications // J.Geophys.Res.V.109, A11, A11 2002 10.1029/2004 JA 010540 2004.
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.K. and Yang Y.-H.** Dawn-dusk asymmetry of geosynchronous magnetopause crossings. // J.Geophys.Res.V.109. A05203, doi: 10.1029/2003JA 010171, 2004.
- Dryer M.** Interplanetary shock waves: recent developments. // Space Sci.Rev. V.122, P.277-325. 1975.
- Dryer M., Fry C.D., Sun W., Deehr C., Smith Z., Akosofu S.I., Andrews M.D.** Prediction in real time the 2000 July 14 heliospheric shock wave and its companions during the “Bastille” epoch. // Solar Physics. V.204. № 1-2. P.267-286. 2001.
- Foukal P.V.** Solar Astrophysics. Weinheim: Wiley – VCH Verlag. 412 p. 2004.
- Grib S.A.** Interaction of non-perpendicular/parallel solar wind shock waves with the Earth’s magnetosphere. // Space Sci.Rev. V.32. P.43-48. 1982.
- Grib S.A., Brunelli B.E., Dryer M., Shen W.-W.** Interaction of interplanetary shock waves with the bow shock-magnetopause system. // J.Geophys.Res. V.84. A10. P.5907-5920. 1979.
- Grib S.A., E.A. Pushkar.** Nonlinear solar wind discontinuities interactions in the vicinity of the terrestrial magnetosphere. // Proc. of the First SOLTIP Symp. Liblice, Czechoslovakia. V.2. P.56-61. 1992.
- Grib S.A.** Some points of the MHD solar shock waves interactions with the magnetosphere of the Earth. // 6 International conference “Problems of Geocosmos” Book of Abstracts. St.Petersburg 2006. P. 203.
- Kennel C.F., Edmiston J.P., Scarf F.L., Coroniti F.V., Russell C.T., Smith E.J., Tsurutani B.T., Scudder J.D., Feldman W.C., Anderson R.R., Mozer F.S., and Temerin M.** Structure of the November 12, 1978, quasi-parallel interplanetary shock. // J. of Geophys.Res.V. 89. № A7. P.5346- 5452, 1984.
- Lemaire J., M.J. Rycroft.** The bow shock. Preface. // Nuovo Cim. V.2C, P.653-654. 1979.

- Paularena K.I., J.D. Richardson, M.A. Kolpak, C.R. Richardson, G.L. Siscoe.** A dawn-dusk density asymmetry in Earth's magnetosheath. // *J. of Geophys.Res.*, V.106. № A11. P.25,377-25,394. 2001.
- Richter A.K.** Interplanetary slow shocks. // *Physics and Chemistry in Space. Space and Solar Physics*, vol.21, *Physics of the Inner Heliosphere* // Ed.: Schwenn R., Marsch. Berlin: Springer-Verlag. P.23-44. 1991.
- Samsonov A.A.** Numerical MHD modeling of propagation of interplanetary shock through the magnetosheath. // 6 International Conference "Problems of Geocosmos" Book of Abstracts. St.Petersburg. 2006. P.265.
- Smith Z., Dryer M., Ort E. and Murtagh W.** Performance of interplanetary shock propagation models: STOA and ISPM. // *J.Atm.Solar-Terr.Phys.* V.62. P.1265-1274. 2001.
- Szabo A., Th.W.Narock, J.D.Richardson.** Rapid movements of the Earth's bow shock. // *Suppl.to EOS. Trans.AGU.* 83. P.F1131. 2002.
- Yuming Wang, Chenglong Shen, Wang S., and Pinzhong Ye.** Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium. // *Solar Physics.* V.222. № 2. P.329-343. 2004.
- Zhuang H.C., Russell C.T., Smith E.J. and Gosling J.T.** Three-dimensional interaction of interplanetary shock waves with the bow shock and magnetopause: a comparison of theory with ISEE observations. // *J. Geophys.Res.* V.86. №A7, P.5590-5600. 1981.

THE ASYMMETRY OF NONLINEAR INTERACTIONS OF THE SOLAR MHD SHOCK WAVES

Grib S.A.¹, Pushkar E.A.²

¹*Academy of Sciences of Russia, Central (Pulkovo) Astronomical Observatory,
Pulkovo, Saint Petersburg, 196140 Russia*

²*Moscow State Industrial University, Moscow, 109068 Russia*

Summary

An oblique MHD interaction of the solar fast shock wave with the bow shock wave front upstream the Earth-type planetary magnetosphere is studied. The fast shock wave is taken as a typical solar nonstationary strong discontinuity for the solar corona and the solar wind. Attention has been paid to the qualitative and quantitative (with respect to the proton concentration) dawn-dusk asymmetry of the flow inside the magneto sheath. The results under discussion have been confirmed in some points experimentally in situ by the gas-kinetic pattern of the bow shock wave front region and the WIND and ISEE 3 spacecraft data on the plasma density.

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ В СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ

Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А.

Представлены результаты наблюдений долгопериодических (с периодами 40-80 минут) колебаний поля лучевых скоростей в солнечных пятнах и в окружающих их областях. Данные получены путем прямой регистрации доплеровских смещений спектральных линий. Теоретическая интерпретация явления основана на модели собственных вертикально-радиальных колебаний солнечного пятна или магнитного элемента (поры) как единого целого.

Введение

Одним из важных направлений локальной гелиосейсмологии является сейсмология солнечных пятен, цель которой состоит в диагностике физических свойств пятен и окружающих их областей по характеристикам наблюдаемых в них МГД-колебаний [1-4].

Пятенную сейсмологию можно, в свою очередь, разделить на два принципиально различных по своим подходам направления:

1) сейсмология солнечных пятен на базе исследования наблюдающихся в магнитной силовой трубке пятна магнитозвуковых (но модифицированных гравитацией) короткопериодических (3-5 минутных) колебаний [1-4];

2) сейсмология пятен на основе долгопериодических (от 20-30 минут до нескольких суток) собственных колебаний пятна как целого [12].

Некоторые особенности колебаний второго типа и обсуждаются ниже.

Под долгопериодическими колебаниями солнечных пятен мы понимаем:

- торсионные (крутильные) колебания пятен с периодами от часов до нескольких суток;
- смещения пятен вдоль меридионального и широтного направлений, носящие колебательный характер (с периодами от примерно 1-2 часа до нескольких суток);
- колебания магнитного поля и лучевых скоростей в пятнах, регистрируемые на уровне фотосферы оптическими методами, а также колебания интенсивности поляризованного радиоизлучения источников над пятнами, которые регистрируются радиогелиографами.

Последние два вида колебаний (с периодами от 20 минут до нескольких часов) являются отражением одного и того же физического процесса: вертикально-радиальных смещений всего пятна, как целого, около некоторого положения равновесия. Эти колебания позволяют независимо получать детальную информацию о строении солнечных пятен, в частности, определять магнитную шкалу высоты в пятне, глубину вильсоновской депрессии, а также нижнюю магнитную границу пятна – уровень, начиная с которого магнитная силовая трубка пятна начинает резко расширяться книзу.

Вертикально-радиальные смещения регистрируются тремя независимыми способами:

а) по временным вариациям напряженности магнитного поля пятен, измеряемого по зеемановскому расщеплению линий [5-7]. Периоды выявляемых при этом колебаний – от 20 минут до нескольких часов.

б) по вариациям лучевых скоростей и магнитного поля в пятнах, с помощью видеоманитографа, снабженного CCD-системой регистрации солнечного спектра. Видео-

магнитограф разработан в Пулковке и установлен на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-5 [8]. Периоды получаемых колебаний – от 3-5 минут до 1-2 часов.

в) по изменению интенсивности поляризованного радиоизлучения источников над солнечными пятнами. Колебания выявляются при обработке методами вейвлет-анализа двумерных синтезированных изображений радиогелиографа Нобеяма на волне 1.76 см. [9,10]. Периоды выявляемых колебаний – от 3-5 минут до нескольких часов.

Для своей теоретической интерпретации долгопериодические колебания магнитных элементов солнечной атмосферы также требуют принципиально других подходов, чем описание короткопериодических МГД-осцилляций. Они, по-видимому, связаны с тем, что всякий локальный магнитный элемент (пятно, пора, узелок), будучи достаточно долгоживущим и устойчивым в механическом смысле образованием, способен под воздействием внешних возмущений испытывать колебания около некоторого положения устойчивого равновесия. Эти колебания носят интегральный характер в том смысле, что магнитный элемент сохраняет в целом свою структуру и геометрию, но его размеры и, соответственно, магнитное поле, периодически меняются. Когда элемент поднимается в более разреженные слои, внешнее давление, поджимающее его с боков, убывает, и он расширяется, а его магнитное поле ослабевает. При погружении в более глубокие слои фотосферы и конвективной зоны, магнитный элемент, напротив, сжимается, и его поле возрастает. Такие собственные колебания можно назвать вертикально-радиальными. Теоретическая модель, детально описывающая этот процесс, изложена в работе [12]. Период этих осцилляций, согласно [12], не зависит от поперечного размера элемента и определяется только напряженностью его магнитного поля и магнитной шкалой высоты λ_m : при $\lambda_m \cong 1Mm$ и напряженности поля от 1.5 до 4 кГс период варьирует в пределах примерно от 40 до 200 минут [12].

1. Наблюдательный материал и его анализ

В данной работе представлены некоторые результаты наблюдений в мае 2006 года на телескопе АЦУ-5 ГАО РАН в Пулковке. Исследовались колебательные процессы в солнечных пятнах и ближайших окрестностях на основании доплерограмм хорошего качества.

Благодаря достаточно продолжительным сеансам наблюдений, достигавшим 4 часов при регистрации со скважностью 15-30 секунд, удалось достоверно выявить низкочастотную область колебаний магнитных элементов с периодами от 40 до 80 минут. На участке солнечного спектра в диапазоне $\lambda 649.38$ нм – $\lambda 649.97$ нм, попадавшего на CCD матрицу, видна группа из семи линий, образующихся на разной высоте в атмосфере Солнца. Оказалось, что для всех выбранных нами спектральных линий, т.е. практически на всех высотах фотосферы, от примерно 190 до 500 км, мощность колебаний поля вертикальных скоростей сосредоточена в двух спектральных полосах, а именно, $[0.1-0.4]$ mHz и $[3-4.5]$ mHz, с центральными частотами, соответствующими 80-ти и 5-ти минутным периодам колебаний, соответственно. Между этими двумя достоверно выделяемыми полосами, высокочастотной и низкочастотной, на картах мощности наблюдается широкий провал – здесь колебания практически отсутствуют.

Очень важен вопрос о достоверности результатов, т.к. в спектре мощности колебаний, особенно короткопериодических, могут появляться паразитные гармоники, связанные с атмосферными и инструментальными эффектами. Мы уверены в солнечном происхождении выявленных нами колебаний. Сигнал значительно превышает ошибку определения лучевой скорости по прямому измерению доплеровских смещений на цифровых спектрограммах – 30 м/сек. На рис.1 представлено убедительное, на наш взгляд, свидетельство этого, а именно, представлены карты доплеровских смещений, полученные одновременно и по одной методике в одной из исследуемых нами

солнечных линий Ca 649.37 нм (буква а) и в теллурической линии H₂O 649.33 нм (b). Как видим, в случае теллурической линии и карта смещений и спектральная карта мощности (d) не показывают ничего, кроме белого шума, в то время как в линии кальция колебательные процессы выявляются совершенно отчетливо, с характерной пространственной и частотной локализацией. На верхней карте в данном случае отсутствует низкочастотная полоса колебаний из-за малой длительности сеанса наблюдений, длившегося около 1 часа.

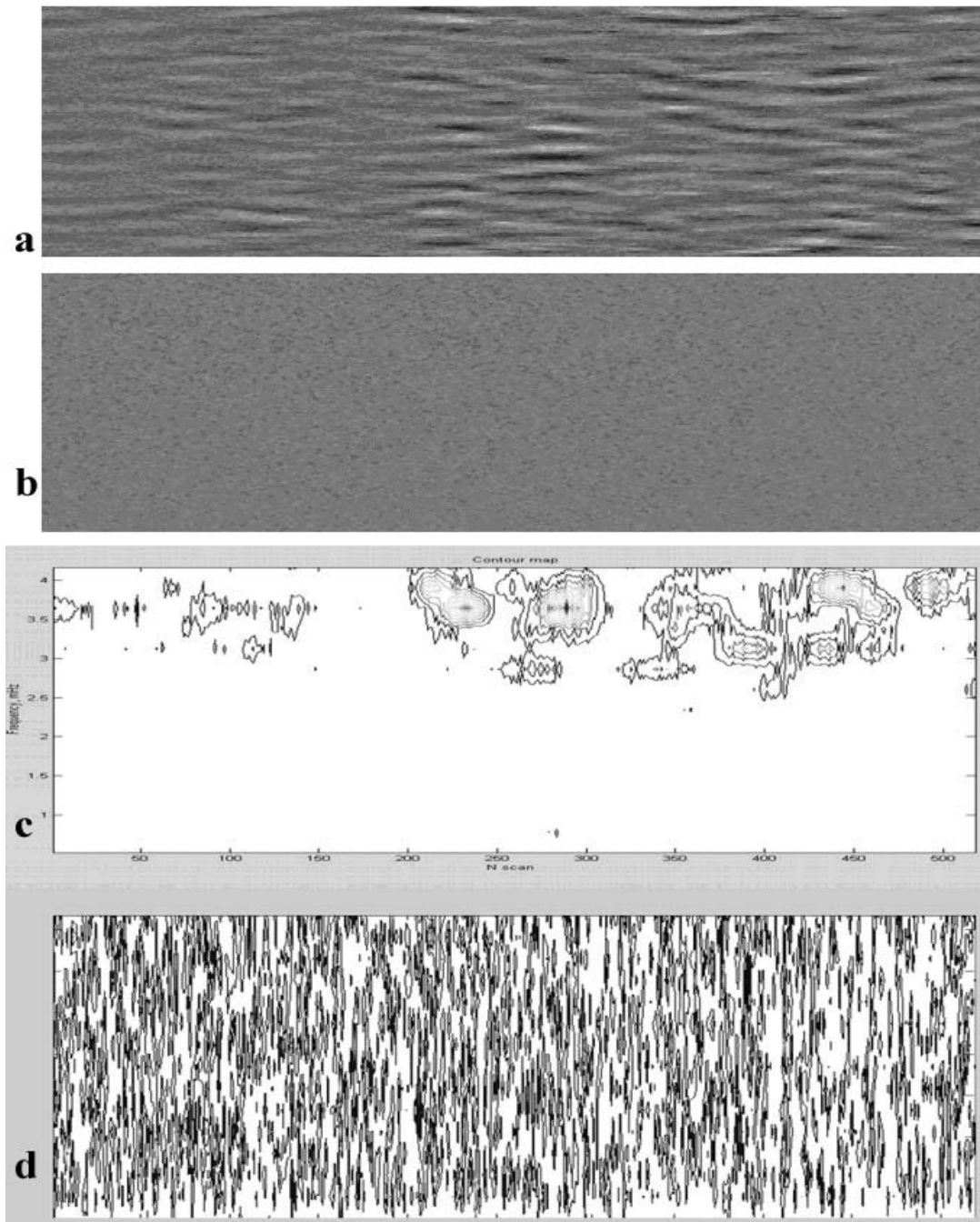


Рис.1. Карты смещений в солнечной линии Ca $\lambda 649.379$ нм (a) и теллурической линии H₂O $\lambda 649.325$ нм (b), полученные одновременно и по одной методике, и их спектральные карты смещений (c и d), соответственно.

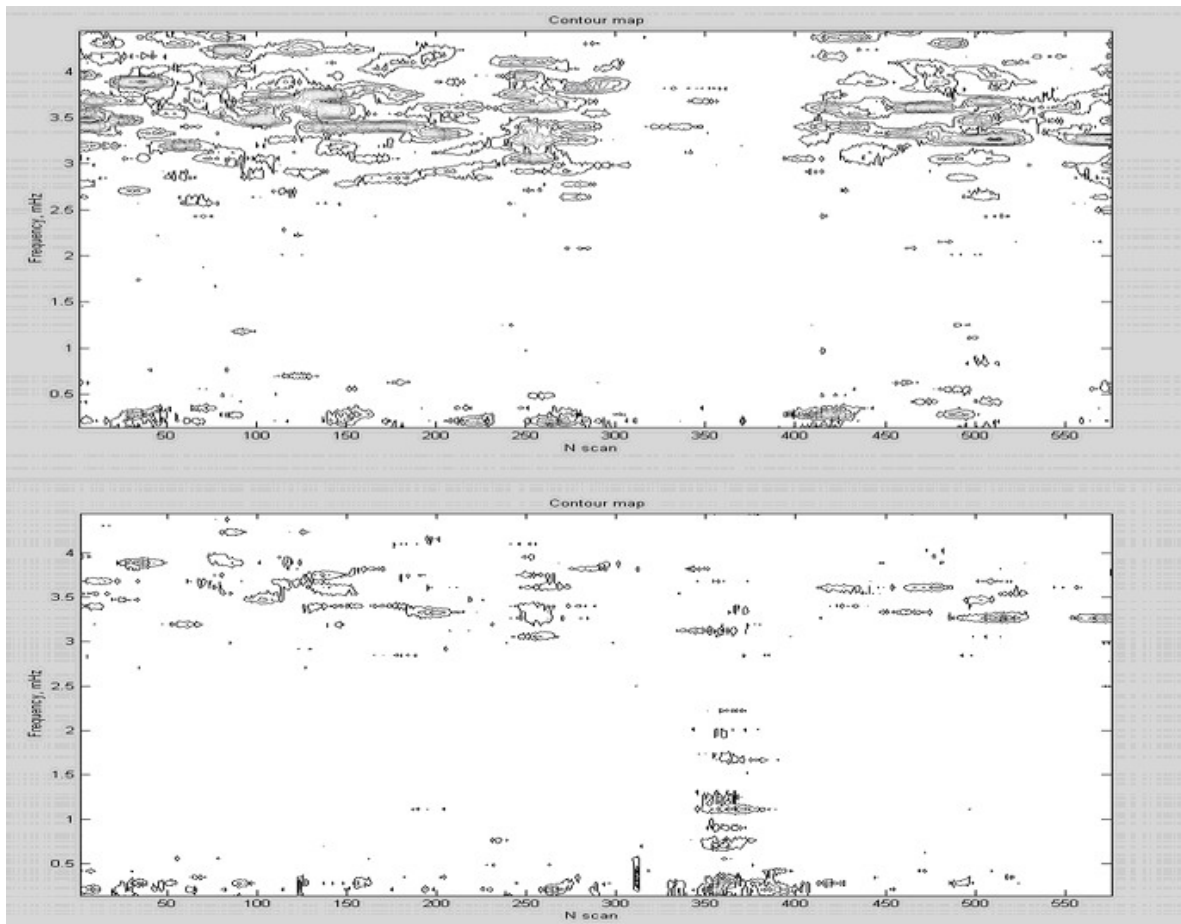


Рис.2. Ω -L диаграмма распределения амплитуды колебаний полученная одновременно в двух спектральных линиях Fe 649.499 нм (верхняя карта) и Fe 649.647 нм (нижняя карта).

Весьма важным общим свойством исследуемого колебательного процесса, выявляемого по всем спектральным линиям, является чрезвычайно четкая пространственная локализация обеих мод: на всех высотах фотосферы размеры пространственных «островов» локализации мощности вертикальных колебаний сравнимы между собой и возбуждены синхронно. Однако, рассматривая спектральные карты (Ω -L диаграммы), полученные в слабой и сильной линиях, образующихся на разных высотах, мы видим, что, несмотря на указанные общие черты процесса, по высоте колебательные процессы распределены различным образом.

На рис.2 в качестве примера представлены спектральные карты, полученные в двух линиях: Fe 649.49 нм (верхняя карта) и Fe 649.65 нм (нижняя карта), образующихся на высотах фотосферы в 500 км и 190 км, соответственно. На обоих рисунках отчетливо выявляются две основных спектральных полосы колебаний: высокочастотная, (3.2-4) mHz (5 мин) и низкочастотная (0.2-0.3) MHz (60-80 мин), соответственно. Однако, если на верхней карте доминантной является 5-ти минутная компонента в окружающем пятно пространстве, а в пятне колебания практически отсутствуют, то в слабой линии (образующейся в нижней фотосфере) амплитуды колебаний в 5-минутной и 80-минутной полосах оказываются уже сравнимы. Более того, низкочастотная мода в солнечном пятне явно доминирует по отношению к колебаниям в околопятенном пространстве! На этих глубинах определяющим процессом становятся именно колебания пятна как целого.

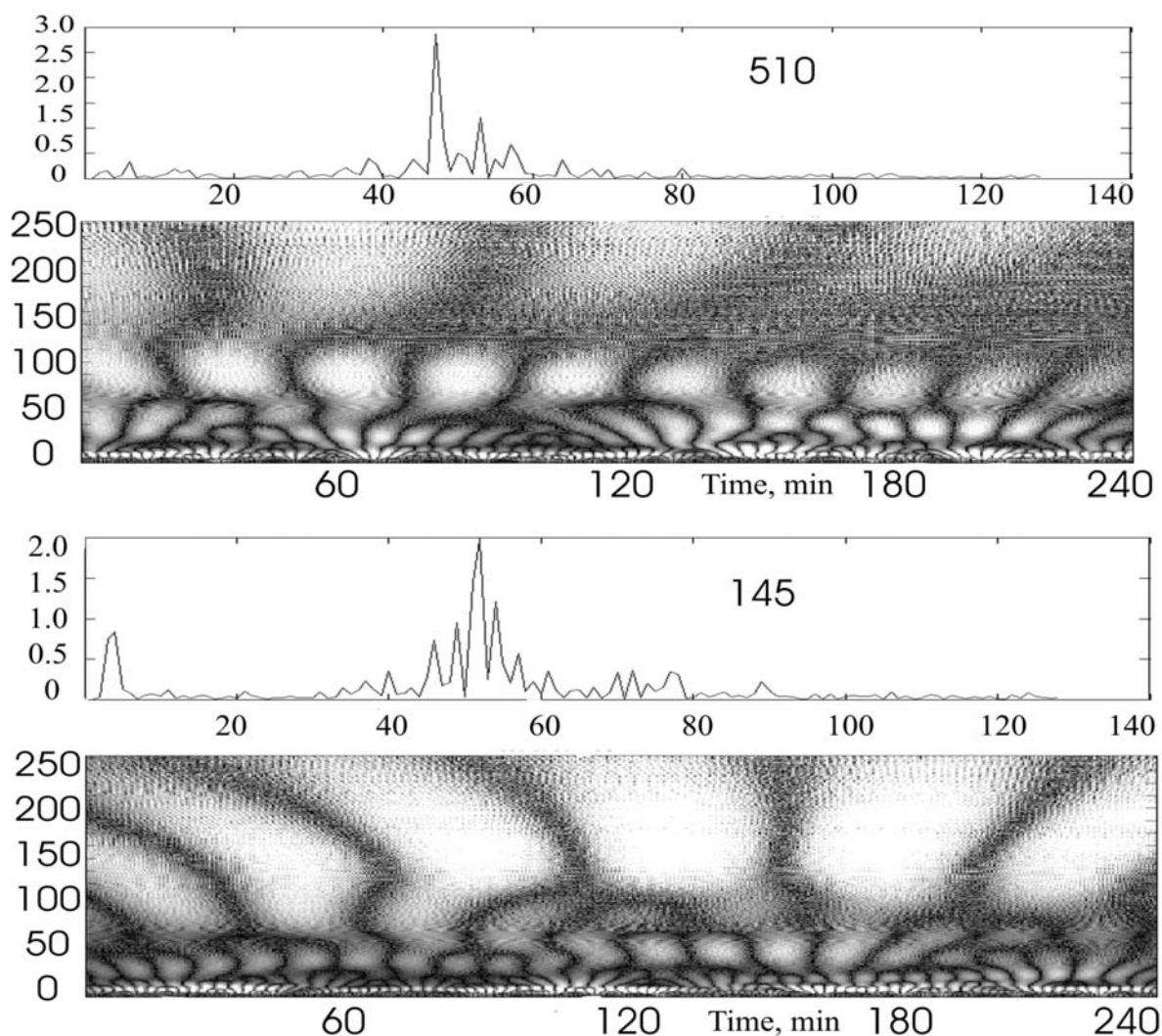


Рис.3. Локальные разрезы на спектральной карте в зоне возбуждения колебаний (145-й) и между зонами (510-й скан). Верхняя панель в паре – фурье-преобразование скана (спектр мощности), нижняя – вейвлет-спектр скана (вещественный вейвлет Морле).

Таким образом, оказывается, что низкочастотные колебания достаточно сильно концентрируются в нижних слоях атмосферы солнечного пятна, с высотой их мощность убывает.

Важную роль для характеристики колебательного процесса играет выявление степени его устойчивости, т.е. определение длительности интервалов возбуждения колебаний или, иными словами, длины тех цугов, которые удастся пронаблюдать. На рис. 3 представлены результаты вейвлет-анализа, позволяющие дать ответ на этот вопрос. Поскольку колебания пространственно локализованы, то мы выбрали для детального сравнительного анализа поведения колебаний сканы, как в зоне возбуждения колебаний (в зоне локализации), так и между зонами: скан 145 проходит через зону возбуждения колебаний, а скан 510 проходит между зон возбуждения колебаний. На рис. 3 в скане 145 в спектре мощности присутствуют обе моды, в то время как в 510-м скане низкочастотная мода сильно ослаблена. Присутствие 5-минутной моды в последнем случае является следствием пространственного перекрытия зон возбуждения в соответствующей полосе частот. Практически нет сканов, в которых эта мода отсутствует, в то время как низкочастотная мода пространственно локализована более четко, что воз-

можно связано с присутствием магнитного поля в этих зонах, и указывает на разную природу возбуждения этих мод. Из этого рисунка мы отчетливо видим, что 5-минутная мода имеет характерную длительность цуга ~ 30 мин. В то же время низкочастотная мода, как в пятне, так и в околопятенном пространстве, существует устойчиво на протяжении всего периода наблюдений (одиночное пятно 07.05.2006, серия 4 часа). Это дает еще одно надежное свидетельство того, что здесь действительно наблюдается процесс собственных колебаний магнитного элемента как целого, непрерывно возбуждаемых внешними воздействиями со стороны турбулентной конвективной зоны.

2. Заключение

1. Установлено, что в солнечном пятне и в областях локализации сопутствующих пятну магнитных элементов наблюдаются низкочастотные колебания поля лучевых скоростей с периодами от 40 до 80 минут. Низкочастотная мода в смысле пространственного распределения реализуется на масштабах мезогрануляции ($10'' \div 12''$).

2. Получено, что амплитуда низкочастотной моды в солнечном пятне быстро убывает с высотой: будучи отчетливо выраженной на уровне 200 км, она становится едва заметной на высоте 500 км.

3. Колебания низкочастотной моды устойчиво прослеживаются в течение всего сеанса наблюдений (до 4 часов).

4. Теоретическая интерпретация полученных данных опирается на механизм собственных глобальных колебаний магнитного элемента как целого (вертикально-радиальные колебания).

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земле”, а также гранта РФФИ № 04-07-90254.

Литература

1. *Thomas J.H., Cram L. E., Ney A.H.* Five-minute oscillations as a subsurface probe of sunspot structure // *Nature*. 297. P.485. 1982.
2. *Thomas J.H.* Oscillations in sunspots // *Australian Journal of Phys.* V.38. P.811-824, 1989.
3. *Thomas J.H.* Sunspots seismology // *News Letter of the Astron. Soc. of New York*. 1990. V.4. №2. P.4.
4. *Zhugzda Y.D., Locans V., Staude J.* 1983. *Solar Phys.* V. 82. P. 369; *Astron Nachr.*, V.308. P.257.
5. *Вяльшин Г.Ф., Наговицын Ю.А.* Особенности колебательных процессов в группах солнечных пятен СД 135/1984 и 136/1984 // *Солнечные данные*, 1990. №9. С.91.
6. *Nagovitsyn Yu.A., Vyalshin G.F.* Quasi-periodic Variations of Magnetic Field Strength in Sunspots // *Астрон. циркуляр*. № 1553. С.1-2. 1992.
7. *Nagovitsyn Yu.A., Vyalshin G.F.* Variations of the Field Strengths in the Sunspots of 1982 June and July Groups and 1984 June Group // *Contrib. Astr. Obs. Skalnaté Pleso*. 1986. V.15. P.75-85.
8. *Parfinenko L.D.* Research of sunspot oscillations, i. The Pulkovo CCD spectroheliograph – magnetograph, *Solar Phys.* vol.213, No2, april 2003, p.291.
9. *Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A. and Nagovitsyna E.Yu.* Quasi-periodic oscillations of Microwave Emission in Solar Active Regions – *Publ. Astr. Soc. Japan*, V.58, No1, p.29-35. 2006.
10. *Гельфрейх Г.Б. и др.* Квазипериодические колебательные процессы над солнечными пятнами по данным радиогелиографа Нобейма // VII Пулковская конференция по физике Солнца. ГАО РАН. 2003. С.111-116.

11. **Соловьев А.А., Наговицын Ю.А.** Долгопериодические колебания солнечных пятен // Труды конференции “Солнечная активность как фактор космической погоды”, СПб, с.593-598. 2005.
12. **Соловьев А.А., Киричек Е.А.**, Труды X Пулковской конференции, СПб, ГАО РАН. 2006. С.49-76.

PECULIARITIES OF LONG-TERM OSCILLATIONS OF RADIAL VELOCITIES IN SUNSPOTS

Efremov V.I., Parfinenko L.D., Soloviev A.A.

Summary

Long-term oscillations of radial velocities (with a period about 40-80 min) revealed by direct registration of Doppler shifts of spectral lines in the sunspot and its surrounding area are discussed. The theoretical interpretation of this phenomenon is based on the model of eigen radial-vertical oscillations of sunspots and small magnetic elements (pores) as a whole.

О МОДУЛЯЦИИ ГИРОСИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ АЛЬВЕНОВСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т.

Рассматривается влияние альвеновских колебаний на нетепловое гиросинхротронное излучение корональных арок. Рассчитаны глубины модуляции для интенсивности и степени круговой поляризации. На примере солнечной вспышки 15 апреля 2002 г. обсуждаются приложения полученных результатов.

Введение

К настоящему времени получено достаточно много теоретических указаний, свидетельствующих о том, что альвеновские волны могут быть ответственны за нагрев короны Солнца [1–3], высокоскоростные потоки солнечного ветра [3], ускорение заряженных частиц во вспышечных петлях [4] и т.д. Между тем, имеется крайне мало наблюдательных фактов, которые бы подтверждали эти предположения. В значительной мере это связано с тем, что альвеновские моды в отличие от других магнитогидродинамических волн не сжимают плазму, т.е. они не способны модулировать температуру и плотность плазмы. Поэтому их отождествление в рентгеновском, ультрафиолетовом и оптическом диапазонах связано с большими трудностями. Лишь сравнительно недавно с запуском орбитальной станции TRACE удалось обнаружить на ультрафиолетовых изображениях активных областей поперечные смещения корональных петель активных областей, обусловленные изгибными модами, практически не сжимающими плазму [5]. Помимо данных мод, в корональных петлях могут также генерироваться винтовые (крутильные) альвеновские колебания, которые не приводят к видимым смещениям их вершин, а значит, для их исследования необходимо привлекать иные методы.

Возбуждение альвеновских мод сопровождается, в первую очередь, вариациями направления магнитного поля [6,7]. Поскольку некоторые механизмы радиоизлучения как тепловой, так и нетепловой природы чрезвычайно чувствительны к подобным вариациям, то следует ожидать, что соответствующие наблюдения могут оказаться весьма плодотворными для изучения проявлений волн альвеновского типа в верхней атмосфере Солнца. В частности, как было показано в работе [8], в случае реализации теплового циклотронного излучения, альвеновские волны способны вызывать сильную модуляцию излучения оптически тонких источников. Гельфрейху и др. [8] это позволило сделать вывод о возможной связи наблюдаемых десятисекундных пульсаций микроволнового излучения активных областей с данными модами (см. также [9]).

Почти 30 лет назад Тэппинг [7] обратил внимание на важную роль крутильных колебаний в модуляции синхротронного излучения корональных петель. Было показано, что при малых углах θ между направлением магнитного поля и лучом зрения, амплитуда вариаций излучения может оказаться весьма существенной. Между тем микроволновое излучение солнечных вспышек с частотой $f > 10$ ГГц определяется не ультрарелятивистскими электронами, а частицам с энергиями $E = 0.2 - 1$ МэВ [10]. Кроме того, теоретические результаты Тэппинга [7] достаточно трудно привязать к реальным наблюдениям.

В представленной работе мы рассмотрим зависимость глубины модуляции интенсивности и степени поляризации гиросинхротронного излучения от параметров источника в случае возбуждения альвеновских колебаний в корональных петлях. Исходя из

полученных результатов, особое внимание уделим анализу вспышечного события 15 апреля 2002 г.

Крутильные и изгибные колебания тонких магнитных трубок

В рамках идеальной магнитной гидродинамики уравнения движения, индукции, неразрывности и баланса энтропии можно представить в виде

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \right) &= -\nabla p + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi}, \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) S &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где энтропия $S = p\rho^{-\gamma}$ и постоянная адиабаты $\gamma = 5/3$. Пусть осесимметричная магнитная трубка $\mathbf{B}_0 = (0, 0, B_0(r))$ под действием некоторой внешней силы была выведена из состояния равновесия. Представляя соответственно возмущения скорости, плотности, давления и магнитного поля как $\mathbf{v} = \delta \mathbf{v}$, $\rho = \rho_0 + \delta \rho$, $p = p_0 + \delta p$, $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{e}_z + \delta \mathbf{B}$, после линеаризации системы (1) имеем:

$$\rho_0 \frac{\partial \delta \mathbf{v}_\perp}{\partial t} = -\nabla_\perp \delta p + \frac{B}{4\pi} \frac{\partial \delta \mathbf{B}_\perp}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \delta v_z}{\partial t} = -\frac{\partial \delta p}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta \mathbf{B}_\perp}{\partial t} = B \frac{\partial \delta \mathbf{v}_\perp}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \delta \mathbf{B}_z}{\partial t} = -B \nabla_\perp \cdot \delta \mathbf{v}_\perp, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla_\perp \cdot \delta \mathbf{v}_\perp + \rho_0 \frac{\partial \delta v_z}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\delta \rho = c_s^2 \delta p, \quad (7)$$

где $c_s = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$ – скорость звука.

Из уравнений (3), (5)–(7) следует, что в случае несжимаемой плазмы ($\delta \rho = 0$), возмущение газового давления $\delta p = \delta v_z = \delta B_z = 0$, а система уравнений (2)–(7) сводится к виду:

$$\rho_0 \frac{\partial \delta \mathbf{v}_\perp}{\partial t} = \frac{B}{4\pi} \frac{\partial \delta \mathbf{B}_\perp}{\partial z}, \quad \frac{\partial \delta \mathbf{B}_\perp}{\partial t} = B \frac{\partial \delta \mathbf{v}_\perp}{\partial z}$$

Комбинируя последние два уравнения и считая $\delta v_r = 0$, получим волновое уравнение, описывающее крутильные альвеновские колебания тонкой магнитной трубки:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - v_A^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \delta v_\varphi = 0,$$

Из условия несжимаемости плазмы ($\text{div } \delta \mathbf{v}_\perp = 0$) нетрудно прийти к выводу, что для магнитных трубок полным аналогом плоских альвеновских волн являются крутильные моды ($\delta v_r = 0$, $\partial v_\varphi / \partial \varphi = 0$). При этом $\delta B_z = 0$ и изменением модуля $|\mathbf{B}_0|$ в случае малых

колебаний можно пренебречь, поскольку $|\mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{B}| - |\mathbf{B}_0| \approx 1/2\delta B_\varphi^2 / B_0 \rightarrow 0$. Вместе с тем, вариации направления магнитного поля $\delta\theta$, обусловленные поперечными смещениями, способны оказать существенное влияние на модуляцию гиротронного излучения ($\delta\theta \approx \delta B / B_0$).

Что касается изгибных колебаний, то, как было показано Степановым и др. [11],

$$\left| \frac{\delta\rho}{\rho} \right| \approx (ka) \frac{\delta v_\perp}{v_A},$$

где k — продольное волновое число, a — радиус магнитной трубки.

Таким образом, при $ka \ll 1$ они практически не сжимают плазму и, по сути, являются модами альвеновского типа. Кроме того, в этом случае для изменения $|\mathbf{B}_0|$ имеем $|\mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{B}| - |\mathbf{B}_0| \approx \delta B(ka + 1/2\delta B / B_0)$, а значит, при возбуждении изгибных колебаний вариации гиротронного излучения также в основном связаны с изменением угла θ .

Модуляция нетеплового гиротронного излучения

Проведем анализ влияния альвеновских колебаний на модуляцию нетеплового гиротронного излучения корональной арки на основе формул, предложенных Далком [12].

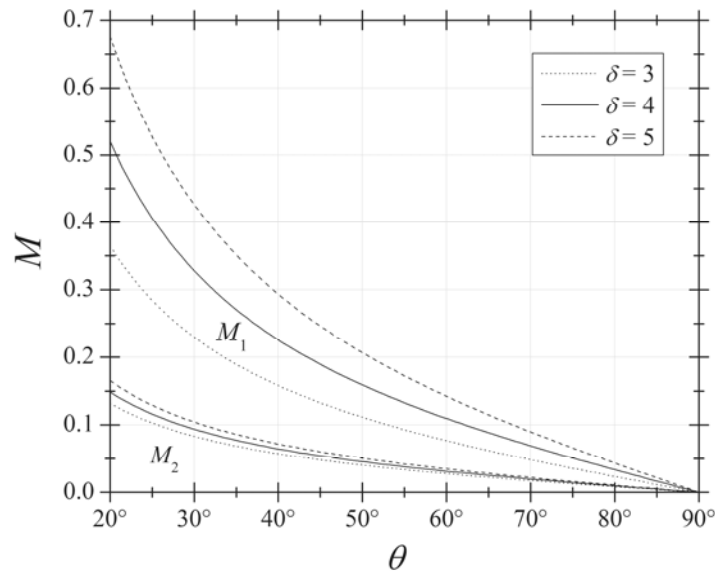


Рис.1. Зависимость глубины модуляции оптически толстого (M_1) и оптически тонкого (M_2) источника гиротронного излучения от угла между направлением магнитного поля и лучом зрения θ при разных значениях показателя спектра ускоренных электронов δ , $\Delta\theta = 5^\circ$.

Интенсивности излучения для оптически тонкого или толстого источника соответственно равны

$$I_1 = \eta_f d, \quad \tau \ll 1 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{\eta_f}{k_f}, \quad \tau \gg 1 \quad (9)$$

здесь d — характерная толщина петли. Коэффициенты излучения η_f и поглощения k_f гиротронного излучения электронов с $E > 10$ кэВ можно представить следующим образом [12]:

$$\frac{\eta_f}{Bn_a} = 3.3 \times 10^{-24} \times 10^{-0.52\delta} (\sin \theta)^{-0.43+0.65\delta} \kappa^{1.22-0.90\delta}, \quad (10)$$

$$\frac{k_f B}{n_a} = 1.4 \times 10^{-9} \times 10^{-0.22\delta} (\sin \theta)^{-0.09+0.72\delta} \kappa^{-1.30-0.98\delta}, \quad (11)$$

где n_a — концентрация ускоренных электронов, $\theta > 20^\circ$ — угол между направлением магнитного поля и лучом зрения, показатель спектра ускоренных электронов $\delta = 2 - 7$ и $f_B = eB/(2\pi mc)$ — гирочастота электронов, $\kappa = f/f_B = 10 - 100$.

Поскольку рассматриваемые колебания практически не сжимают плазму и не меняют величину магнитного поля, то изменениями концентрации ускоренных электронов n_a , напряженности магнитного поля B , и толщины d излучающей области можно пренебречь. Это означает, что вариации интенсивности излучения в основном будут определяться вариациями угла θ . Тогда, из (10)–(11) следует:

$$I_1 \propto (\sin \theta)^{-0.43+0.65\delta}, \quad I_2 \propto (\sin \theta)^{-0.34-0.07\delta}, \quad (12)$$

Определим глубину модуляции излучения как $M = |\Delta I(\theta)|/I(\theta)$, где $\Delta I(\theta) = I(\theta + \Delta\theta) - I(\theta)$ — амплитуда колебаний интенсивности излучения. Раскладывая выражения для M в ряд по малому параметру $\Delta\theta \ll \theta$ в случае оптически тонкого (M_1) и оптически толстого (M_2) источника из (5) соответственно находим:

$$M_1 = (-0.43 + 0.65\delta) \operatorname{ctg} \theta \Delta\theta, \quad M_2 = (0.34 + 0.07\delta) \operatorname{ctg} \theta \Delta\theta. \quad (6)$$

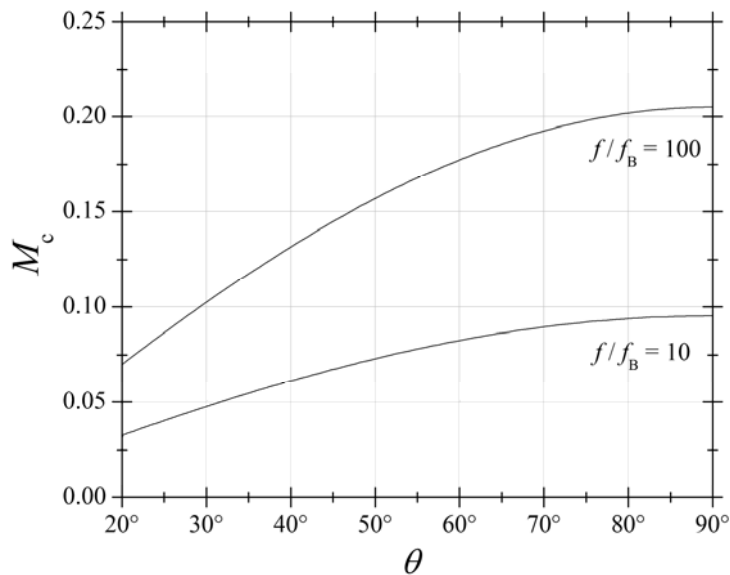


Рис.2. Зависимость глубины модуляции степени круговой поляризации оптически тонкого гиросинхротронного излучения M_c от угла между направлением магнитного поля и лучом зрения θ для оптически тонкого источника при разных значениях $\kappa = f/f_B$, $\Delta\theta = 5^\circ$.

Графики функций $M_1(\theta)$ и $M_2(\theta)$ при значениях показателя спектра ускоренных электронов $\delta = 3, 4, 5$ представлены на Рис.1. Откуда следует, что $M_1 > M_2$, а глубина модуляции оптически тонкого излучения может достигать достаточно больших величин ($M_1 > 0.1$) при углах $\theta < 60^\circ$. Она также заметно возрастает с увеличением показателя спектра δ . Сразу отметим, что, как показывают наблюдения, оптически тонкое излучение солнечных вспышек соответствует частотам $f > 10$ ГГц [10].

Что касается степени круговой поляризации $r_c = V/I$, определяемой в [10] для оптически тонкого источника как

$$r_c = 1.26 \times 10^{0.03\delta} \times 10^{-0.071\cos\theta} \kappa^{-0.782+0.545\cos\theta}, \quad (13)$$

то по аналогии с предыдущим случаем из (6) получим

$$M_c = |\Delta r_c(\theta)| / r_c(\theta) = (-0.163 + 0.545 \ln \kappa) \sin \theta \Delta \theta. \quad (14)$$

На Рис.2. представлена зависимость изменения степени круговой поляризации, определяемая выражением (7). Выбранные значения отношения частоты излучения к гирочастоте электронов ($\kappa_1 = 10$, $\kappa_2 = 100$) соответствуют предельным величинам, ограничивающим область применимости формул (10), (11) и (13). Из Рис.2 следует, что в отличие от интенсивности, модуляция степени круговой поляризации оказывается менее эффективной ($M_c < 0.2$), и она достигает максимальных величин при больших значениях угла θ и параметра κ . Для $B = 70 - 200$ Гс гирочастота электронов $f_B \approx 2.81 \times 10^6 B = 200 - 560$ МГц. Поэтому, считая $\kappa > 50$, мы вновь приходим к выводу, что высокочастотные ($f > 10$ ГГц) микроволновые измерения могут эффективно использоваться для обнаружения альвеновских колебаний в корональных петлях.

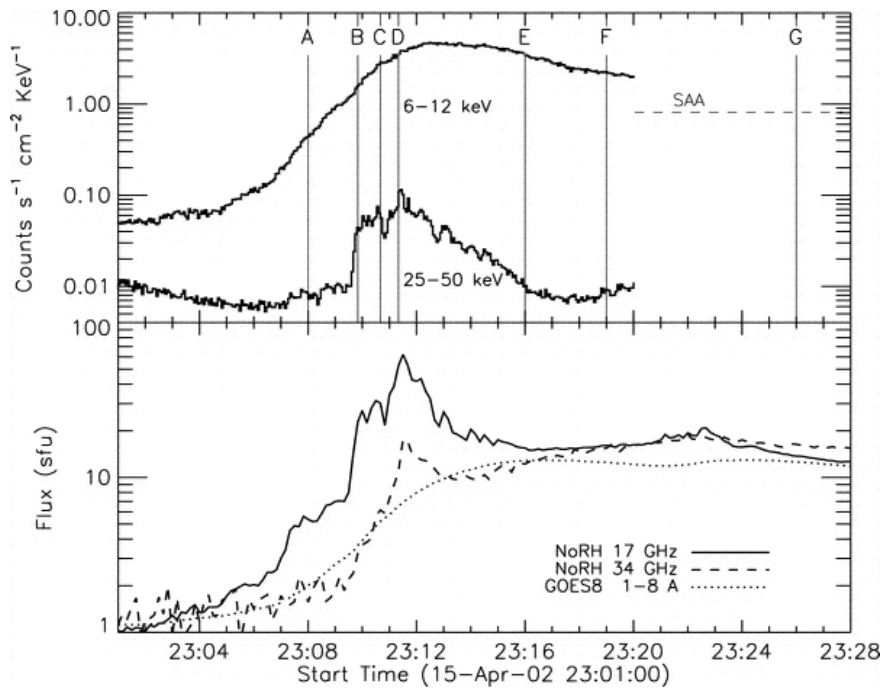


Рис.3. Временные профили вспышки 15 апреля 2002 г, полученные на орбитальных станциях RHESSI, GOES и радиогелиографе Nobeyama. Рисунок взят из работы [13].

Наблюдения и интерпретация

По нашему мнению, отождествить наблюдаемые вариации микроволнового излучения с альвеновскими осцилляциями корональных петель можно с помощью сравнения временных профилей, полученных в различных волновых диапазонах с достаточно высоким временным и пространственным разрешением. Поскольку данные моды не сжимают плазму, то микроволновая модуляция интенсивности должна быть существенно более ярко выраженной, чем в рентгеновском, ультрафиолетовом или оптическом диапазонах. В качестве примера на Рис.3 приведены временные профили рентгеновского и микроволнового излучения для события 15 апреля 2002 г. [13]. На наш взгляд, пульсации излучения на частоте 34 ГГц в предимпульсной фазе вспышки с периодом 30–60 с,

отличающиеся значительной глубиной модуляции, могли быть вызваны возбуждением изгибных мод во вспышечной арке. Это привело к развитию баллонной неустойчивости и формированию токового слоя в области каспа [14], т.е. в данном событии моды альвеновского типа могли выступить в роли триггера солнечной вспышки. Более детальные исследования мы надеемся провести в следующей работе.

Выводы

В представленной работе мы рассмотрели влияние альвеновских колебаний на модуляцию нетеплового гиротронного излучения корональных петель на основе полуэмпирических формул Далка [12]. Как следует из расчетов, если угол между направлением магнитного поля и лучом зрения $\theta < 60^\circ$, то интенсивность излучения достаточно чувствительна к альвеновским возмущениям. В этом случае глубина модуляции оптически тонкого источника $M_1 > 0.1$, и по мере уменьшения угла θ она быстро возрастает. При больших углах θ модуляция степени круговой поляризации r_c (по сути параметра Стокса V) происходит более эффективно, однако ее глубина $M_c < 0.2$. Несмотря на это, приведенные оценки убедительно свидетельствуют, что высокочастотные микроволновые наблюдения ($f > 10$ ГГц) могут быть использованы для проведения детальных исследований условий возбуждения и распространения альвеновских волн во вспышечных корональных петлях.

Модуляция потоков микроволнового излучения нами не рассматривалась, т.е. эффекты, обусловленные геометрией, неоднородностью и пространственной протяженностью корональной петли, а также фоновым излучением во внимание не принимались. Фоновое излучение и особенности возбуждения альвеновских мод также не учитывались. Это может привести к завышенным оценкам значений глубины модуляции по сравнению с наблюдаемыми величинами.

Тем не менее, результаты свидетельствуют, что ввиду больших значений M_1 альвеновские колебания корональных петель могут быть обнаружены даже на инструментах с относительно низким пространственным разрешением. Поскольку важным дополнением к микроволновым измерениям служат наблюдения в других диапазонах, то трудно переоценить те данные, которые ожидается получить на космической орбитальной станции Solar-B.

Авторы благодарят А.А. Соловьева за полезные замечания и обсуждение.

Работа поддержана программой Президиума РАН «Солнечная активность», ОФН-16, «Солнце – Земля» и грантами РФФИ (06-02-16838, 06-02-16859).

Ю.Г.Копылова благодарит Администрацию Санкт-Петербурга за финансовую поддержку (грант PD06-1.9-95).

Литература

1. **Zirker J.B.** Coronal heating // Solar Phys. 1993. V.148. P.43.
2. **Klimchuk J.A.** On solving the coronal heating problem // Solar Phys. 2006. V.234. P.41.
3. **Cranmer S.R.** // Space Sci. Rev. 2002. V.101. P.229.
4. **Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A.G. et al.** // JGR. 1997. V.102. P.14659.
5. **Aschwanden M.J., Fletcher L., Schrijver C.J., and Alexander D.** Coronal loop oscillations observed with the *Transition Region And Coronal Explorer* // Astrophys. J. 1999. V.520. P.880.
6. **Прутт Э.Р.** Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир. 1985.

7. **Tapping K.F.** A torsional wave model for solar radio pulsations // Solar Phys. 1983. V.87. P.177.
8. **Гельфрейх Г.Б., Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г. и др.** О вариациях микроволнового излучения активных областей солнечной атмосферы // Письма в Астрон. журн. 2004. Т.30. С.540.
9. **Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Степанов А.В.** О проникновении акустико-гравитационных и альвеновских волн из хромосферы в корону Солнца // Известия КрАО. 2006. Т.101.
10. **Bastian T.S.** // Proceedings of the Nobeyama Symposium “Solar Physics with Radio Observations”, NRO Report №479. 1999. P.211.
11. **Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Куприянова Е.Г.** Колебания оптического излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных петель. // Письма в Астрон. журн. 2005. Т.31. С.612.
12. **Dulk G.A.** Radio emission from Sun and stars // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1985. V.23. P.169.
13. **Sui L., Holman G.D., White S.M., Zhang J.** Multiwavelength analysis a solar flare on 2002 April 15 // Astrophys. J. 2005. V.633. P.1175.
14. **Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Степанов А.В.** Баллонная неустойчивость и колебания корональных петель // Астрон. журн., 2006. Т. 83. №12 (в печати).

ON MODULATION OF GYROSYNCHROTRON EMISSION FROM CORONAL LOOPS BY ALFVEN OSCILLATIONS

Kopylova Yu.G., Stepanov A.V., Tsap Yu.T.

Summary

The impact of Alfvén oscillations on gyrosynchrotron emission of coronal arcs is considered. Modulation depths for intensity and degree of circular polarization have been calculated. The obtained results are discussed in the context of the April 15, 2002 solar flare.

ПУЛЬСАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ AD LEO И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ОБЛАСТИ ВСПЫШКИ

Куприянова Е.Г., Степанов А.В.

Предложена интерпретация высокочастотных пульсаций вспышки AD Leo, наблюдавшихся 4 ноября 1987 г. на 305 м радиотелескопе в Аресибо в диапазоне 21 см. Происхождение пульсаций связывается с осцилляциями электрического тока в корональной магнитной арке — эквивалентном электрическом контуре. Высокая яркостная температура полностью поляризованного излучения вспышки ($\sim 10^{16}$ К) объясняется на основе когерентного плазменного механизма. Определены значения электрического тока, магнитного поля, плотности плазмы и оценена энергия вспышки.

Введение

AD Leo относится к классу вспыхивающих звезд типа UV Cet. Это одиночный красный карлик спектрального класса dM4.5e, радиуса $3.5 \cdot 10^{10}$ см, находящийся на расстоянии $d = 4.9$ пк [1]. Красные карлики известны своей сильной вспышечной активностью в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах. Феноменологические особенности радиоизлучения красных карликов подобны особенностям радиоизлучения Солнца. Это, например, высокие яркостные температуры, 100% поляризация, а также развитая тонкая структура: внезапные поглощения, пульсации, спайк-всплески. Поэтому для интерпретации такого радиоизлучения привлекаются солнечно-звездные аналогии. Тем не менее, наблюдаются и существенные различия в коронах Солнца и вспыхивающих звезд. Во-первых, красные карлики характеризуются высоким фактором заполнения поверхности звезды пятнами. Для AD Leo относительная площадь пятен варьируется от 15% [2] до 75% [3] видимой поверхности фотосферы, в то время как на Солнце даже в годы максимума она составляет десятые доли процента. Поскольку корональные магнитные арки соединяют пятна разной полярности, то короны красных карликов имеют более развитую структуру магнитного поля. Второе отличие заключается в более высокой температуре корон красных карликов. По данным рентгеновских наблюдений температура корональной плазмы достигает величин $T = 10^7 - 10^8$ К, тогда как температура короны Солнца $T \approx 10^6$ К. Эти различия приводят к тому, что выяснение природы радиоизлучения корон красных карликов следует рассматривать как самостоятельную задачу.

Для интерпретации интенсивного широкополосного радиоизлучения всплесков на звезде AD Leo 4 мая 1987 года с высокими яркостными температурами, 100% поляризацией Бастиан и др. [4] предложили плазменный механизм, обусловленный конусной неустойчивостью [5,6]. Пульсации излучения связываются с быстрыми магнитозвуковыми (БМЗ) осцилляциями магнитной трубки. Однако такая интерпретация встречается с определенными трудностями. Дело в том, что БМЗ-осцилляции обладают, как правило, низкой добротностью Q вследствие сильного затухания из-за ионной вязкости и электронной теплопроводности в короне звезды. Для них характерное значение $Q \sim 30-50$, в то время как наблюдаемые значения $Q \geq 200$.

В данной работе мы предлагаем альтернативную модель пульсаций вспышечного радиоизлучения AD Leo, согласно которой они вызваны осцилляциями электрического тока во вспышечной арке, моделируемой эквивалентным электрическим контуром. Такая модель вспышки была предложена Альфвеном и Карлквистом [7] и развита Зайце-

вым и др. [8,9]. Настоящая работа посвящена определению величины электрического тока, магнитного поля и плотности плазмы во вспышке AD Leo, а также энергии и мощности вспышечного процесса.

Данные наблюдений

4 мая 1987 года были проведены уникальные наблюдения звезды AD Leo в дм диапазоне длин волн на телескопе диаметром 305 м в Аресибо [4]. Преимуществами телескопа являются, во-первых, высокая чувствительность по потоку радиоизлучения $\Delta F \approx 5 \cdot 10^{-2}$ мЯн на частоте $f = 1.415$ ГГц, и, во-вторых, возможностью наблюдений с высоким временным разрешением, до 20 мс. В ходе наблюдений были зарегистрированы два интенсивных всплеска с потоками $F_{\max} \approx 0.33$ Ян и $F_{\max} \approx 0.17$ Ян. Оба всплеска характеризовались 100% правой круговой поляризацией и высокой яркостной температурой $T_B \geq 6.2 \cdot 10^{15}$ К и $T_B \geq 3.3 \cdot 10^{15}$ К, соответственно, при размерах источника излучения $\leq 6 \cdot 10^8$ см. Впервые был получен динамический спектр радиоизлучения звезды с общей шириной полосы 40 МГц с центральной частотой $f = 1.415$ ГГц. Частотный диапазон разделен на 64 частотных канала с эффективной шириной полосы $\Delta f = 625$ кГц, в каждом из которых доступно максимальное временное разрешение $\Delta \tau = 20$ мс. Оба всплеска были широкополосными и имели быстрорастущий частотный спектр $\sim f^\alpha$, где в первом случае $\alpha = 12$, а во втором $\alpha = 10$. Наблюдения с высоким временным разрешением, $\Delta \tau = 20$ мс, позволили различить тонкую структуру второго радио всплеска, а именно, квазипериодические пульсации с периодом в интервале 1–3 с, начавшиеся на фазе роста всплеска и перешедшие в более отчетливые осцилляции с периодом 0.7 с. Глубина модуляции радиоизлучения $\Delta \geq 50\%$. Сразу за максимумом наблюдался резкий спад радиоизлучения до уровня шума. На протяжении спада продолжали наблюдаться 0.7-секундные пульсации, пропавшие после восстановления уровня радиоизлучения через 10 с.

Интерпретация особенностей радиоизлучения AD Leo

Наблюдаемые характеристики радиоизлучения, такие как высокая яркостная температура, высокая степень круговой поляризации, большая глубина модуляции, резкий наклон спектра свидетельствуют в пользу когерентной природы данных всплесков. Для интерпретации такого радиоизлучения обычно привлекают два механизма — электронный циклотронный мазер (ЭЦМ) и плазменный механизм. В качестве источника излучения по аналогии с Солнцем обычно рассматривают корональные магнитные арки. Они представляют собой фактически магнитные ловушки для энергичных частиц. Частицы, движущиеся вдоль магнитных силовых линий, беспрепятственно выходят через основания арки в фотосферу. Захваченные частицы, двигающиеся под углом к магнитному полю, отражаются от «магнитных пробок» в основаниях арки, формируя анизотропию типа «конуса потерь».

Сравнительная эффективность ЭЦМ и плазменного механизмов зависит от соотношения плазменной ω_p и гирочастоты ω_B электронов. Исследования инкрементов основных типов волн, возбуждаемых в плазме и способных выйти из источника, показали, что при $\omega_p / \omega_B \leq 0.3$ наибольшим инкрементом обладают необыкновенные (х) волны с частотой $\omega = \omega_B$, при $0.3 \leq \omega_p / \omega_B \leq 1$ — обыкновенные (о) волны с $\omega = \omega_B$ и х-волны с $\omega = 2\omega_B$, при $1 \leq \omega_p / \omega_B \leq 3$ — х-волны с $\omega = 2\omega_B$ [10,11]. ЭЦМ генерирует радиоизлучение вблизи направления, перпендикулярного магнитному полю арки. Но, как показали Степанов и др. [12], х-мода полностью поглощается тепловой плазмой звездных корон на гармониках гирочастоты $s \geq 3$. Для о-моды существуют лишь узкие окна

выхода вдоль магнитного поля. Кроме того, при помощи ЭЦМ сложно объяснить широкополосное излучение. В условиях плотной плазмы ($\omega_p/\omega_B \geq 3$) более эффективным становится плазменный механизм.

Плазменный механизм

Для интерпретации интенсивного радиоизлучения всплесков на звезде AD Leo, зарегистрированных 4 мая 1987 года мы рассмотрим когерентный плазменный механизм радиоизлучения. Захваченные в корональной магнитной арке энергичные частицы формируют неравновесное распределение электронов по скоростям — анизотропию

типа «конуса потерь», определяемую неравенством $\frac{V_{\perp}^2}{V_{\parallel}^2} > \frac{1}{\sigma - 1}$, где

$\sigma = \sigma(z) = B_{\max}/B(z)$ — пробочное отношение арки, z — высота над основаниями арки, V_{\perp} , V_{\parallel} — поперечная и продольная компоненты скорости движения энергичных частиц относительно магнитного поля. Наличие анизотропии, связанной с конусом потерь, приводит к возникновению неустойчивости плазменных волн и к возбуждению ленгмюровской турбулентности. Наибольшим инкрементом в условиях корон Солнца и звезд обладают электростатические волны с частотой вблизи частоты верхнего гибридного резонанса $\omega_{UH} = \sqrt{\omega_p^2 + \omega_B^2}$ [5]. В результате процессов рассеяния плазменные волны трансформируются в обыкновенные и необыкновенные электромагнитные волны. Если рассеяние происходит на частицах фоновой плазмы (рэлеевское рассеяние), то генерируется радиоизлучение основного тона с частотой $\omega = \omega_{UH}$. При слиянии двух плазменных волн (комбинационное рассеяние) возникает радиоизлучение на удвоенной частоте $\omega = 2\omega_{UH}$. Из известного выражения для показателя преломления о- и х- волн [13] находим, что при $\omega_p/\omega_B = 3$ для основного тона $\omega = \omega_{UH}$ выходит только обыкновенная волна, а необыкновенная поглощается плазмой источника. Для второй гармоники $\omega = 2\omega_{UH}$ из источника выходят оба типа волн. Поскольку радиоизлучение AD Leo было 100% поляризовано, мы заключаем, что оно возникло в результате рэлеевского рассеяния плазменных волн с частотой $\omega = \omega_{UH}$. Максимум диаграммы радиоизлучения основного тона направлен вдоль магнитного поля, что способствует выходу радиоизлучения основного тона из короны. Диаграмма радиоизлучения второй гармоники более широкая (квадруполь), так что такое радиоизлучение сильнее поглощается плазмой источника. Для известной частоты радиоизлучения $f = 1.415$ ГГц, учитывая соотношения $\omega_p/\omega_B = 3$ и $\omega = 2\pi f = \omega_{UH}$, получим значения концентрации плазмы $n = 2.2 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и магнитного поля $B = 160$ Гс в источнике.

Модель источника пульсаций

Для интерпретации высокооборотных осцилляций во время второго всплеска радиоизлучения AD Leo привлечем модель возбуждения гармонических осцилляций вспышечной арки как эквивалентного электрического RLC-контура [9]. Данная модель предполагает, что глобальные конвективные движения фотосферной плазмы приводят формированию магнитных трубок и к генерации электрического тока. Под фотосферой в условиях изотропной проводимости происходит замыкание электрического тока, текущего в магнитной арке. Исходя из обобщенного закона Ома для электрического тока в плазме с магнитным полем в нестационарной форме, уравнений Максвелла и уравне-

ния движения плазмы как целого, можно получить уравнение колебаний электрического тока малой амплитуды $|I_{\sim}| \ll I$ в корональной арке [9]:

$$\frac{1}{c^2} L \frac{\partial^2 I_{\sim}}{\partial t^2} + \left(R(I) - \frac{|V_r| l_1}{c^2 r_1} \right) \frac{\partial I_{\sim}}{\partial t} + \frac{1}{C(I)} I_{\sim} = 0, \quad (1)$$

где $|V_r|$ — среднее значение радиальной составляющей скорости конвективного потока внутри трубки в динамо-области фотосферы, r_1 — радиус токового канала в области действия фотосферной э.д.с., l_1 — длина участка электрического контура в этой области. Корональная часть арки значительно более протяженная, чем фотосферная, ($l \gg l_1$), поэтому эффективную емкость контура можно определить как [9]:

$$C(I) = \frac{4\pi r^4 \rho}{l(4I^2 + c^2 r^2 B_z^2(0))}, \quad (2)$$

где ρ — объемная плотность в корональной части магнитной арки, $B_z(0)$ — проекция напряженности магнитного поля на ось петли. Сопротивление электрического контура определяется в основном его фотосферной частью [9]:

$$R(I) = \frac{l_1 F^2 I^2}{2\pi r_1^2 (2 - F) c^4 m_i v_{ia}} \left(1 + \frac{c^2 r_1^2 B_z^2(0)}{4I^2} \right), \quad (3)$$

где $F = n_a m_a / (n_a m_a + n_i m_i + n_e m_e)$ — относительная плотность нейтральных атомов, I — полный электрический ток, текущий вдоль оси арки через ее поперечное сечение, c — скорость света, v_{ia} — частота ионно-атомных столкновений. Если представить магнитную токнесущую арку в виде одного витка соленоида, то ее индуктивность имеет вид [7]:

$$L = 4l \left(\ln \frac{8l}{\pi r} - \frac{7}{4} \right), \quad (4)$$

где r — радиус корональной части магнитной арки.

Значение тока в петле можно получить из выражения для периода осцилляций RLC-контура $P = 2\pi \sqrt{LC(I)}$. Частота таких осцилляций определяется соотношением

$$\nu_{RLC} = \frac{1}{P} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi \Lambda}} \sqrt{1 + \frac{c^2 r^2 B_z^2(0)}{4I^2}} \frac{I}{2cr^2 \sqrt{\pi m_i}}, \quad (5)$$

где $\Lambda = \ln \frac{4l}{\pi r} - \frac{7}{4}$. В случае достаточно сильного тока второе слагаемое под корнем

$\frac{c^2 r^2 B_z^2}{4I^2} \ll 1$. Примем радиус корональной магнитной арки равным $r = d/2 = 3 \cdot 10^8$ см и

ее типичную длину $l = 20d = 1,2 \cdot 10^{10}$ см [14]. Здесь $d = 6 \cdot 10^8$ см — максимальный размер источника, определенный из наблюдений микропульсаций с временным масштабом ~ 20 мс [4]. Используя значение периода осцилляций $P = 0.7$ с, из формулы (5) получаем величину тока $I \approx 2\pi cr^2 \nu_{RLC} \sqrt{nm_i \Lambda} \approx 2 \cdot 10^{12}$ А, а из выражения (2) — значение

ёмкости RLC-контура $C \approx 4,3 \cdot 10^{-3}$ Ф. Следует отметить, что квазипериодические пульсации с периодом 1–3 с на фазе роста вспышки, перешедшие в 0.7-секундные осцилляции говорят о процессе стабилизации электрического тока в процессе вспышки. Исходя из геометрии арки, находим с помощью соотношения (4) индуктивность $L \approx 52$ Гн. От-

сюда величина полной энергии электрического тока, запасенной в арке, оценивается как $W = \frac{LI^2}{2} \approx 10^{26}$ Дж.

Обсуждение и заключение

Из анализа данных о радио и рентгеновском излучении солнечных вспышек следует, что $< 5\%$ энергии, запасенной в корональной магнитной арке, реализуется во время вспышки [9]. Проверим это обстоятельство для рассматриваемой нами вспышки AD Leo 4 ноября 1987 г. Предположим, что, как и на Солнце, радиус магнитной арки с током остается постоянным, а глубина, на которой происходит замыкание тока, порядка 70 км. Используя формулу (3), получим при $F = 0.1$, $n_a = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $T = 10^4 \text{ К}$ эффективную частоту ионно-атомных соударений [15] $\nu_{ia} = 10^{-10} n_a T^{-1/2} \approx 100 \text{ с}^{-1}$ и, следовательно, величину сопротивления вспышечной арки $R \approx 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Отсюда мощность вспышки $\dot{W} = RI^2 \approx 5.6 \cdot 10^{22} \text{ Вт}$. Предположим, что вспышка происходит в одиночной корональной арке. Тогда энергия, выделившаяся в корональной арке за время существования пульсаций $\Delta t \approx 42 \text{ с}$, равна $W = \dot{W} \cdot \Delta t \approx 2.4 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$, что составляет 2,4 % всей энергии. При такой малой доле выделившейся энергии магнитная конфигурация вспышечной арки должна сохраняться.

Сравним полученные в данной работе параметры с параметрами ряда солнечных вспышек, исследованными в работе [9]. Более низкие значения величины тока $I \approx \cdot 10^{11} \text{ А}$, сопротивления $R \approx 10^{-4} - 10^{-3} \text{ Ом}$ и энергии вспышек, $W = 10^{24} \text{ Дж}$, можно связать с более низкой активностью поверхностных слоёв Солнца по сравнению с красными карликами.

Основным свидетельством в пользу модели RLC-контура является высокая добротность наблюдаемых осцилляций. Используя полученные значения R , L и C , найдем

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx 10^4, \text{ что не противоречит данным наблюдений } (Q > 200).$$

Наблюдаемое значение добротности, меньшее, чем теоретическое, обусловлено, по-видимому, эффектом внезапного поглощения. Бастиан и др. [4] предположили, что спад излучения до уровня шума вызвано новой инъекцией электронов в арку, заполнивших «конус потерь», что привело к срыву конусной неустойчивости и прекращению излучения [16].

Модель Бастиана и др. [4], в которой пульсации радиоизлучения связываются с БМЗ-осцилляциями магнитной трубки, не вполне оправдана, поскольку добротность таких осцилляций существенно меньше наблюдаемых. Действительно, вычисленная по формулам работы [17] добротность колебаний, определяемая ионной вязкостью, равна $Q_v \approx 70$. Для затухания из-за электронной теплопроводности $Q_c \approx 60$.

Модель нелинейных пульсаций, вызванных индуцированным рассеянием волн на частицах фоновой плазмы и перекачкой волн в нерезонансную область [18,19] также не подходит. В этом случае период нелинейных осцилляций $P_{nl} \leq 1/\nu_{ei} \approx T^{3/2}/60n \approx 0.02 \text{ с}$ при характерных температуре $T \approx 10^7 \text{ К}$ и плотности плазмы $n \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ в корональных арках красных карликов, что значительно меньше наблюдаемого.

Таким образом, модель эквивалентного RLC-контура предоставляет нам возможность определять величину электрического тока, запасенную в арке энергию электрического тока и мощность вспышки. Модель радиоизлучения на основе плазменного механизма позволяет найти значения концентрации плазмы и магнитного поля в источнике радиоизлучения — области вспышечного энерговыделения AD Leo.

Работа выполнена при содействии гранта РФФИ №06-02-16859 и программы президиума РАН «Звёзды и Галактики».

Литература

1. **Гершберг П.Е.** Активность солнечного типа звезд Главной Последовательности — 2002, Одесса: «Астропринт».
2. **Алексеев И.Ю.** // Астрон.журн. 1998, Т.75, №5, С.736.
3. **Saar S.H., Linsky J.L.** The photospheric magnetic field of the dM3.5e flare star AD Leonis // *Astrophys. J.* 1985, V.299, P.L47–L50.
4. **Bastian T.S., Bookbinder J., Dulk G.A., Davis M.** Dynamic spectra of radio bursts from flare stars // *Astrophys. J.* 1990, V.353, P.165–273.
5. **Stepanov A.V., Kliem B., Krueger K., Hildebrandt, Garaimov V.I.** Second-harmonic plasma radiation of magnetically trapped electrons in stellar coronae // *Astrophys. J.* 1999, V.524, P.961–973.
6. **Зайцев В.В., Степанов А.В., Куприянова Е.Г.** Особенности плазменного механизма радиоизлучения звезд поздних спектральных классов // *Письма в Астрон. Журн.* 2000, Т.26, № 11, С.855–861.
7. **Alfven H, Carlqvist P.** Currents in the solar atmosphere and a theory of solar flares 1967 // *Solar Phys.*, V.1, P.220–228.
8. **Zaitsev V.V., Stepanov A.V.** Towards the circuit theory of solar flares // *Solar Phys.* 1992, V.139, P.343–356.
9. **Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S., Pohjolainen S.** LRC-circuit analog of current-carrying magnetic loop: diagnostics of electric parameters // *Astron. Astrophys.* 1998, V.337, P.887–896.
10. **Hewitt R.G., Melrose D.B., Dulk G.A.** Cyclotron maser emission of auroral Z mode radiation // *J. Geophys. Res.* 1983, V.88, P.10065–10071.
11. **Sharma R.R., Vlahos L.** Comparative study of the loss cone-driven instabilities in the low solar corona // *Astrophys. J.* 1984, V.280, P.405–415.
12. **Stepanov A.V., Furst E., Kruger A., Hildebrandt J., Barwig B., Schmitt J.** Multifrequency observations of a flare on UV Ceti // *Astron. Astrophys.* 1995, V.299, P.739–750.
13. **Железняков В.В.** Излучение в астрофизической плазме. — 1997, М.: «Янус-К».
14. **Mullan D.J., Mathioudakis M., Bloomfield D.S., Christian D.J.** A Comparative Study of Flaring Loops in Active Stars // *Astrophysical J. Suppl. Ser.* 2006, V.164, P.173–201.
15. **Leake J.E., Arber T.D., Khodachenko M.L.** Collisional dissipation of Alfvén waves in a partially ionised solar chromosphere // *Astron. Astrophys* 2005, V.442, P.1091–1098.
16. **Zaitsev V.V., Stepanov A.V.** On the origin of fast drift absorption bursts *A&A* **45** 135 1975.
17. **Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цан Ю.Т.** Радиальные колебания корональных магнитных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // *Письма в АЖ* 2002, Т.28, С.870–879.
18. **Зайцев В.В.** К вопросу о стабилизации пучковой неустойчивости // *Известия ВУЗ. Радиофизика* 1970, Т.13, С.1016–1024.
19. **Fleishman G.D., Stepanov A.V., Yurovsky Yu.F.** Microwave burst of November 17, 1991: Evidence for fragmented particle injection into a coronal loop // *Space Sci. Rev.* 1994, V.68, P.205–210.

PULSATIONS OF RADIO EMISSION FROM AD LEO AND DIAGNOSTICS OF ELECTRIC CURRENTS IN EMISSION REGION

Kouprianova E.G., Stepanov A.V.

Summary

Interpretation of high quality pulsations during the AD Leo flare on November 4, 1987 observed by 305 m radio telescope at Arecibo in 21 cm range is proposed. Pulsations are related to electric current oscillations in a coronal magnetic arch as equivalent RLC-circuit. High brightness temperature of fully polarized radio emission of the flare ($\sim 10^{16}$ K) is caused by coherent plasma emission. The values of electric current, magnetic field, and plasma density are computed and the energy of the flare is estimated.

О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ 2400-ЛЕТНИМ КЛИМАТИЧЕСКИМ РИТМОМ И УЗЛОВОЙ ПРЕЦЕССИЕЙ КОМЕТНО-МЕТЕОРОИДНОГО КОМПЛЕКСА ТАВРИД

Огурцов М.Г.

Исследована возможная связь вариации земного климата с периодом 2.0-2.5 тысяч лет (цикл Халльштатцайта) с узловой прецессией ядра метеороидного комплекса Таврид, период которой равен 2.25-2.5 тысяч лет. Отмечено, что экстремумы цикла Халльштатцайта хорошо совпадают с периодами пересечения земной орбиты ядром указанного комплекса. Поскольку именно в данные эпохи интенсивность бомбардировки Земли космическими телами резко возрастает, были оценены результаты возможного столкновения Земли с каменным астероидом диаметром 250 м движущимся со скоростью 25 км/с. Показано, что отклик земной атмосферы на падение подобного астероида будет весьма существенным и вклад цепочки таких катастрофических событий в формирование 2400-летнего климатического ритма может оказаться ощутимым.

Глобальный цикл с периодом около 2400 лет и его возможная природа

Цикличность с периодом 2.0-2.5 тысяч лет отчетливо проявляется в концентрации радиоуглерода в древесных кольцах (Houtermans, 1971; Damon and Sonnett, 1991; Damon and Jirikowic, 1992; Васильев и др., 1999; Vasiliev and Dergachev, 2002). Эту вариацию Дамон и Жирикович (1992) назвали циклом Халльштатцайта (ЦХ) т.к. она хорошо коррелирована с эпохами похолодания и потепления отмеченными Шмидтом и Грюле (Schmidt and Gruhle, 1988). ЦХ ясно прослеживается и в других климатических и археологических данных (Шнитников, 1957; Dansgaard et al., 1984; O'Brien et al., 1995; Васильев и др., 1997). На рис.1А показан радиоуглеродный ряд, полученный в рамках программы INTCAL98 (Stuiver et al., 1998), после удаления долговременного ($T > 5000$ лет) тренда.

В данной работе исследовалась только та часть исходной серии (Стуйвер и др., 1998), которая была получена на основе измерения концентрации ^{14}C в кольцах деревьев, росших на средних широтах (Германия, Ирландия, Орегон, Калифорния) т.е. до 11854 до н.э. Из рис. 1 видно, что вариация с периодом примерно 2400 лет четко выражена, как в сглаженном ряду Стуйвера (рис. 1А) так и, особенно, в 1800 летней взвешенной компоненте данного ряда (рис. 1Б). Причины радиоуглеродной и климатической вариаций с периодом 2.0-2.5 тысячи лет до конца не выяснены. Худ и Жирикович (Hood and Jirikowic, 1990) предположили, что причиной ~ 2400 -летнего цикла в $\Delta^{14}\text{C}$ является соответствующее колебание солнечной активности. В работах Васильев и др. (1999), Vasiliev and Dergachev (2002) предположено, что и климатический и радиоуглеродный ритмы вызваны ~ 2400 -летним циклом в активности Солнца. Данный цикл воздействует на атмосферный радиоуглерод двумя путями: (а) прямым образом, через солнечную модуляцию интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) непосредственно генерирующих ^{14}C в атмосфере; (б) косвенным образом, через солнечную модуляцию глобального климата Земли, вызывающую синхронные с солнечными колебания параметров углеродообменной системы. Если 2400-летняя вариация в $\Delta^{14}\text{C}$ является только проявлением соответствующего гелиоклиматического ритма, то радиоуглеродный и солнечный циклы должны развиваться сходным образом. Для проверки этого предположения сопоставим 2400-летние вариации в радиоуглероде и в ^{10}Be . Бе-

риллиевый ряд, измеренный в рамках проекта GISP2 в ледовом керне из южной Гренландии (Alley et al., 1995; Finkel and Hishiizumi, 1997), охватывает промежутки 3300-8000 лет назад и 9400-40000 лет назад.

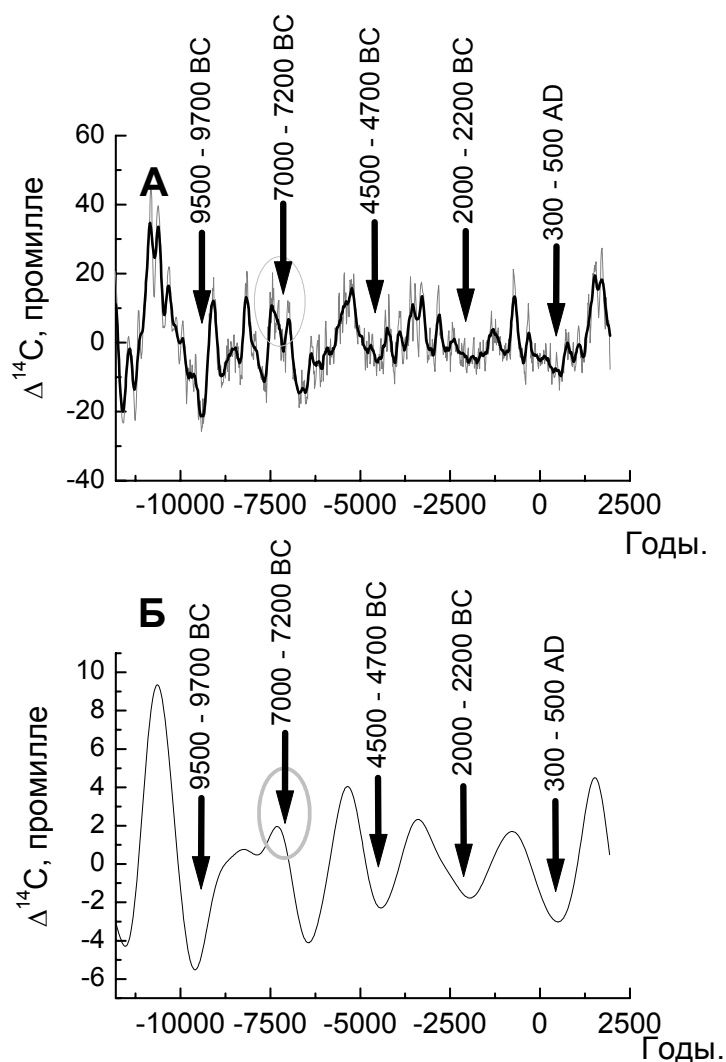


Рис. 1.

А – декадная радиоуглеродная серия, INTCAL98 (Stuiver et al., 1998). Исходный ряд после вычитания долговременного ($T > 5000$ лет) тренда – серая линия. Тот же ряд, но сглаженный по десяти точкам – толстая чёрная линия. Стрелками показаны предполагаемые эпохи пересечения орбиты Земли ядром комплекса Таврид.

Б – 1800-летняя вэйвлет-компонента радиоуглеродной серии INTCAL98. Стрелками показаны предполагаемые эпохи пересечения орбиты Земли ядром комплекса Таврид.

Как видим, интервалы измерения серий GISP2 и INTCAL98 частично перекрываются, что делает возможным сравнение ~2400-летнего циклов в обоих рядах. С учётом того, что концентрация бериллия в полярном льду зависит от колебаний глобального климата значительно слабее, чем концентрация ^{14}C в атмосфере, такое сопоставление представляется потенциально весьма информативным. Оно произведено на Рис.2. Из рисунка видно, что хотя долговременные (периоды более 600 лет) вариации в рядах данных по ^{10}Be и $\Delta^{14}\text{C}$ действительно схожи, есть и заметные различия: (а) концентрация бериллия в полярном льду, в отличие от радиоуглерода, не имеет провала ~9600 лет до н.э., (б) – ЦХ в бериллии в период 1300-6000 до н.э. искажается более кратковремен-

ными флуктуациями. Они дают подъёмы концентрации ^{10}Be примерно 2150 и 4500 до н.э., которые отсутствуют в $\Delta^{14}\text{C}$. Подобные расхождения дают основание предположить, что помимо активности Солнца, определённый вклад в ~ 2400 -летнюю периодичность радиоуглерода дают и другие факторы. В этой связи уместно отметить гипотезу об узловой прецессии ядра кометно-метеороидного комплекса Таврид с периодом 2.25-2.5 тысяч лет, которая была изложена в работах Ашера и Клубе (Asher and Clube, 1993, 1997; Clube, 1998).

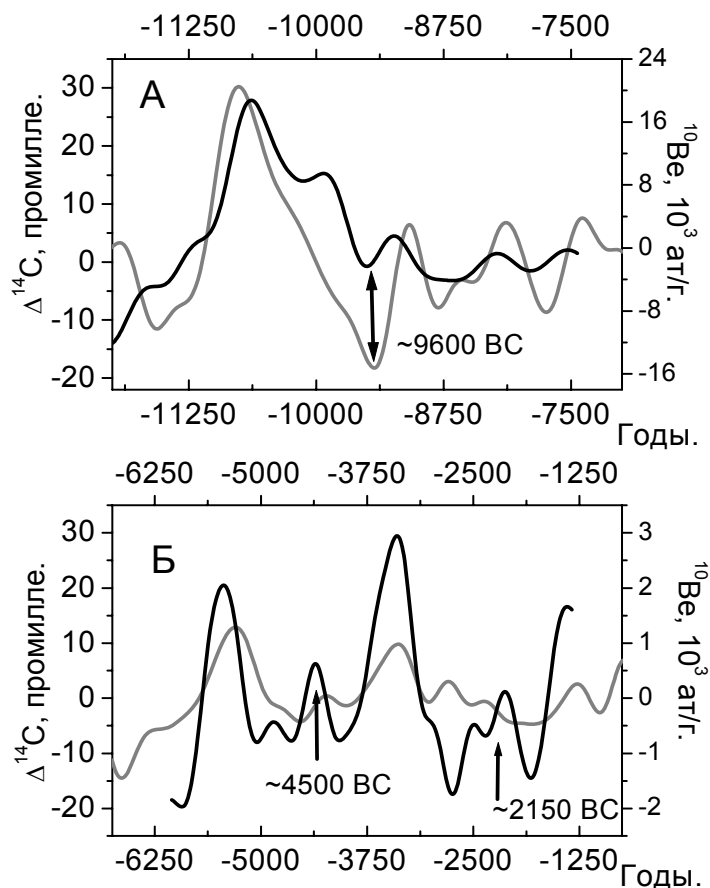


Рис. 2. Фильтрованные Фурье-фильтром (вариации с периодами более 600 лет подавлены) ряды данных. Серая линия - концентрация ^{14}C в древесных кольцах [Stuiver et al., 1998], чёрная линия - концентрация ^{10}Be в гренландском льду [Finkel, R.C., and K. Nishiizumi, 1997].

Тавриды представляют собой широкий поток кометных обломков, пересекающий орбиту Земли дважды в год (в июне-июле и сентябре-декабре). Этот метеороидный комплекс, скорее всего, сформировался в течение последних 10-20 тысяч лет в результате дефрагментации огромной кометы (Steel et al., 1991; Steel and Asher, 1996; Бабаджанов, 1999). Внутри этого потока, согласно Ашеру и Клубе, лежит узкое ядро, которое вследствие узловой прецессии пересекает орбиту Земли каждые 2.25-2.5 тысячи лет в течение около двух столетий. Очевидно, что периоды узловой прецессии комплекса Таврид и ЦХ весьма близки. Более того, экстремумы ЦХ согласуются с эпохами пересечения земной орбиты ядром потока. Последние такие пересечения, согласно расчётам Asher and Clube (1993), Clube (1998) произошли примерно 1500 и 4000 лет назад. На рис. 1А периоды предполагаемых эпох пересечений продлены до 12 тысяч лет назад. Как видно из рис. 1А почти все минимумы ЦХ в радиоуглероде хорошо совпадают с вышеуказанными эпохами. Более того, пересечения, имевшие место 2000-2200 до н.э.,

4500-4700 до н.э., 9500-9700 до н.э., приходится на периоды заметного расхождения между бериллиевыми и радиоуглеродными данными.

Очевидно, что в эпохи пересечения орбиты Земли ядром комплекса Таврид интенсивность бомбардировки земной поверхности кометными обломками резко возрастает. Поэтому Клюбс (1998) предположил, что ЦХ есть цикл глобальных похолоданий Земли (“ударная зима”), связанных с выбросами в атмосферу значительного количества мелкодисперсной пыли и сажи, возникающими при падениях крупных астероидов. Следует отметить, однако, что, концентрация радиоуглерода в атмосфере коррелирует с температурой отрицательно (Дергачёв и Векслер, 1991; Peristykh and Damon, 1998). Это означает, что минимумы $\Delta^{14}\text{C}$, совпадающие с периодами пересечений, должны соответствовать максимумам температуры, т. е. потеплениям, а не похолоданиям. Вторых, согласно Меведеву и др. (1996), для того, чтобы вызвать заметный глобальный температурный эффект энергия удара должна быть не менее 2×10^5 Мт тринитротолуола (ТНТ). Это соответствует падению каменного астероида, с диаметром 1.4 км и скоростью 20 км/сек. Вероятность случайного столкновения такого астероида с Землёй очень мала – не более чем раз в 8×10^5 лет (Медведев и др., 1996). Разумеется, когда земная орбита попадает в центр потока Таврид, эта вероятность должна резко возрасти. Но сможет ли она вырасти настолько, чтобы обеспечить падение каждые 2 500 лет – вопрос, на который трудно ответить. Полученные недавно палеоклиматические данные, однако, дают новое звучание гипотезе о связи ЦХ с прецессией ядра Таврид.

Географическое распределение 2400-летней вариации

Погодичная реконструкция июльской температуры в северной Фенноскандии длительностью около 7500 лет была получена недавно в работе (Helama et al., 2002) с помощью методов дендрохронологии. В этом ряду была обнаружена заметная вариация с периодом около 2.1 тысячи лет. На рис.3 приведены данные по летней температуре в СФ и концентрации радиоуглерода, вэйвлетно-фильтрованные в полосе 1580-2700 лет.

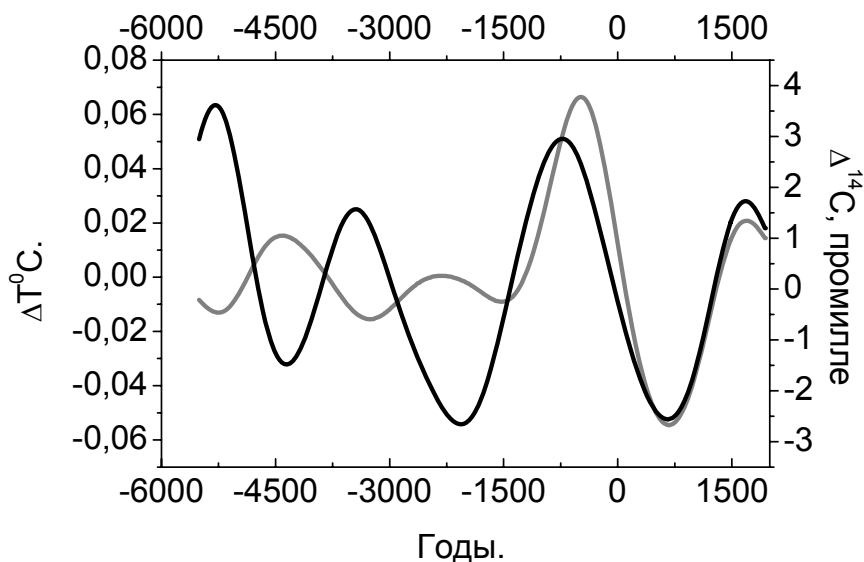


Рис. 3. Вэйвлетно-фильтрованные в полосе 1570-2740 лет ряды данных. Чёрная линия - концентрация ^{14}C в древесных кольцах [Stuiver et al., 1998], Серая линия – реконструкция июльской температуры в северной Фенноскандии (Helama et al., 2002).

Из рисунка видно, что фазовое соотношение между ЦХ в двух сериях не постоянно - до 1500 до н. э. они коррелируют отрицательно, а после – положительно. Это означает, что, например, в эпоху Малого Ледникового Периода (МЛП, $\cong 1450-1800$), соот-

ветствующую минимуму ЦХ и обычно считающуюся периодом глобального похолодания (максимум ЦХ в концентрации¹⁴C), в северной Фенноскандии, наоборот, было теплее обычного. Ряд других современных палеоклиматических данных также ставит под сомнение существование глобального МЛП. Эти палеоданные указывают на то, что в соответствующую эпоху в одних точках Земли было теплее обычного, а в других – холоднее (см. Overpeck, 1995; IPCC, 2001). Поэтому допустимо предположить, что ЦХ не является чередой общепланетарных потеплений-похолоданий, а имеет региональное географическое распределение, т.е. 2400-летние периодичности в разных областях Земли имеют разные фазы. Т.е. в ходе ЦХ подъём температуры в одних областях планеты сопровождается похолоданием в других. Если это так, то 2400-летнюю вариацию разумно трактовать не как осцилляцию величины полной энергии, содержащейся в нижней тропосфере Земли, но как колебание в распределении этой энергии между различными регионами планеты при неизменной глобальной величине. Изменения в региональном распределении тепла возникают обычно вследствие колебаний общей циркуляции атмосферы. Атмосферная циркуляция, в свою очередь, весьма чувствительна даже к не слишком сильным вариациям химического состава атмосферы, особенно к изменениям содержания озона и окислов азота (Пудовкин и Распопов, 1992; Haigh, 1994; Пудовкин, 1995; Shindell, 1999). Это значит, что для заметного нарушения общей циркуляции атмосферы не обязательно столь сильного воздействия, как удар астероида в 10^5 Мт ТНТ. Покажем это ниже.

О возможных климатических последствиях падения астероида диаметром 250 метров

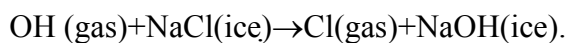
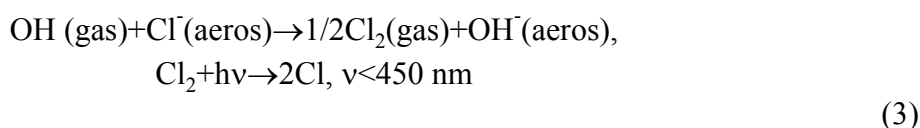
Скорости, с которыми астероиды пересекают земную орбиту, заключены в диапазоне 11-72 км/с (Коробейников и др., 1997). Оценим возможные последствия падения каменного астероида диаметром 250 м и плотностью $3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ движущегося со скоростью 25 км/с. Астероиды такого размера могут сталкиваться с Землёй раз в 15000 тысяч лет (Медведев, 1996) если моменты соударений распределены случайно. Следует отметить, что астероид, скорее всего, упадёт в океан т.к. океаны покрывают не менее 70% земной поверхности. Вероятность падения в океан составит примерно 1/21000 лет. Но, как уже было отмечено, в периоды, когда земная орбита оказывается внутри ядра Таврида, столкновения значительно учащаются. Поэтому, предположим, что каждое из таких пересечений, случающихся раз в 2.25-2.5 тысячи лет, сопровождается падением каменного астероида с указанными выше параметрами. Т.е., в качестве модели взаимодействия Земли с комплексом Таврида будем рассматривать падение астероида в каждую эпоху пересечения ядром комплекса земной орбиты. Энергию удара подобного тела ($R=250 \text{ м}$, $v=25 \text{ км с}^{-1}$, $\rho=3.0 \text{ г см}^{-3}$):

$$E_{imp} = \frac{4}{3} \pi R^3 \times \frac{\rho v^2}{2} \cong 1800 \text{ Мт ТНТ} \quad (1)$$

В результате такого удара в толще океанской воды образуется полость диаметром около 5 км и глубиной около 3 км (Кроуфорд и Мадер, 1998). Объём этой полости достигнет примерно 50 км^3 . Значительная часть воды, занимавшей данную полость, попадёт в виде брызг и пара в атмосферу. Согласно работе (Toon et al., 1994) масса воды, выброшенной в атмосферу в виде пара, достигнет 11 масс упавшего тела, т.е. 2.1×10^3 Мт воды. В виде брызг в атмосферу попадёт около 4×10^3 Мт воды (Toon et al., 1994). Оценим высоту в атмосфере, которой эта водяная масса может достичь. Произведём оценку при помощи формулы:

$$h = \frac{E_{ok}}{m_{ok} g}. \quad (2)$$

где m_{ok} – масса выброшенной в атмосферу воды, E_{ok} – энергия, переданная этой водной массе, h – средняя высота подъёма водной массы m_{ok} в атмосфере. Тогда если E_{ok} составит всего 3% от полной кинетической энергии удара E_{imp} средняя высота заброса воды достигнет 40 км. Очевидно, что из шести мегатонн морской воды, выброшенной при падении астероида, значительная часть достигнет стратосферных, и, возможно, мезосферных высот. Водные массы, попавшие в атмосферу в виде брызг, быстро (вероятно в течение нескольких дней) осядут на поверхность, поэтому их воздействие на атмосферу рассматривать не будем. Что касается воды в виде пара (2.1×10^3 Мт), то она может находиться в стратосфере в течение нескольких лет (Toon et al., 1994). Оценим возможные последствия такого увлажнения стратосферы. Полный естественный приход H_2O в стратосферу (главным образом за счёт окисления метана) не превышает 50 Мт/г (Кароль и Киселёв, 2001). Из этого следует, что если более 10^3 Мт воды попадёт в стратосферу это будет эквивалентно естественному поступлению за несколько десятилетий. Можно отметить также, что полная масса воды, содержащейся в атмосфере на высотах более 30 км, не превышает нескольких сотен мегатонн. Очевидно, что увлажнение стратосферы, следующее за падением астероида, будет беспрецедентным и резко изменит её химическое состояние. В атмосфере молекулы воды распадаются, образуя радикал ОН который способен разрушать озон. Особенно разрушителен для озонового слоя будет хлор, привнесённый морской водой. Если 2.1×10^3 Мт воды с типичной солёностью 3.5% достигнет стратосферы, то в неё попадёт не менее 40 Мт хлора. Годовое поступление хлора в стратосферу обеспечиваемое всей современной промышленностью составляет около 1 Мт (Prather et al., 1990). Оценки вулканического вклада в поступление хлора в стратосферу дают величины 0.1-1.0 Мт/год (Symonds et al., 1998). Следовательно, в результате падения астероида в океан, в стратосферу мгновенно поступит количество хлора равное количеству, приносимому всей современной индустрией за 40 лет, и совместно индустрией и вулканами за 20 лет. Хлор, поступивший в атмосферу в составе раствора поваренной соли, может эффективно перерабатываться в реактивный хлор в цепочке гетерогенных химических реакций:



Атомарный хлор, в свою очередь, является эффективным разрушителем озона. Оценим последствия заброса в стратосферу нескольких кубических километров солёной воды. Всего в атмосфере находится 3×10^{15} г озона – 3.7×10^{37} молекул O_3 .

После падения астероида в стратосферу попадёт около 1.5×10^{36} атомов хлора в составе NaCl. Если всего 4×10^4 из них превратятся в атомарный Cl то весь озоновый слой будет уничтожен. Это значит, что удар в океан астероида энергией свыше 10^3 Мт ТНТ способен вызвать катастрофическое разрушение озонового слоя над значительной частью земной поверхности, а, возможно, и в глобальном масштабе. Скорее всего, возникнут и другие изменения в стратосферной химии, которые трудно предсказать заранее. В результате произойдёт беспрецедентное изменение химического состава атмосферы, и, как следствие, сильнейшее нарушение энергетического баланса. Это, в свою очередь, должно заметно трансформировать атмосферную циркуляцию. Действительно, происходящее в ходе 11-летнего солнечного цикла изменение количества страто-

сферного озона всего на несколько процентов, уже способно значительно изменить циркуляцию атмосферы (Haigh, 1994, 1996; Shindell et al., 1999; Tourpali et al., 2003; Rozanov et al., 2004). Следующий возникающий вопрос связан с относительной краткостью описываемого эффекта. Согласно (Toon et al., 1994) даже полностью разрушенный озоновый слой восстановится в течение примерно одного года. Однако, резкое воздействие на атмосферу может служить триггером, включающим механизмы с гораздо большей длительностью действия. Нечто похожее имеет место у земного вулканизма. Известно, что выбрасываемая при извержении вулканов пыль находится в атмосфере Земли не более нескольких месяцев, а сульфатный аэрозоль, забрасываемый в стратосферу при особо мощных вулканических взрывах, находится там не более 7 лет (Bekki et al., 1996). С другой стороны, исследования, проведённые в работах Briffa et al. (1998), Ogurtsov et al. (2002), Zielinski (2000), и многих других свидетельствуют о способности мощных вулканических извержений изменять климат Земли на временных шкалах в десятки и сотни лет. Более того, в работе Zielinski (2000) обсуждается возможное влияние мега-извержения вулкана Тоба ($\cong 72000$ лет назад) на стадиал – глобальное похолодание Земли длительностью порядка тысячи лет. Автор объясняет, это действием механизмов обратной связи, запущенных данным мощнейшим взрывом. Вполне возможно, что удар астероида в океан с полным энерговыделением свыше 10^3 Мт ТНТ также способен иметь достаточно продолжительные последствия для климата.

Конечно, объяснить 2400-летний климатический цикл только периодическими падениями астероидов комплекса Таврид невозможно. Однако, цепочка подобных событий, совпадающих по времени с экстремумами ЦХ (300-500 н.э., 2000-2200 до н.э., 4500-4700 до н.э., 9500-9700 до н.э. см. Рис.1) вполне может входить в резонанс с указанным ритмом, усиливать его и придавать ему наблюдаемую чёткость. Особенно любопытно, рассмотреть промежуток времени 7000-7200 до н.э. Это единственная эпоха пересечения земной орбиты ядром потока Таврид, пришедшаяся не на минимум ЦХ в $\Delta^{14}\text{C}$, а на его максимум (см. Рис. 1^б). Из Рис. 1^а видно, что, несмотря на общий подъём средней концентрации радиоуглерода в, связанный с максимумом ЦХ, как раз в 7000-7200 до н. э. на графике $\Delta^{14}\text{C}$ наблюдается отчётливый провал, продолжительностью около 200 лет

Заключение

Произведённый в работе анализ позволил сделать следующие выводы:

1) Была подтверждена связь экстремумов климатического цикла Халльстатцайта (вариация с периодом 2.0-2.5 тысяч лет) с периодами пересечения орбиты Земли ядром астероидно-метеороидного комплекса Таврид.

2) На основе современных палеоклиматических данных было показано, что цикл Халльстатцайта (вариация с периодом 2.0-2.5 тысяч лет), возможно, есть не глобальное колебание полного количества тепла, содержащегося в нижней атмосфере Земли, но колебание распределения неизменного количества тепла между различными географическими регионами нашей планеты. Такие изменения в региональном распределении энергии возникают при соответствующих трансформациях атмосферной циркуляции.

3) Поскольку именно в эпохи пересечения орбиты Земли ядром кометно-метеороидного потока Таврид интенсивность бомбардировки земной поверхности космическими телами возрастает, были произведены качественные оценки возможных климатических последствий падения в океан астероида, сопровождающегося энерговыделением в 2×10^3 Мт ТНТ. Было показано, что такое событие приведёт к катастрофическому разрушению озонового слоя и, как следствие, к значительным переменам в системе циркуляции атмосферы.

Таким образом, было показано, что падение каменного астероида с диаметром 250 м, скоростью 25 км/с, и плотностью 3 г см^{-3} случающееся примерно раз в 2.5 тысячи лет (периоды пересечения орбиты Земли ядром комплекса Таврид) может давать вклад в 2400-летнюю временную вариацию земного климата. Разумеется, подобный вывод носит характер гипотезы, базирующейся лишь на качественных оценках и достаточно произвольных предположениях. Для подтверждения или опровержения этой гипотезы необходима дальнейшая работа. Во-первых, следует оценить, насколько возрастёт вероятность соударения Земли с астероидом, когда её орбита попадает в ядро Таврид. Сразу же можно отметить, что сделать это непросто, т.к. из малых астероидов (размеры менее 1 км) на сегодняшний день, согласно Медведеву и др. (1996), открыто не более 7%. Во-вторых, нужны более точные и надёжные оценки возможных климатических последствий столкновения астероида с Землёй, что требует дальнейшего прогресса в нашем знании о химии атмосферы и её влиянии на атмосферную циркуляцию на длительных временных шкалах.

Работа была выполнена в рамках программы обмена между Российской и Финской Академиями наук (проект №16), программы президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля” и поддержана грантами РФФИ 04-02-17560, 06-02-16268.

Литература

- Бабаджанов П.Б.** Родственные метеорные потоки астероидов комплекса Таурид // Астрон. Вестник. 1999. Т. 33. № 2. С. 159-168.
- Васильев С.С., Дергачев В.А., Чистяков В.Ф.** Выявление ~2400-летнего цикла в концентрации ^{14}C и восприимчивость поведения человека к изменениям климата в прошлом // Радиоуглерод и Археология. 1997. Вып.2. С. 13-36.
- Васильев С.С., Дергачёв В.А., Распопов О.М.** Источники долговременных вариаций концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли // Геомагн. и Аэрон. 1999. Т.39. №6. С. 749.
- Дергачёв В.А., Векслер С.В.** // Применение радиоуглеродного метода для изучения природной среды прошлого. Л.: 1991.
- Кароль И.Л., Киселёв А.А.** // Природа. 2001. Т. 5. С. 60-66.
- Коробейников В.П., Гусев С.Б., Семёнов И.В.** О моделировании разрушений космических тел в атмосфере Земли // Астрон. Вестник. 1997. Т. 31. №4. С. 370-384.
- Медведев Ю.Д., Свешников М.Л., Сокольский А.Г., Тимошкова Е.И., Чернетенко Ю.А., Черных Н.С., Шор В.А.** Астероидно-кометная опасность. С.-Петербург, 1996. 244 С.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М.** Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы // Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. №5. С. 1-10.
- Пудовкин М.И.** Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Соросовский образовательный журнал. 1995. №10. С. 106-113.
- Шнитников А.В.** Изменчивость общей увлажнённости материков Северного полушария // Записки Геогр. общества СССР. 1957. Т.16. С. 1-336.
- Alley, R.B., R.C. Finkel, K. Nishiizumi, S. Anandakrishnan, C.A. Shuman, G.R. Mershon, G.A. Zielinski, and P.A. Mayewski.** Changes in continental and sea-salt atmospheric loadings in central Greenland during the most recent deglaciation: Model-based estimates // Journ. of Glaciol. 1995. V. 41. P. 503-514.
- Asher D.J., Clube S.V.M.** An extraterrestrial influence during the current glacial-interglacial // Quat. Journ. Roy. Astr. Soc. 1993. V. 34. P. 481-511.
- Asher D.J., Clube S.V.M.** Towards a dynamical history of “proto-Encke” // Celest. Mech. and Dynam. Astron. 1997. V. 69. P. 149-170.

- Bekki S., Pyle J.A., Zhong W., Toumi R., Haigh J.D., Pyle D.M.** The role of microphysical and chemical processes in prolonging the climate forcing of the Toba eruption // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 2669-2672.
- Brasser G., Solomon S.** Aeronomy of the middle atmosphere, 1984. D. Reidel, Dordrecht.
- Clube S.V.M.** The problem of historical catastrophism // in: ed. by B.J. Peiser, T. Palmer and Bailey M.E., *Natural catastrophes during Bronze Age civilizations: archaeological, geological, astronomical and cultural perspectives.* Publ. Archaeopress, Oxford. 1998. P. 242.
- Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J.** Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years // *Nature.* 1998. V. 393. P. 450-455.
- Crawford D.A., Mader C.L.** Modelling asteroid impact and tsunami // *Sci. of tsunami hazards.* 1998. V.10. №1. P.21-31.
- Damon P.E., Sonett C.P.** Solar and terrestrial components of the atmospheric ^{14}C variation spectrum // in: ed. by C.P. Sonett, M.S. Giampapa, M.S. Mathews, *The Sun in time.* Tuscon, Univ. of Arizona press. 1991. P. 360.
- Damon P.E., Jirikowic J.L.** Solar forcing of global climatic change? // In: ed. by R.E. Taylor, A. Long, R.S. Kra. *Radiocarbon after four decades: an interdisciplinary perspective.* Springer-Verlag, New York. 1992. P. 117-129.
- Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gunderstrup N., Hammer C., Oeshger H.** North Atlantic climate oscillations revealed by deep Greenland ice core, In: ed. by Hansen J.E. and Takahashi T. *Climate Processes and Climate Sensitivity,* AGU, Washington, D.C. 1984. P. 288-298.
- Finkel, R.C., K. Nishizumi.** Beryllium 10 concentrations in the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core from 3-40 ka // *Journ. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 26699-26706.
- Haigh I.D.** The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate // *Nature.* 1994. V. 370. P. 544-546.
- Haigh I.D.** The impact of solar variability on climate // *Science.* 1996.V. 272. P. 981-984.
- Helama, S., Lindholm, M., Timonen, M., Eronen, M.** The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland – Part 2: interannual to centennial variability in summer temperatures for 7500 years. // *The Holocene.* 2002. V. 12. № 6. P. 681-689.
- Houtermans J.C.** 1971. Geophysical interpretation of Bristlecone pine radiocarbon measurements using a method of Fourier analysis of unequally spaced data // Ph.D. Thesis. 1971. Univ. of Bern.
- Hood L.L., Jirikowic J.L.** Recurring variations of probable solar origin in the atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ time record // *Geophys. Res. Letters.* 1990. V. 17. P. 85.
- IPCC (2001).** ed. by Houghton et al., IPCC third assessment report, *Climate change 2001: the scientific basis,* Cambridge University Press. 881 P.
- O'Brien S.R., Mayewski P.A., Meeker L.D., Meese D.A., Twickler M.S., Whithlow S.I.** Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core// *Science.* 1995. V. 270. P. 1962-1964.
- Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Lindholm M., Jungner H., Nagovitsyn Yu.A.** // Evidence of solar variation in tree-ring-based climate reconstructions // *Solar Phys.* 2002. V.205. P. 403-417.
- Overpeck J.T.** Paleoclimatology and climate system dynamics // *Rev. of Geophys.* 1995. V. 33. №3S. P.863-871
- Prather M.J., Garcia M.M., Douglass A.R., Jackman C.H., Ko M.K.W., Sze N.D.** The space Shuttle's impact on the stratosphere // *Journ. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 18583.
- Peristykh A.N., Damon P.E.** Modulation of atmospheric ^{14}C concentration by the solar wind and irradiance components of the Hale and Schwabe solar cycles // *Solar Phys.* 1998. V. 177. № 1/2. P. 343-355.
- Rozanov E.V., Schlesinger M.E., Egorova T.A., Li B., Andronova N., Zubov V.A.** Atmospheric response to the observed increase of solar UV radiation from solar minimum to solar

- maximum simulated by the University of Illinois at Urbana-Champaign climate-chemistry model // Journ. Geophys. Res. 2004. V. 109. D01110, doi:10.1029/2003JD003796.
- Symonds R.B., Rose W.F., Reed M.H.** Contribution of Cl and F-bearing gases to the atmosphere by volcanoes // Nature. 1988. V. 334. P. 415.
- Steel D.I., Asher D.J., Clube S.W.M.** The structure and evolution of the Taurid complex // Month. Not of Roy. Astr. Soc. 1991. V. 251. P. 806-822.
- Steel D.I., Asher D.J.** The orbital dispersion of the macroscopic Taurid objects // Month. Not of Roy. Astr. Soc. 1996. V. 280. №3. P. 806-822.
- Stuiver M., Reimer P. J., Bard E., Beck J. W., Burr G. S., Hughen K. A., Kromer B., McCormac F. G., v. d. Plicht J., Spurk M.** INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24 000-0 cal BP // Radiocarbon. 1998. V. 40. P. 1041-1083.
- Shindell, D., Rind, D., Balachandran, N., Lean, J. and Lonergan, P.** Solar cycle variability, ozone and climate // Science. 1999. V. 284. P. 305-308.
- Schmidt B., Gruhle W.** Radiokohlenstoffgehalt und dendrochronologie // Naturwissenschaftliche Rundschau. 1988. V. 5. P. 177-182.
- Shumilov O.I., Henriksen K., Raspopov O.I., Kasatkina E.I.** Arctic ozone abundance and solar proton events // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 1647-1650.
- Shumilov O.I., Kasatkina E.I., Henriksen K., Raspopov O.I.** Ozone “mini-holes” initiated by energetic solar protons // Journ. Atmosph. Terrestr. Phys. 1995. V. 57. P. 665-671.
- Toon O.B., Zahle K., Turco R.P., Cowey C.** Environmental perturbations caused by impacts. In: ed . by T. Gehers. Hazards due to comets and asteroids. The Univ. of Arizona Press, Tuscon&London. 1994. P. 791-827.
- Tourpali K., Schuurmarns C.J.E., van Donald R., Steil B., Bruhl C.** Stratospheric and tropospheric response to enhanced solar UV radiation: a model study // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 30. DOI:10.1029/2002GL016650.
- van Geel B., Raspopov O.M., van der Plicht J., Renssen H.** Solar forcing of abrupt climate change around 850 calendar years BC // in: ed. by B.J. Peiser, T. Palmer and Bailie M.. Natural catastrophes during Bronze Age civilizations: archaeocological, geological, astronomical and cultural perspectives. Publ. Archaeopress, Oxford. 1998. P. 162-168.
- Vasiliev S.S., Dergachev V.A.** The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: bispectrum of ^{14}C data over the last 8000 years // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 115-120.
- Zielinski, G.A.** Use of paleo-records in determining variability within the volcanism-climate system // Quaternary Science Reviews. 2000. V.19. P. 417-438.

ON THE POSSIBLE RELATIONSHIP BETWEEN CA 2400 YEAR CLIMATIC RHYTHM AND NODAL PRECESSION OF THE TAURID COMET-METEOROID STREAM

Ogurtsov M.G.

Summary

A possible relationship between terrestrial climatic variation with a period 2.0-2.5 kyr (the Hallstattzeit cycle) and nodal precession of the core of Taurid meteoroid stream was analyzed. It was shown that extremes of the Hallstattzeit cycle coincide well with the data of intersection of the Earth's orbit by the core of Taurid complex. Since in these epochs intensity of the Earth's bombardment by cometary debris increases sharply, we have estimated the effect of a possible collision between the Earth and an asteroid 250m in diameter traveling at $20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. It was shown that climatic consequences of such impact might be substantial and therefore a chain of such events may significantly contribute to 2.4 kyr climatic variations.

ЦВЕТА ГАЛАКТИК КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Полякова Г.Д.

Для 83 родительских галактик сверхновых типа II определены редуцированные к системе каталога RC3 значения ряда физических параметров (позиционных углов PA, изофотных диаметров D и отношений осей b/a). Изображения этих галактик, полученные из STScI Digital Sky Survey, использовались для определения их морфологических типов. Вычисленные для них по данным APM Sky Catalogues показатели цвета $(B - R)$ редуцировались в $(B - V)_T(\text{cor})$, которые исправлялись за покраснение и величины $(B - V)_T^0(\text{cor})$ сравнивались со средними значениями показателей цвета $\langle (B - V)_T^0 \rangle$ спиральных и неправильных галактик из каталога RC3.

1. Введение

Морфологическая классификация галактик обычно проводится по их прямым изображениям, полученным для голубой области спектра. Широкое распространение получила система Хаббла [1, 2], основанная на эмпирических критериях, связанных с формой и структурой этих объектов. Ими являлись: 1) отношение размеров центрального аморфного балджа и диска, 2) характер спиральных рукавов и 3) степень разрешения на звезды и области III спиральных рукавов и диска.

По мере накопления крупномасштабных фотографий ярких галактик, полученных на крупных телескопах, Хаббл дополнил свою систему новым (первоначально гипотетическим) морфологическим типом линзовидных S0 галактик [2]. После его смерти А.Сэндидж издал атлас галактик, посвященный памяти Э.Хаббла, составленный по его неопубликованным материалам и собранной коллекции негативов 176 ярких галактик [3].

Позднее система классификации Хаббла была модифицирована Ж. де Вокулером [4,5]. Детальное описание ревизованных хаббловских типов с соответствующими иллюстрациями опубликовано в Физической энциклопедии [4]. А каталог морфологических типов 1500 ярких (ярче 14^m) галактик и сравнение результатов классификации этих объектов разными авторами, приведены в [5]. Эта ревизованная система использовалась Вокулером при составлении Справочных каталогов ярких галактик [6–8] и получила широкое распространение.

В 60-е годы прошлого века благодаря накопленным знаниям по звездной эволюции стало очевидным, что работы по классификации галактик обеспечат быстрое понимание механизмов образования и эволюции этих объектов [9]. Это обстоятельство послужило причиной постановки Сэндиджем программы классификации всех ярких галактик каталога Шэпли-Эймс [10] по их изображениям, полученным с высоким разрешением. Наблюдения проводились на крупных телескопах в обсерваториях Маунт Вилсон, Маунт Паломар и Лас Кампанас (Чили). Для 1168 галактик были получены фотографические изображения с большим масштабом (29–11 "/мм) на фотографических пластинках Eastman 103aO, 103aD и 103aF.

Результаты этой работы приведены в ревизованных Шэпли-Эймс каталогах RSA1 и RSA2 [10,11], а сами изображения и описание ревизованной системы – в 2-х томном Карнеги атласе галактик [9].

Следует заметить, что классификация, выполненная только по внешнему виду объектов, является довольно субъективной. А. Сэндидж указал на различие морфологических типов объектов ранних типов, общих для Карнеги атласа [9] и каталога RC2 [7] Вокулеров и Корвина. По его классификации галактики получались более поздними на 1 тип, чем в [7]. Причиной этого различия могло быть использование фотографических негативов с низким разрешением или переэкспонированных изображений. По его мнению, надежность классификации определяется как масштабом изображения, видимым диаметром, так и ориентацией галактик [12].

Позднее в [13] был получен аналогичный результат. В этой работе принимали участие 6 опытных экспертов (Бута, Корвин, Ж. де Вокулер, Дресслер, Хухра и ван ден Берг). Каждый из них провел независимую классификацию 835 ярких ($B > 17^m$ и $D > 0.5'$) галактик различных типов от E0 ($T = -5$) до Im ($T = 10$) из APM Equatorial Catalogue Galaxies [14] по сканам негативов, полученных с 48" телескопа UKST (масштаб изображений около 67 "/mm). Вычисленная дисперсия определений в парах экспертов изменялась от 1.3 до 2.1 ревизованных хаббловских типов, а по всем определениям она составила 1.8 типа.

Отсюда следует, что классификация изображений галактик, полученных при низких разрешениях, может быть причиной больших различий в морфологических типах. Это достаточно сложная задача даже для квалифицированных экспертов, т.к. для ее решения необходим определенный опыт.

Поскольку изображения родительских галактик сверхновых типа II мы будем получать из STScI Digital Sky Survey [15] также с низким разрешением, поэтому в качестве дополнительного критерия классификации предполагается использовать показатели цвета галактик. Напомним, что тесная корреляция хаббловских морфологических типов с интегральными цветами галактик впервые была получена Э.Холмбергом [16].

Выполнить эту работу мы собираемся следующим образом.

1) На основе данных каталога RC3 [8] составить выборки галактик разных типов и для них определить средние значения показателей цвета $(B - V)_T^0$, исправленных за поглощение в Галактике, дисках самих галактик и красное смещение (раздел 2а). Они будут использоваться в качестве дополнительных критериев классификации.

2) По данным каталогов APM [17] для объектов в тех же выборках определить показатели цвета $(B - R)$ и для каждого морфологического типа получить уравнение линейной регрессии, связывающее $(B - R)$ и $(B - V)_T$ (раздел 2б).

3) Получить из DSS [15] изображения родительских галактик, по виду которых определить их типы. Затем для них по данным из [17] получить показатели цвета $(B - R)$ и, используя соответствующие уравнения линейной регрессии, редуцировать их в $(B - V)_T$ (cor). После исправления последних за поглощение в Галактике, дисках родительских галактик и красное смещение величины $(B - V)_T^0$ (cor) сравнить со средними значениями показателей цвета $\langle (B - V)_T^0 \rangle$ тех же морфологических типов, что поможет оценить правильность (или ошибочность) проведенной классификации (раздел 3).

2а. Анализ показателей цвета $(B - V)_T^0$ каталога RC3

По данным каталога RC3 Вокулеров и др. [8] нами составлен список из 3047 галактик различных морфологических типов, для которых приведены исправленные за покраснение полные показатели цвета $(B - V)_T^0$. Из них наиболее представительными являются галактики 4х классов: эллиптические (420), линзовидные (641), спиральные разных типов (1782) и неправильные (176).

Отметим, что выборка неправильных галактик не является однородной, 145 из них классифицированы как Im (поздние спирали типа Магеллановых облаков с аморфной структурой и молодыми горячими звездами населения I). 19 галактик классифицированы как I0 (редкие аморфные объекты, сходные по структуре с линзовидными галактиками) [18]. 12 объектов из [8] отнесены к неправильным I, без определения типа, поэтому они были исключены из рассмотрения при статистическом анализе.

По этой же причине мы исключили 159 спиральных галактик S, тип которых в RC3 не приведен. Пекулярные (P) и галактики с внешним кольцом (R) ввиду их малочисленности (21 и 9, соответственно) также не рассматривались.

Далее, для исследуемых выборок галактик разных морфологических типов мы определили вид зависимости показателей цвета $(B - V)_T^0$ от исправленных за покраснение полных величин V_T^0 . При вычислении уравнений линейной регрессии по правилу выделения промахов [19] нами был исключен ряд объектов. Они, в основном, являлись пекулярными по своим физическим характеристикам – галактики с высокой поверхностной яркостью (Arak), с ультрафиолетовым континуумом (Mk, KUG), взаимодействующие (VV), и др. Однако зависимость между этими величинами, если и существует, то является довольно слабой. Действительно, значимые по критерию Стьюдента (уровень доверительной вероятности $P = 99\%$) угловые коэффициенты линейной регрессии, равные (0.031 ± 0.009) , (0.018 ± 0.005) и (0.013 ± 0.005) получились лишь для Sa, Sb и Sc спиралей. Для них вычисленные значения коэффициентов корреляции равны 0.26, 0.22 и 0.13, соответственно. Отсутствие зависимости или ее слабость объясняются, скорее всего, тем, что в каталоге RC3 приведены показатели цвета ярких галактик, диапазон изменения звездных величин которых небольшой (в основном, от $V_T = 8^m$ до 16.5^m). Далее в исследуемые выборки входят как нормальные, так и пекулярные галактики, различающиеся составом звездного населения, т.е. цветом.

Полученные частоты n_i и средние значения показателей цвета $\langle (B - V)_T^0 \rangle$ галактик различных типов ревизованной хаббловской последовательности (от E до Im) приведены в таблице 1. Отметим, что в каталоге RC3 классифицированы по типам менее половины эллиптических (E) и линзовидных (S0) галактик, поэтому величины $\langle (B - V)_T^0 \rangle$ определены по всем объектам этих классов.

Таблица 1. Средние значения показателей цвета.

Морфологический тип	Частоты n_i	$\langle (B - V)_T^0 \rangle$	Доверительный интервал
E0 – E7	394	0.911 ± 0.002	0.904 – 0.918
S0	597	0.876 ± 0.003	0.866 – 0.886
S0/a	103	0.789 ± 0.012	0.748 – 0.831
Sa, SBa	158	0.728 ± 0.012	0.688 – 0.768
Sab, Sbab	127	0.730 ± 0.012	0.690 – 0.770
Sb, SBb	280	0.641 ± 0.008	0.614 – 0.668
Sbc, SBbc	274	0.590 ± 0.006	0.570 – 0.610
Sc, SBc	333	0.543 ± 0.007	0.520 – 0.566
Scd	140	0.471 ± 0.010	0.437 – 0.505
Sd	60	0.449 ± 0.013	0.404 – 0.494
Sdm	52	0.446 ± 0.013	0.400 – 0.492
Sm	93	0.416 ± 0.012	0.375 – 0.457
Im	145	0.377 ± 0.012	0.337 – 0.417

Из этой таблицы видно, что средние значения показателей цвета зависят от типа галактик и изменяются в пределах от 0.91^m (красные эллиптические) до 0.38^m (голубые неправильные). Полученный результат не противоречит опубликованным ранее результатам Холмберга и Вокулера [16,18].

Более детальный анализ величин показателей цвета проводился нами для спиральных галактик, поскольку именно в них, в основном, наблюдаются сверхновые типа II. Наибольшие различия в показателях цвета получились для ранних и поздних спиралей Sab – Sb, Sc – Scd (0.099^m и 0.080^m , соответственно), а наименьшие – для Sa – Sab и поздних спиралей Sd – Sdm (0.007^m и 0.003^m , соответственно).

Согласно критериям классификации в [9] галактики типов Sa, Sab и Sb различаются размерами центрального балджа по сравнению с диском (они больше у Sa, убывая к Sab и Sb типам), углами раскрытия спиральных рукавов (они меньше у Sa, возрастая к Sab и Sb типам) и темпами недавнего звездообразования (число звезд населения I и областей III, возрастающее от Sab к Sb) в них.

Галактики типов Sc и Scd отличаются малыми размерами ядерных областей, наибольшими углами раскрытия спиральных рукавов и высокими темпами звездообразования. Хотя у Scd объектов (более поздних, чем Sc) рукава выделяются менее четко, темп звездообразования высокий, но их абсолютные величины существенно слабее, чем у галактик более ранних типов [9].

Объекты Sd – Sm относятся к самым поздним типам спиральной последовательности. У них (если имеется) очень маленькое ядро, плохо выделяются спиральные рукава, заполненные яркими молодыми звездами и областями III, свидетельствующими о высоком темпе недавнего звездообразования. Они также являются объектами с низкой поверхностной яркостью [20].

Сравнение величин $\langle (B - V)_T \rangle^0$ галактик различных типов проводилось по критерию Стьюдента, который согласно [21], использовался в качестве критерия различия между средними значениями эмпирических совокупностей.

Это сравнение показало, что для выборок Sa и Sab галактик средние значения показателей цвета не различаются значимым образом (уровень $P = 99\%$) образом. Их разность составляет $0.007^m \pm 0.015^m$, а вычисленная величина t , равная 0.49, меньше табличного значения $2.60 = t_{99}(277)$ при числе степеней свободы $f = 277$ и уровне доверительной вероятности $P = 99\%$. Она показывает, что различие в величинах $\langle (B - V)_T \rangle^0$ носит случайный характер, а сами сравниваемые выборки Sa и Sab галактик можно считать выборками из одной генеральной совокупности. Применение критерия Пирсона χ^2 [21] подтвердило это заключение. Полученное $\chi^2 = 14.97$ значительно меньше величины $29.1 = \chi^2_{01}(14)$ при числе степеней свободы $f = 14$ и уровне $P = 99\%$.

Аналогичный результат получен и для поздних спиральных типов Sd – Sdm. Для них различие средних, равное $0.003^m \pm 0.019^m$, также носит случайный характер [$t = 0.14 < 2.63 = t_{99}(110)$], а сами выборки величин $(B - V)_T^0$ можно считать выборками из одной генеральной совокупности [$\chi^2 = 11.87 < 23.2 = \chi^2_{01}(10)$].

Для галактик типов Sab – Sb и Sc – Scd, напротив, получились достоверные (уровень $P = 99\%$) различия средних значений показателей цвета, равные $0.099^m \pm 0.013^m$ и $0.080^m \pm 0.011^m$ [$t = 7.73 > 2.59 = t_{99}(400)$ и $t = 7.01 > 2.59 = t_{99}(470)$, соответственно]. Они показывают, что различия в величинах $\langle (B - V)_T \rangle^0$ носят систематический характер, а сравниваемые выборки относятся к разным генеральным совокупностям. Вычисленные значения $\chi^2 = 66.39 > 32.0 = \chi^2_{01}(16)$ и $\chi^2 = 55.32 > 29.1 = \chi^2_{01}(14)$, соответственно, также подтверждают этот вывод.

26. Анализ показателей цвета (B – R) каталогов APM

Согласно таблице 1 число спиральных и неправильных галактик исследуемой выборки составляет 1751. По их экваториальным координатам α , δ (эпоха J2000.0) [8] из APM каталогов северного и южного полушарий неба [17] были получены данные об объектах, расположенных только в 1580 площадках неба. Их размер, выбранный нами, составил $3' \times 3'$. Как отмечалось в [22] эти каталоги, однотипные по своей структуре, являются оцифрованными версиями первого Паломарского (POSS-I) и UKST обзоров. В них для каждого объекта приводятся экваториальные координаты (эпохи B1950.0 или J2000.0), автоматически измеренные по "голубым" и "красным" негативам фотографические величины B, B_j и R, изофотные большие радиусы, эллиптичность $e = (1 - b/a)$, позиционные углы, а также классификация изображения.

Далее для каждой из 1580 площадок было проведено отождествление спиральных и неправильных галактик, по координатам которых получались данные из [17]. Критериями отождествления были минимальные различия в значениях координат, позиционных углов, отношений осей b/a в RC3 и APM. При этом было установлено, что в [17] для идентифицируемых галактик достаточно часто измерялся только один из негативов. Но даже в случае измерений изображений галактик по 2-м негативам, зачастую приводились отрицательные значения звездных величин. Естественно, что такие объекты исключались из рассмотрения. Кроме того, ряд самых ярких галактик отождествить не представилось возможным. Поэтому объем исследуемой выборки (общий для северного и южного полушарий неба) с измеренными величинами B, B_j и R существенно уменьшился до 585.

Напомним, что фотографические величины (B и R) и (B_j и R) в каталогах APM определялись методом поверхностной фотометрии и отнесены к изофотам с разными уровнями поверхностной яркости $\mu_B = 24^m$, $\mu_R = 23^m$ (APM NS) и $\mu_B = 25^m$, $\mu_R = 24^m$ (APM SS) с квадратной секунды дуги, соответственно [22].

Кроме того, фотографические величины (B и R) и (B_j и R) определялись для разных спектральных диапазонов. В первом Паломарском обзоре для получения "голубых" и "красных" негативов применялись, соответственно, крупнозернистые эмульсии Eastman 103a-O (полоса пропускания $\lambda\lambda$ 3500 – 5000Å), и Eastman 103a-E в комбинации с фильтром 2444 red Plexiglass (полоса пропускания $\lambda\lambda$ 6200 – 6700Å) [23].

В австралийских же обзорах UKST B_j и UKST SES R использовались мелко зернистые эмульсии Kodak IIIa-J и Kodak IIIa-F в комбинации с фильтрами CG 395 и OG – 590, соответственно. Величины B_j определялись для сине-зеленой области спектра (полоса пропускания $\lambda\lambda$ 3950 – 5400Å), а R величины – для области, хорошо соответствующей стандартной фотоэлектрической полосе R [24].

Проверку влияния этих факторов на величины показателей цвета мы провели путем сравнения средних значений $\langle(B - R)\rangle$ (APM NS) и $\langle(B_j - R)\rangle$ (APM SS), вычисленных для морфологических типов Sa + Sba, Sb + SBb, Sbc + SBbc и Sc + SBc, как наиболее представительных выборок. Сравнение средних, проведенное по критерию Стъдента [21], не выявило их значимого различия даже для уровня P = 95% доверительной вероятности. Последнее означает, что подвыборки показателей цвета (B – R) и (B_j – R) для указанных выше типов принадлежат одним и тем же совокупностям. Отсюда следует, что различия в изофотах и спектральных диапазонах, для которых определялись звездные величины B, B_j и R, вероятно, не являются значимыми факторами при определении показателей цвета (B – R) и (B_j – R), которые в дальнейшем мы будем обозначать как (B – R).

Частоты объектов разных морфологических типов n_i приведены в колонке 2 таблицы 2. При ее составлении мы объединили все типы как ранних (Sa, Sba и Sab, SBab),

так и поздних (Sd, Sdm) спиралей. Правомочность такой процедуры была показана выше.

Таблица 2.

Морфологический тип	Частоты n_i	$\langle(B - V)_T\rangle$	$\langle(B - R)\rangle$	Уравнение регрессии
S0/a	45	0.885 ± 0.022	1.641 ± 0.135	$Y = -0.882 + 0.998X$
Sa, SBa, Sab, SBab	101	0.831 ± 0.015	1.644 ± 0.098	$Y = -0.790 + 0.975X$
Sb, SBb	100	0.733 ± 0.015	1.449 ± 0.096	$Y = -0.704 + 0.980X$
Sbc, SBbc	87	0.706 ± 0.011	1.485 ± 0.106	$Y = -0.692 + 0.990X$
Sc, SBc	104	0.663 ± 0.014	1.520 ± 0.134	$Y = -0.664 + 1.000X$
Scd, SBcd	39	0.604 ± 0.023	1.134 ± 0.173	$Y = -0.552 + 0.954X$
Sd, Sdm	32	0.540 ± 0.021	1.374 ± 0.224	$Y = -0.536 + 0.997X$
Sm	28	0.535 ± 0.025	0.572 ± 0.287	$Y = -0.526 + 0.983X$
Im	49	0.444 ± 0.017	0.769 ± 0.140	$Y = -0.434 + 0.986X$
Sc, SBc (NS)	52	0.668 ± 0.020	1.832 ± 0.164	$Y = -0.682 + 1.007X$
Sc, SBc (SS)	52	0.657 ± 0.018	1.208 ± 0.205	$Y = -0.655 + 0.998X$

Вычисленные средние значения $\langle(B - R)\rangle$ (колонка 4) показывают (в пределах ошибок определений) их зависимость от морфологических типов. Наиболее "красные" из них – ранние спирали (S0/a, Sa, SBa, Sab, SBab), а "голубые" – (Scd, SBcd, Sd, Sdm, Sm) и неправильные галактики (Im). Однако, полученная зависимость является менее четкой по сравнению с аналогичной зависимостью средних $\langle(B - V)_T\rangle$ (колонка 3) из каталога RC3. Напомним, что средние значения показателей цвета определялись для наблюдаемых B , B_j и R , не исправленных за покраснение, величина которого зависит от эффективной длины волны спектрального диапазона, галактической широты b , отношения осей b/a и лучевых скоростей v изучаемых галактик. Чтобы проверить влияние поглощения в Галактике, мы вычислили средние показатели цвета для северного и южного галактических полушарий для тех же типов Sa + SBa, Sb + SBb, Sbc + SBbc и Sc + SBc.

Сравнение средних по критерию Стьюдента показало их значимое различие (уровень $P = 95\%$) только для галактик типа Sc + SBc. Для них вычисленные величины $\langle(B - R)\rangle$ равны 1.83 ± 0.16 и 1.23 ± 0.20 и соответствуют значению $t = 2.38 > 1.98 = t_{05}(100)$.

Объяснить этот факт, вероятно, возможно различиями в распределениях галактик по галактическим широтам. Сравнение распределений величин b , проведенное по методу χ^2 , показало их значимое (уровень $P = 99\%$) различие. Действительно, вычисленное значение $\chi^2 = 20.53 > 18.5 = \chi^2_{01}(7)$ при числе степеней свободы $f = 7$. Распределение галактик северного полушария по галактическим широтам получилось достаточно симметричным с явно выраженным максимумом ($n = 23$ из 52) на интервале b от 40° до 49° . Распределение же южных галактик является достаточно равномерным на широтах с большим поглощением света (от -20° до -60°) и около четверти из них расположены на высоких галактических широтах.

По нашему мнению, другой возможной причиной этого факта является различие распределений самих значений $(B - R)$. Сравнение выборочных долей по критерию Фишера [25] показало их значимое различие (уровень $P = 95\%$) для 2-х интервалов, середины которых равны 0.45 и 4.45. Полученные отношения частот показывают, что число галактик северного полушария с малыми значениями показателей цвета существенно меньше ($w_i/w_k = 0.4$) и существенно больше ($w_i/w_k = 5.0$) – с большими значениями

ми. Кроме того, только в подвыборке южного полушария имеются 4 галактики с большими отрицательными значениями $(B - R)$. Естественно, что оба эти обстоятельства приводят к различию средних значений показателей цвета.

Как уже отмечалось в [26], корреляция показателей цвета $(B - R)$ и $(B - V)_T$ получилась довольно слабой, но очень тесная зависимость ($r = 0.99$ для всех типов) установлена между величинами разностей показателей цвета $\Delta CI = (B - R) - (B - V)_T$ и $(B - R)$. Вычисленные уравнения линейной регрессии для всех типов приведены в таблице 2. Они позволяют по известным показателям цвета из каталогов АРМ определить значения $(B - V)_T(\text{cor})$, которые после исправления за покраснение будут использованы для определения морфологических типов галактик.

3. Результаты

По данным циркуляров МАС для определения морфологических типов мы выбрали 83 родительских галактик, в основном, с известными лучевыми скоростями ($v < 18000$ км/с), для которых фактические данные отсутствуют (или они недостаточны) в широко известных каталогах. По их экваториальным координатам α, δ (эпоха J2000.0) из АРМ каталогов [17] были получены данные об объектах, расположенных в площадках неба с размерами $3' \times 3'$. Затем, как и обычно, для каждой из них проведено отождествление галактик, критериями которого были минимальные различия в координатах и классификация изображений, указанная в [17].

В табл. 3 приведены имена сверхновых и их родительских галактик, для которых указаны координаты α, δ (эпоха J2000.0), лучевые скорости v и соответствующие ссылки (колонка 7). Фактическая информация для них приведена в табл. 4, в которой указаны величины B, B_j и показателей цвета $(B - R)$. Для вычисления редуцированных в систему каталога RC3 значений изофотных диаметров D и отношений осей b/a использовались полученные нами ранее соответствующие уравнения линейной регрессии (4 и 8) из [27] и (6, 11) из [26]. Вычисленные значения D_c и $(b/a)_c$ приведены в колонках 5 и 6. Значения позиционных углов мы не редуцировали, поскольку систематического различия между величинами PA в каталогах АРМ и RC3 нами не установлено.

Таблица 3.

N	Name		Coordinates		v km/s	circ IAU
	SN	galaxy	h m s	' "		
1	1988i	A1018+35	10 21 10.7	+35 39 29.5	10500	4563,4571
2	1988q	A1631+34	16 33 20.7	+34 48 25.2	6600	4623
3	1990v	N 7564	23 15 38.4	+07 18 42.1	10400	5074,5083
4	1990ad	A2240+01	22 42 39.2	+01 18 06.8	–	5117,5120
5	1990ae	M01-02-04	00 22 49.8	+06 49 02.5	7680	5122,5123
6	1991c	A1132+05	11 32 40.2	+05 20 35.6	8394	5167
7	1991av	A2153+00	21 56 01.8	+00 59 52.9	7500	5338,5347
8	1992aw	A1906+50	19 06 54.0	+51 02 49.8	11000	5633,5606
9	1992bj	A2319+24	23 21 50.9	+25 09 29.7	16000	5656
10	1992bm	A0729+50	07 33 19.3	+50 28 25.9	15000	5672,5692
11	1995bc	A0951+40	09 51 43.0	+40 18 35.9	14400	6275
12	1997cq	U 10420	16 29 51.0	+39 46 01.0	8970	6674,6675
13	1997cs	A1513+02	15 13 38.6	+02 53 43.8	11100	6689
14	1998bv	HS1035+4758	10 38 25.7	+47 42 36.5	1500	6900
15	1998et	A0659+57	06 59 06.6	+03 24 59.2	12000	7054,7058
16	1999k	P 22597	08 03 06.6	+03 24 59.2	12000	7097

17	1999ab	A1025+53	10 25 01.0	+53 52 30.0	9400	7109
18	1999ap	A0829+04	08 29 47.5	+04 37 38.5	12000	7125
19	1999ay	A1444+58	14 44 44.1	+58 55 43.6	11992	7130,7357
20	1999bv	M10-25-14	17 22 40.7	+59 59 48.9	5510	7148,7186
21	1999df	P 54081	15 08 56.5	+52 26 47.1	11400	7228,7239
22	2000au	M8-15 14	07 53 08.1	+50 07 49.8	5900	7389,7394
23	2000co	M7-33 17	15 57 24.3	+41 54 11.0	11500	7436,7437
24	2000ct	A1701+33	17 01 04.1	+33 28 31.6	8950	7448,7449
25	2001aa	U 10888	17 29 59.4	+60 21 00.8	6150	7593,7601
26	2001ag	M8-18-09	09 34 31.4	+46 27 41.7	8000	7603
27	2001dv	M9-27-71	16 44 56.0	+51 15 33.2		7690,7721
28	2001dx	P 63222	19 27 18.5	+65 18 58.4	5700	7692,7716
29	2001dy	M4-40-16	17 04 59.9	+23 10 08.4	9000	7693,7716
30	2002cb	M8-24-34	13 04 23.2	+47 35 47.9	8900	7870
31	2002ch	KUG1111+340	11 14 32.0	+33 48 21.3	10200	7879,7881
32	2002dw	U 11376	18 54 14.8	+48 55 43.0	6528	7932,7933
33	2002em	U 3430	06 15 49.5	+64 25 50.9	4059	7955,7964
34	2002hj	A0258+04	02 58 09.5	+04 41 10.3	7090	8006,8008
35	2002ik	A2125+00	21 25 53.8	+00 24 58.5	9600	8020
36	2002je	A0027+24	00 27 22.6	+24 10 55.7	7470	8021,8023
37	2003ad	A1456+45	14 56 27.6	+45 21 13.4	10500	8065,8067
38	2003at	M11-20-23	16 38 47.3	+66 01 08.9	7200	8074,8078
39	2003ci	U 6212	11 10 24.6	+04 49 42.1	9090	8097,8098
40	2003gx	M6-03-07	01 02 55.2	+37 40 22.8	10203	8178,8203
41	2003ii	M6-06-53	02 33 04.5	+35 30 27.2	13400	8208,8210
42	2003jf	M11-22-09	17 53 32.9	+64 10 24.4	10553	8233,8234
43	2003ki	M11-10-34	07 51 34.2	+63 55 41.9	7500	8245,8246
44	2003ky	N 4001	11 58 06.8	+47 20 05.2	14100	8254,8259
45	2003la	M10-15-89	10 30 20.9	+61 15 50.2	9233	8259
46	2004v	A1450+17	14 50 55.4	+17 13 05.3	12500	8285,8287
47	2004z	M10-19-05	13 32 16.2	+60 23 37.6	6933	8290,8294
48	2004df	A1508+21	15 08 21.4	+21 52 45.4	6182	8374,8390
49	2004eb	N 6387	17 28 24.1	+57 32 42.5	8500	8396,8405
50	2004el	M9-25-04	14 59 52.8	+54 37 08.0	7885	8406
51	2004gr	N 3678	11 26 15.7	+27 52 01.9	7200	8452
52	2005k	N 2923	09 36 03.7	+16 45 40.6	8151	8468,8470
53	2005bi	M7-34-36	16 27 22.2	+39 06 36.0		8511,8527
54	2005ee	P 73054	23 57 55.9	+32 38 05.1	9730	8603,8606
55	2005ep	U 10626	16 56 35.1	+58 01 43.5		8607,8246
56	2005la	KUG1249+278	12 52 16.2	+27 31 58.7	5570	8639
57	1991e	A0634-65	06 34 22.4	-65 33 13.4	7200	5185,5186
58	1991h	Reiz3080	12 58 54.3	-10 43 50.9	5396	5188,5200
59	1991p	A1315-15	13 18 04.0	-15 18 08.2	11100	5235,5249
60	1991ah	A2207-46	22 10 08.2	-46 19 25.9	11100	5290
61	1992an	A1335-30	13 37 48.8	-30 41 23.4	15000	5571
62	1992as	A2101-44	21 03 56.2	-44 38 51.8	7500	5575
63	1992ay	A0428-46	04 30 18.6	-46 24 13.0	18600	5619,5627
64	1993s	A2249-40	22 52 23.8	-40 18 44.5	9600	5812,5823

65	1993w	A2327-03	23 29 40.0	-03 02 17.4	5400	5848,5859
66	1995q	E284-G42	20 16 27.8	-43 24 19.7		6176
67	1996m	A1251-13	12 51 16.4	-13 01 12.8	6000	6347
68	1997cl	A1354-28	13 54 18.9	-27 44 30.3	14100	6647,6649
69	1998ap	A2000-52	20 00 37.4	-52 42 37.9	12400	6873
70	1998ca	A1213-06	12 13 32.1	-06 24 01.3	8400	6904,6921
71	1998ee	A0153-53	01 53 30.8	-53 58 21.8	14900	7030,7107
72	1999e	A1317-18	13 17 16.7	-18 33 03.4	7800	7089,7090
73	1999ai	M-1-34-13	13 14 09.7	-05 35 54.5	5340	7118,7144
74	1999eq	A0119-03	01 19 22.7	-03 36 20.4	13300	7297
75	2000r	A1001-06	10 01 21.3	-06 33 55.4	3000	7384
76	2001ax	A1607-00	16 07 13.6	-00 04 43.5	9300	7608,7618
77	2001fb	P 713	00 10 04.5	-00 26 05.3	9648	7740,7754
78	2001ij	M0-07-84	02 42 31.8	-01 00 55.3	11400	7778,7795
79	2002ew	A2054-00	20 54 30.5	-00 08 22.8	8920	7964,7988
80	2003bn	A1002-21	10 02 35.2	-21 10 53.0	3800	8088,8098
81	2003cb	N 4885	13 00 33.9	-06 51 11.3	3400	8094,8098
82	2005gm	N 1423	03 42 40.2	-06 22 53.2	6000	8616,T256
83	2005lw	I 672	11 08 03.2	-12 29 02.9	7710	8646,T321

Изображения родительских галактик были получены из DSS и XDSS [15]. Однако, их непосредственное сравнение с изображениями галактик из Карнеги атласа [9] является затруднительным по ряду причин. Напомним, что в этом атласе приведены фотографии 1168 самых ярких галактик всего неба, полученных с большим масштабом (29 – 11"/мм). Масштабы изображений в обзорах POSS-I и UKST составляют около 67 "/мм, что приводит к потере тонких деталей структуры галактик. Кроме того, изучаемые объекты являются более слабыми и более далекими, чем объекты из [9], и это также приводит к потере внешних деталей их изображений.

Поэтому для определения морфологических типов родительских галактик использовалась следующая методика. Из Карнеги атласа [9] мы выбрали наиболее типичные объекты основных хаббловских типов, как ординарных, так и спиралей с перемычкой (S0 и SB0, Sa и SBa, Sb и SBb, Sc и SBc, Scd и SBcd, Sd, Sm и Im). Затем изображения последних мы также получили из DSS и XDSS (для исключения различий в масштабах изображений) и использовали их в качестве стандартов при классификации.

Таблица 4.

N	galaxy name	B	(B-R)	Dc	(b/a)c	PA	E(B-V)	$(B-V)_r^0$	M.T.
1	A1018+35	14 ^m .85	0 ^m .77	85.3	0.34	40	0 ^m .01	0 ^m .46	Scd
2	A1631+34	14.56	0.19	33.3	0.54	11	0.01	0.77	S0/a
3	N 7564	10.62	1.32	50.1	0.71	121	0.03	0.53	Sc
4	A2240+01	16.69	2.02	21.2	0.81	77	0.06	0.58	Sc*
5	A0020+06	12.25	0.92	80.4	0.46	51	0.03	0.46	Scd
6	A1132+05	17.43	1.72	21.0	0.98	118	0.03	0.78	S0/a
7	A2153+00	15.72	0.20	28.2	0.80	36	0.06	0.54	Sc
8	A1906+50	13.82	-0.38	44.8	0.92	140	0.06	0.52	Sc
9	A2319+24	16.25	1.10	28.8	0.98	166	0.06	0.44	Scd
10	A0729+50	16.21	1.85	41.5	0.46	30	0.06	0.43	Sd
11	A0952+40	16.32	2.00	56.8	0.36	18	0.01	0.47	SBcd

12	U 10420	8.02	0.72	100	0.75	168	0.00	0.56	RSBc
13	A1513+02	13.69	-0.35	28.6	0.87	27	0.03	0.57	Sc
14	HS1035+4758	14.03	0.37	28.5	0.89	172	0.00	-	-
15	A0659+57	14.22	1.81	38.4	0.71	32	0.06	0.47	Scd
16	A0803+03	12.15	1.31	46.9	0.75	8	0.03	0.49	SBc(s)
17	A1025+53	13.55	0.66	52.7	0.36	34	0.00	0.45	SBcd
18	A0829+04	16.68	0.68	35.1	0.69	21	0.03	0.51	Scd
19	A1444+58	17.95	0.99	20.9	0.60	75	0.01	0.52	Sc
20	M10-25-14	7.90	-1.75	70.0	0.82	29	0.03	0.58	Sbc
21	P 54081	13.03	1.34	64.7	0.86	73	0.01	0.70	Sa
22	M8-15-14	12.47	1.64	71.7	0.69	33	0.01	0.63	SBb
23	M7-33-17	10.96	0.86	51.4	0.62	123	0.01	0.52	SBc
24	A1701+33	14.79	0.67	42.6	1.00	158	0.03	0.58	Sbc
25	A1729+60	6.65	0.64	92.7	0.68	138	0.03	0.55	SB(r)bc
26	M8-18-9	14.05	1.20	43.5	0.79	69	0.00	0.64	SBb(r)
27	M9-27-71	13.79	0.70	48.4	0.62	49	0.00		S...
28	P 3222	11.50	1.45	71.7	0.45	80	0.12	0.46	Scd
29	M4-40-16	12.13	1.63	36.2	0.84	93	0.06	0.67	Sa
30	M8-24-34	8.24	0.81	45.6	0.97	148	0.00	0.60	SBbc
31	A1114+33	13.86	0.58	44.4	0.57	33	0.01	0.46	Scd
32	U 11376	10.63	1.50	57.5	0.66	86	0.06	0.49	Scd
33	U 3430	12.93	1.79	77.3	0.45	113	0.12	0.46	Scd
34	A0258+04	15.81	0.40	29.3	0.82	82	0.06	0.45	Scd
35	A2125+00	11.55	0.59	63.2	0.51	71	0.06	0.41	Sdm
36	A0027+24	14.30	-0.16	29.8	0.67	177	0.03	0.75	S0/a
37	A1456+45	11.24	0.87	37.8	0.74	29	0.00	0.55	Sc
38	M11-20-23	10.51	-0.88	49.2	0.86	56	0.03	0.55	Sc
39	U 6212	8.00	1.82	106	0.62	32	0.03	0.57	SBbc
40	M6-03-07	12.74	1.22	54.5	0.48	164	0.06		SBb*
41	M6-06-53	12.18	1.43	71.5	0.59	102	0.06	0.44	Scd
42	M11-22-9	11.45	0.88	75.3	0.67	172	0.03	0.47	Scd
43	M11-10-34	12.69	0.40	41.6	0.75	90	0.03	0.76	SBa(s)
44	N 4001	12.12	1.81	47.8	0.73	151	0.00	0.68	Sa
45	M10-15-89	11.85	0.42	48.9	0.84	84	0.00	0.70	Sa(s)
46	A1450+17	15.85	0.58	22.6	0.89	163	0.01	0.48	Scd
47	M10-19-5	13.16	0.56	63.4	0.65	71	0.00	0.79	S0/a
48	A1508+21	14.60	1.83	35.8	0.60	54	0.03	0.76	S0/a
49	N 6387	9.36	0.72	50.5	0.55	96	0.03	0.46	Scd
50	M9-25-4	13.99	0.50	63.5	0.52	51	0.00	0.56	SBc
51	A1126+27	12.77	1.05	64.1	0.97	49	0.00	0.67	SBb(s)
52	N 2923	13.49	0.21	49.8	0.60	167	0.00	0.77	S0/a
53	A1301+27	8.46	1.26	65.2	0.80	156	0.00		S...
54	P 73054	15.15	-0.61	38.9	0.49	29	0.06	0.46	PSc
55	U 10626	9.12	0.42	64.4	0.84	151	0.00		S...
56	K1249+278	9.68	-1.33	54.8	0.69	127	0.01	0.58	Sbc(s)
57	A0634-65	14.56	0.88	71.1	0.40	66	0.06	0.43	Sd
58	Reiz3080	11.24	-1.29	78.8	0.50	31	0.03	0.46	Sd
59	A1315-15	11.95	-0.05	68.9	0.47	149	0.03	0.42	Sd

60	A2207-46	13.93	-2.64	53.4	0.46	130	0.00	0.50	Sc
61	A1335-30	13.60	-1.88	42.9	0.68	17	0.06		SBa(s)*
62	A2101-44	13.84	-0.88	46.8	0.95	12	0.09	0.43	Sd
63	A0428-46	14.28	-1.32	66.0	0.38	175	0.02		Sc*
64	A2249-40	10.42	0.43	78.3	0.56	155	0.00	0.75	Sa
65	A2327-03	11.00	0.12	70.8	0.72	20	0.01	0.47	SBcd
66	A2016-43	9.34	-1.06	88.2	0.42	106	0.06	0.54	SBc*
67	A1251-13	9.70	-0.98	95.7	0.37	105	0.03	0.48	Sd
68	A1354-28	10.66	-2.32	50.5	0.71	12	0.06		S...
69	A2000-52	10.43	-1.88	63.2	0.64	75	0.03		Sa(s)*
70	A1213-06	10.66	-0.32	75.9	0.41	122	0.00	0.42	SBcd
71	A0153-53	10.45	-0.50	66.8	0.70	126	0.00	0.53	SBc
72	A1317-18	10.51	-0.13	63.3	0.50	21	0.06	0.70	SB0/a
73	A1314-05	9.30	-0.15	107	0.40	47	0.03	0.46	Sd
74	A0119-03	11.32	-0.94	54.7	0.86	145	0.02	0.76	RS0/a
75	A1001-06	13.31	-0.45	65.3	0.36	37	0.03	0.47	Sd
76	A1607-00	12.41	1.24	61.4	0.65	37	0.09	0.70	S0/a
77	P 713	12.54	0.69	54.0	0.76	70	0.00	0.77	S0/a
78	M0-07-84	12.28	-0.43	62.5	0.52	117	0.03		S...
79	A2054-00	12.40	-0.22	48.8	0.74	136	0.09		S...
80	A1002-21	12.20	-0.76	61.5	0.41	100	0.03	0.76	S0/a
81	N 4885	10.35	0.99	77.3	0.82	146	0.03	0.73	Sa
82	N 1423	9.73	1.86	87.8	0.68	24	0.03	0.71	SBa(r)
83	I 672	11.85	2.06	71.3	0.53	155	0.03	0.74	S0/a

При определении морфологических типов родительских галактик в качестве критериев, как и обычно, рассматривались отношения размеров балджа и диска, а для объектов, более поздних, чем Sa, их принадлежность кратным системам или скоплениям галактик. В качестве дополнительного (количественного) критерия мы использовали средние значения показателей цвета $\langle (B - V)_r^0 \rangle$ (табл. 1).

Для этого, определив по внешнему виду морфологический тип каждого объекта и используя соответствующие уравнения линейной регрессии (табл. 2), мы конвертировали показатели цвета $(B - R)$ и $(B_j - R)$ в показатели цвета $(B - V)_r$ (cor). Последние исправлялись за поглощение в Галактике, диске самой галактики и красное смещение аналогично тому, как это проводилось в каталоге RC3.

Для этого методом Бурштейна и Хайлеса [28] были определены избытки цвета $E(B - V)$ (колонка 9, табл.4) родительских галактик по их галактическим координатам (l, b) , вычисленным по программе Л.Г.Романенко. Поглощение в Галактике в полосе B вычислялось по формуле $A_g(B) = 4.3 * E(B - V)$.

Поглощение, вызываемое пылью в диске самой галактики, являющееся функцией наклона, определялось соотношением $A_d(B) = \alpha(T) * \log R_{25}$, где $\alpha(T)$ – коэффициент поглощения, зависящий от морфологического типа, а $R_{25} = (D/d)_{25} = 1/(b/a)$ – отношение диаметров, измеренных по изофотам с уровнем поверхностной яркости $\mu_B = 25^m$ с квадратной секунды дуги (B – m/ss).

Поправка за красное смещение $K_B(z, T) = K'_B(T) * cz$, где коэффициенты $K'_B(T)$ определены Пенсом [29] для галактик разных морфологических типов и приведены в RC3. Величины лучевых скоростей cz были собраны нами из Циркуляров MAC и каталога ГАИШ [30].

Затем полученные величины $(B - V)_r^0$ (cor) мы сравнивали со средними значениями показателей цвета $<(B - V)_r^0 >$ (колонка 3 табл.1). Морфологический тип считался определенным достаточно надежно, если значение $(B - V)_r^0$ (cor) попадало в границы доверительного интервала (колонка 4 табл.1), предполагаемого нами типа. В противном случае процедура классификации повторялась.

Определенные по этой методике морфологические типы приведены в колонке 10 табл.4. Отметим, что для пяти родительских галактик сверхновых SN 1990ad, SN 1995q, SN2001dv, SN2005bi, SN2005ep лучевые скорости неизвестны и показатели цвета не исправлены за красное смещение. Поэтому для слабой Anon галактики (SN 1990ad) и яркой E284-G42 (SN 1995q) морфологические типы (Sc и SBc) определены по внешнему виду и помечены звездочкой. Остальные три галактики M9-27-71, A1301 + 27 и UGC 10626 (SN 2001dv, SN 2005bi, SN 2005ep) являются, скорее всего, ранними спиральями, поэтому они классифицированы как спиральные S... без уточнения типа.

Родительские галактики сверхновых SN 1992an, SN 1992ay, SN 1997cl, SN 1998ap, SN 2001ij, SN 2002ew и SN 2003gx, вероятно, являются пекулярными по своим физическим свойствам, поэтому определить по показателю цвета их морфологический тип не представляется возможным. Четыре из них A1335-30, A2000-52, A0428-46 и M6-03-07 мы классифицировали по их виду как SBA(s), Sa(s), Sc, и SBb, соответственно. Отметим, что галактика (A0428 – 46) – наклоненная спираль $[(b/a)c = 0.38]$, с хорошо видимым звездообразным ядром и диском больших размеров. Она является членом тесной системы двух далеких ($v = 18600$ km/c) анонимных галактик. Для карликовой голубой компактной галактики HS 1035 +4758 (SN 1998bv) тип также не установлен ни по цвету, ни по изображению (звездообразный объект со слабым диском).

Сравнение морфологических типов объектов, общих для данной работы (табл. 4) и каталога ГАИШ [30], показало, в целом, их удовлетворительное согласие. И лишь для родительской галактики SN 1993s отмечено значительное различие в классификации. Действительно, A2252 – 40 – близкая ($v = 9600$ km/c) одиночная яркая наклоненная спираль $[(b/a)c = 0.56]$ с большой центральной линзой и диском классифицирована нами как Sa. Вычисленный показатель цвета $(B - V)_r^0$ (cor) = 0.75 хорошо соответствует этому типу. Выделить же звездообразное ядро на передержанном изображении центральной области этой галактики, полученном из DSS, довольно затруднительно. Кроме того, соотношение размеров балджа и диска (по нашему мнению) не соответствует галактике типа Sc, как указано в [30].

4. Заключение

Система классификации Хаббла, основанная на эмпирических критериях, связанных с формой и структурой галактик, является довольно простой и широко распространенной. Однако метод, в котором используется только внешний вид объектов, является достаточно субъективным, поскольку результаты определения морфологических типов зависят от масштаба и плотности негатива, а также от яркости и ориентации галактик. Этот факт был установлен А.Сэндиджем при сравнении ревизованных хаббловских типов ранних спиральных галактик, общих для Карнеги атласа [9] и Справочного каталога RC2 [7] Вокулеров и Корвина.

Позднее аналогичный результат был опубликован в [13]. Полученные с низким масштабом (около 67 "/mm) изображения 835 ярких галактик классифицировались при визуальном просмотре шестью ведущими экспертами. Вычисленная дисперсия по всем определениям составила 1.8 ревизованных хаббловских типов.

Поскольку изображения родительских галактик сверхновых типа II мы получали из DSS [15] с таким же низким масштабом, как и в [13], поэтому кроме обычных критериев классификации мы использовали дополнительный – показатель цвета. С этой целью по данным из [8] для галактик различных морфологических типов определены средние значения показателей цвета $\langle (B - V)_r^0 \rangle$, исправленные за поглощение в Галактике, дисках самих галактик и красное смещение (табл. 1).

Для 585 спиральных и неправильных галактик (общих для каталогов RC3 и APM) из [17] получены фотометрические данные и определены показатели цвета $(B - R)$, которые редуцировались в $(B - V)_T$ (cor). Для этого использовалась полученная ранее [26] зависимость между величинами разностей показателей цвета $\Delta CI = (B - R) - (B - V)_T$ и показателями цвета $(B - R)$. Уравнения линейной регрессии (колонка 5 табл.2), связывающие эти величины, определены для галактик разных типов.

Фотометрические данные для 83 родительских галактик мы получили из каталогов, APM [17], а их изображения – из DSS [15]. Последние сравнивались с изображениями типичных галактик различных типов, выбранных нами из Карнеги атласа [9] и полученных также из [15], для исключения различий в масштабах изображений.

Определив по внешнему виду морфологический тип объекта, и, используя соответствующее (этому типу) уравнение линейной регрессии (табл. 2), мы редуцировали показатель цвета $(B - R)$ в $(B - V)_T$ (cor), который исправляли за поглощение в Галактике, диске родительской галактики и красное смещение. Полученную величину $(B - V)_r^0$ (cor) сравнивали со средним значением $\langle (B - V)_r^0 \rangle$ предполагаемого типа (табл. 1). Последний (морфологический тип) считался определенным достаточно надежно, если значение $(B - V)_r^0$ (cor) попадало в границы его (предполагаемого типа) доверительного интервала (колонка 4 табл. 1). В противном случае процедура классификации повторялась.

Сравнение морфологических типов родительских галактик, общих для данной работы и каталога ГАИШ [30], показало их удовлетворительное согласие, хотя проводилось по выборке малого объема (23 из 83). Большое различие в классификации получено только для родительской галактики SN 1993s.

Такая методика определения морфологических типов галактик, насколько известно автору, не применялась ранее. Однако, полученные результаты носят предварительный характер. Для их проверки очень желательными очень желательными являются фотометрические и спектральные наблюдения этих галактик для определения в стандартной системе их цветов $(B - V)$ и $(U - B)$ и выявления пекулярности (или ее отсутствия) у некоторых из них.

Считаю приятным долгом поблагодарить Е.И. Гаген-Торн, И.Н.Никанорову, Л.Г. Романенко, М.С.Чубея за помощь при выполнении и оформлении работы.

Литература

1. **Hubble E.** //Astrophys.J. 1926. Vol.64, P.321.
2. **Hubble E.** //The realm of the Nebulae. 1936. Oxford Univ. Press.
3. **Sandage R.A.** //The Hubble atlas of Galaxies. 1961. Pub. 618. Carnegie Inst. of Washington.
4. **de Vaucouleurs G.** //Handbuch der Physik. 1959. Vol.53. P.275. Berlin: Springer-Verlag.
5. **de Vaucouleurs G.** //Astrophys. J. Suppl. 1963. Vol.8 N 74. P.31.
6. **de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A.** // Reference Catalogue of bright Galaxies. 1964. Univ. of Texas Press, Austin.

7. *de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G.* // Second reference Catalogue of bright Galaxies. 1976. Univ. of Texas Press, Austin and London.
8. *de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A. Corwin H.G. et al.* //Third reference Catalogue of bright Galaxies. 1991. Berlin: Springer.
9. *Sandage A., Bedke J.* // The Carnegie atlas of Galaxies. 1994. Washington: Carnegie Inst. of Washington publ.
10. *Shapley H., Ames A.* // Annals of the Harvard College Obs. 88, N 2.
11. *Sandage A., Tammann G.* //A revised Shapley-Ames Catalog of brigh Galaxies. (Carnegie Inst. of Washington, Washington) Publ. 635, 1st ed.
12. *Sandage A., Tammann G.* //A revised Shapley-Ames Catalog of brigh Galaxies. (Carnegie Inst. of Washington, Washington) Publ. 635, 2nd ed.
13. *Naim A., Lahav O., Sodre L., et al.* //1995. MNRAS. Vol. 275. P. 567.
14. *Raychaudhury S., Lynden-Bell D., Scharf C. et al.* //1994. BAAS. Vol.26. P.920.
15. <http://cadcwww.dao.nrc.ca/cadcbin/getdss/>
16. *Holmberg E.* // 1958. Lund Medd. Ser. II. N 136.
17. <http://www.wast.cam.ac.uk/~mike/apmcat/interface.html>
18. *de Vaucouleurs G.* // IAU Symposium N 15. 1962. P.5. Ed. McVitti G.СmacMillan comp. N. Yourk.
19. *Азекян Т.А.* // Основы теории ошибок для астрономов и физиков. 1968. Издательство Наука. С.113.
20. *Sandage A.* // Galaxies and the Universe. 1975. P. 23. Eds. Sandage A., Sandage M., Kristian J. The Univ. of Chicago Press.
21. *Урбах В.Ю.* // Математическая статистика для биологов и медиков. М. Издательство АН СССР. 1963. С.200, С.260, С.156.
22. *Irwin M., Maddox St., McMahon R.* // Spectrum 1994. No2, P.14.
23. *Sky atlas.* // Pasadena: National Geography Sociaty, Palomar observatory. 1954. 879 tab.
24. *Cannon R.D.* // Astrophys. Space Sci. Libr. 1984. Vol.110, P. 25. Dordrecht/ Boston: D.Reidel publ. comp.
25. *Зайцев Г.Н.* // Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука. 1984. С.258.
26. *Полякова Г.Д.* // Изв. ГАО. 2004. N 217. С.120.
27. *Полякова Г.Д.* // Изв. ГАО. 2002. N 216. С.574.
28. *Burstein D., Heiles C.* //Astron J. 1982. Vol.87. P.1165.
29. *Pence W.D.* //Astrophys. J. 1976. Vol. 203. P.39.
30. <http://www.sai.msu.su/sn/sncat>

THE INTEGRATED COLOR AS ADDITIONAL CLASSIFICATION CRITERIA FOR THE GALAXIES

Polyakova G.D.

For 83 host galaxies of the type II Supernovae the value of the isophotal diameters, axis ratio and position angles corrected to the photometric system of the RC3 catalog has been obtained. The appearance images of these galaxies were obtained from STScI Digital Sky Survey and were used for determination of their morphological type. As an additional criterion of the classification we used the mean color-indices corrected for the Galactic and internal extinction and redshift $\langle (B - V)_T^0 \rangle$, obtained for the spiral and irregular galaxies.

МЕТОДЫ
И
ИНСТРУМЕНТЫ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ПРОЕКЦИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ

Часть 1. Стандартный метод максимальной энтропии

Байкова А.Т.

Рассматривается задача восстановления изображений по небольшому числу проекций с использованием стандартного метода максимальной энтропии в форме Шеннона. На результатах моделирования показаны преимущества данного метода по сравнению с традиционными алгоритмами чистки.

Введение

Задача восстановления изображений по проекциям (реконструктивная томография) представляет интерес во многих областях человеческой деятельности, начиная с медицины и кончая астрономией [1]. В астрономии в качестве примеров можно привести реконструкцию яркости космических объектов при лунных покрытиях [2,3] и доплеровскую томографию при исследовании двойных звездных систем [4].

Проблема восстановления изображений с использованием нелинейных алгоритмов, обладающих высокими интерполирующими и экстраполирующими свойствами, возникает в случае, когда число проекций мало и в плоскости данных имеются большие незаполненные участки (пропуски). В таких случаях применение линейных методов, таких как, например, алгоритма обратных фильтрованных проекций [1], становится нецелесообразным из-за невозможности восстановления отсутствующей информации и, как следствие, плохого качества получаемых изображений [2].

Известен класс методов, основанных на радиоастрономическом подходе [2,3], использующих различные модификации хорошо известного в радиоинтерферометрии алгоритма чистки (CLEAN) [5]. Для его применения из данных (проекций) формируется “грязное” изображение. Диаграмма направленности системы формирования изображений строится таким образом, что “грязное” изображение представляет собой свертку искомого изображения и диаграммы. В результате задача восстановления искомого изображения сводится к решению обратной задачи типа свертки, которая является некорректно поставленной. Решение этой задачи в работах [2, 3] предлагается находить в области изображения с использованием алгоритма чистки и его модификаций. В частности, авторы работы [3] используют алгоритм двух чисток с целью получения двух решений, одно из которых лучше представляет компактные, а другое — протяженные детали изображения. При этом остается открытым вопрос о получении целостного представления об объекте, что является определенным недостатком метода.

Целью данной работы является применение хорошо известного во многих областях физики и техники фундаментального метода анализа данных, основанного на оптимизации функционала энтропии по Шеннону, для получения наиболее правдоподобного решения, удовлетворяющего экспериментальным данным [6]. Решения, получаемые по методу максимальной энтропии (ММЭ), являются сугубо гладкими, и поэтому во многих практических случаях применение этого метода является более естественным, нежели метода традиционной чистки по Хёгбому, работающего в классе разрывных функций [5].

1. Постановка задачи

Задача, решаемая в данной работе, формулируется следующим образом. Пусть имеется объект – двумерный источник излучения интенсивностей конечной пространственной протяженности в области X, Y . Математически такой объект описывается двумерной финитной неотрицательной функцией переменных X и Y : $O(X, Y)$ (см. рис. 1а). Проекция объекта на линию p , составляющей угол φ с осью Y , как показано на рис. 1а, представляет собой интеграл распределения интенсивности по объекту по координате, перпендикулярной оси p . Проекция представляет собой функцию переменной p , которую обозначим как $T(p)$. Пусть имеется N проекций объекта с различными углами φ_i , т.е. имеется N интегралов $T_i(p)$ ($i = 1, \dots, N$) двумерного объекта по направлениям, составляющим углы $\varphi_i + 90^\circ$ с осью Y . Требуется восстановить изображение объекта $O(X, Y)$ по проекциям $T_i(p)$.

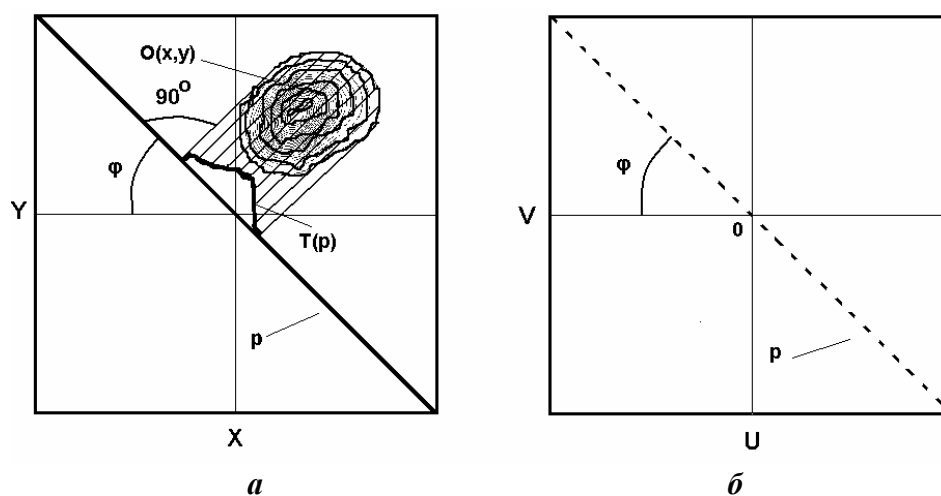


Рис. 1.

2. Метод восстановления по проекциям

В основе используемого нами алгоритма восстановления изображения по проекциям лежит фундаментальное соотношение между преобразованием Радона и преобразованием Фурье, формулируемое в виде теоремы о проекциях [1]. В соответствии с этой теоремой, Фурье-преобразование проекции $T(p)$, проходящей под углом φ к оси Y (рис. 1а), является одномерным центральным сечением двумерного преобразования Фурье функции $O(X, Y)$, составляющим такой же угол φ с осью V в области пространственных частот U, V (UV -плоскости). На рис. 1б показаны координаты Фурье-образа проекции $T(p)$. Пример шести проекций изображен на рис. 2а. Соответствующее заполнение UV -плоскости показано на рис. 2б. Если число проекций бесконечно, то восстановление изображения осуществляется с помощью обратного преобразования Радона [1].

Отметим, что принципиальная возможность восстановления изображения по небольшому числу проекций, или, по неполному UV -заполнению области пространственных частот, основывается на свойстве аналитичности преобразования Фурье финитной функции [7], описывающей пространственно ограниченный объект. Аналитические функции могут быть продолжены на всю бесконечную область их определения по значениям, известным на конечном интервале или конечном множестве точек.

Основным требованием, предъявляемым к алгоритмам восстановления, является нелинейность. Только в силу нелинейности возможна реализация “аналитического продолжения” спектра, т. е. заполнения пустых участков на UV -плоскости. С помощью

линейных процедур получение недостающих спектральных гармоник принципиально невозможно. Требование неотрицательности решения во многих случаях преобразует линейные процедуры в существенно нелинейные. Неотрицательность решения является неотъемлемым свойством стандартного метода максимальной энтропии, который мы используем в данной работе.

3. Метод максимальной энтропии

Пусть карта объекта с конечным носителем дискретизирована в соответствии с теоремой Шеннона-Котельникова и имеет размер $N \times N$ пикселей. Дискретные отсчеты искомого распределения обозначим как

$$x_{kl}, k, l = 1, \dots, N - 1.$$

Известные отсчеты двумерного спектра Фурье объекта, представляющие собой данные в соответствии с теоремой о проекциях, обозначим следующим образом, выделив вещественную A_m и мнимую B_m части:

$$X_m = A_m + jB_m, m = 1, \dots, M,$$

где m - номер текущего отсчета с известными координатами (u_m, v_m) на UV-плоскости, не обязательно находящимися в узлах координатной сетки; M - число известных отсчетов. Отметим, что отсутствие проблем с пикселизацией данных в частотной области является определенным техническим преимуществом рассматриваемого метода, что существенно повышает точность восстановления [1].

Применяемый нами метод максимальной энтропии [8] предполагает решение следующей задачи условной оптимизации:

$$\min(\sum_k \sum_l x_{kl} \ln(x_{kl}) + \rho \sum_m ((\eta_m^{re})^2 + (\eta_m^{im})^2) / \sigma_m^2), \quad (1)$$

$$\sum_k \sum_l x_{kl} a_{kl}^m - \eta_m^{re} = A_m, \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_l x_{kl} b_{kl}^m - \eta_m^{im} = B_m,$$

$$x_{kl} \geq 0, \quad (3)$$

где a_{kl}^m, b_{kl}^m - постоянные коэффициенты (косинусы и синусы), соответствующие преобразованию Фурье; A_m, B_m - вещественная и мнимая части данных о спектре объекта; η_m^{re}, η_m^{im} - вещественная и мнимая части неизвестного аддитивного шума, распределенного по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ_m ; ρ - положительный весовой коэффициент.

Как видно из (1), оптимизируемый функционал состоит из основного (негэнтропии в форме Шеннона) и дополнительного функционала. Последний представляет собой оценку расхождения восстановленного спектра с измеренными данными по критерию χ^2 . Дополнительный функционал может рассматриваться в качестве регуляризирующего, или, стабилизирующего члена. Он вводится, если ошибки данных настолько велики, что для стабилизации решения не достаточно применения только энтропийного функционала. Уравнения (2) представляют собой линейные ограничения на неизвестные изображения (x_{kl}) и шума $(\eta_m^{re}, \eta_m^{im})$. Ограничение на неотрицательность изображе-

ния (3) в данном случае может быть опущено в силу специфики энтропийного решения, являющегося чисто положительным. Отметим, что благодаря тому, что заполнение UV-плоскости обязательно содержит нулевую точку (полный поток источника), автоматически производится необходимая для ММЭ нормировка решения.

Численные методы решения задачи восстановления (1)-(3) как задачи нелинейной оптимизации подробно рассмотрены в [8].

4. Результаты моделирования

Представим результаты моделирование задачи восстановления изображений по проекциям для четырех объектов, имеющих разную морфологию: 1) совокупность из трех компактных гауссовых деталей; 2) совокупность из трех протяженных гауссовых деталей; 3) и 4) – сочетание протяженных и компактных гауссовых деталей (см. рис. 3, левая колонка). Для получения исходных данных в каждом примере было использовано по шесть проекций с углами $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $\varphi_3 = 45^\circ$, $\varphi_4 = 135^\circ$, $\varphi_5 = 63.5^\circ$, $\varphi_6 = 116.5^\circ$. Расположение проекций в плоскости изображений показано на рис. 2а. Цифрами обозначены номера проекций. Суммарное заполнение UV-плоскости, полученное исходя из теоремы о проекциях, показано на рис. 2б. Данные были сформированы таким образом, что отношение сигнал/шум для всех рассмотренных примеров составило около 10.

Восстановление изображений было произведено двумя методами: методом максимальной энтропии, описанным выше, и стандартным методом CLEAN по Хэгбому [5].

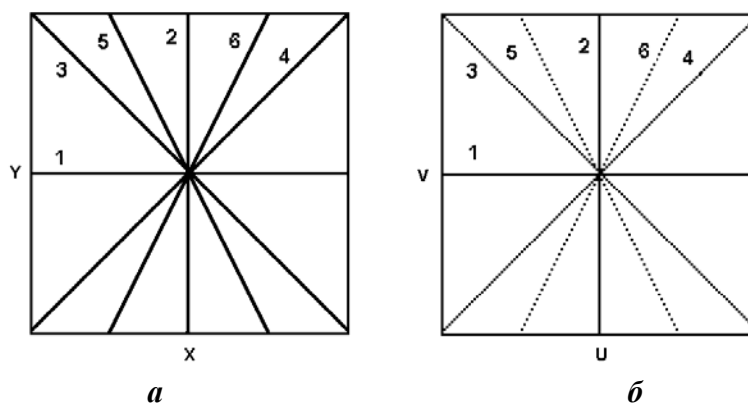
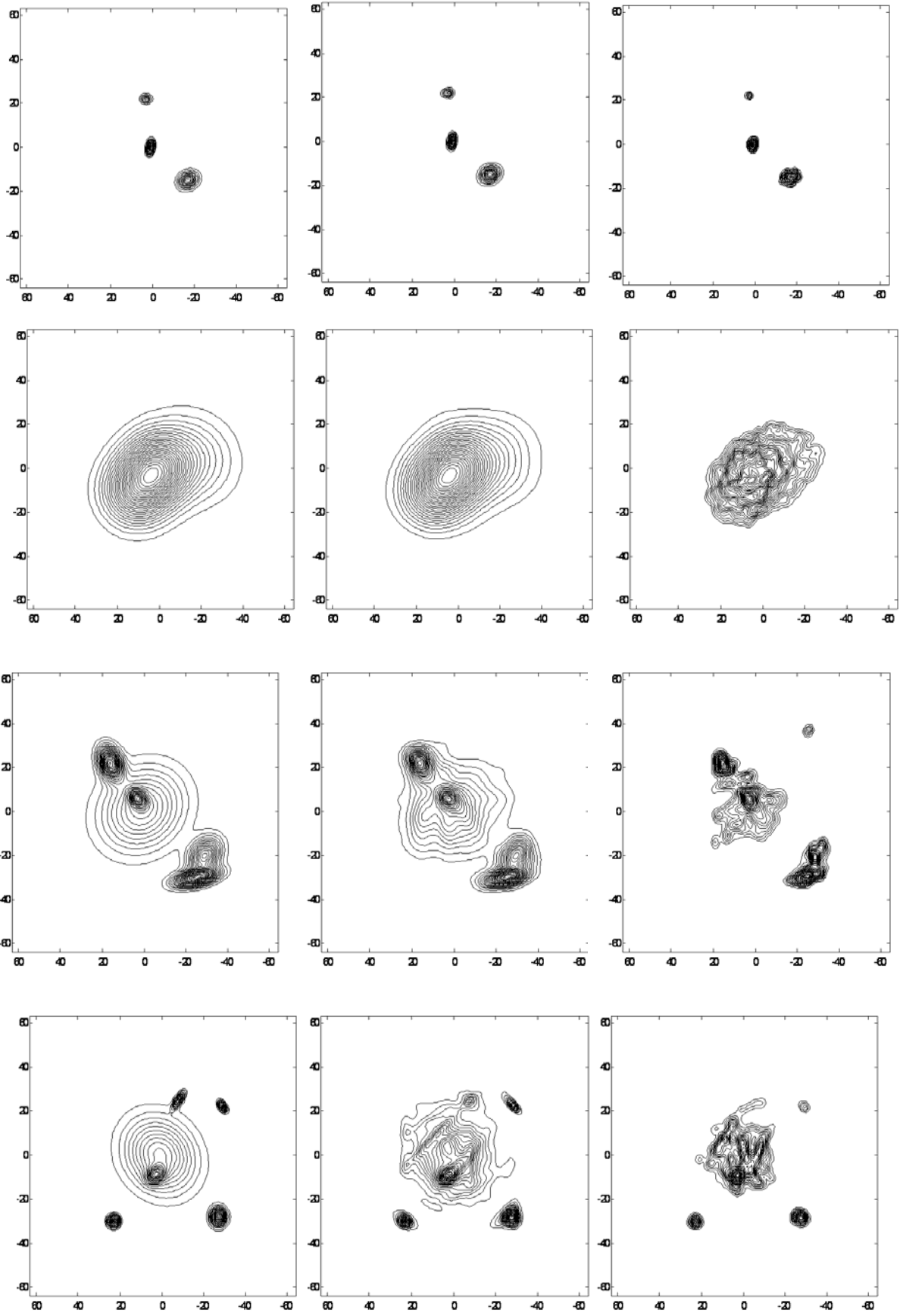


Рис. 2.

Полученные ММЭ- и CLEAN -карты приводятся в центральной и правой колонках рис.3 соответственно. Отметим, что на всех приведенных изображениях контурные линии проведены с шагом в 4% от пикового значения на карте.

Анализ полученных изображений показывает, что качество восстановления во многом зависит от структуры объекта. Проанализируем ММЭ-карты. Наивысшее качество восстановления отмечается в случае однородных источников: состоящих либо только из компактных, либо только из протяженных деталей (источники 1) и 2)). В этом случае мы имеем почти точное восстановление. В случае комбинированных источников, представляющих собой совокупность протяженных и компактных деталей, восстановление хуже (источники 3) и 4)). Причем, чем выше динамический диапазон карт, тем ниже качество восстановления, особенно протяженной части структуры. В этом случае следует использовать дифференциальный метод максимальной энтропии, предложенный в работе [9]. Этому будет посвящена вторая часть данной работы.



Модельные карты

ММЭ-карты

CLEAN-карты

Рис. 3.

Теперь сравним ММЭ-карты с CLEAN-картами. Как видно из изображений, приведенных в правой колонке рис. 3, наилучшее восстановление получено для компактных источников. Однако, по сравнению с ММЭ даже в случае довольно компактных структур (см. первый источник) восстановление компонент произошло с некоторым нарушением соотношения амплитуд: наименее компактный источник вытянулся по амплитуде в наибольшей степени и сузился в пространстве. В случае чисто протяженной структуры (объект 2)) решением явилось довольно раздробленное изображение, хотя общие контуры объекта передались неплохо. Наихудшее восстановление получено для объектов 3) и 4) смешанной структуры. Точечные компоненты восстановились с большими искажениями соотношения амплитуд. Протяженная часть структуры получила наибольшие внутренние пространственные искажения, существенно уменьшилась площадь протяженной подложки, что привело к большим искажениям общего очертания объектов. Однако, в случае 4) нижние точечные детали более точно восстановились на CLEAN-карте по сравнению с ММЭ-картой. Если ММЭ, в силу гладкости решения, несколько расширяет изображения источников, то CLEAN, в силу разрывности решения, наоборот, сужает компоненты, стараясь превратить их в более компактные.

Таким образом, из рассмотренных примеров следует, что алгоритм ММЭ является более предпочтительным по сравнению с традиционным алгоритмом чистки CLEAN с точки зрения более точного восстановления протяженных структур источника.

5. Заключение

В силу справедливости теоремы о проекциях, применение метода максимальной энтропии представляется совершенно естественным и простым решением задачи восстановления изображений по небольшому числу проекций. Результаты моделирования разработанного метода восстановления на базе двух основных радиоастрономических процедур деконволюции: CLEAN и ММЭ, говорит в пользу применения ММЭ, поскольку ММЭ обеспечивает более качественное восстановление, в особенности, протяженных деталей изображения. Это связано с тем, что ММЭ-решения по своей природе являются гладкими, в то время как CLEAN- алгоритмы, ищущие решение в пространстве δ -функций, ведут к разрывному изображению. В случае компактных структур применение ММЭ и CLEAN обеспечивает примерно одинаковое качество. Дополнительным техническим преимуществом рассмотренного метода, основанного на ММЭ, является отсутствие всяких проблем с пикселизацией карт в частотной области, что повышает точность восстановления изображений. В следующих частях данной работы предполагается дальнейшее повышение качества восстановления изображений по небольшому числу проекций за счет применения дифференциального метода максимальной энтропии, а также обобщение метода максимальной энтропии для восстановления знакопеременных изображений, что позволит расширить диапазон практических приложений методов реконструктивной томографии.

Литература

1. *Хермен Г., Восстановление изображений по проекциям* (Ред. перевода Л.М. Сороко, М: Мир, 1983).
2. *Агафонов М.И., Подвойская О.А., Изв. вузов. Радиофизика. 32, 742 (1990).*
3. *Агафонов М.И., Подвойская О.А., Изв. вузов. Радиофизика. 33, 1185 (1990).*
4. *Агафонов М.И., Шарова О.И., Изв. вузов. Радиофизика. 48, 367 (2005).*
5. *Högbon J.A., Astron. Astroph. Suppl. Ser., 15, 417 (1974).*
6. *Frieden B.R. JOSA, 62, 511 (1972).*

7. *Хургин Я.И., Яковлев В.П. Финитные функции в физике и технике* (М: Наука, 1971).
8. *Байкова А.Т.*, Сообщения ИПА РАН N 58 (СПб.: ИПА РАН, 1993).
9. *Байкова А.Т.*, Изв. вузов. Радиофизика. **41**, 991 (1998).

**IMAGE RECONSTRUCTION FROM PROJECTIONS USING
MAXIMUM ENTROPY METHOD
Part I. Standard maximum entropy method.**

Vajkova A.T.

Summary

The paper analyzes the problem of image reconstruction using a limited number of projections. We present the results of modeling and show advantages of maximum entropy method (MEM over the standard CLEAN algorithm for solving this problem.

EASSISTANT, ПРОГРАММА-АССИСТЕНТ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Бережной А.А.

Дается описание программы EAssistant, которая создана для облегчения эфемеридной поддержки наблюдений и увеличения эффективности работы наблюдателя. Интерфейс позволяет выполнять быстрое вычисление эфемерид заранее определенной группы объектов непосредственно на момент наблюдения, тем самым получать всю необходимую информацию к наблюдениям, отфильтрованную и упорядоченную по определенным критериям, быстро переключаться между объектами наблюдений и автоматически вести электронный журнал наблюдений.

В настоящее время существует множество программных продуктов, предоставляющих возможность получить весьма точную эфемериду интересующих наблюдателей объектов. К таким программам относится ЭПОС [1], HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>), предоставляющий несколько интерфейсов получения эфемериды с помощью Интернета и ряд других программных продуктов. Перечисленные программы обеспечивают высокую точность эфемерид и очень удобны при офисной работе. Во время наблюдений, наблюдатель в условиях ограниченного времени должен не только получать точную эфемериду объекта, но и иметь возможность оперативно выбрать объект, который оптимальным образом удовлетворяет требованиям, имеющейся программы наблюдений и находится в наиболее выгодном положении для наблюдений. Особенно это важно, если на инструменте ведется несколько наблюдательных программ, например, наблюдение астероидов, спутников планет, наблюдение покрытий и сближений астероидов со звездами, взаимные явления в системе спутников планет и т.п. В такой ситуации наблюдателю нужно оперативно получать информацию о многих объектах и оперативно оценивать её, быстро выбирая объект, наблюдение которого оптимально в данный момент времени. Подобная задача решается на различных инструментах по-своему с учетом специфики наблюдательных задач. Представляемая программа создана с учетом астероидной и планетной направленности наблюдений, выполняемых на нормальном астрографе Пулковской обсерватории.

Программа EAssistant предоставляет пользователю простой интерфейс, позволяющий быстро выбирать объект и получать для него эфемериду. Главное диалоговое окно программы представлено на рисунке 1.

В левом верхнем углу окна отображается системное время, синхронизированное со всемирным координированным временем (синхронизация времени производится до запуска EAssistant), и соответствующее ему местное звездное время, а также поле для ввода поправки в минутах времени, которое требуется наблюдателю для установки телескопа и запуска экспозиции. Введение поправки имеет значение только для быстро движущихся объектов, например АСЗ или близких комет, и может не использоваться при наблюдении большинства астероидов и спутников планет.

В разделе «Объект» имеются поля для выбора объекта по имени или по номеру. Список объектов, включенных в программу наблюдений, должен быть заранее сформирован в виде файла соответствующего формата. Ключевым полем, по которому можно различать объекты, является имя, потому что номер объекта может отсутствовать, например, в каталоге нумерованных астероидов. Каждый объект, включенный в общую программу наблюдений, снабжается условным номером (в виде целого числа),

обозначающим задачу, для которой он предназначен, приоритетом в рамках общей программы наблюдений и номером каталога для оптимизации поиска объекта. Присвоение приоритета – это первый шаг к полной автоматизации процесса наблюдения по принятой программе.

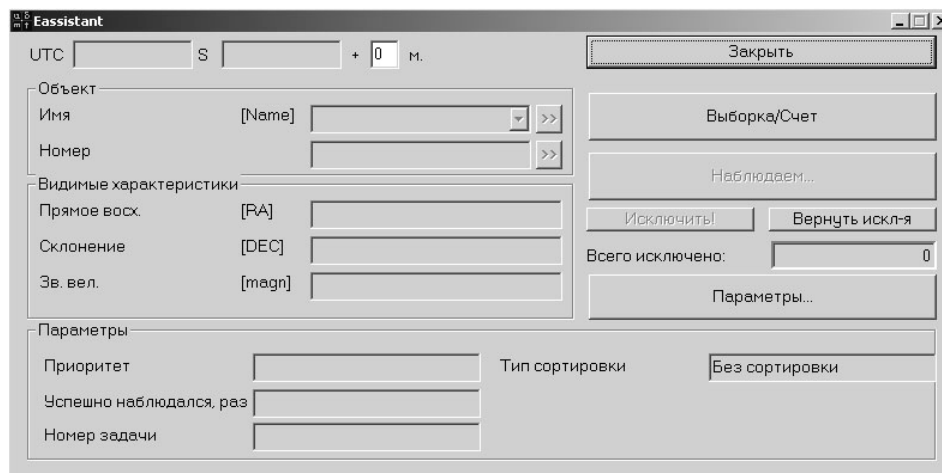


Рис. 1. Главное окно программы EAssistant.

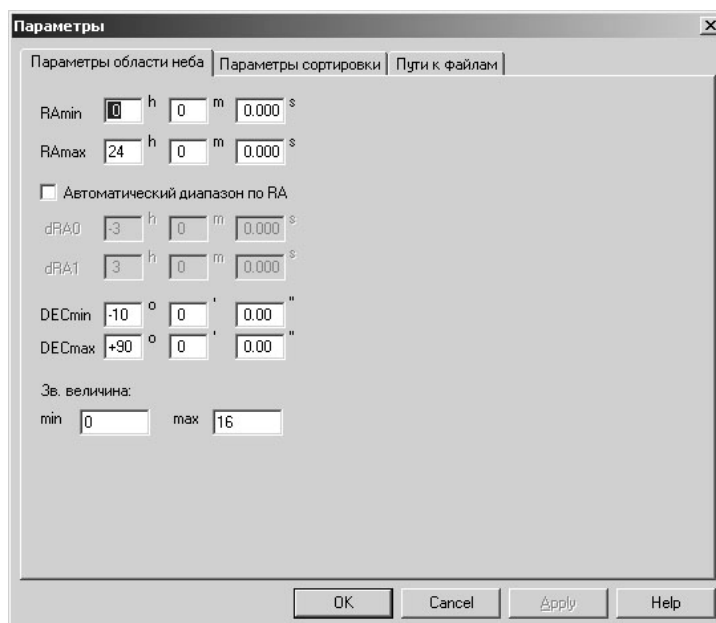


Рис. 2. Окно установки параметров.

Работа наблюдателя с программой начинается с выставления параметров, для чего нажимается соответствующая клавиша («Параметры») с правой стороны главного окна. В появившемся диалоговом окне (рис. 2) можно установить область наблюдений по RA и DEC, а также диапазон звездных величин, в котором будет вычисляться эфемерида. Границы области наблюдений по прямому восхождению можно привязать к основному меридиану.

В разделе «Тип сортировки» можно устанавливать последовательность расположения объектов в наблюдательном списке: по удаленности от меридиана, по возрастанию и убыванию звездных величин, по количеству наблюдений, по возрастанию прямого восхождения и по приоритету (рис 3.).

Последняя вкладка дает возможность при необходимости изменить пути к необходимым для работы файлам (рис 4.). По умолчанию эти файлы должны располагаться в директории с самой программой. Если программа их там не обнаружит, то она при запуске попросит указать пути к файлам.

Нажатие на клавишу «Выборка/Счет» основного окна обеспечивает вычисление эфемерид в заданных границах координат и звездных величин для всех объектов [2-4]. Для этого, с использованием точных планетных эфемерид DE405 вычисляются прямоугольные экваториальные координаты Земли, учитывается поправка за топоцентр. Затем последовательно вычисляются прямоугольные и сферические координаты объектов. Точность координат получается порядка $10''$, что вполне достаточно для наведения на объект. После окончания вычислений становится доступным раздел («Объект»), в котором наблюдатель может выбрать объект, задав его имя [Name], либо номер. При этом, в разделе «Видимые характеристики» появятся RA, DEC и звездная величина, а в разделе «Параметры» информация о приоритете («Приоритет»), количестве успешных наблюдений («Успешно наблюдался, раз») и номере задачи, для которой проводятся наблюдения объекта («Задача»).

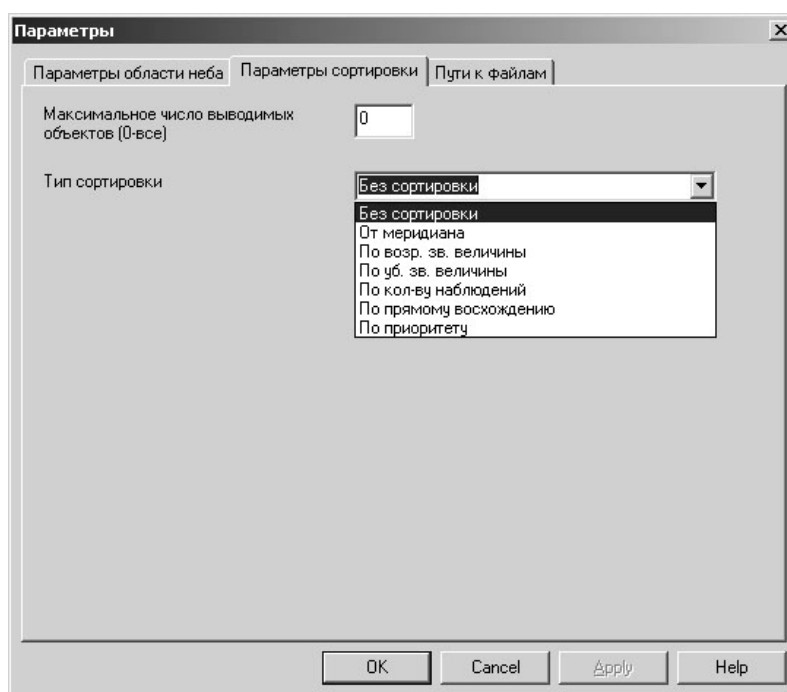


Рис. 3. Окно «Параметры сортировки».

Для получения установочных координат, наблюдатель должен нажать клавишу «Наблюдаем...». После чего запустится программа `n_astroglyph` (рис 5). Эта программа, разработанная Ховричевым М.Ю, давно используется на нормальном астрографе Пулковской обсерватории. Выполнив установку инструмента и начав экспозицию, нужно закрыть программу `n_astroglyph` и подтвердить в появившемся окне (рис 6.), что объект наблюдается («Плюс»), или же по каким-то причинам наблюдение по выбранному объекту не началось («Минус»). После этого программа запишет в журнал всю информацию о наблюдении, включая результат, как положительный, так и отрицательный, который использует при следующей выборке для определения числа успешных наблюдений. Журнал хранится в виде файла и может быть позднее просмотрен в случае необходимости. После подтверждения наблюдения наблюдатель снова попадает в главное окно программы (рис 1.) и может приступить к выборке следующего объекта.

Также у наблюдателя имеется возможность исключать объекты из наблюдений не по видимым характеристикам (попадание в указанный диапазон по сферическим координатам и звездным величинам), а напрямую указав имя, для которого эфемерида считаться не будет. Такая возможность полезна, если некоторые из астероидов неудобны или наблюдать их (в данную ночь) больше не нужно. Для этого существует список исключаемых имен. Добавление объекта в этот список выполняется выбором объекта (в поле «Имя») и нажатием на кнопку «Исключить!», после чего такой астероид или планета в списке имен не появятся. Вернуть их можно либо нажатием на кнопку «Вернуть искл-я», либо вручную – редактированием соответствующего файла. Под клавишами «исключения» и «возврата исключенных» располагается поле, информирующее о количестве исключенных в данный момент объектов.

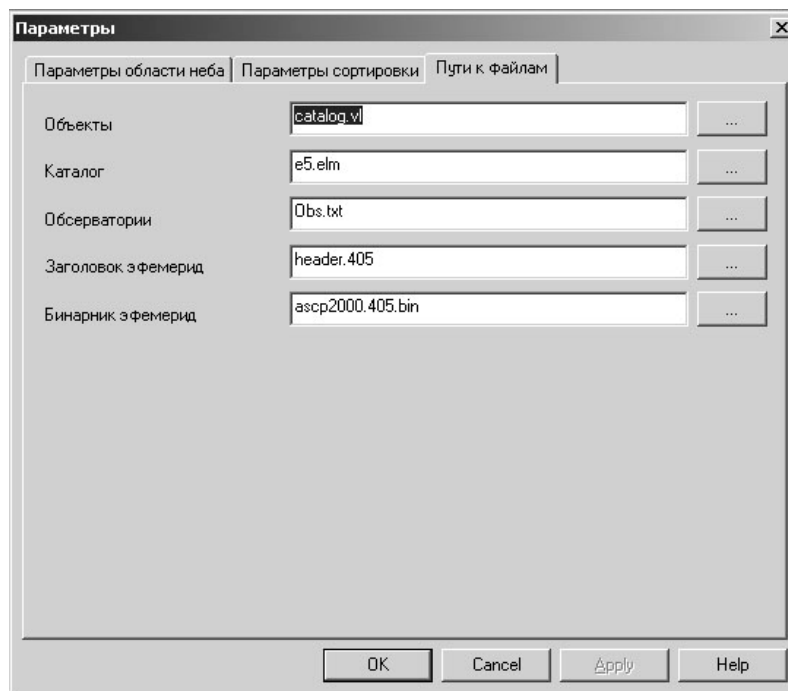


Рис. 4. Окно «Пути к файлам».

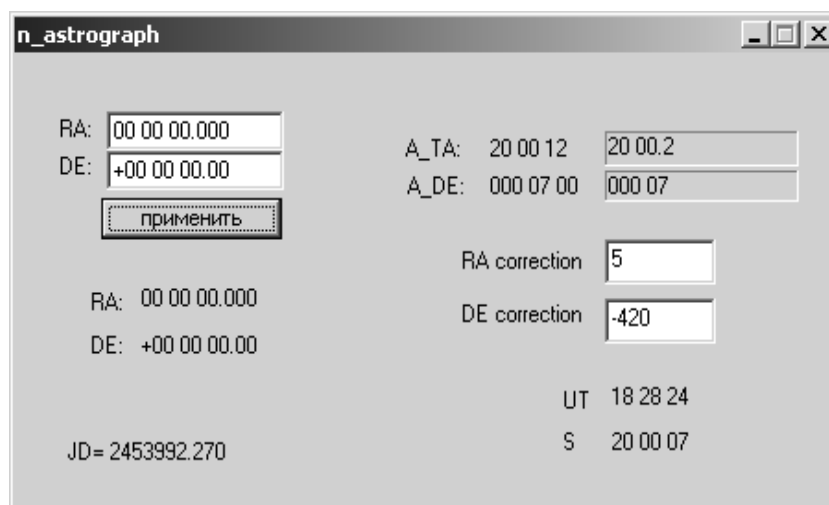


Рис. 5. Окно программы n_astrogaph.

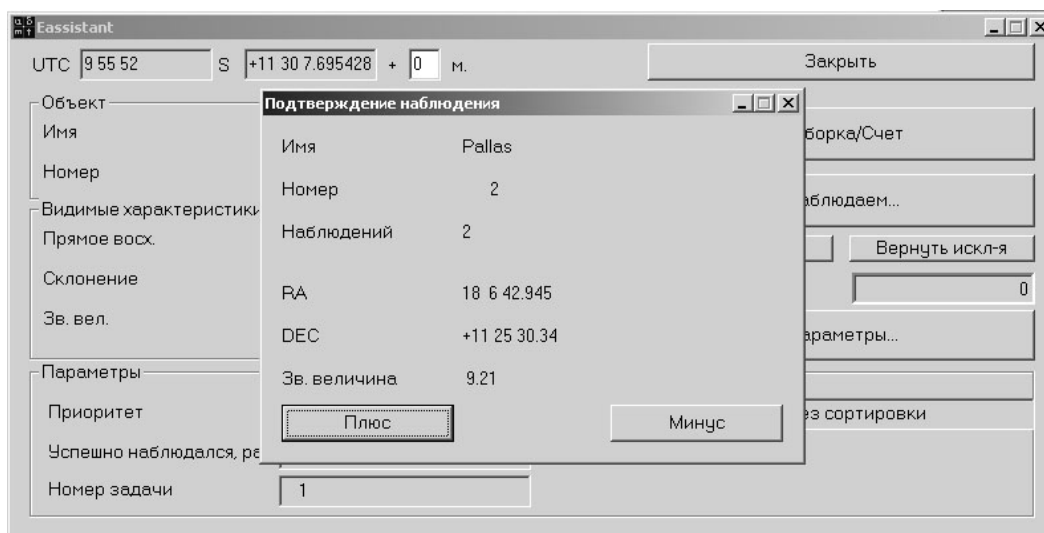


Рис. 6. Окно «Подтверждение наблюдения».

Разработанная программа EAssistant облегчает и оптимизирует работу наблюдателя и успешно применяется с 2006 года при наблюдениях на нормальном астрографе Пулковской обсерватории.

Литература

1. **В.Н. Львов, Р.И. Смехачева, С.Д. Цекместер.** ЭПОС - пакет программ для работ по изучению объектов Солнечной системы. Сборник трудов конференции "Околоземная астрономия XXI века", Звенигород, 21-25 мая 2001 г., Москва, ГЕОС, 2001, с. 235-240.
2. **М.А. Субботин,** «Введение в теоретическую астрономию», изд. Наука, 1968, 802 с.
3. **Справочное руководство по небесной механике** под ред. Г.Н. Дубошина, 1976 г., 864 с.
4. **Труды ИПА РАН.** Эфемеридная астрономия. Изд. ИПА РАН. Вып. 10, 2004 , 488 с.

EASSISTANT, ASSISTANT SOFTWARE FOR OBSERVER

Berezhnoi A.A.

Summary

A description of the EAssistant software which has been developed to improve the efficiency of observations is presented. User interface allows to perform quick ephemeris computation of a predetermined group of objects during the observation, and to receive all necessary observational information that is filtered and sorted by certain criteria. There is an opportunity to make a fast choice between observational objects and to automatically keep an electronic log of observations.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА–320М.

III. Новый алгоритм определения отсчета лимбов

Верещагина И.А., Бехтева А.С., Куприянов В.В.

В настоящей статье подробно описаны принципы работы нового алгоритма определения отсчета лимбов, являющегося частью процесса автоматизации астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА–320М. Проиллюстрированы различные этапы обработки изображений, такие как снятие фона и выделение информативной части, а также удаление пятен и других дефектов, искажающих информацию. Существенно переработаны методы распознавания цифр и измерения положений штрихов. В результате работы нового алгоритма значительно увеличилась надежность и скорость наведения на объект; точность наведения при этом возросла примерно в 4 раза.

Общий план алгоритма

Текущее положение трубы телескопа на зеркальном астрографе ЗА–20М определяется с помощью определения значений отсчетов шкал разделенных кругов (лимбов) по часовому углу (t) и склонению (\square). В процессе автоматизации астрономических наблюдений на данном инструменте естественным образом возникла необходимость распознавания этих отсчетов в автоматическом режиме. Для решения этой задачи был предложен ряд алгоритмов [1,2], но ни один из них не смог обеспечить 100%-й надежности распознавания. Основным источником проблем явилась обработка графических изображений лимбов, отягощенных различными геометрическими искажениями, пятнами и другими дефектами; для их устранения приходилось применять немалые усилия. Тем не менее, требования к эффективности работы данного алгоритма очень высоки, так как от этого зависит скорость и надежность наведения инструмента на объект. По этой причине возникла необходимость в разработке новой версии модуля для снятия отсчетов с лимбов, которая, по возможности, учитывала бы недостатки предыдущих и была бы более эффективной.

Во избежание повторения недостатков предыдущих версий, новая программа разрабатывалась независимо. Ниже приведен общий план реализации алгоритма.

Прежде всего, совершается ряд подготовительных действий.

1) С обоих лимбов (по часовому углу и по склонению) снимается несколько изображений (см. рис. 1), желательно по одному для каждого градусного отсчета (т.е. по 360 для каждого лимба). Изображения снимаются таким образом, чтобы отсчет находился как можно ближе к центру кадра — тогда оптические искажения будут минимальными. Эти изображения в дальнейшем используются в качестве так называемых *шаблонов*, т.е. образцов цифр градусной части отсчета, а также фона изображений.

2) Из полученных таким образом шаблонов в интерактивном режиме, при помощи графического интерфейса, который является частью данного программного обеспечения, выбирается приблизительно 10 “идеальных” шаблонов, т.е. таких изображений, на которых отсутствуют пятна и какие-либо другие дефекты. По этим “идеальным” изображениям вычисляются усредненные характеристики цифр и штрихов. Такими характеристиками являются: средняя высота и ширина цифр и штрихов, соответствующие расстояния между цифрами и штрихами, среднее расстояние от верхней границы ри-

сунка до цифры. Все эти данные оказываются необходимыми для очищения обрабатываемых изображений от пятен.

3) Обрабатываются все полученные шаблоны, отдельно для каждого лимба, и в результате определяется средняя карта фона изображений, которая затем учитывается при обработке всех рисунков в рабочем режиме.

4) Из всех шаблонов извлекаются числа, соответствующие градусному отсчету, и каждое число, если оно 2- или 3-значное, разделяется на отдельные цифры. Все полученные таким образом цифры группируются от 0 до 9 и сохраняются в виде двоичных файлов в соответствующих каталогах. Эти данные используются в качестве образцов цифр при отождествлении градусного отсчета изображения, обрабатываемого в рабочем режиме.

Все описанные выше шаги прделываются однократно, на стадии “калибровки” датчика положения, и повторять их следует только в том случае, если изменился фон, фокусировка или подсветка лимбов.

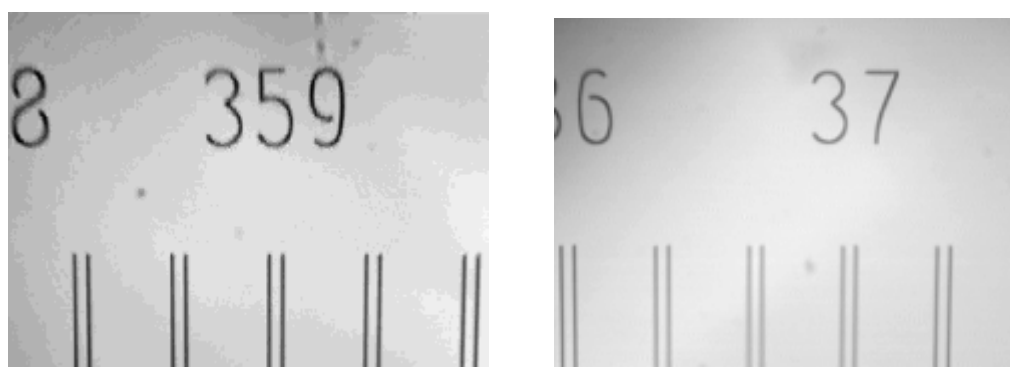


Рис. 1. Типичные изображения лимбов t (слева) и \square (справа) на зеркальном астрографе ЗА–320М.

В “рабочем” режиме вызов алгоритма инициируется по команде системы автоматического управления телескопом CHAOS [2], каждый раз, когда необходимо определить текущее положение трубы. Поступающие с плат видеозахвата оцифрованные изображения лимбов в виде графических файлов обрабатываются в три этапа:

- устраняется фон;
- отождествляется градусный отсчет с предварительной проверкой на наличие пятен;
- определяется отсчет в минутах и секундах, также с проверкой и устранением пятен.

Алгоритм реализован в среде Borland C++ Builder 6.0 с использованием интерактивного графического интерфейса (см. рис. 2). Графическая оболочка обеспечивает удобство выполнения описанных выше предварительных шагов, а также позволяет обрабатывать изображения в тестовом режиме. Тестовый режим предназначен для обработки изображений, на которых алгоритм дает сбой, — чтобы выявить причину этого сбоя и, по возможности, ее устранить (рис. 2 сн.). Данный режим работает с графическими файлами в формате Windows Bitmap (BMP). Для этого предусмотрена следующая возможность: если при обработке изображения в рабочем режиме возникает какая-либо ошибка, такое изображение сохраняется на диске в виде графического файла в нужном формате.

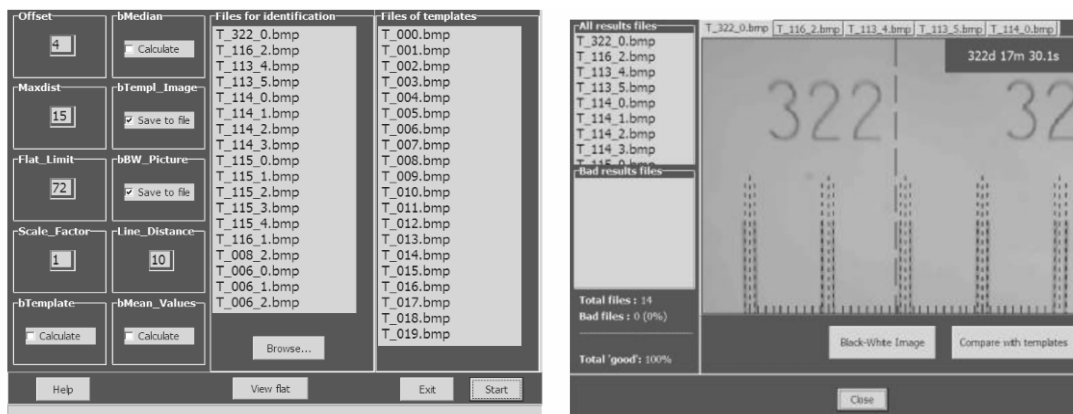


Рис. 2. Графический интерфейс программы считывания лимбов.

Получение изображений шкал лимбов

Для получения исходных изображений шкал лимбов используются две ПЗС-камеры малого размера (192Ч144 для лимба \square и 240Ч180 для лимба t) — по одной для каждого лимба. Камера, предназначенная для работы с лимбом часового угла (t), подключена к плате Creative Video Blaster RT300, камера для лимба склонения (\square) — к плате на базе набора микросхем Brooktree (Conexant) VT848.

Программный модуль управления видеодрайверами подключает выбранные драйверы, устанавливает с ними связь и периодически опрашивает их, получая новые изображения соответствующего лимба (см. рис. 1). Полученные изображения обрабатываются в соответствии с описанным ниже алгоритмом с целью получения текущего отсчета с каждого лимба. По окончании работы непрерывный захват изображений прекращается, и связь с видеодрайверами разрывается по команде системы управления телескопом.

Данная реализация отличается от предыдущей тем, что используемые драйверы выбираются по их идентификатору, а не по номеру. Это обеспечивает большую гибкость их использования.

Кроме того, передача изображения от драйвера реализуется не через буфер обмена (clipboard), как ранее, а через промежуточный графический файл, что, как показала практика, значительно увеличивает скорость обработки. Данная реализация имеет большую производительность, что крайне существенно для получения оперативной информации о положении телескопа в любой момент времени и минимизации задержек наведения, поскольку количество запросов положения трубы может достигать при этом десятков в минуту.

Для реализации данного модуля управления используется стандартный интерфейс VFW (Video for Windows, Microsoft Corp).

Компенсация неравномерности фона изображения

Общая карта фона изображений, как уже отмечалось в первом разделе, получается из “основных” шаблонов. Для этого рассматривается по очереди каждый шаблон, и для него вычисляются нормированные значения интенсивности цвета для каждого пиксела: если I_{ij}^k — значение интенсивности цвета пиксела с координатами i, j ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) соответственно для k -го шаблона, то нормированное значение интенсивности для пиксела с этими координатами будет

$$\bar{I}_{ij}^k = \frac{I_{ij}^k}{\sum_i I_{ij}^k} mn.$$

Затем, для каждого фиксированного пиксела с координатами i, j рассматриваются значения интенсивностей цветов по всем имеющимся шаблонам. Все эти значения выстраиваются в порядке возрастания, и для такой упорядоченной последовательности вычисляется медианное значение:

$$M_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j}^{(N+1)/2}, & N - \text{нечетное}, \\ \frac{I_{i,j}^{N/2} + I_{i,j}^{N/2+1}}{2}, & N - \text{четное}. \end{cases}$$

Вычисление медианного, а не среднего значения по всем “основным” шаблонам позволяет исключить случайные флуктуации интенсивности в данной точке i, j на отдельных шаблонах.

На рис. 3 справа показан пример карты фона, вычисленной с помощью медианного алгоритма. Видно, что, в отличие от предыдущей версии алгоритма [2], где фон и пятна удалялись отдельно в два этапа, новый метод позволяет сразу получить карту яркости фона, общую для всех изображений с данного лимба, детали которой — распределение освещенности, пятна, дефекты и т.д. — не зависят от конкретного участка лимба.

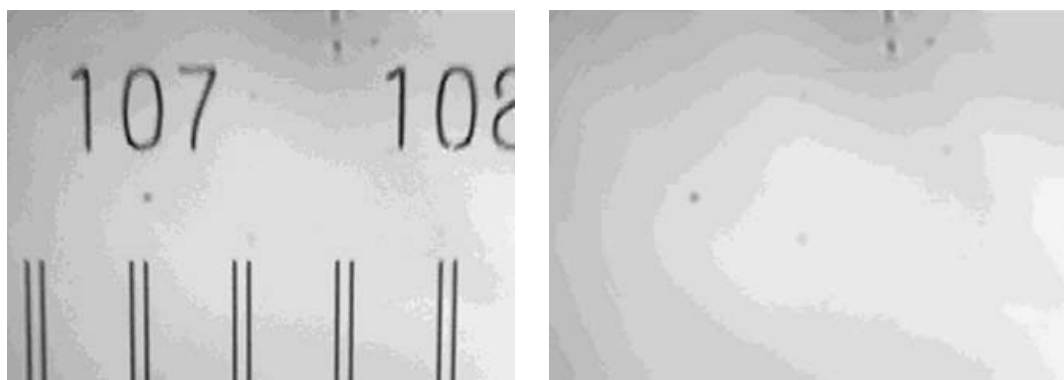


Рис.3. Типичное изображение лимба t (слева) и карта фона, получаемая с помощью медианного алгоритма (справа).

Определенная таким образом карта фона затем, в рабочем режиме, учитывается при обработке каждого изображения. При этом предполагается, что неоднородности интенсивности имеют мультипликативный характер, поэтому итоговая интенсивность пиксела вычисляется как частное от деления его исходной интенсивности I_{ij} на нормированное медианное значение интенсивности \bar{I}_{ij} в той же точке. Строго говоря, для корректного учета неравномерности фона изображений лимбов требуется компенсировать отдельно аддитивную и мультипликативную компоненты фона. Но в данном случае независимо выявить их невозможно; кроме того, учета только мультипликативной компоненты на практике оказывается достаточно.

Однако, на каждом отдельном изображении, помимо “общих” деталей, могут еще присутствовать индивидуальные пятна и неоднородности фона, присущие только данному кадру. Для устранения таких деталей, вводится пороговое значение интенсивности: $F = I_{\min} + 72(I_{\max} - I_{\min})/100$, где I_{\max} и I_{\min} — соответственно, максимальное и минимальное значения интенсивности изображения с устраненной неоднородностью фона. Коэффициент 0.72 был определен эмпирически; значение его зависит, главным образом, от степени зашумленности и контрастности изображений. Завышенное значение порогового уровня приведет к большей зашумленности изображения и, тем самым, к дополнительным трудностям при распознавании цифр; наоборот, при заниженном его

значении возможно пропадание отдельных участков цифр или штрихов, или даже целых цифр, имеющих низкую контрастность по отношению к фону.

Сигналом, т.е. информативной частью изображения, являются пиксели, имеющие интенсивность $I_{ij} < F$. Им сопоставляется черный цвет, а пикселям ярче F — белый; таким образом изображение переводится в двоичный формат.

Рис. 4 иллюстрирует результат устранения неоднородности фона и перевода изображения в черно-белый (двоичный) формат при помощи глобального порога F .

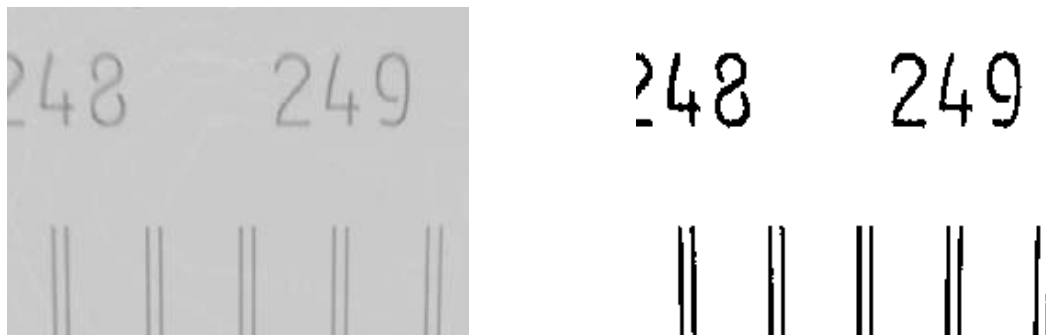


Рис.4. Изображение после выравнивания фона (слева) и после применения глобального порога и перевода в двоичный формат (справа).

Определение целой части отсчета (число градусов)

Следующим этапом после удаления фона является отождествление числа на изображении (от 0 до 359), обозначающего градусный отсчет. Для решения этой задачи рассматривается верхняя половина двоичного изображения, на которой расположено это число (см. рис. 4).

Выявление и устранение пятен на изображении

Прежде всего, с помощью данных, полученных из обработки “идеальных” шаблонов, производится проверка верхней части изображения на наличие пятен. Обнаруженное пятно удаляется, т.е. все черные пиксели, принадлежащие пятну, преобразуются в белые (фоновые) пиксели.

Идея данной процедуры заключается в определении областей локализации черных пикселей и сравнении этих областей со средними характеристиками цифры, а именно, средней шириной, высотой, расстоянием от верхнего края рисунка и т.п. (см. первый раздел). Пятном считается то, что резко отличается хотя бы по одной из этих характеристик от среднего. Соответственно, то, что не подпадает под этот критерий, считается цифрой.

Наиболее сложной задачей в данной процедуре является определение требуемой степени отличия от средней характеристики, поскольку, в силу, например, геометрических искажений, обусловленных оптикой видеокамер, высота и ширина цифр на разных кадрах может заметно различаться. Для определения приемлемого критерия, наряду со средними характеристиками \bar{h} , были вычислены так же оценки максимальных отклонений от этих средних значений σ_h . Тогда, если среднее значение некоторой характеристики цифры равно \bar{h} , то соответствующую характеристику рассматриваемого пятна h следует сравнивать:

- с величиной $(\bar{h} + \sigma_h)$, если мы хотим убедиться, что величина h не больше среднего,
- с величиной $(\bar{h} - \sigma_h)$ для выяснения того, что величина h не меньше соответствующего среднего.

Оказалось, что оценки \square_h , вычисленные с помощью “идеальных” шаблонов, являются заметно заниженными. Поэтому, оценки \square_h пришлось корректировать эмпирическим путем.

Как показала практика, наиболее стабильными величинами являются высота цифры и ее расстояние от верхнего края, т.е. “вертикальные” характеристики. Для них достаточно хорошо работают даже оценки \square_h , вычисленные с помощью “идеальных” шаблонов. Гораздо больше проблем возникло при определении оценок h для средней ширины цифры. Здесь, помимо учета геометрических искажений (шумовых факторов) имеется еще то обстоятельство, что средняя ширина цифры 1 всегда примерно в два раза меньше, чем ширина всех остальных цифр. Поэтому в качестве характеристики пришлось рассматривать величину, равную сумме ширины и расстояния между цифрами в числе. Эта величина оказалась более стабильной. Но, в любом случае, величина \square_h для данной характеристики получается по модулю довольно большой (большой разброс допустимых значений h), и поэтому здесь возможны ошибки, если ширина пятна окажется близкой к ширине цифры. Однако, окончательный вывод о том, пятно это или цифра, делается по совокупности всех характеристик, и вероятность того, что и другие характеристики пятна окажутся похожими по величине на цифру, крайне мала.

Процедура обнаружения пятен построена таким образом, что вначале она сканирует изображение по горизонтали и выделяет все области черных (информационных) пикселей, разделенные между собой хотя бы одним столбцом белых (фоновых) пикселей по вертикали. Затем, каждая выделенная таким образом область (пятно) обрабатывается отдельно.

Если высота или ширина пятна оказывается меньше соответствующих средних величин, то такое пятно удаляется сразу.

Если высота пятна оказывается больше средней высоты цифры, то оно сканируется по вертикали с целью выявления областей белых пикселей по всей его ширине (“проверка на группу мелких пятен”). Если белые пиксели обнаруживаются, то это значит, что данная область черных пикселей по горизонтали состоит из нескольких пятен по вертикали, и тогда удаляются все пятна, кроме максимального по высоте (так как может оказаться, что это — цифра). В качестве предполагаемой цифры оставляется пятно именно с максимальной высотой потому, что общая высота половины изображения такова, что не может быть пятна на одной вертикали с цифрой, которое оказалось бы больше ее по высоте. Вся процедура очищения от пятен повторяется циклически до тех пор, пока не останутся только такие области черных пикселей, которые по всем параметрам соответствуют цифре. Поэтому, если оставленное максимальное по высоте пятно не окажется на самом деле цифрой, то оно удалится при следующей итерации данной процедуры.

Если при сканировании пятна по высоте белые пиксели, разделяющие его на части, не обнаруживаются, то пятно просто “укорачивается” сверху (если его высота от верхнего края изображения оказывается меньше средней) или снизу (в противном случае); таким образом удаляются возможные пятна сверху или снизу от цифры.

После такой обработки пятна по высоте, производится проверка его ширины. Здесь алгоритм построен таким образом, что если ширина пятна оказывается больше ширины одной цифры, но меньше ширины двух цифр (удвоенной средней величины одной цифры), то оно делится пополам с помощью одного вертикального столбца белых пикселей. Если же ширина пятна оказывается больше двух цифр, но меньше трех, то оно также делится соответствующим образом на три части. Это делается для разделения цифр в числе, если они оказываются слившимися между собой, а также для очищения от небольших по высоте пятен сбоку от крайней цифры.

Пример результата работы данной процедуры приведен на рис. 5.

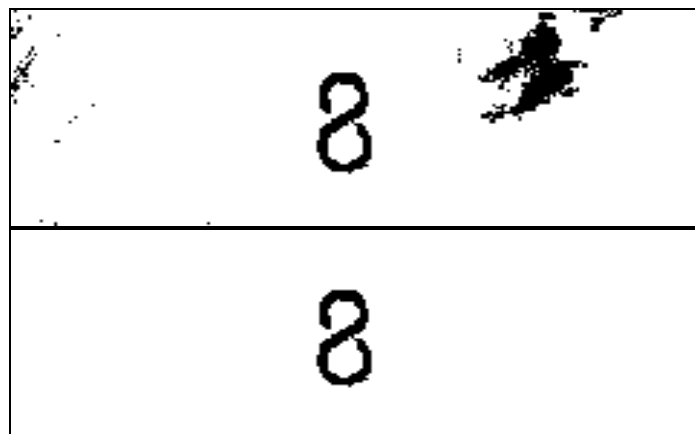


Рис. 5. Верхняя часть изображения до удаления пятен (вверху) и после (внизу).

Идентификация числа

После того, как изображение очищено от пятен, производится идентификация числа. Для этого, рассматриваются оставшиеся после удаления пятен группы черных пикселей (считается, что все они представляют собой цифры), и вычисляются расстояния между ними по горизонтали. Если это расстояние оказывается меньше 15% общей ширины кадра (величина, подобранная эмпирически), то такие две цифры объединяются в одну группу, т.е. в число.

Если групп цифр (чисел) на изображении оказывается более одного, то из них выбирается ближайшее к центру изображения по горизонтали. Одновременно вычисляется координата середины этого числа, которая потребуется в дальнейшем для определения дробной части отсчета.

Распознавание числа реализовано методом сравнения с шаблонами. В отличие от алгоритма распознавания отсчетов [2], осуществляется сравнение с шаблоном отдельных цифр, а не всего числа целиком.

Это усовершенствование связано с тем, что присутствие геометрических искажений, вносимых объективом ПЗС-матрицы, ранее нередко приводило к ошибочному отождествлению числа, оказавшегося ближе к периферии кадра, с шаблоном, относящимся к другому числу. Такие искажения приводят, прежде всего, к тому, что расстояния между цифрами одного и того же градусного отсчета при разных положениях его относительно центра изображения оказываются в общем случае разными. Эти различия могут оказаться достаточно велики, чтобы привести к ошибочному отождествлению этого числа, если будет найден шаблон для какого-либо другого числа, расстояния между цифрами которого ближе к измеренным, а соответствующие цифры схожи — как, например, цифры 5 и 6 в начертании, примененном на лимбах ЗА–320.

Другая важная причина ошибок — это наличие ощутимого пиксельного шума, в результате которого изображения одной и той же цифры на разных кадрах могут несколько отличаться. В качестве иллюстрации можно привести различные варианты изображения цифры 1 после приведения к двоичному формату (см. рис. 6).



Рис. 6. Цифра “1” на разных изображениях.

Следует отметить, что влияние шума можно было бы существенно снизить, производя суммирование серии снятых последовательно изображений лимбов. Однако, это может привести к размазыванию в горизонтальном направлении изображения быстро движущегося лимба и к снижению точности временной локализации полученных отсчетов.

Наряду с геометрическими искажениями, пиксельный шум может вызвать путаницу в распознавании похожих цифр — в нашем случае это, чаще всего, цифры 5 и 6. Это приводит к тому, что схожесть внешних контуров и размера, например, цифры 6 в шаблоне для числа, отличающегося от распознаваемого только этой цифрой, с теми же характеристиками цифры 5, искаженной шумом, может оказаться достаточно сильной. В этом случае различия с цифрой 5 шаблона, обусловленные шумом, будут преобладать над различиями контуров и размера для цифры 6, что приведет к неверному отождествлению.

Все это позволяет сделать вывод о неприменимости метода простого, без разделения на цифры, сравнения с шаблоном при наличии заметных геометрических искажений.

Как мы отмечали выше, ошибок, связанных с отличиями в расстояниях между отдельными цифрами, вызванными геометрическими искажениями, можно избежать, прибегая к способу сравнения по отдельным цифрам. Но такой способ полностью не устраняет проблему второго типа — различия в изображении самих цифр, вызванные как геометрическими искажениями, так и пиксельным шумом. Поэтому мы использовали статистический подход, в котором отдельная цифра сравнивается не с одиночными шаблонами цифр от 0 до 9, а с сериями шаблонов, представляющих каждую цифру на разных участках лимба. Таким образом, в настоящем алгоритме каждая отдельная цифра отождествляемого числа поочередно сравнивается со всеми имеющимися шаблонами “0”, затем — со всеми шаблонами “1”, и т.д. до “9”, и вычисляется доля совпадений с каждой из этих серий шаблонов. Окончательно, выбирается та цифра, для которой эта доля оказалась наибольшей. Такой подход, как показывает опыт, полностью исключает влияние шумовых и геометрических искажений отдельных цифр.

Остановимся подробнее на методе сравнения двоичного изображения цифры с отдельным шаблоном. Прежде всего, изображение цифры и шаблон приводятся к одинаковому размеру уменьшением большего из этих двух изображений. Делается это для того, чтобы избежать дополнительных ошибок, связанных с несовпадением размеров в результате геометрических искажений. Также здесь реализована возможность пересчета изображения на другое разрешение (*resampling*). В нашем случае это не используется, т.к. не дает существенных улучшений, но возможно, что для других оптических систем это окажется полезным.

Также вводится критерий ширины: сравниваются только те цифры, для которых разность их ширины не превышает одну треть от ширины большей из цифр. Делается это для повышения быстродействия алгоритма, поскольку, например, цифра 1 по ширине почти в два раза меньше всех остальных и нет никакой необходимости сравнивать ее с другими.

Для сравнения используется следующий эвристический прием, направленный также на уменьшение влияния шума. Каждая цифра делится на 4 части (мозаикой), и эти части сравниваются между собой по отдельности. Сравнение происходит по всем пикселям: и черным (информационным), и белым (фоновым). Если общее количество совпадающих пикселей в одной из частей меньше 75%, то число совпадений по данному фрагменту обнуляется. Иными словами, при слишком большом попиксельном различии фрагментов считается, что “форма” цифр в этих фрагментах разная, и данный фрагмент можно полностью исключить из рассмотрения. Наоборот, если число совпа-

дений превышает 95%, оно устанавливается равным 100%, т.е. считается, что “форма” фрагментов одинаковая, и приоритет данного шаблона следует увеличить. Окончательно, подсчитывается общее число (в процентах) вычисленных таким образом совпадений по всем четырем фрагментам.

Таким образом, в результате последовательного отождествления описанным способом отдельных цифр (если их больше одной) получается искомое число, соответствующее целой части отсчета.

Определение дробной части отсчета (минуты и секунды)

Следующим этапом после отождествления числа градусов является определение минут и секунд, соответствующих дробной части отсчета. Для этого обрабатывается нижняя половина кадра, содержащая вертикальные штрихи. В случае лимбов, используемых на ЗА–320, штрихи нанесены парами с шагом 20', точному значению дробной части отсчета (0', 20', 40') отвечает середина соответствующей пары штрихов (рис. 7).

Прежде всего, путем сканирования изображения и выделения областей черных пикселей по горизонтали, определяется общее количество штрихов. Затем, как и в случае с числом, производится проверка на наличие пятен. Идея данной процедуры такая же, как в случае с цифрами (см. разд. 4.1), с тем исключением, что для штрихов средние характеристики ширины, высоты и расстояний между ними гораздо более стабильны, т.е. оценки максимальных отклонений от среднего и их эмпирические поправки достаточно малы. Еще одно отличие от алгоритма устранения пятен для цифр заключается в том, что здесь группы пикселей, не удовлетворяющих данным критериям, не удаляются при помощи заполнения соответствующих участков изображения белым цветом, а просто игнорируются. Если же оказывается, что некоторое пятно закрывает собой один или несколько штрихов, и если при этом хотя бы четвертая часть средней высоты штриха остается видимой, то штрих достраивается (см. рис. 7).

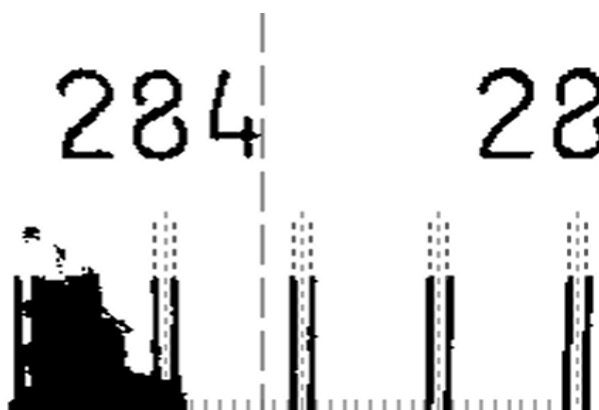


Рис.7. Пятна на штрихах. Пунктирными линиями обозначены отождествленные штрихи. Большая пунктирная линия обозначает центр кадра.

Поскольку штрихи на изображении расположены парами, прежде всего необходимо вычислить усредненные горизонтальные координаты их середин; “точная” пиксельная координата соответствующего отсчета тогда вычисляется как среднее арифметическое от координат пары штрихов. Координатой отдельного штриха считается усредненная по вертикали, вдоль всего штриха, X -координата центра тяжести, рассчитанного по всей ширине штриха, с некоторым отступом δ_x . При этом используются значения интенсивности, полученные из исходного изображения в градациях серого, а не двоичного (черно-белого) кадра:

$$X = \frac{\sum_{y=y_1}^{y_2} X_y}{y_2 - y_1 + 1},$$

где y_1 и y_2 — соответственно, нижняя и верхняя границы штриха, а X — координата центра тяжести для данного y :

$$X_y = \frac{\sum_{x=x_1-\delta_x}^{x_2+\delta_x} x \hat{J}_{xy}}{\sum_{x=x_1-\delta_x}^{x_2+\delta_x} \hat{J}_{xy}},$$

где x_1 и x_2 - левая и правая границы штриха, а \hat{J}_{xy} — значение смещенной интенсивности негатива исходного изображения $\hat{J}_{xy} = J_{xy} - \min_{x_1-\delta_x \leq x \leq x_2+\delta_x} J_{xy}$, причем $J_{xy} = 1 - I_{xy}$, $I_{xy} \in [0,1]$ — нормированная интенсивность пиксела с координатами (x,y) на исходном кадре.

Т.о. горизонтальная пиксельная координата любого из точных отсчетов ($0', 20', 40'$) на изображении вычисляется как среднее арифметическое величин X для соответствующей пары штрихов.

На рис. 8 продемонстрирована вычисленная таким способом середина для нескольких штрихов (пунктир). Видно, что приемлемый результат получается даже для штрихов, изображения которых подверглись геометрическим искажениям оптикой датчика положения телескопа.

В результате работы описанной выше процедуры получается набор пиксельных x -координат X_i , $i = 1, \dots, n$, соответствующих отсчетам лимба, кратным $20'$. Затем определяется номер k “опорного” отсчета, ближайшего слева к середине кадра, и ищется отсчет, ближайший к положению центра числа (он соответствует $0'$, т.е. целому градусу). Таким образом, определяется абсолютное значение опорного отсчета на лимбе α_0 и, тем самым, интервал $[\alpha_0, \alpha_0 + 20']$, в котором находится значение искомого отсчета лимба α , соответствующее абсолютному положению на лимбе середины кадра. При этом, по ориентировочному расстоянию (в пикселах) между последовательными парами штрихов, учитывается, что из-за наличия пятен часть $20'$ меток между этими двумя могла не отождествиться.

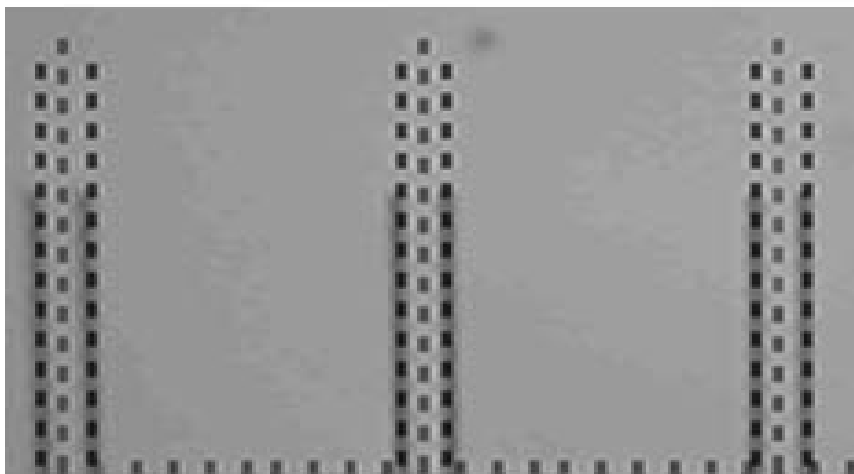


Рис. 8. Пример определения центра штриха. Пунктирными линиями обозначены центры тяжести для отдельных штрихов и результирующее среднее расстояние между ними.

Последним этапом алгоритма является вычисление положения середины кадра (в секундах дуги) внутри найденного интервала $[\alpha_0, \alpha_0 + 20']$. Данная задача осложняется тем, что, в результате геометрических искажений, горизонтальный угловой масштаб изображения $\frac{\partial\alpha}{\partial x}$ является неоднородным в пределах кадра, т.е. зависит от координаты x . Вследствие этого, расстояние в пикселах между последовательными $20'$ метками $\Delta X_i = X_{i+1} - X_i$, $i = 1, \dots, n-1$, оказывается переменным.

Для корректного учета неоднородности масштаба зависимость $\Delta X_i(X_i)$ интерполируется полиномом $\Delta X(x)$ степени $n-2$ (см. рис. 9). В предположении достаточно гладкой вариации углового масштаба в пределах кадра, данный полином можно считать аппроксимацией зависимости углового масштаба $\frac{\partial\alpha}{\partial x}$ от координаты x . Поскольку угловое расстояние между точками X_k и X_{k+1} составляет $20'$, окончательно получаем выражение для искомого отсчета лимба:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\int_{X_k}^{X_c} \Delta X(x) dx}{\int_{X_k}^{X_{k+1}} \Delta X(x) dx} 20',$$

где X_c — x -координата середины кадра.

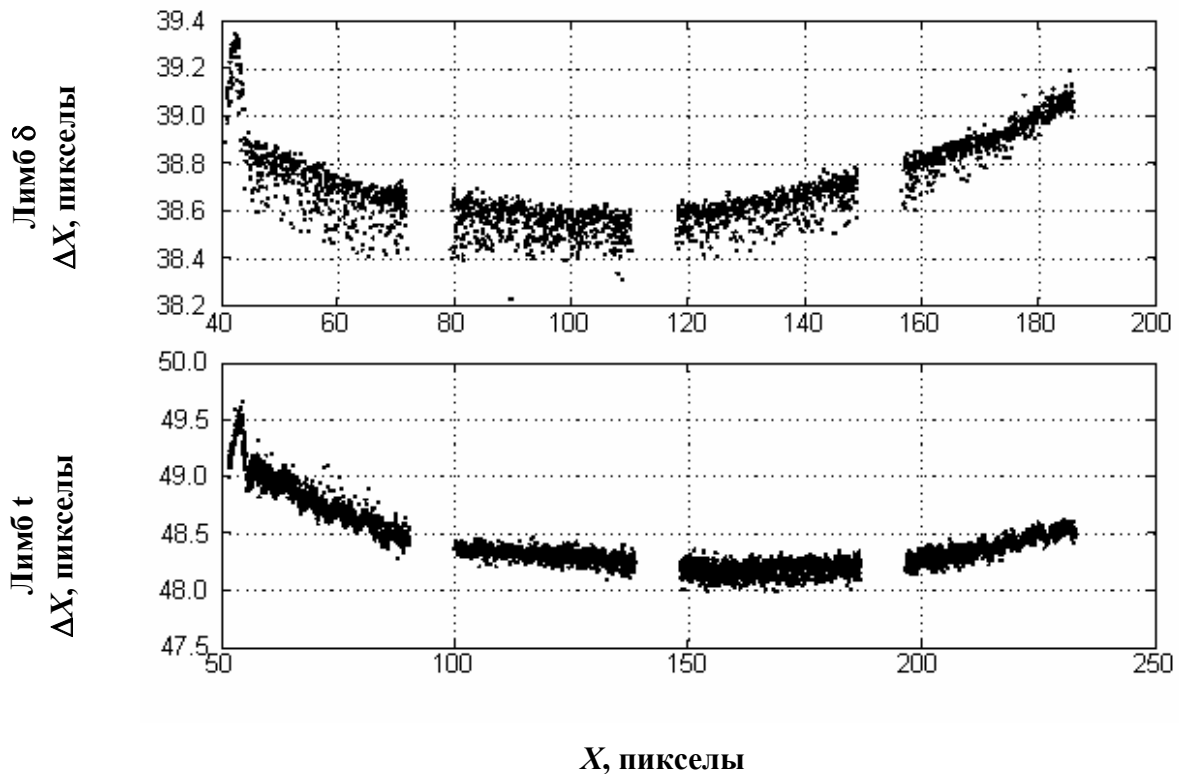


Рис.9. Неоднородность расстояний между штрихами для лимбов δ (сверху) и t (снизу) в пределах кадра (дисторсия). По горизонтальной оси отложена ширина кадра в пикселах, а по вертикальной – расстояние между каждой парой штрихов, также в пикселах.

Разумеется, при отсутствии заметных геометрических искажений изображения лимба данная процедура значительно упрощается. Поскольку график на рис. 9 в этом случае представляет собой горизонтальную прямую, что соответствует однородному масштабу, искомый отсчет лимба вычисляется как

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{X_c - X_k}{X_{k+1} - X_k} 20'.$$

Как показал опыт, применение данного алгоритма на ЗА–320 позволило снизить среднеквадратическую ошибку определения отсчета с 20" до примерно 5" .

Заключение

Подводя итоги данной работы, можно заключить, что в описанном алгоритме применяется принципиально новый подход для решения большинства задач получения отсчета лимбов — учета фона, определения дробной части отсчета, очищения от пятен и т.п. При этом, для задачи отождествления целой части отсчета подробно рассматриваются и учитываются ошибки предшествующих версий [1,2]. В результате, точность наведения трубы телескопа возросла приблизительно в 4 раза; ошибки в отождествлении чисел при работе нового алгоритма до сих пор не отмечены. За счет этого, а также за счет более эффективного метода работы с драйверами плат видеозахвата (см. разд. 2), заметно возросла скорость отождествления отсчетов с лимбов, а, следовательно, и скорость наведения на объект.

Литература

1. **Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Куприянов В.В., Корнилов Э.В.** Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА–320М., Изв.ГАО, 2002, №216, с.128–156.
2. **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 зеркальном астрографе ЗА–320М., Изв.ГАО, 2004, №217, с.505–530.

AUTOMATION OF ASTRONOMICAL OBSERVATIONS WITH THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320M. III. New Algorithm for Limbs Digitize

Vereshchagina I.A., Bekhteva A.S., Koupriyanov V.V.

Summary

In our paper, the principle of the new limb's digitization algorithm has been considered in detail. This algorithm is a part of the automation process of astronomical observations with the mirror astrograph ZA-320M. III. Different phases of limb's images processing such as signal and noise resolving and stains cleaning have been instantiated. Results of reprocessing methods for limbs digitize have been shown. The new algorithm is more accurate and fast than the previous one.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ПУЛКОВСКОЙ МНОГОХОДОВОЙ ВАКУУМНОЙ КЮВЕТЕ ВКМ-100 С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ СЕНСОРОВ ВЛАЖНОСТИ

**Галкин В.Д.¹, Ниберт Т.², Никанорова И.Н.¹, Сальников И.Б.¹, Ляйтерер У.²,
Алексеева Г.А.¹, Новиков В.В.¹, Даусс Д.²**

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

²Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg

При спектральных исследованиях водяного пара в лабораторных условиях (определение молекулярных констант, измерение спектральных функций пропускания), одной из важнейших характеристик, которая должна быть точно определена, является количество водяного пара в момент измерений. В статье обсуждается применение для этой цели в кювете ВКМ-100 полимерных сенсоров влажности, изготавливаемых ОАО "Практик - НЦ" (Москва). Эти сенсоры были исследованы в лаборатории Метеорологической обсерватории г. Линденберга (Германия) путем сравнения их показаний с эталонными средствами измерения при различных значениях относительной влажности, давления и температуры. Также были выполнены измерения относительной влажности в боксах с солевыми растворами, гарантирующими соответствующую данному солевому раствору относительную влажность с точностью несколько десятых процента. Анализ результатов лабораторного исследования сенсоров и обширных рядов измерений, выполненных в кювете, позволил заключить, что при измерениях в диапазоне относительной влажности 40-80% достигается точность измерения содержания водяного пара ~5%. Намечены дальнейшие пути увеличения точности измерения и расширения диапазона относительной влажности, в котором могут быть выполнены точные измерения.

Введение

Солнечный и звездный фотометры, которые используются для изучения оптических характеристик атмосферы, могут быть использованы также для измерения содержания водяного пара в атмосфере. В этом случае один из фильтров фотометра должен быть центрирован на полосу поглощения водяного пара. При наблюдении в полосе воды величина фотометрического отсчета будет зависеть не только от оптических характеристик атмосферы в данной длине волны, но и от количества водяного пара на луче зрения. Методика наблюдений и обработки данных, [1,2], позволяет выделить ту часть ослабления сигнала, которая связана с поглощением водяным паром. Если имеется соответствующая калибровочная зависимость величины поглощения от количества водяного пара на луче зрения, то количество последнего в атмосфере может быть получено из наблюдений. В настоящее время наиболее точным способом получения такой калибровочной зависимости является прямая калибровка фотометрических данных, полученных в лабораторных условиях, в зависимости от числа поглощающих молекул на луче зрения. Для этой цели в Пулкове используется специальный лабораторный комплекс, описанный ранее, [3]. Кювета с многократным прохождением света позволяет изменять число поглощающих молекул на луче зрения в известное число раз за счет изменения числа прохождений света в кювете. В используемом в настоящее время варианте зеркал в кювете ВКМ-100 длина пути может изменяться от 100 м до 4100 м, т.е. число поглощающих молекул на луче зрения может быть изменено в 41 раз. Однако, число поглощающих молекул, приходящихся на одно прохождение, остается неизвестным. Если мы хотим, чтобы калибровка обеспечивала точность определения содержа-

ния водяного пара с помощью фотометра в натуральных условиях 1-2%, мы должны обеспечить, по крайней мере, не меньшую точность определения содержания водяного пара в кювете во время калибровки фотометра. Это метрологически не простая задача. В настоящее время мы не располагаем возможностью установить в кювете эталонные средства измерения влажности. Поэтому было решено использовать полимерные сенсоры относительной влажности, которые выпускаются промышленностью для технических целей, и провести их исследование и калибровку в лабораторных условиях самостоятельно. Поскольку сенсор дает локальную информацию о влажности, несколько сенсоров было размещено вдоль кюветы, и их показания были сопоставлены и проанализированы при различных условиях наблюдений. Используемые нами сенсоры были исследованы в лаборатории РТУ (давление, температура, влажность) Метеорологической обсерватории г. Линденберга (Германия). Это обстоятельство имело особое значение, т.к. позволило не только исследовать сенсоры, но и непосредственно сравнить шкалы влажности Пулковских сенсоров со шкалой, по которой калибруются сенсоры для радиозондирования атмосферы. В настоящей работе приведены результаты лабораторных испытаний сенсоров и проанализированы измерения, выполненные с ними в кювете.

Измеритель влажности и температуры

Прибор для измерения влажности и температуры ИВТМ-7 МК-С, используемый нами и изготавливаемый ОАО "Практик-НЦ", Москва, предназначен для непрерывного измерения температуры и влажности в различных технологических процессах промышленности, энергетики, медицины и сельского хозяйства. Прибор состоит из первичного преобразователя относительной влажности и температуры ИПВТ-03-07 (датчика) и блока управления, [4].

Основные характеристики прибора: диапазон измерения влажности - 2-98%, погрешность измерений относительной влажности 2% (во всем диапазоне измерения), дополнительная погрешность от изменения температуры окружающего воздуха - 0.2% на 1 градус. Погрешность измерения температуры в диапазоне от 0 до 40°C составляет 0.5°.

Преобразователь ИПВТ-03-06 выполнен по схеме RC-генератора на таймере типа 555. В качестве R-элемента в канале температуры используется платиновый терморезистор, а в качестве C-элемента канала влажности используется емкостный сенсор влажности. Преобразователь состоит из алюминиевого корпуса, в котором расположена схема преобразования сигнала от сенсоров влажности и температуры, и металлического щупа, на конце которого в измерительной головке расположены сенсоры влажности и температуры.

Подключение датчиков к таймеру производится с помощью электронного коммутатора. Кроме измерительных элементов коммутатор производит подключение к таймеру образцовых RC-элементов (в качестве образцовых элементов применяются термостабильные резисторы и конденсаторы). Применение подобной измерительной схемы позволяет производить автокомпенсацию преобразователя при изменении температуры окружающей среды.

Управление коммутатором, подсчет частоты с таймера, вычисление температуры и влажности осуществляется логическим блоком преобразователя, выполненным на базе PIC-контроллера. По программе, заложенной в микроконтроллере, осуществляется измерение частоты от сенсоров, образцовых элементов и вычисление значений температуры и влажности по индивидуальным калибровкам, находящимся в памяти вычислительного устройства преобразователя. Вычисленные значения параметров влажности и температуры в последовательном цифровом коде поступают на выходное устройство преобразователя. Выходное устройство необходимо для передачи данных об измерен-

ных значениях в прибор. Передача данных осуществляется по полудуплексному каналу дифференциальным методом. Применение данного способа передачи позволяет преобразователю работать на длинных линиях при большом уровне электромагнитных помех. Расстояние, на котором устойчиво работает преобразователь, составляет не менее 300 метров.

Блок управления выполнен в виде микропроцессорной системы на основе микроконтроллера Intel MCS-51 и является микро-ЭВМ. Он предназначен для работы с преобразователем влажности и температуры типа ИПТВ-03 и его модификациями. Работа блока управления определяется программой, записанной в постоянное запоминающее устройство. Внутренние переменные, а также константы калибровки и другие оперативные параметры, хранятся во FLASH-памяти, которая является энергонезависимой и сохраняет информацию при отключенном питании в течение всего срока службы прибора.

Расположение датчиков ИПТВ-03-06 в кювете

В настоящее время измерительный комплекс состоит из кюветы ВКМ-100, источника света, солнечного фотометра, предоставленного нам Метеорологической обсерваторией г. Линденберга и 4^х датчиков ИПТВ-03-06 (№№ 65132, 1229, 1230, 1087). Общий вид измерительного комплекса представлен на **рис. 1**. Схема размещения датчиков в кювете приведена на **рис. 2а**. Датчики подключены к кювете через специальные переходные фланцы и соединены с блоком управления кабелем, длина которого составила соответственно для первого датчика 5 м, для второго 20 м, для третьего 60 м и для четвертого 100 м. Кабели от датчиков подключаются к блоку управления через пакетный переключатель. Опрос датчиков осуществляется последовательно пакетным переключателем. Для каждого датчика регистрировались данные о температуре (t), относительной влажности $H(\%)$ и абсолютной влажности $a(\text{г}/\text{м}^3)$. Среднее значение для четырех датчиков характеризует содержание водяного пара в кювете при данном давлении, а дисперсия индивидуальных показаний сенсоров дает ошибку измерения. Обычная серия измерений для калибровки фотометров начиналась при атмосферном давлении, когда в кювете могут быть установлены датчики и при необходимости добавлена жидкая вода для повышения влажности. Затем последовательно путем откачки воздуха устанавливалось требуемое давление, при котором производились измерения с фотометром, и измерялась относительная и абсолютная влажность. Результаты измерения относительной влажности в зависимости от давления для одной из серий показаны на **рис. 2б**.

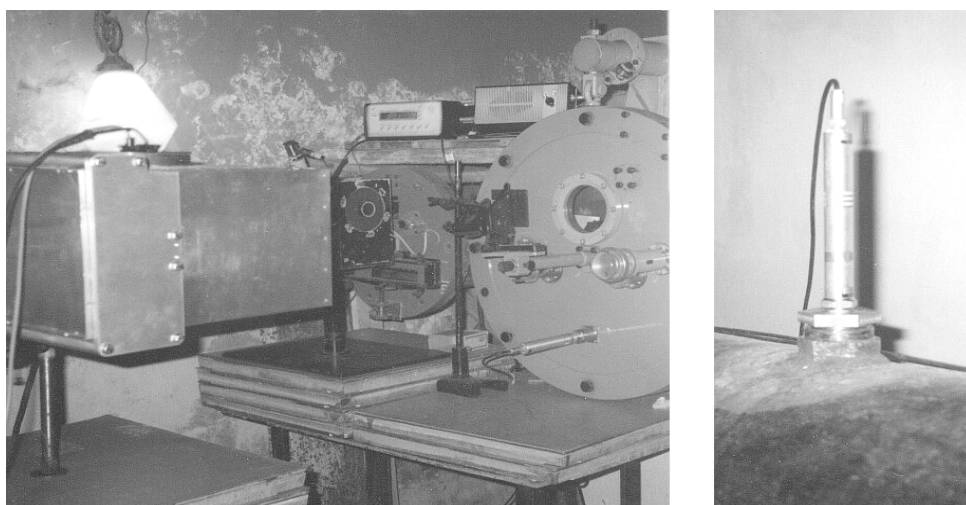


Рис. 1. Общий вид измерительного комплекса (солнечный фотометр, блок управления с коммутатором, датчики ИПТВ-03-06 на входе и на расстоянии 60 м в кювете ВКМ-100).

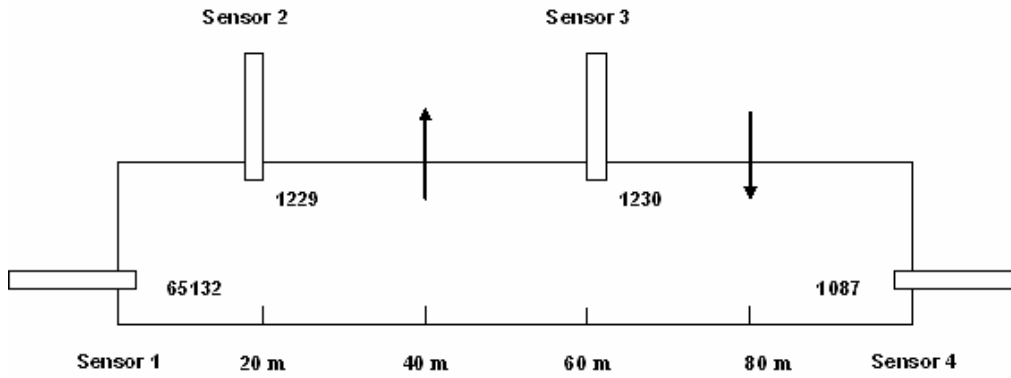


Рис. 2а. Расположение датчиков в кювете ВКМ-100.

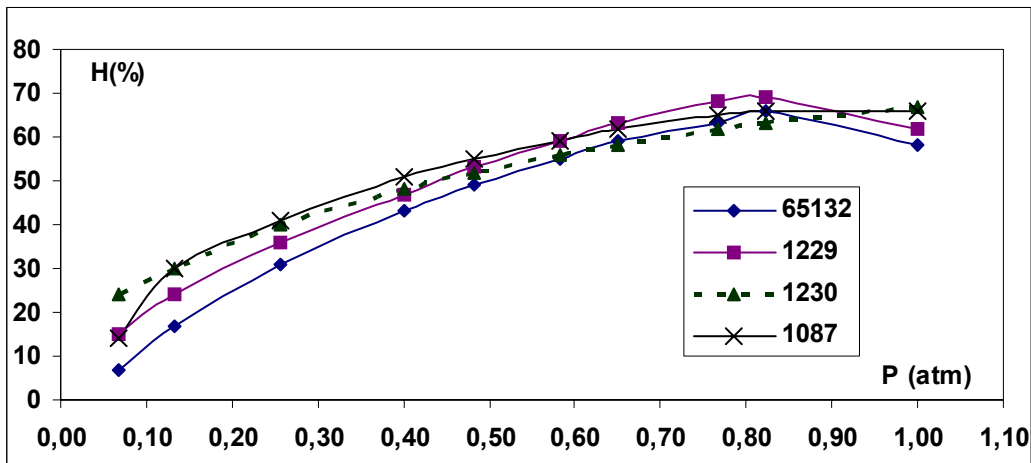


Рис.2 б. Относительная влажность $H(\%)$, измеренная четырьмя сенсорами, в зависимости от давления в кювете.

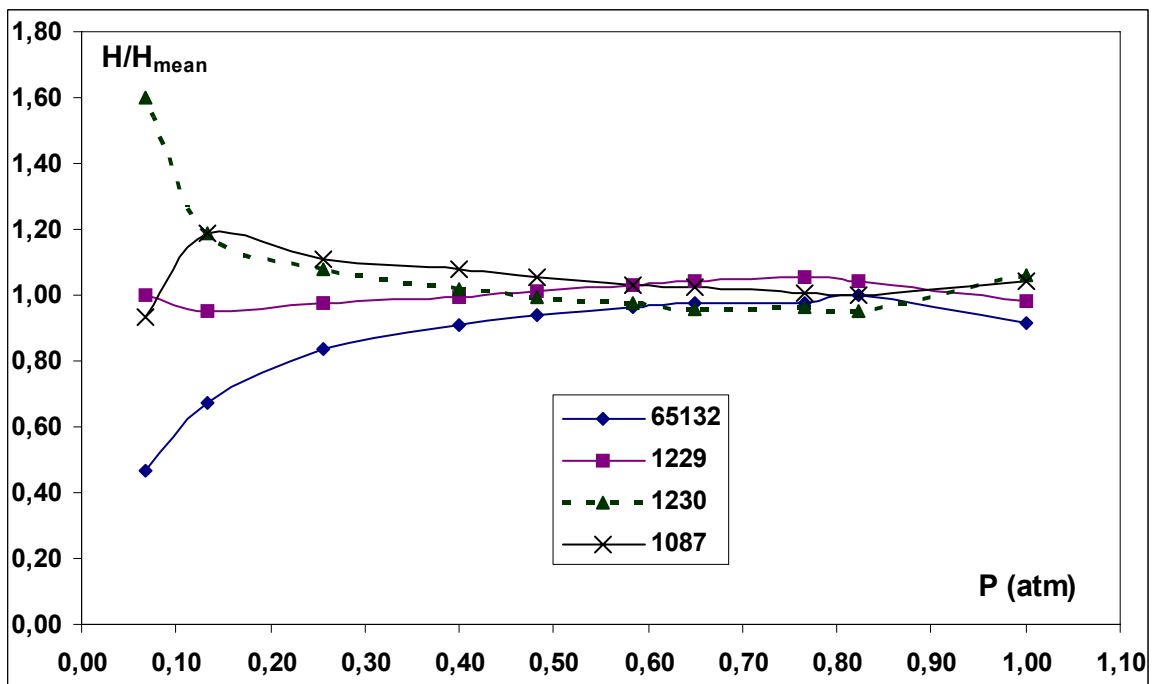


Рис. 3. Влажность $H(\%)$ относительно среднего значения $H(\%)$ для данного давления.

На этом рисунке можно проследить, как меняется относительная влажность с изменением давления, а также насколько согласованно меняются показания отдельных сенсоров. На **рис. 3** эти же данные представлены в виде отношения измеренного значения относительной влажности к среднему из измерений четырех сенсоров при данном давлении для того, чтобы нагляднее судить о степени отклонения отдельных измерений от среднего.

Как следует из **рис. 2-3**, сходимость отдельных измерений заметно ухудшается при уменьшении давления и, соответственно, уменьшении относительной влажности.

Чтобы проиллюстрировать изменение показаний сенсоров в зависимости от местоположения в кювете, на **рис. 4** представлены данные показаний индивидуальных сенсоров относительно средних значений в зависимости от положения сенсора в кювете.

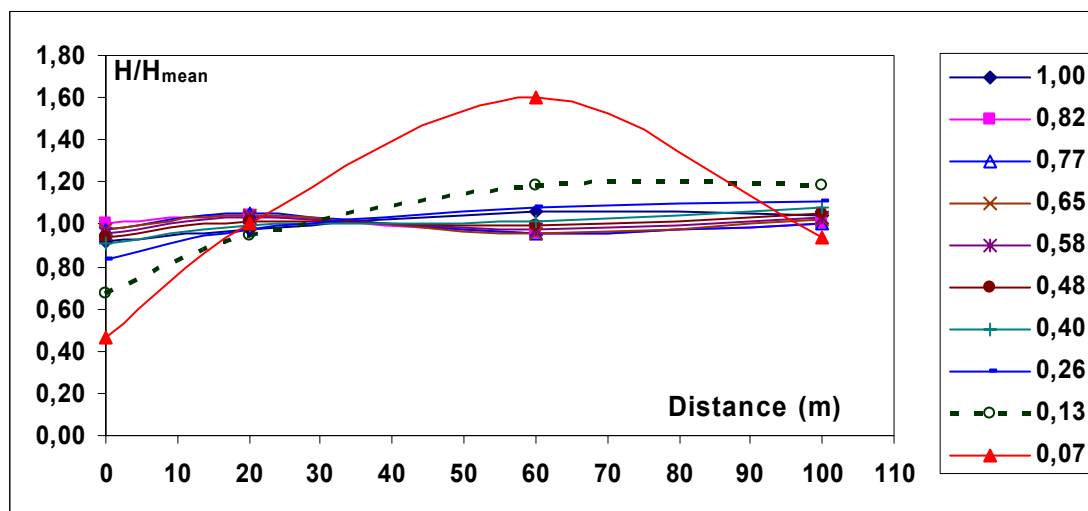


Рис.4. Распределение $H(\%)$ в кювете относительно средних значений для разных давлений.

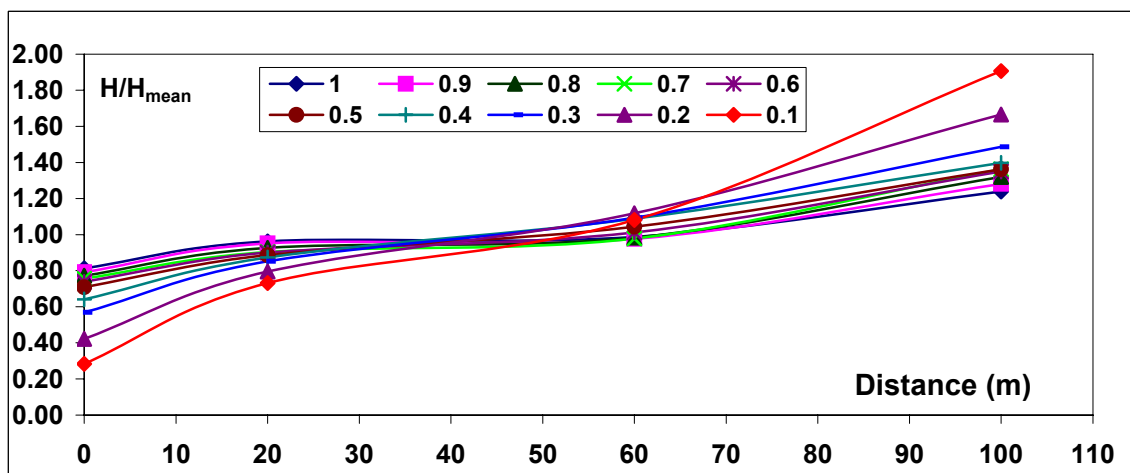


Рис.5. Распределение $H(\%)$ относительно среднего значения при различных давлениях в случае наличия температурного градиента вдоль кюветы.

Из **рис. 3** и **4** видно, что результаты измерений для разных сенсоров достаточно хорошо совпадают (среднее квадратичное отклонение $\sim 5\%$) вплоть до давления 0.4 атм., а затем ошибка быстро возрастает с уменьшением давления. На примере **рис. 2-4** рассмотрен случай наблюдений в кювете в условиях лета, когда отключено отопление,

и мы имеем однородное распределение температуры и влажности в кювете. Подобным же образом были проанализированы другие случаи, в том числе и такие, когда в кювете устанавливается температурный градиент различной величины (вплоть до 15°C), и в кювету для повышения влажности добавляется жидкая вода.

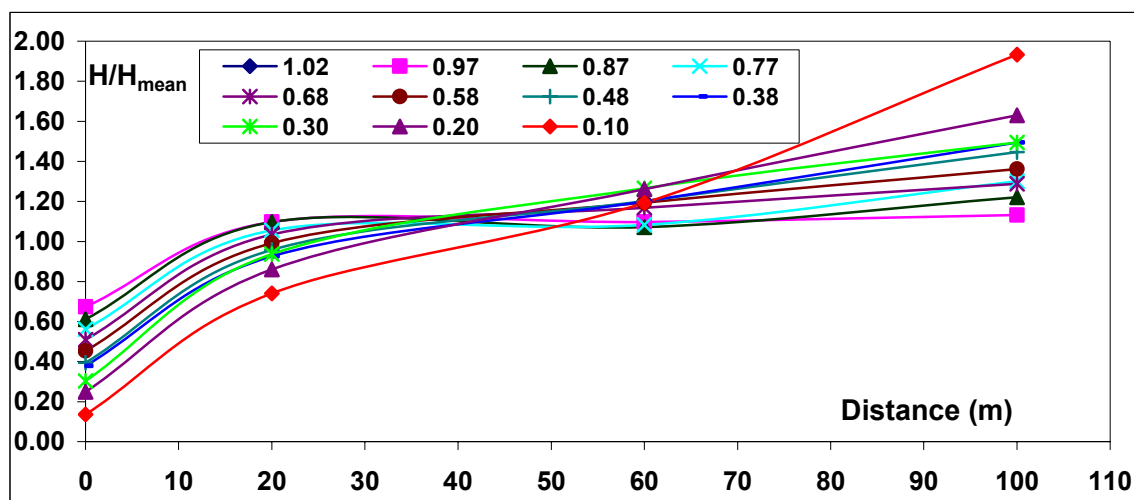


Рис. 6. Распределение $H(\%)$ относительно среднего значения при различных давлениях в случае наличия температурного градиента и добавки жидкой воды в кювету.

На рис. 5 приведены данные для случая температурного градиента в кювете, а на рис. 6 отражена ситуация, когда в кювету добавлена жидкая вода. Добавление жидкой воды существенно меняет распределение влажности в кювете, однако установившееся распределение сохраняется при различных давлениях до значения 0,4 атм (пока влажность не упадет ниже 30-40%). Согласно данным, приведенным на рисунках 4-6, при относительной влажности выше 40% и однородном распределении температуры внутри кюветы распределение влажности в кювете по отношению к среднему ее значению сохраняется на уровне 3%, в случае наличия градиента температуры - 5% и при добавлении в кювету жидкой воды - 9%. По аналогичной схеме были рассмотрены все данные по измерению абсолютной влажности.

Исследование Пулковских датчиков

в лаборатории Метеорологической обсерватории г. Линденберга (Германия)

Чтобы провести независимую экспертизу датчиков, оценить ошибки измерений, стабильность работы, индивидуальные различия, сравнить шкалы влажности, нами была выполнена калибровка датчиков в лаборатории Метеорологической обсерватории Линденберга (Германия), которая располагает возможностями создания различных условий влажности, температуры и давления в замкнутых объемах (солевых боксах и барокамере) и различными средствами измерения и контроля характеристик этих условий.

В 2004 году были проведены пробные испытания датчиков с целью выяснения принципиальной возможности их использования для измерения влажности в кювете.

В 2005 и 2006 годах проведены более детальные, хотя и кратковременные, серии сравнения измерений, выполненных в Линденберге с Пулковскими датчиками и с эталонными средствами измерения. Были выполнены следующие измерения: измерения в боксах над солевыми растворами, в которых обеспечивается точность воспроизведения относительной влажности в несколько десятых процента, [5]; измерение влажности в барокамере при фиксированном давлении (200 hPa, 400 hPa, 600 hPa, 800 hPa и 1000 hPa). 33

В 2006 году такая процедура была выполнена для всех Пулковских датчиков (№№ 65132, 1229, 1230 и 1087) при температурах 10°C и 20°C (в 2005 году измерения были проведены для всех датчиков при температуре 10°C и выборочно для температуры 20°C). Измерения при всех условиях выполнялись нашими датчиками и эталонными средствами измерения - конденсационным гигрометром "ТОРОС", изготовленным фирмой "КОМЕТ" (Москва) и сенсорами "Vaisala" (изготовитель-Финляндия). Обработка измерений, выполненных с сенсорами "Vaisala" методом стандартизации частоты, специально разработанным в Линденберге ("FN-методика"), [6], гарантирует точность 1% во всем диапазоне измерения относительной влажности от 0 до 100%, т.е. такую же, как и конденсационный гигрометр "ТОРОС". Поэтому все измерения с Пулковскими датчиками рассматривались относительно показаний измерительных средств FN, "ТОРОС" и солевых растворов как стандартных средств измерения.

Приведем некоторые результаты, характеризующие свойства наших датчиков. На **рис. 7 а** приведен пример рабочей серии калибровочных измерений в барокамере, выполненных 11.07.2006 в Линденберге. В верхней части рисунка показаны измерения температуры с помощью сенсора "Vaisala" по FN-методике, гигрометра "ТОРОС" и Пулковского датчика, проводимые в течение 6 минут, а в нижней части - измерения относительной влажности этими же датчиками. На **рис. 7 б** приведены данные измерений для всех датчиков, полученные в различных условиях (над соевыми растворами, в барокамере при различных температурах и давлениях), относительно идеальных характеристик среды (рассчитанная влажность для солевых растворов, данные для барокамеры по измерениям эталонного прибора "ТОРОС").

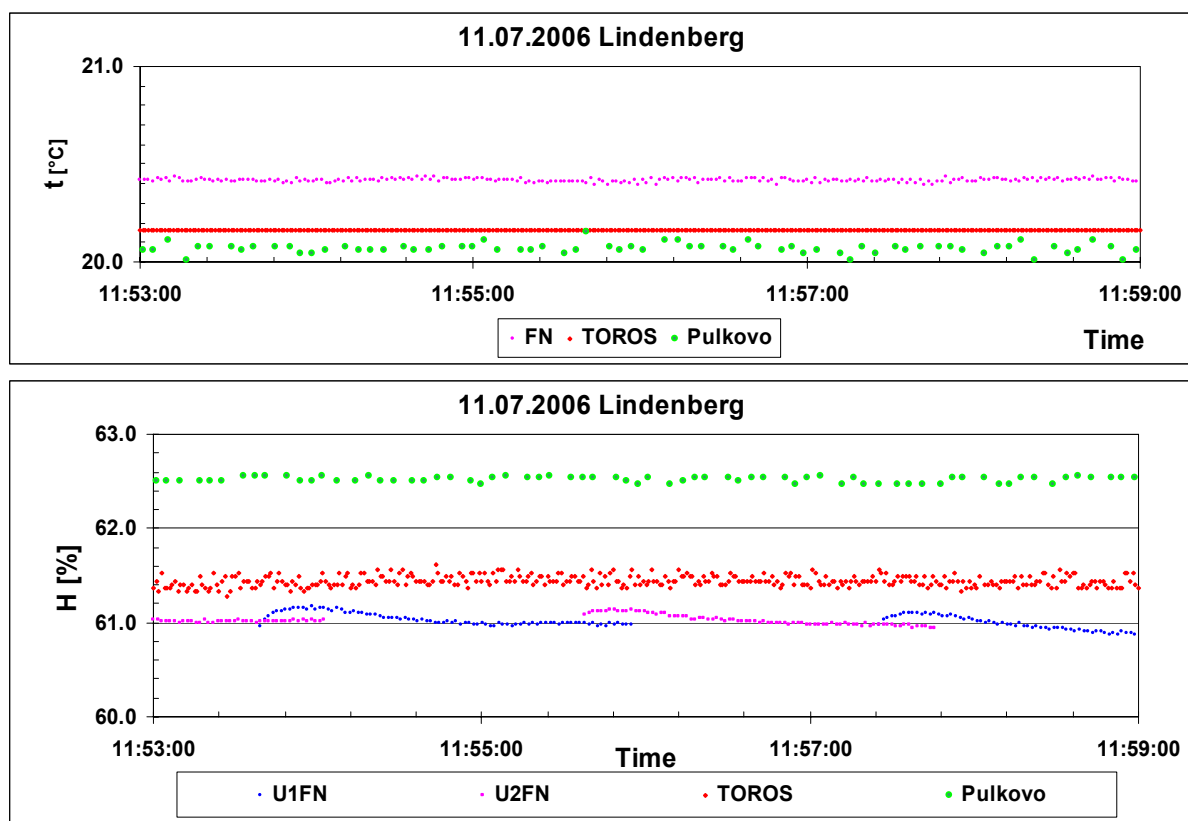


Рис. 7 а. Пример серии калибровочных измерений, выполненных в Линденберге (фрагмент).

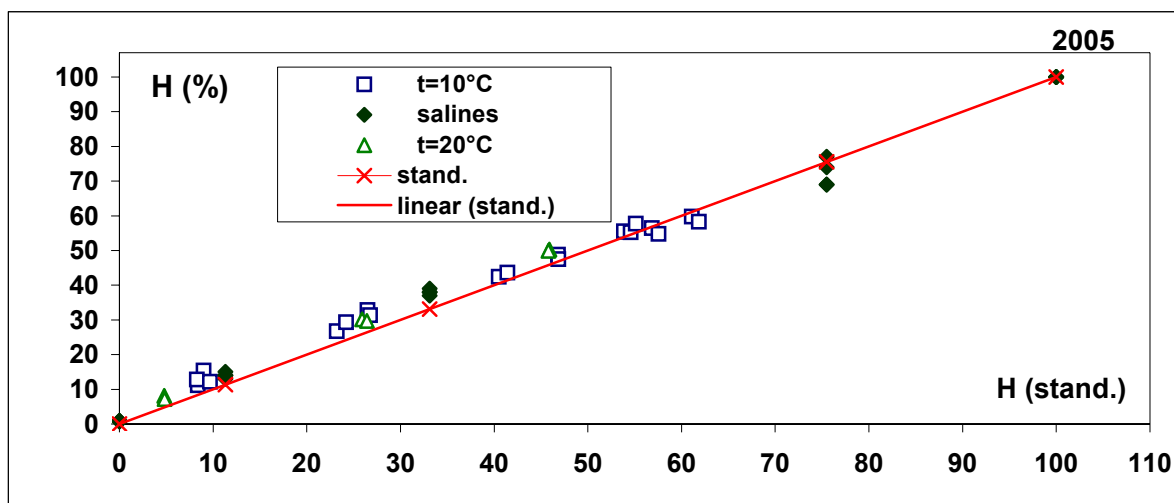


Рис. 7 б. Относительная влажность $H(\%)$, измеренная над солевыми растворами и в барокамере при различных давлениях и температурах по сравнению с данными эталонного гигрометра “ТОРОС” и табличными значениями для солевых растворов.

Из **рис. 7 б** видно, что данные, полученные с помощью наших датчиков в солевых растворах при 20°C и атмосферном давлении и в барокамере при различных температурах и давлениях, не противоречат друг другу и могут быть аппроксимированы одной кривой. Это позволяет предположить, что показания сенсоров не зависят от давления и температуры.

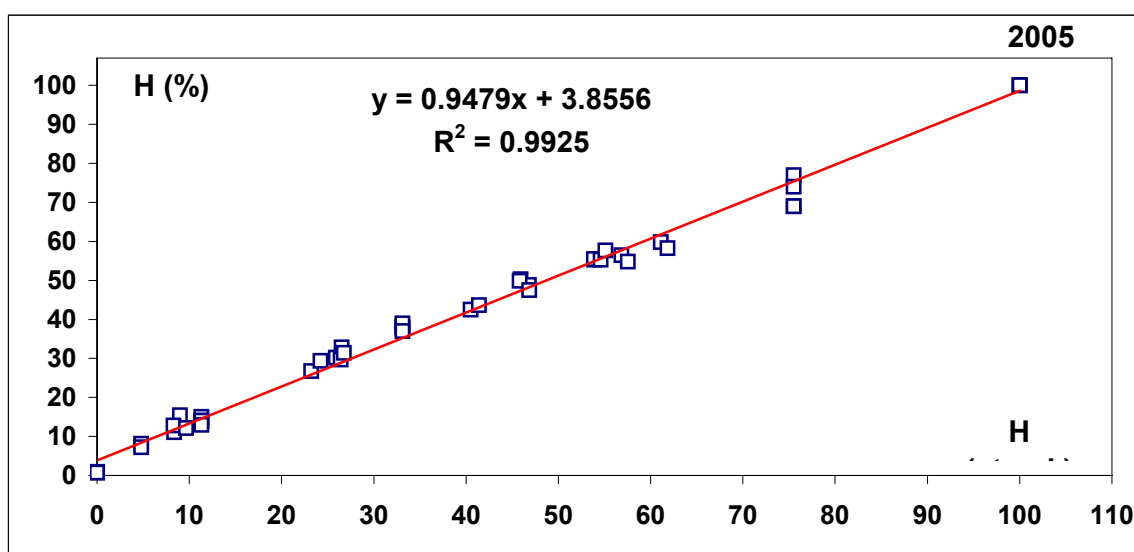


Рис.7 с. Линейная аппроксимация всех данных для всех сенсоров по измерениям 2005 г.

На **рис. 7 с** показана аппроксимация всех измерений 2005 года линейной зависимостью, а на **рис. 8** показано сравнение линейных аппроксимаций 2005 и 2006 годов. Согласие аппроксимаций 2005 и 2006 годов находится в пределах 2%, что свидетельствует о стабильности измерительных характеристик сенсоров. Однако погрешность измерения относительной влажности 2% по всей шкале влажности, заявленная изготовителем в паспорте датчика, говорит о том, что измерение абсолютной влажности при низких значениях относительной влажности может иметь большую относительную ошибку.

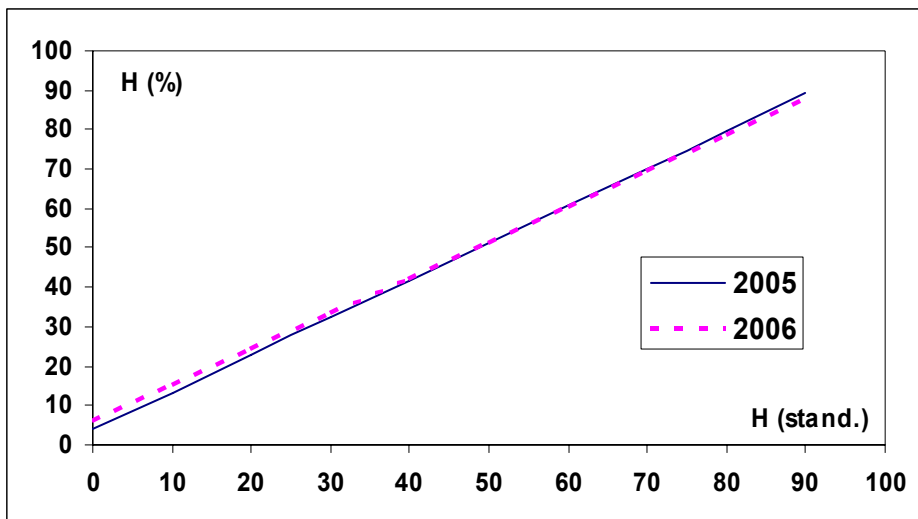


Рис.8. Линейные аппроксимации данных по всем сенсорам для 2005 и 2006 года.

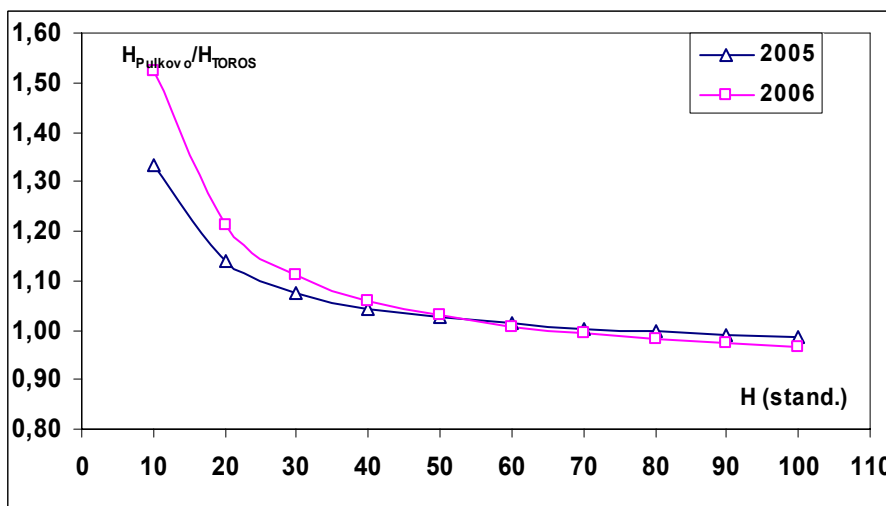


Рис. 9. Отношение Пулковской шкалы влажности к стандартной.

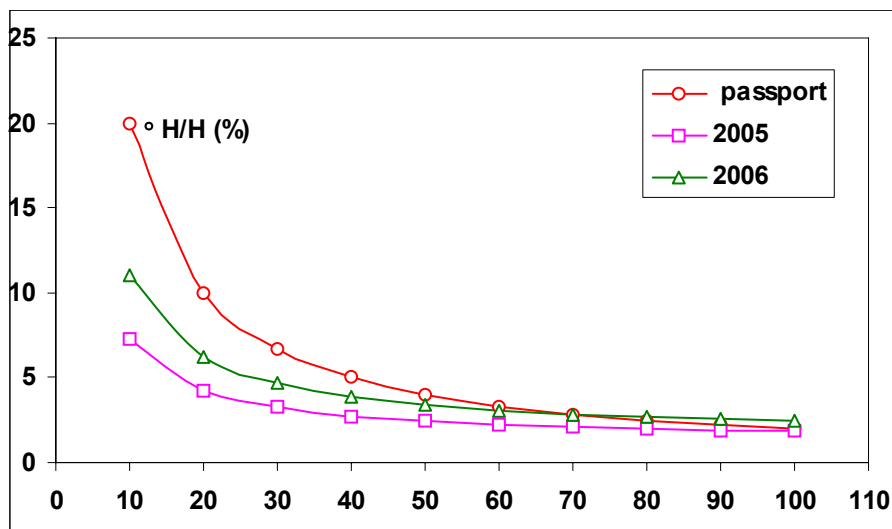


Рис.10. Сравнение паспортной ошибки определения относительной влажности с ошибками, полученными из калибровок 2005 и 2006 годов.

На **рис. 9** показано отношение относительной влажности $H(\%)$, вычисленное на основании аппроксимаций, характеризующих Пулковские сенсоры, к стандартной относительной влажности, т.е. влажности, какой она должна быть по измерениям стандартных приборов. На **рис. 10** на основе ошибок коэффициентов аппроксимаций (см. **рис.8**) получены относительные ошибки значений $H(\%)$ (для 2005 и 2006 гг.). На этом же рисунке приведена относительная ошибка $H(\%)$, вычисленная согласно паспортной погрешности измерения $H(\%)$ в 2% по всей шкале влажности. На основании **рис. 9** и **10** можно видеть, что для низких значений относительной влажности возрастает как относительная так и систематическая ошибка определения влажности, т.е. появляется систематическое отклонение измеренных значений влажности от стандартных. Это означает, что измерения, выполненные при низких значениях относительной влажности, могут быть отягчены значительными индивидуальными ошибками. Действительно, как мы видим на **рис. 3**, измерения, выполненные при низких давлениях (что соответствует малым значениям относительной влажности), показывают значительные отклонения индивидуальных измерений от средних значений. Таким образом, можно заключить, что измерения при малых значениях относительной влажности не целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо гарантировать высокую точность определения содержания водяного пара в кювете.

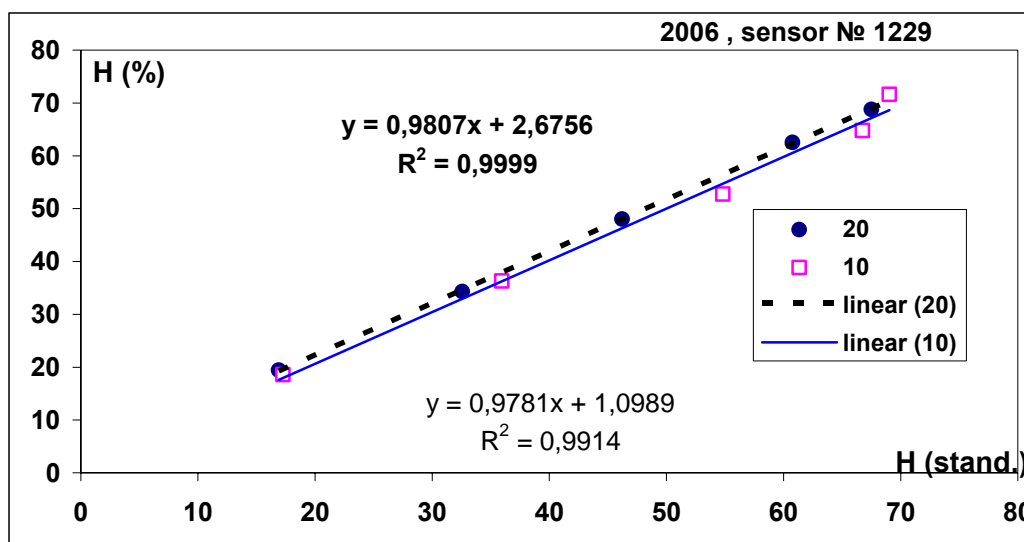


Рис. 11. Сравнение данных, полученных для двух значений температуры.

По измерениям 2006 года, ввиду большего объема однородных данных, была предпринята попытка более детального рассмотрения индивидуальных характеристик сенсоров и изучения возможности уменьшения ошибки измерения за счет индивидуальной калибровки сенсоров. На **рис. 11** показаны результаты сравнения показаний датчика №1229 для двух температур (10° и 20°C) со стандартными значениями. На рисунке видно, хотя и небольшое, в пределах ошибок, но отчетливое различие аппроксимаций измерений для этих температур. Подобное различие калибровок для двух температур можно отметить и для других датчиков. Учитывая, что температурные различия находятся в пределах ошибок, индивидуальные соотношения перехода от показаний Пулковских сенсоров к стандартным значениям для каждого сенсора были получены по всей совокупности данных для данного сенсора. На основе полученных соотношений были скорректированы измерения, выполненные в кювете. К сожалению, коррекция не привела к существенному улучшению сходимости измеренных значений относительной влажности. Ситуация стала понятной после вычисления индивидуальных

для каждого сенсора ошибок коррекции (**рис. 12**). Мы видим, что ошибка коррекции не меньше ошибки измерения, что не позволяет получить заметного выигрыша от коррекции. Следует заметить, что задача коррекции измерений с помощью индивидуальной калибровки каждого сенсора не выглядит бесполезной. Фактически она сводится к тому, чтобы обеспечить калибровку каждого сенсора с ошибкой меньше ошибки измерения, т.е. выполнять достаточное число измерений для получения калибровочной кривой.

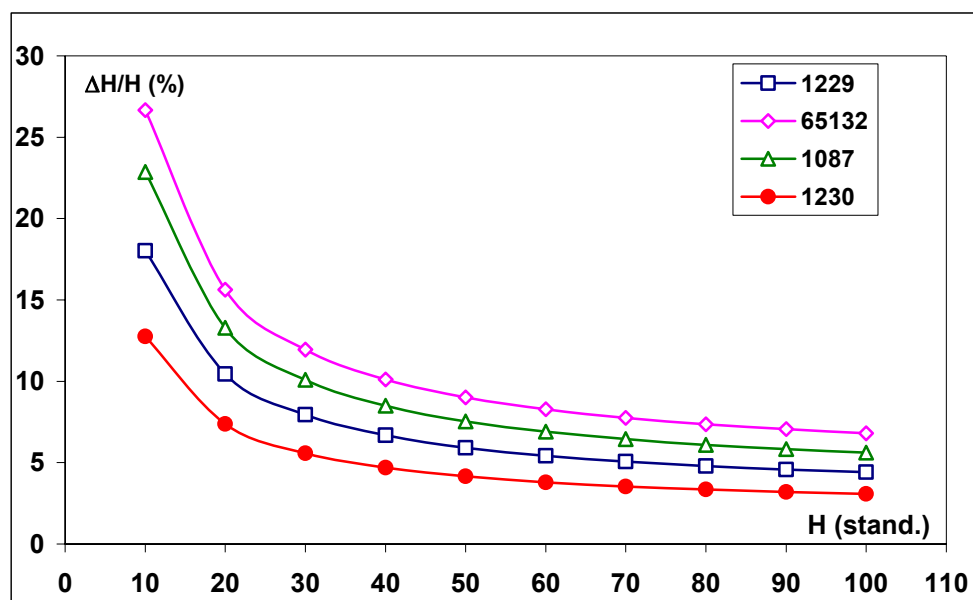


Рис. 12. Ошибка определения H(%) (ошибка коррекции), вычисленная на основе сравнения значений H(%), полученных данным сенсором и гигрометром "ТОРОС".

Заключение

Измерения влажности, выполненные в кювете в 2004-2006 годах с помощью датчиков ИПВТ-03-06, а также их исследование, проведенное в лаборатории РТУ в Линденберге, позволяют заключить следующее:

- сенсоры такого типа могут быть использованы для измерения и контроля влажности в кювете;
- сенсоры не показывают зависимости от давления;
- сенсоры показали стабильность результатов измерения в течение периода времени использования - 2004-2006 гг.
- индивидуальные калибровки сенсоров показали, что в пределах паспортной точности они показывают различную ошибку измерений, и среди исследованных сенсоров наилучшими оказались №1229 и 1230;
- все сенсоры обнаружили слабую температурную зависимость при переходе от 10°C к 20°C, причем при 20°C показали меньшую ошибку измерения;
- использование индивидуальных калибровок сенсоров для коррекции измерений, выполненных индивидуальными сенсорами, не дало ожидаемого эффекта. Однако это объясняется ограниченным объемом измерений для индивидуальных калибровок, и в дальнейшем представляется целесообразным использовать подобную коррекцию на основе более тщательно выполненных калибровок;
- анализ индивидуальных калибровок и ошибок позволил выделить интервал значений относительной влажности, в котором может быть достигнута оптимальная точность определения содержания водяного пара в кювете (H = 40-80%).

Проведенное исследование датчиков позволяет гарантировать определение абсолютной влажности в кювете в интервале значений относительной влажности 40-80% с ошибкой порядка 5% в случае постоянной температуры вдоль кюветы и от 5 до 10% при наличии температурного градиента и неоднородного распределения вдоль кюветы, вызванного добавлением жидкой воды. Несомненно, более детальная индивидуальная калибровка датчиков позволит корректировать данные измерений и повысить точность определения содержания водяного пара в кювете.

Литература

1. *Leiterer U. et al.* Contr. to Atmosh. Phys., 1998, 71/4, pp.401-420.
2. *Alekseeva G.A. et al.* International Conference ENVIROMIS 2000, Proceeding, ed. by E. Gordov, 2001, pp.38-42, Tomsk, (Environmental Observations, Modeling and Information Systems as Tools for Urban/Regional Pollution Rehabilitation, Tomsk, Russia, 24-28 October 2000).
3. *Галкин В.Д. и др.* Изв. ГАО в Пулково, 2004, № 217, с.472-484.
4. *Паспорт и инструкция по эксплуатации измерителя влажности и температуры ИВТМ-7.* ТФАП2.844.009. Москва, АООТ "Практик-НЦ".
5. *L. Greenspan.* Journal of Research by the National Bureau of Standards, 1977, 81A, pp.89-96.
6. *Leiterer U. et al.* Contr. Atmosph. Phys.1997, 70, pp.319-336.

ESTIMATION OF WATER VAPOR CONTENTS AT PULKOVO MULTIPASS VACUUM CELL (VKM-100) BY USE OF POLYMERIC HUMIDITY SENSORS

Galkin V.D.¹, Naebert T.², Nikanorova I.N.¹, Sal'nikov I.B.¹, Leiterer U.²,
Alekseeva G.A.¹, Novikov V.V.¹, Dauss D.²

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences

²Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, Germany

Summary

Real-time water vapor content is one of the most important parameter during spectral laboratory water vapor investigations for the determinations of molecular constants and spectral transmission functions. The value of this content must be measured most precisely. This paper discusses the use of polymeric humidity sensors (made by JSC Practic-NC, Moscow, Zelenograd) at Pulkovo multipass vacuum cell VKM-100. These sensors were explored at Meteorological Observatory Lindenberg (Germany) by means of comparison with standard tools for different relative humidity, pressure and temperature. Relative humidity measurements in the boxes with salt solutions were also obtained. In this case the accuracy of equilibrium relative humidity values for selected aqueous salt solutions may be guaranteed in the range 0.1-0.3%. The analysis of sensors laboratory investigations and large sets of cells measurements showed that an accuracy ~5% can be reached for water vapor content measurements at the relative humidity range 40-80%. Ways and means for an improvement of measurement accuracy and the extension of the relative humidity range are proposed.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА И ЛУНЫ

**Галкин В.Д.¹, Сальников И.Б.¹, Новиков В.В.¹, Ляйтерер У.², Алексеева Г.А.¹, Ни-
берт. Т.², Никанорова И.Н.¹**

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

²Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg

С целью выяснения возможности использования солнечного фотометра ROBAS 30 для круглосуточного мониторинга содержания водяного пара в Земной атмосфере были выполнены наблюдения Солнца и Луны. Ошибка определения содержания водяного пара, полученная на основе дисперсии фотометрических данных, составила 1-2% по наблюдениям Солнца и 3% по наблюдениям Луны. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования фотометра ROBAS 30 для круглосуточного мониторинга содержания водяного пара в Земной атмосфере.

1. Введение

Солнечные фотометры, выпускаемые фирмой Dr.Karl Schulz and Partners GmbH (Германия) [1], обладают высокочувствительными приемниками излучения с большим динамическим диапазоном ($\sim 10^8$), что позволяет регистрировать излучение, как от Солнца, так и от Луны. Такие наблюдения для определения аэрозольной оптической плотности Земной атмосферы были выполнены на Шпицбергене [2] с солнечными фотометрами SP1A и SP2H. Однако в дальнейшем наблюдения Луны не получили продолжения в связи с трудностями учета изменения яркости Луны с изменением фазы. Тем не менее, возможность исследования оптических характеристик Земной атмосферы в дневное и ночное время с одним прибором выглядит очень привлекательно. Мы использовали солнечный фотометр ROBAS 30, чтобы получить данные о содержании водяного пара в Земной атмосфере по наблюдениям Солнца и Луны.

2. Описание фотометра и наблюдательного комплекса

Фотометр ROBAS 30 представляет собой полностью автоматизированный прибор для определения оптических характеристик атмосферы по наблюдениям Солнца. Изображение Солнца формируется линзой диаметром 10 мм с фокусным расстоянием 80 мм. В фокальной плоскости изображение Солнца выделяется диафрагмой диаметром 1.5 мм. Приемник излучения находится на расстоянии 30 мм от фокуса, куда попадает расфокусированное изображение Солнца. Измеряемый участок длин волн выделяется клиновым фильтром, состоящим из трех секторов, длина волны определяется углом поворота фильтра. Фотометр работает в диапазоне длин волн 350-1150 нм, измерения выполняются в 70 длинах волн, полуширина пропускания фильтра составляет от 5 до 25 нм. Фотометр работает в автоматическом режиме, при котором может регистрироваться поток излучения от Солнца или лабораторного источника. В случае наблюдения Солнца автоматически после каждого измерения определяется аэрозольная оптическая плотность для всех длин волн. Продолжительность одного цикла наблюдения составляет 28 сек. Для вычисления аэрозольной оптической плотности необходимо, чтобы предварительно были получены инструментальные внеатмосферные величины для всех длин волн. Процедура определения последних обычно выполняется по методу Ланглей [3] в условиях стабильной атмосферы с высокой прозрачностью (высокогорные усло-

вия). Для фотометра ROBAS 30, который является штатным прибором Метеорологической обсерватории г. Линденберга (Германия), калибровка выполняется один раз в два года в высокогорных условиях (в немецких Альпах, либо на Канарских островах).

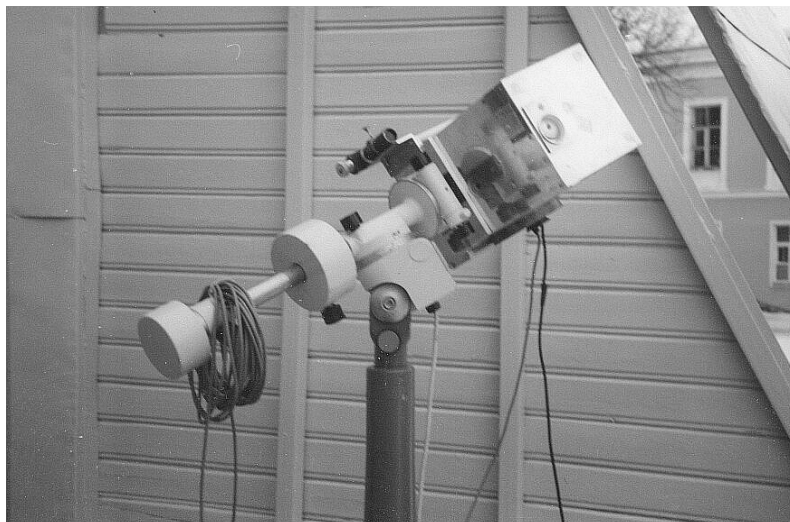


Рис. 1. Солнечный фотометр ROBAS 30 на параллактической монтировке.

Поскольку в нашем распоряжении оказался фотометр без системы наведения и слежения, перед нами встала проблема максимально облегчить процесс наблюдения Солнца и сделать возможным наблюдение Луны. Для этой цели была использована параллактическая монтировка от телескопа “Менискас-180“. Для наведения на Луну был добавлен небольшой гид, который юстировался по Солнцу. Общий вид установки с фотометром показан на **рис. 1**. Монтировка размещена в целостной пристройке здания Астрофизической лаборатории. Записи наблюдений Солнца и Луны приведены на **рис. 2**. Как следует из рисунка, наблюдаемые распределения энергии в спектрах Солнца и Луны очень похожи.

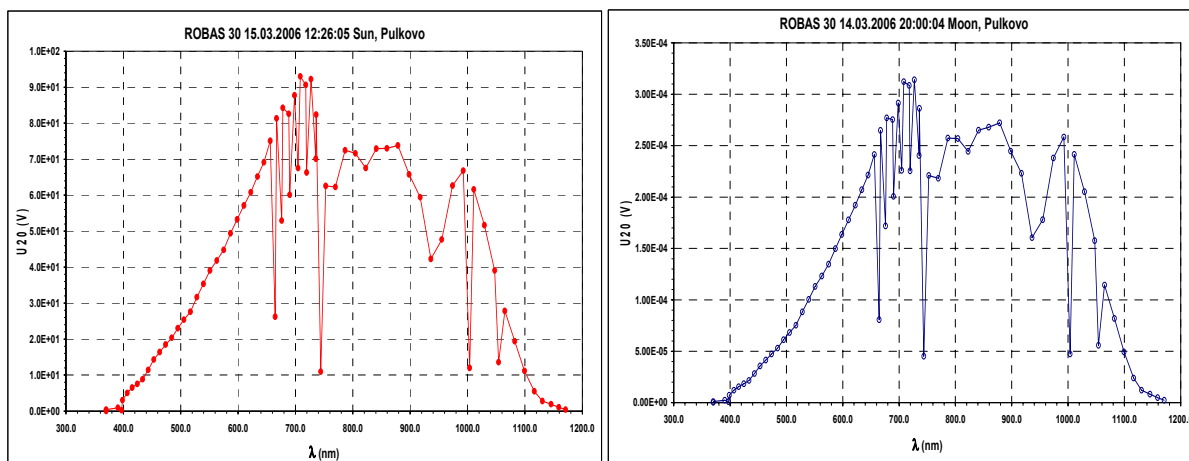


Рис. 2. Наблюдаемые распределения энергии в спектрах Солнца и Луны (фотометр ROBAS 30).

3. Используемая методика

Процедура определения внеатмосферных величин и оптической плотности, заложенная в программу наблюдения и обработки данных, предполагает использование закона ослабления света Бугера в одинаковой степени для всех длин волн. Вследствие этого для участков спектра, включающих теллурические полосы поглощения, результа-

ты оказываются ошибочными, как для внеатмосферных величин, так и для значений оптической плотности, отнесенной к одной воздушной массе. В области длин волн, включающей теллурические полосы водяного пара, мы должны разделить источники ослабления излучения в соответствии с типом зависимости ослабления от воздушной массы. Согласно [4] наблюдаемая звездная величина источника излучения может быть записана, как

$$m_{obs} = m_0 + \alpha \cdot F(z) + c_f \cdot (F(z))^\mu, \quad (1)$$

либо

$$m_{obs} = m_0 + \alpha \cdot F(z) + c_w \cdot W^\mu, \quad (2)$$

причем

$$c_f = c_w \cdot (W_0)^\mu, \quad (3)$$

где m_{obs} –наблюдаемая звездная величина источника излучения; m_0 – внеатмосферная звездная величина, α - коэффициент экстинкции, обусловленный аэрозольным ослаблением и Релеевским рассеянием, $F(z)$ –воздушная масса, c_f и c_w – величина поглощения водяным паром в звездных величинах в расчете на одну воздушную массу или на 1 см осажденной воды соответственно, $W = W_0 \cdot F(z)$ - количество водяного пара на луче зрения в см осажденной воды, W_0 –количество водяного пара для единичного атмосферного столба, μ - эмпирический параметр, характеризующий быстроту изменения поглощения при возрастании количества водяного пара на луче зрения. Использование выражения (1) или (2) зависит от того, известен ли нам параметр c_w . Если он нам известен, то использование выражения (1) позволяет определить на основе наблюдений внеатмосферную величину и параметр c_f , т.е. величину поглощения для зенита. Если известно c_w , то из наблюдений могут быть получены внеатмосферная величина и количество водяного пара, выраженного в см осажденной воды (2). Если же содержание водяного пара в атмосфере известно из других источников, выражение (2) позволяет определить внеатмосферную величину и параметр c_w .

Параметры c_w и μ могут быть либо определены экспериментально, путем калибровки прибора в лаборатории, либо вычислены на основе кривых пропускания фильтров и спектральных функций пропускания для водяного пара. В свою очередь спектральные функции пропускания можно получить либо теоретически, либо экспериментально. Используя кривую пропускания фильтра $\lambda 955.1$ нм для фотометра ROBAS 30 и экспериментальные данные для спектральных функций пропускания водяного пара, полученные нами с помощью кюветы ВКМ-100 [5], мы определили параметры c_w и μ , как

$$c_w = 0.{}^m459 \quad \mu = 0.580. \quad (4)$$

4. Наблюдения и обработка

Наблюдения Луны были получены 14.03.06. Для сравнения были использованы наблюдения Солнца, выполненные 14.03.06 и 15.03.06. Для обработки были отобраны наблюдения Луны, выполненные в полнолуние 14.03.06 (18^h20^m-20^h00^m всемирного времени) и ближайшие по времени наблюдения Солнца 14.03.06 (12^h20^h-13^h50^m) и 15.03.06 (13^h00^m-14^h00^m).

После наведения на объект и включения программы наблюдения, осуществлялась автоматическая регистрация результатов с интервалом пять минут. Коррекция внеатмосферных величин и величины поглощения водяным паром в зените выполнялась в соответствии с формулой (1). При этом аэрозольная составляющая ослабления определялась на основе данных для длин волн 878.1 и 1010.9 нм, свободных от теллурического поглощения. На **рис. 3** представлены наблюдаемые m_{obs} и внеатмосферные

потоки m_0 от Солнца в звездных величинах для всего наблюдаемого диапазона спектра. Внеатмосферные величины m_0 получены при калибровке на Канарских островах. Для полосы водяного пара 930 нм приведены скорректированные величины m_0 , полученные в Пулковке по формуле (1).

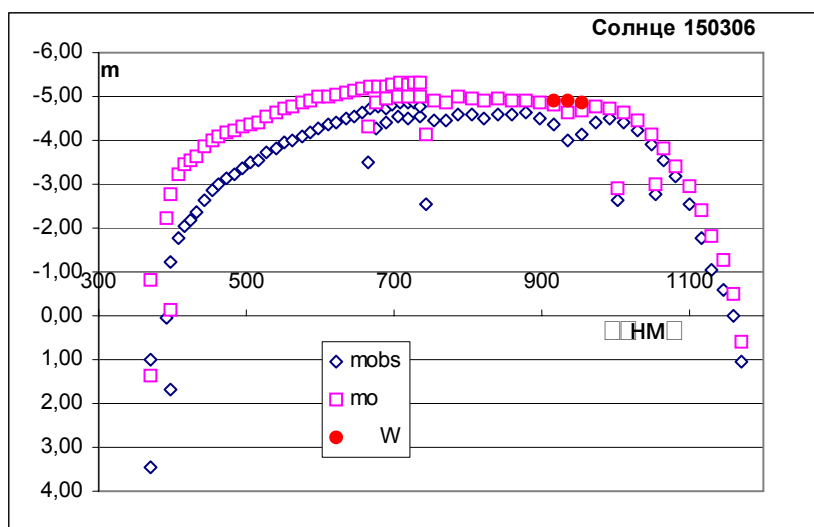


Рис. 3. Наблюдаемые и внеатмосферные звездные величины для Солнца.

Графики, иллюстрирующие определение внеатмосферной величины и величины поглощения водяным паром в зените для фильтра λ 955.1 нм по наблюдениям Солнца и Луны показаны на рис.4. Здесь в соответствии с выражением (1) приведены наблюдаемые величины ($m_{obs} - \alpha \cdot F(z)$) в зависимости от $(F(z))^{\mu}$ и их линейная аппроксимация. Свободный член аппроксимации дает значение внеатмосферной величины, а коэффициент при аргументе - величину поглощения водяным паром в зените c_f . Полученные внеатмосферные величины и поглощение водяным паром в зените с ошибками их определения сопоставлены в таблице 1. В последних двух колонках приведено содержание водяного пара в атмосферном столбе в см осажденной воды, полученное с использованием значений параметра c_w (4).

Из выражения (3) следует, что ошибка определения содержания водяного пара зависит не только от ошибки определения величины c_f , которая, как видно из таблицы, достаточно мала, но также от ошибки параметра c_w . В свою очередь, точность параметра c_w , определяемого в процессе эксперимента, ограничивается точностью определения содержания водяного пара. В таблице 1 ошибка определения атмосферного содержания водяного пара W_0 дана только на основе точности фотометрических наблюдений (ошибки c_f), без учета ошибки c_w .

Таблица 1.

Объект	m_0	Δm_0	c_f	Δc_f	W_0	ΔW_0
Солнце						
14.03.06	-4.888	0.009	0.303	0.005	0.489	0.005
15.03.06	-4.878	0.015	0.272	0.007	0.406	0.006
Луна						
14.03.06	8.605	0.031	0.360	0.019	0.658	0.020

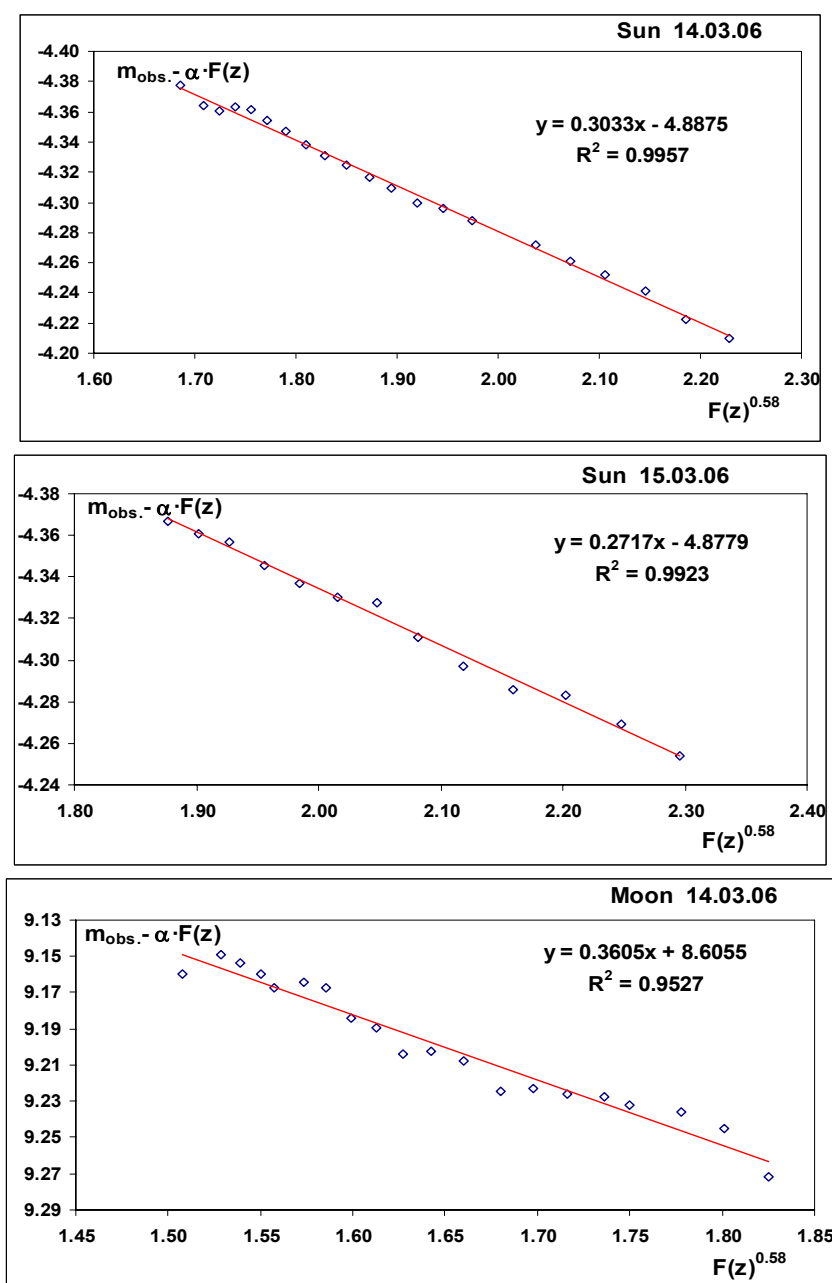


Рис. 4. График определения внеатмосферной величины и поглощения H_2O в зените.

5. Заключение

Выполненное нами исследование показало, что с солнечным фотометром типа ROBAS 30 можно осуществлять круглосуточный мониторинг содержания водяного пара в атмосфере Земли. Фотометрическая точность измерения излучения Солнца и Луны достаточна для определения содержания водяного пара в атмосфере с ошибкой 1-3% (таблица 1). Однако, для этого необходимо лабораторное определение параметра c_w с не меньшей точностью.

Литература

1. *Schulz, K.H.* Product Catalogue, Dr. Schulz and Partners GmbH, Buckow, Germany, 1998.
2. *Herber, A. et al.* Journal of Geophysical Research, 2002, v.107, N D10, p.1029.
3. *Shaw, G.E.*, Pure Appl. Geophys., 1976, 114, 1-14.

4. *Галкин В.Д., Архаров А.А.*, *Астрономический журнал*, 1981, т. 58, с.636-647.
5. *Алексеева Г.А. и др.*, *Изв. ГАО РАН*, 1994, с.116-125.

ESTIMATION OF WATER VAPOR CONTENT IN EARTH'S ATMOSPHERE BY OBSERVATIONS OF THE SUN AND THE MOON

**Galkin V.D.¹, Sal'nikov I.B.¹, Novikov V.V.¹, Leiterer U.², Alekseeva G.A.¹,
Naebert T.², Nikanorova I.N.¹**

¹*Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences*

²*Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg, Germany*

Summary

Observations of the Sun and the Moon have been made with the purpose of ascertaining the efficiency of the photometer ROBAS 30 use for daily atmospheric water vapor content monitoring. The water vapor content error, derived on the basis of the photometric data dispersion, is 1-2% from solar observations and 3% from the observations of the Moon. The obtained results testify to the efficiency of the photometer ROBAS 30 use for daily atmospheric water vapor content monitoring.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СИНХРОННЫЙ ГОЛОГРАММНЫЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР

Гроздилов В.М.

Представлена новая оптическая схема спектрофотометра голограммными отражающими фильтрами. Спектрометр предназначен для высококачественной фотометрии средне-волнового диапазона.

Оптическая схема

Введение

Предлагается новая оптическая схема голограммного спектрофотометра (ГСФ), работающего в двенадцати полосах спектрального диапазона 0.3-1.7 микрон абсолютно синхронно, с учетом разницы оптических путей в каждом канале, не теряя при этом эффективности в каждой полосе спектра. Это осуществимо, пожалуй, только с дихроичными спектроделителями (СПД), которые предварительно разводят входной пучок на несколько спектральных каналов параллельно, т.е. деревом, и отражательными полосовыми голограммными оптическими фильтрами (ГОФ), представляющими собой объемные фазовые голограммы. СПД и ГОФ имеют дифракционную эффективность порядка 100% при параллельном входном пучке. Параллельный входной пучок необходим для ГОФ и СПД по всей оптической схеме вплоть до выходов к фотоприемникам (ФП) во всех 12 каналах, далее в каждом канале ставятся свои линзы, необходимые для каждого ФП. Известно, что получить спрессованный коллимированный пучок можно только в системе Мерсена. Дихроичные покрытия (ДП) в оптике выполняют функции фильтра нижних частот, т.е. короткие волны отражаются, длинные пропускаются. Вся оптическая схема ГСФ разведена по стеклу для устранения Френелевских потерь, обеспечения стабильности и эффективности оптических пучков. Везде используется полное внутреннее отражение (ПВО). Все пучки коллимированные, входят и выходят по нормали, все необходимые грани блоков призм, работающих с малым зазором, имеют просветляющее покрытие. Все клинья 22,5 градуса со своими ДП приклеиваются оптическим клеем каждый к своей призме. Новая оптическая схема существенно упрощена относительно предыдущей [1], где было много различных призм, при этом схема была универсальной, но очень громоздкой. Новая схема получилась более компактной и эффективной, состоящей из двух типов родственных блоков. СПД содержит три блока с полупентапризмами, а разводящая часть двенадцать блоков с пентапризмами. Всего пятнадцать блоков одинакового размера. Все блоки собираются и разбираются как кубики в корпусе ГСФ. Возможны разные конфигурации оптической схемы, так как все блоки можно поворачивать вокруг своих осей. Остановимся на одной из более удачных конфигураций.

Предварительный СПД

СПД разводит входной пучок на четыре канала, сначала центральный блок делит пучок на 0.3-0.6 μm и 0.6-1.7 μm спектра, затем левый пучок делится на 0.3-0.43 μm и 0.43-0.6 μm , а правый делится на 0.6-0.94 μm и 0.94-1.7 μm (рис.1а, б). Все три блока СПД одинаковы по размеру, каждый содержит по две полупентапризмы (БУ-45⁰) и один клин 22.5⁰ со своим дихроичным покрытием, который показан на рис.1 а, б.

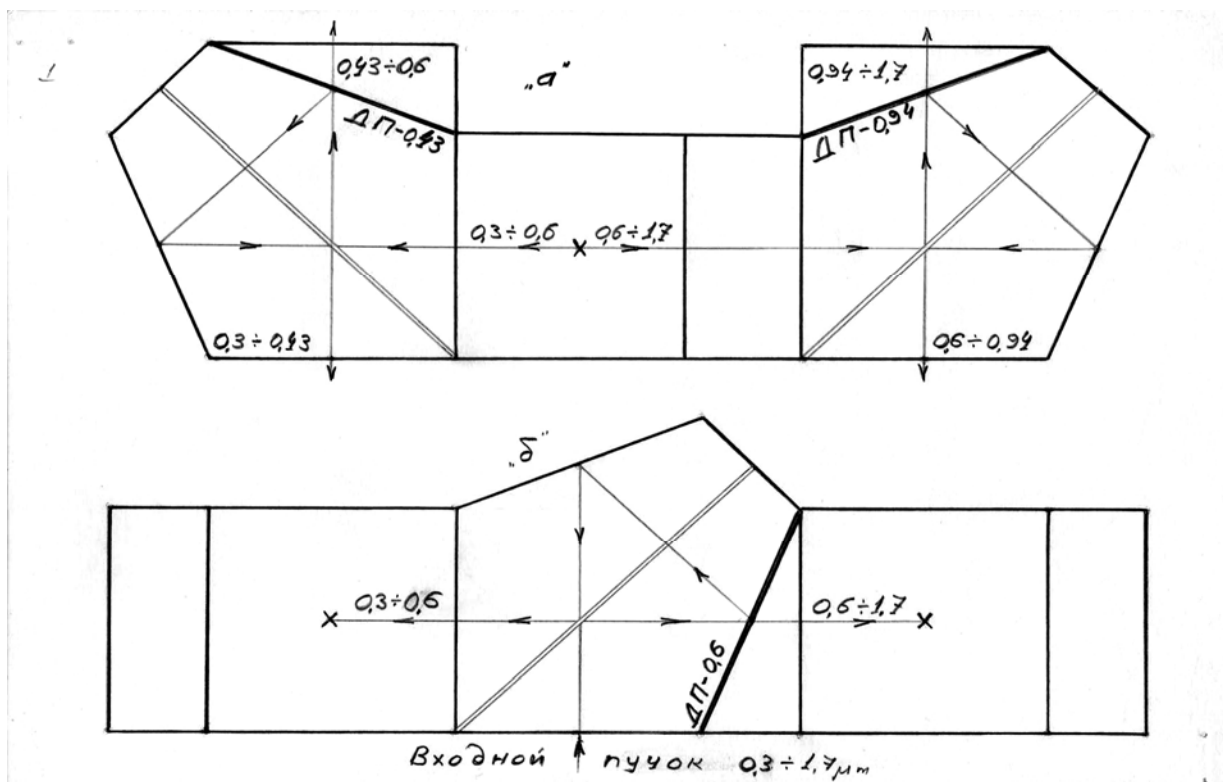


Рис.1. Две проекции (а - вид сверху, б - вид сбоку) предварительного СПД со схемой разводки входного оптического пучка.

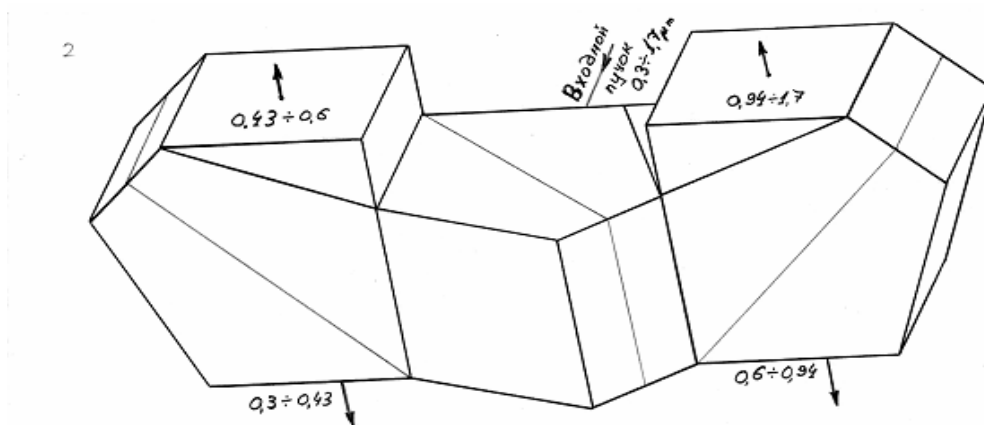


Рис.2. Аксонометрическая проекция СПД с наружной разводкой пучков.

Общая разводящая часть

После разведения СПД входного пучка на четыре предварительных канала, каждый из которых делится последовательно по три канала ГОФ, как показано на рис.3 а, б со своими фильтрами.

Все двенадцать выходных пучков направлены перпендикулярно к одной плоскости, каждый пучок поступает к своему фотоприемнику (ФП) по нормали.

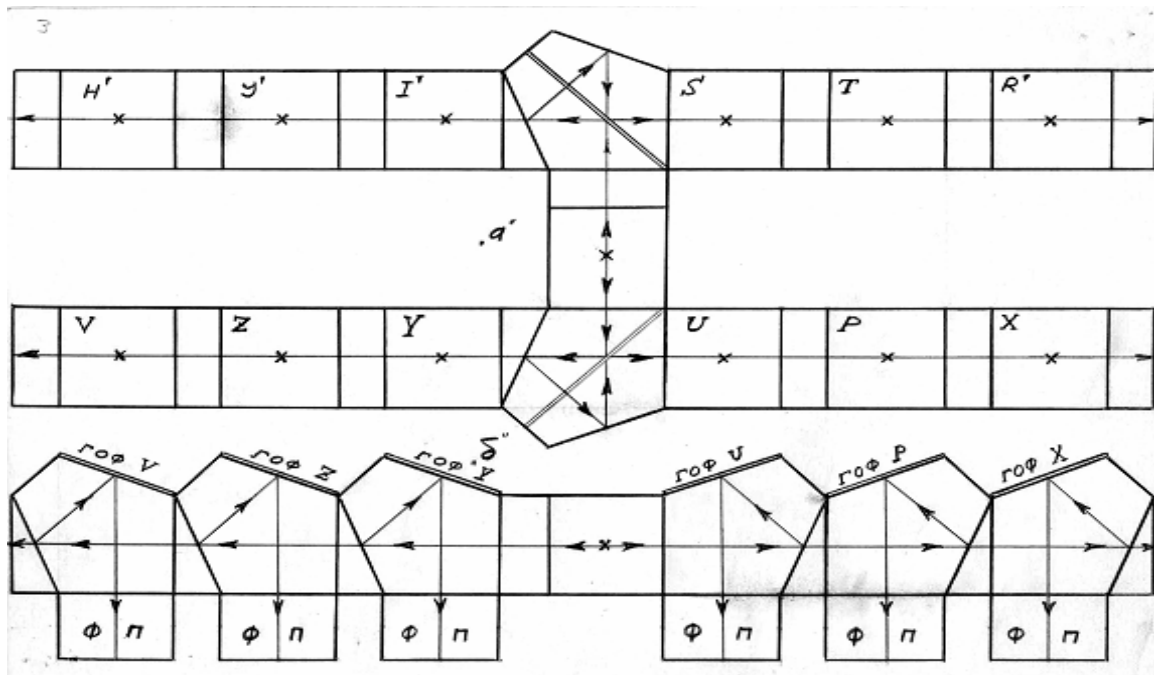


Рис.3. Две проекции (а - вид сверху, б - вид сбоку) оптической схемы ГСФ.

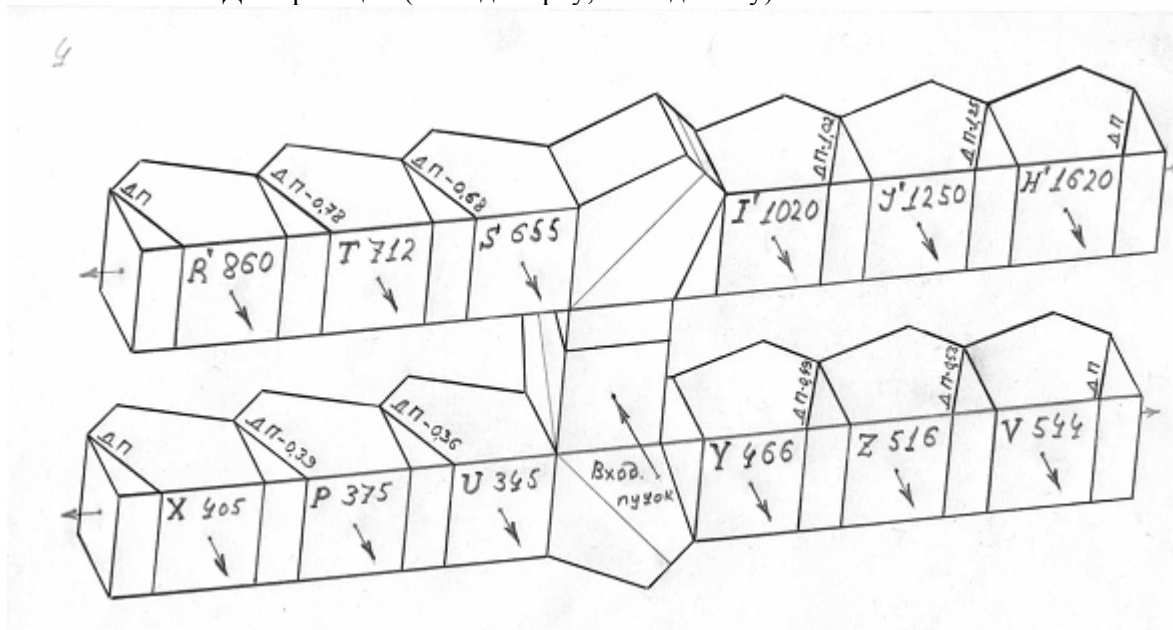


Рис.4. Аксонометрическая проекция с наружной разводкой входного и выходных пучков.

Более подробную информацию о ГСФ и ГОФ можно найти в [2, 3, 4].

Преимущества многоканальных синхронных ГСФ

ГСФ позволяет:

- Уменьшить затраты времени на наблюдения, или за то же время получить большую или лучшую информацию, путем увеличения количества наблюдений или увеличения экспозиции, т.е. увеличения проникающей способности.
- Получать моментальные надежные цвета звезд даже при неочень хороших атмосферных условиях, особенно это важно для быстро переменных и эруптивных звездных объектов.

- Можно и нужно применять оптимальные для каждого канала фотоприемники для каждой конкретной задачи или объекта.
- Выполнять фотометрические наблюдения (ФЭУ, фотодиоды и прочее) для точечных или протяженных объектов.
- Выполнять обзоры площадок или протяженных объектов от Солнца до слабых звезд (ПЗС - матрицы различного типа).
- При необходимости длительных экспозиций можно использовать один или более каналов для специальных работ, привязки к стандартам или гидирование.

Применение ГСФ

ГСФ имеют особо важное значения для многочисленных телескопов малого и умеренного размера с диаметром главного зеркала 0,2 – 1,0 м. Обычная спектроскопия для них недоступна или мало эффективна. Зато они обладают удивительными свойствами, недоступными для больших телескопов:

- Их очень много.
- Они сравнительно легко поддаются автоматизации и компьютеризации.
- Они, ввиду малого веса и соответственно малой инерционности легко балансируются, могут быть оснащены быстрыми и точными приводами, их можно устанавливать в трудно доступных местах с хорошим астроклиматом, при необходимости легко перемещать.
- Они сравнительно дешевы.

Все эти возможности существенно отличают их от больших телескопов и открывают большую новую нишу их эффективного применения для быстро переменных и вспыхивающих объектов, таких как гамма - всплески и другие интересные объекты.

Независимо от размера телескопа всегда необходима эффективная навесная аппаратура и быстрая компьютерная обработка информации, которые являются завершающим и контрольным звеном всего тракта.

Расширенная многоцветная среднеполосная, особенно, такая как Вильнюсская фотометрическая система, не намного уступает по информативности спектроскопии и значительно превосходит ее по проникающей способности, на 3-4 звездных величины для ПЗС матриц и на 6-8 звездных величин для ФЭУ, с учетом 100 % эффективности ГОФ и СПД.

При выборе фотометрической системы я однозначно остановился на среднеполосной Вильнюсской фотометрии [5], несколько расширив спектральный диапазон и существенно повысив дифракционную эффективность ГОФ.

В свое время Яшеком и Франкелем [6] было введено важное понятие критерия чистоты параметров фотометрической системы (качество системы). Согласно этому критерию к настоящему времени наилучшей системой является Вильнюсская фотометрия.

Оценка поляризационных эффектов

Следует заметить, что многоканальные фотометры, где неизбежно присутствуют работающие под углом к световым пучкам оптические элементы, так или иначе поляризуют измеряемое излучение, и, следовательно, результаты проведенных с ними измерений частично поляризованного света астрономических объектов отягощены некоторыми систематическими погрешностями. Излучение звезд обычно линейно поляризовано менее чем на 10% и только у единичных пекулярных объектов и звезд с очень большим межзвездным покраснением ($A_V \geq 5^m$) степень поляризации излучения может быть больше.

При измерениях блеска астрономических объектов, имеющих 10% -ю линейную поляризацию, погрешности, не превышающие 0.01 зв. вел. в самом неблагоприятном случае. Цветовые зависимости при этом не превышают 0.005 зв. вел. во всем диапазоне спектральных классов.

При решении большей части астрофизических задач, связанных с исследованием изменений блеска, влияния этих ошибок не существенно. При прецизионных измерениях в прибор может быть поставлен деполяризатор любого типа, уменьшающий приведенные ошибки на порядок. Другой путь решения этой проблемы – установка в каждом канале компенсатора поляризации. В любом случае желательно использовать фотометр в фиксированном положении по позиционному углу [7].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-07-90254.

Литература

1. **В.М. Гроздилов**, Оптическая схема голограммного спектрофотометра (ГСФ), Труды IX Пулковской международной конференции «солнечная активность как фактор космической погоды», 4-9 июля 2005 г., с.639, Санкт-Петербург.
2. **В.М. Гроздилов**, Высокоэффективная среднеполосная фотометрия на объемных фазовых голограммах, Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, №217, с.531, 2004.
3. **В.М. Гроздилов, Л.Д. Парфиненко**, Высокоэффективное использование телескопов умеренного размера, Труды международного научного семинара «Физика Солнца и звезд», март 2005 г., с.51, Калмыцкий госуниверситет, Элиста.
4. **Г.Б. Семенов, А.К. Аристов, А.В. Варнаев, В.М. Гроздилов, А.П. Желваков, Т.В. Щедрунова**, Получение голограммных фильтров в УФ диапазоне спектра 320-420 нм, Оптический журнал, том 72, № 2, 2005.
5. **В. Страйджист**, Многоканальная фотометрия звезд, Вильнюс, 1977.
6. **С. Jaschek, S. Frankel**, Astron&Astrophys, 158, 174-176, 1986.
7. **В.Н. Корнилов, А.В. Крылов**, Ядерная физика космических лучей, 203-218, МГУ, 1993.

MULTI-CHANNEL SYNCHRONOUS HOLOGRAM SPECTROPHOTOMETER

Grosdilov V.M.

Summary

A new optical scheme of the spectrophotometer with hologram reflective filters is reviewed. The spectrophotometer is intended for high-performance middle-band photometry.

ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF THE ASTRONOMICAL DOME OF THE TOWER EAST IN CAMPO IMPERATORE AND POSSIBLE OPTIONS FOR ITS REFURBISHMENT

Di Varano I.

*Istituto Nazionale di Astrofisica INAF Osservatorio Astronomico di Collurania Teramo
Italia*

The purpose of this work is to analyze the problems associated with the design of the dome for astronomical observatories and the structural features, making reference to Dome East at Campo Imperatore, as it is exposed to extreme environmental conditions. Furthermore, we intend to demonstrate how it's important to determine the proper dimensions of the tambour, in order to prevent its plastic deformation.

1. Introduction

The most important characteristic of a dome for astronomy is to assure the best conditions for telescope operations, allowing the fulfilment of its optic performances, in order to guarantee its integrity. Starting from these basic issues, the main thing to design a dome is to set up the optimal technical-economic parameters, and after that it is possible to make the best choice for an adequate building. So here is a list of some fundamental parameters.

Overall dimensions of the dome must match with those of the telescope, so as to allow assembling and substituting larger elements of the telescope, as for instance the primary mirror.

For an easier assemblage and use, the dome doesn't have to be heavy, and the building must permit to reassemble the single parts.

At the same time the bearing structure of the dome must be enough strong to withstand static and dynamic loads. Among them there are wind actions, ground displacements, the inertial actions of the electric motors, and seismic loads.

The bearing structure or skeleton is formed by ribs and traverses. Metal or wood are preferred as materials, if the dome sizes are not big. Steel buildings are much largely used, because of the comfort in assembling, and for the fact they assure the solidity required for minimal beam sections. Nevertheless steel structures are prone to deformations, under the influence for example of temperature or compression loads, and this leads to structural instability. It's necessary to take care of the estimation in particular of wind forces, whose effects can turn out to be catastrophic.

2. Characteristics of dome East in Campo Imperatore

Now we pass to consider the practical examination of the main features of dome of tower East in Campo Imperatore, where the AZT-24 telescope is placed (see Fig.1). The medium diameter measures 9.5 m. The dome frame is composed of 24 ribs, formed by two section bars double-T shaped, each with dimensions of 200x100 mm, and by 4 traverses of 40x40mm. This kind of structure provides a good resistance to compression instability. The aperture width measures 2.0 m and it takes place by means of two horizontal sliding doors. External covering of dome is realized through zinc-plated steel segments, with a thickness of 0.8 mm, while inside the dome has been covered by wood plates, with a thickness of 20 mm.

The dome structure, together with the external and inside covering and with the sliding doors, anchored to the bearing tambour in the lower part, is supported by 12 pulleys on a rail,

bolted on the shell of the tower. In the time of our research a double-T section bar of type HE 120 A, was used for the rail (114x120x5 mm), which doesn't provide, however, the necessary strength. When the dome rotates, the rail is buckled under its weight, and the contact with the driving wheels becomes so unstable that it produces an irregular motion. One of the tasks of this paper is to analyze the reasons of the rail deformation and to suggest a possible solution to the problem.

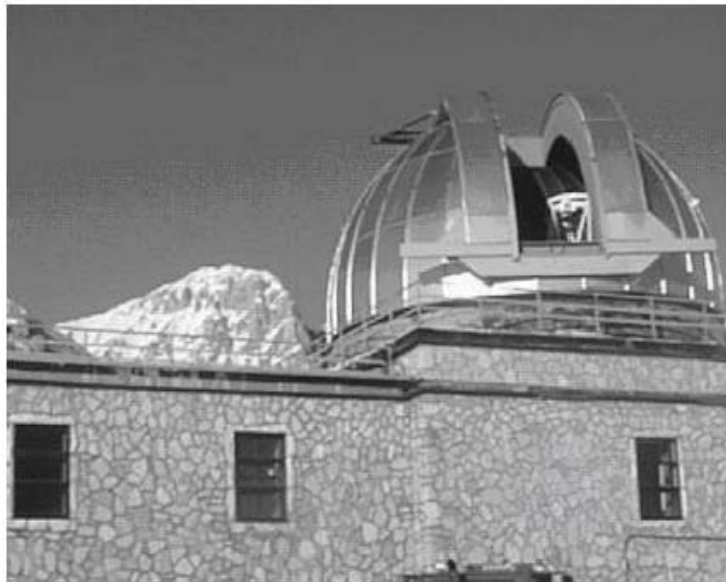


Fig.1. View of the dome East.

The dome rotates thanks to three hydraulic motor, each of 5.5 Hp, and the doors open and close with the help of a couple of pistons. In both cases for the hydraulic transmission, the oil is pumped from the central pump, connected to the electric controls and the switch on the moving part of the dome. The maximum rotating speed is $3.2^\circ/\text{s}$.

3. Methods of structural analysis

A structural analysis can be carried out using two methods: analytical and numerical approaches. Analytical methods are quite good for simple structures, but for more complex ones, as in our case, they lose their validity. It is preferable therefore to use numerical methods, which in turn can be divided in two types:

- 1) numerical solutions of differential equations for displacements or stresses;
- 2) matrix methods based on finite elements model.

Finite-difference and numerical integration techniques belong to the first group, based on mathematical approximation of differential equations: nevertheless, the large number of computational operations limit their use to simpler structures.

Matrix methods belong to the second group. The structure is first decomposed in single discrete elements, then displacement or stress distribution are applied, and reassembled together, in order to satisfy equilibrium and congruence equations in the joints of these elements. Such methods are suitable for implementation on a PC because the problem involving stiffness matrixes is referable to the solution of linear equations system.

These methods in turn can be distinguished in:

- a) displacement method (stiffness method), where displacements are chosen as unknowns;
- b) the force method (or flexibility method) where forces are the unknowns.

4. Definition of the active loads

After having assigned in SAP2000 software respectively material, external restraints and appropriate sections to each element, active loads have been put in.

As truss section, one of equivalent area and moments of inertia I_x , I_y close to the actual section, has been chosen. In the database section of the program it corresponds to abbreviation W8x35. Considering that the specific weight of steel is 7850 kg/m^3 and that of the wood 900 kg/m^3 , including trolleys, motors and hydraulic circuit, sliding doors, and moreover dead weights, weldings, etc., the global weight is esteemed to be about 16 t. The weights of external covering in zinc-plated steel and of lumber can be set as uniform span loads. This load must be projected along the 24 ribs multiplying it by the influence area, as a value of 2 mls (linear meters) (see Figers 2 and 3).

For wood: $900 \times 0.02 \times 1 \times 1 \times 2 = 36 \text{ kg/m}$.

For the segments: $7850 \times 0.8 \times 10^{-3} \times 2 = 12.56 \text{ kg/m}$.

Total = 48.56 kg/m.

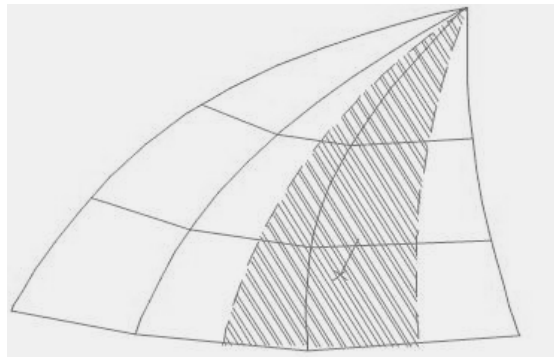


Fig. 2. A view of the influence area.

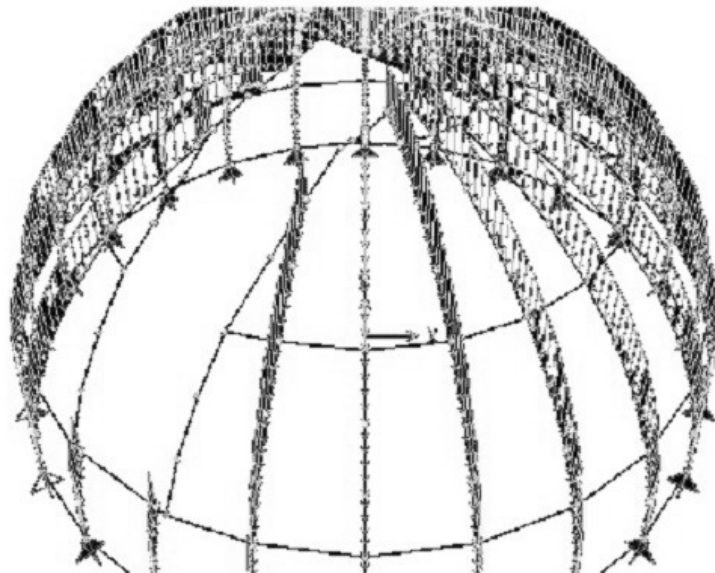


Fig. 3. A 3D view of the distributed weight loads in SAP2000.

5. The snow action

After the application of proper weight load, it is necessary to see how and where snow forces are distributed. Taking as reference the Ministerial Decree (Decreto Ministeriale D.M., 16-01-96), the proper formula is applied:

$$q_s = \mu_i q_{sk} \quad (1)$$

q_{sk} representing the reference value of snow load on the ground; it is in turn a function of altitude a_s and of the location. The site belongs to the zone I, for which the valid formula is the following:

$$\text{Zone I, } a_s > 750 \text{ m.} \Rightarrow q_{sk} = 3.25 + 8.5(1850 - 750)/1000 = 121 \text{ kg/m}^2 \quad (2)$$

For the calculation of shape factor μ_i , a distribution with $\mu_1 = 0.8$ was selected. On each rib there's a uniformly distributed snow load equal to:

$$P_{\text{snow}} = 121 \times 0.8 \times 2 \text{ kg/m} = 114 \text{ kg/m.} \quad (3)$$

6. Wind loads

As indicated in the D.M., the wind acts along the horizontal direction, variable in time so that dynamic effects are produced, which can be estimated through a statistic analysis. Therefore it is better to assume them as equivalent static forces. The formulas adopted for the calculation derive from probabilistic analysis.

The wind pressure is:

$$p = q_{\text{ref}} C_p C_d C_e \quad (4)$$

where the kinetic pressure q_{ref} can be written as:

$$q_{\text{ref}} = \frac{v_{\text{ref}}^2}{1.6} \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

where C_e is the exposure factor, C_p the shape or aerodynamic factor, C_d the dynamic one. The site belongs to zone 3, for which the following values are valid:

$$\begin{cases} v_{\text{ref}} = 27 \text{ m/s} \\ a_0 = 500 \\ k_a = 0.03 \left[\frac{1}{s} \right] \end{cases} \quad a_s = 1800 > a_0 = 500 \quad (6)$$

$$v_{\text{ref}} = v_{\text{ref}10} + k_a (a_s - a_0) = 66 \text{ m/s} \quad (7)$$

hence:
$$q_{\text{ref}} = \frac{66^2}{1.6} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 272 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

The exposure factor is correlated to the height of the building from the ground (z). The site belongs to zone 3D, category III, corresponding to the following coefficients:

$$\begin{cases} k_r = 0.2 \\ z_0 = 0.1 \text{ m} \\ z_{\text{min}} = 5 \end{cases} \Rightarrow c_e = 0.2^2 \times \frac{\ln 8.75}{0.1} \left[7 + 1 \cdot \ln \frac{8.75}{0.1} \right] = 2.05. \quad (9)$$

In order to determine C_p it needs to be noticed that when the Standard refers to cylindrical and spherical bodies, it means closed structures, while for further examinations of dy-

dynamic forces in turbulent regime, it refers to experimental investigations in a wind tunnel. In our case a closed dome configuration has been considered; besides that, being this an analysis of global forces, it leads to extreme conditions for the purpose of the work, and it is assumed that the dome is not opened at all.

According to what expressed in the paragraph C.7.6.7 of D.M 9-01-96, for spherical bodies the value $C_p=0.35$ can be assumed, as the wind acts as a load distributed on a layer perpendicular to its direction, in this case a semicircle (see Fig.4). Assuming $C_d=1$, we obtain:

$$p_v = \frac{272}{2} \times 0.35 \times 2.05 = 97.58 \frac{kg}{m^2} \quad (10)$$

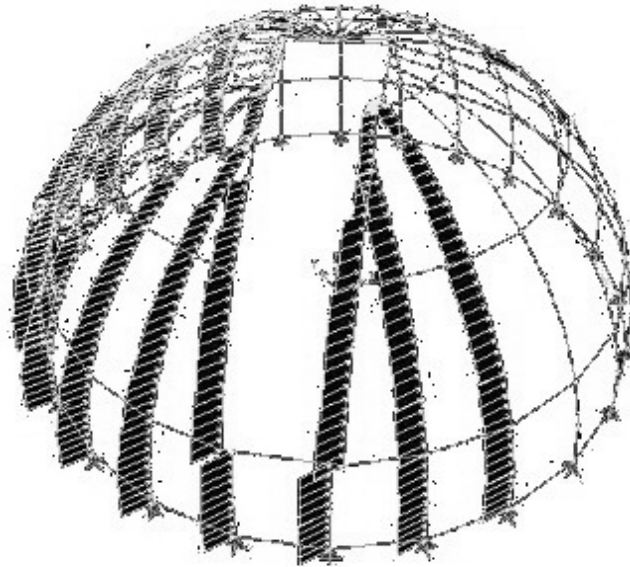


Fig. 2. A view of wind load distribution.

7. Seismic forces

Conventionally these forces are estimated first with a static analysis. Supposing that the whole structure is subject to horizontal forces parallel to earthquake directions, the following formula (as expressed by D.M.) is used:

$$F_h = CRIW \quad (11)$$

With: C = level of seismicity;

R = responding coefficient, related to the direction taken into account;

I = coefficient of seismic protection;

W = overall mass weight.

$$C = \frac{s-2}{100} = \frac{12-2}{100} = 0.1$$

In this case:

$R=1$, since T_0 is not defined. We put $I=1$, as the dome does not introduce any risk for the characteristics of use. $W=16$ t, hence:

$$F = 66 \text{ kg.}$$

This action, if compared with the other active loads, as written below, is almost negligible.

8. Actions due to centrifugal forces

The motors produce on the rail a tangential thrust and a centrifugal force in the radial direction. Keeping in mind that highest speed is 3.2°/s, and considering an average time of 5s of the slope ramp of the motors, the angular acceleration is:

$$\dot{\omega}_{dome} = 1,117 \times 10^{-2} \text{ rad} / \text{s}^2$$

then: $a_{tdome} = \dot{\omega}R = 5.305 \times 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$.

Considering the diameter of the trolley wheel equivalent to 250 mm (see Fig.5), and M=15 kg, the following parameters are determined:

$$\ddot{\theta}_{tr} = 0.42 \text{ rad} / \text{s}^2, \quad I_c = \frac{1}{2} MR^2 = 0.117 \text{ kgm}^2,$$

$$a_{rdome} = \omega^2 R = 1.478 \times 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2, \quad a_{tr} = 5.507 \times 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2.$$

With twelve trolleys, each of two wheels, with an equal weight uniformly distributed, the normal reaction for each of them is: $R_N = 666,67 \text{ kg}$. As far as the torque moment is concerned, taking as reference the VAR-SPE catalogue¹ for hydraulic transmissions, it can be noticed that at low capacity, with a motor of 4 kW, the moment increases almost of a factor 5, if compared to the nominal one. In fact the starting torque is the higher one: for the type PM 1210 it measures 66 Nm. Supposing the lowest speed is 200 rpm, with a global efficiency:

$$\eta_{gl} = \eta_{hy} \eta_v \eta_m = 0.32$$

where η_m = mechanical efficiency,

η_v = volumetric efficiency,

η_{hy} = hydraulic efficiency.

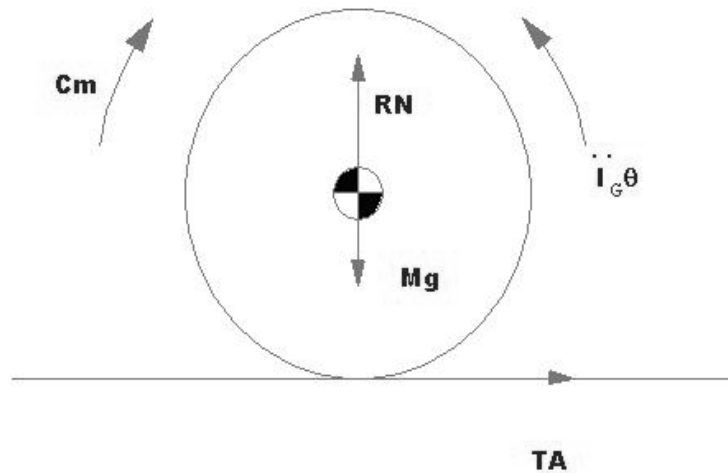


Fig.3. Forces acting on a single trolley wheel.

$$C_m = \frac{\eta P}{\omega} = 62,66 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_A R + I_G \ddot{\theta} = C_m$$

The value of the torque found on the catalogue leads to: $T_A = 105.6 \text{ kgf}$.

¹ See <http://www.var-spe.com/uk> for details

Because of no skidding, it is necessary to verify that $T_A \leq \mu R_N = 133.34kgf$, where $\mu=0.2$. So this is completely fulfilled.

9. Thermal loads

Taking always as reference the D.M. 9-01-96, considering thermal variations, it has been supposed they were uniform along the section and constant for every element, with a thermal gradient of $\Delta T = 25^\circ C$. The rail strain is equivalent to:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T = 1.2 \times 10^{-5} \times 25 \times 29.845 = 8.95mm$$

and the tension, normal to the section, is given by:

$$\sigma = \frac{N}{A} = E \alpha \Delta T = 206000 \times 1.2 \times 10^{-5} \times 25 \frac{N}{mm^2} = 61.8 \frac{N}{mm^2}$$

These stresses, if compared with the acceptable ones of $160 N/mm^2$, even if inferior to the maximum value, taken singularly, give a remarkable contribution to the global actions, and together with the wind loads, they are the main factors for plastic deformation of the tambour. So in a primary project stage they are anything but negligible.

10. Load cases

Implementing an analysis of loads, it is possible to achieve features for the whole structure. In particular we are interested in determining the external joint reactions. As stresses caused by the wind are greater than those due to permanent loads, according to normative CNR-UNI 1001, two load combinations have been studied: the first includes weight + snow + wind-temperature (thermal contraction), (see Fig.6a), and the other refers to weight + wind + temperature (thermal expansion in absence of snow) (see Fig.6b). As verify method the one so-called of acceptable stresses has been employed.

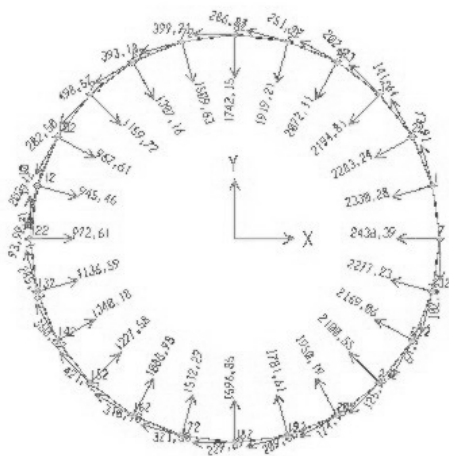


Fig. 6.a. Reactions forces

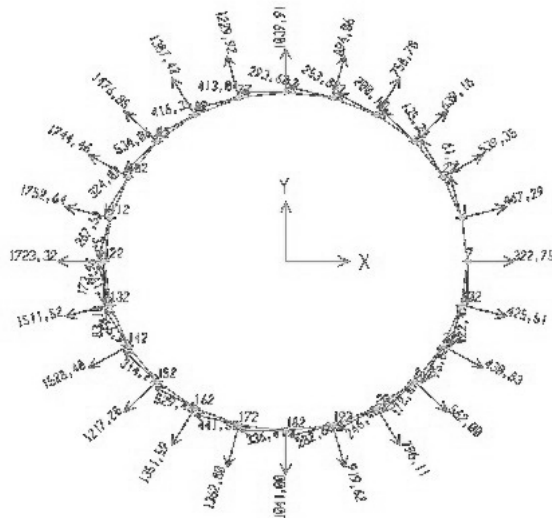


Fig. 4.b. Reactions forces.

11. Strength verification

From the CNR-UNI 10011 Standards, for Fe360 section bars it can be pointed out that the maximum stress on the beam is:

$$\sigma \leq \sigma_{amm} = 160 N/mm^2.$$

Tresca strength criterion has been adopted. The σ is the equivalent one, due to pluriaxial stresses: in this case the rail is subject to shear along two perpendicular directions 2-3 (ra-

dial respect to the dome and downward) and to a tension normal to section along direction 1 (see Fig.7). Its geometric representation is given by the Mohr-circle, that can be found in handbooks and engineer books

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3(\tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}$$

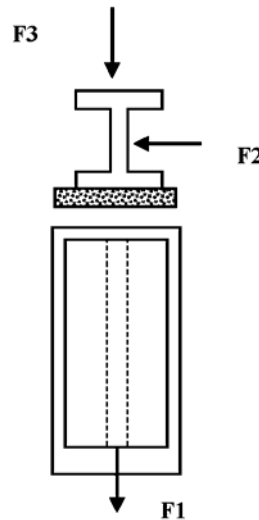


Fig. 5. A schematic of the force directions.

The data relative to double-T shaped HE 120 A, taken from the manual are: $h = 114 \text{ mm}$; $b = 120 \text{ mm}$; $t_o = 5 \text{ mm}$; and $t_w = 8 \text{ mm}$; section area = 25.3 cm^2 . Two formulas has been used to determine the shear value:

$$\tau_{13} = \frac{F3}{(h - 2e)a} \quad (\text{shear absorbed by the central part of the section});$$

$$\tau_{12} = \frac{3 F2}{2 be} \quad (\text{shear absorbed by the peripheral parts of the section});$$

The stress values in every node for the different load combinations, where COMB1 represents condition of only snow, COMB2 that of only wind, COMB3 snow + wind - temp, COMB4 wind + temp, are shown in the following Table 1:

Table 1. Output table with joint stresses on the dome rail, derived from the analysis.

JOINT	LOAD	F1	F2	F3	Tau_3	Tau_2	Sigma	Sigma eq
		kgf	Kgf	kgf	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1	COMB1	-29,3437	-338,232	1596,456	12,47	-13,53	-0,12	31,87
1	COMB2	-63,0947	-854,733	1808,039	14,13	-34,19	-0,25	64,07
1	COMB3	-61,7392	467,2886	2377,421	18,57	18,69	-0,24	45,64
1	COMB4	-73,9068	-2330,28	1804,671	14,10	-93,21	-0,29	163,28
7	COMB1	68,9885	-527,634	1745,142	13,63	-21,11	0,27	43,52
7	COMB2	117,7505	-965,344	1813,674	14,17	-38,61	0,47	71,24
7	COMB3	122,487	322,753	2440,432	19,07	12,91	0,48	39,88
7	COMB4	102,0436	-2438,39	1809,736	14,14	-97,54	0,40	170,70
112	COMB1	3,78	-524,546	1866,123	14,58	-20,98	0,01	44,25

112	COMB2	-134,395	509,8515	630,8926	4,93	20,39	-0,53	36,34
112	COMB3	-173,459	1752,642	1279,617	10,00	70,11	-0,69	122,66
112	COMB4	-93,9012	-945,46	634,459	4,96	-37,82	-0,37	66,06
122	COMB1	-11,88	-484,99	1778,051	13,89	-19,40	-0,05	41,33
122	COMB2	-30,8003	475,6268	618,0155	4,83	19,03	-0,12	34,00
122	COMB3	-83,1849	1723,317	1224,623	9,57	68,93	-0,33	120,54
122	COMB4	19,1023	-972,611	628,1381	4,91	-38,90	0,08	67,92
					0,00			
132	COMB1	-23,6286	-476,106	1789,034	13,98	-19,04	-0,09	40,92
132	COMB2	64,1513	294,4698	887,0723	6,93	11,78	0,25	23,67
132	COMB3	3,466	1511,522	1534,773	11,99	60,46	0,01	106,76
132	COMB4	120,1125	-1136,59	887,5789	6,93	-45,46	0,47	79,66
172	COMB1	44,2529	-263,872	1292,898	10,10	-10,55	0,17	25,30
172	COMB2	416,57	3,6477	799,3337	6,24	0,15	1,65	10,94
172	COMB3	529,4758	1362,799	1063,045	8,31	54,51	2,09	95,53
172	COMB4	310,0965	-1512,29	1034,232	8,08	-60,49	1,23	105,71
182	COMB1	28,4784	-542,416	1880,917	14,69	-21,70	0,11	45,39
182	COMB2	376,861	-163,525	726,2908	5,67	-6,54	1,49	15,07
182	COMB3	441,5021	1041,003	1395,342	10,90	41,64	1,75	74,57
182	COMB4	321,3041	-1596,85	725,6111	5,67	-63,87	1,27	111,08
192	COMB1	15,7899	-516,164	1837,125	14,35	-20,65	0,06	43,55
192	COMB2	279,3859	-329,316	1025,856	8,01	-13,17	1,10	26,73
192	COMB3	336,4132	919,6207	1646,822	12,87	36,78	1,33	67,51
192	COMB4	229,8891	-1781,61	1038,392	8,11	-71,26	0,91	124,23
202	COMB1	-18,4198	-470,519	1728,138	13,50	-18,82	-0,07	40,12
202	COMB2	249,1026	-487,648	1291,646	10,09	-19,51	0,98	38,05
202	COMB3	282,68	796,1131	1845,232	14,42	31,84	1,12	60,56
202	COMB4	209,0289	-1950,19	1309,509	10,23	-78,01	0,83	136,27
212	COMB1	-2,3092	-632,493	2064,935	16,13	-25,30	-0,01	51,97
212	COMB2	208,0196	-639,486	1511,507	11,81	-25,58	0,82	48,81
212	COMB3	246,4022	561,997	2258,802	17,65	22,48	0,97	49,51
212	COMB4	174,1525	-2100,55	1508,108	11,78	-84,02	0,69	146,96
222	COMB1	-27,4889	-799,342	2468,217	19,28	-31,97	-0,11	64,67
222	COMB2	152,3142	-705,319	1549,698	12,11	-28,21	0,60	53,18
222	COMB3	172,085	430,8267	2459,116	19,21	17,23	0,68	44,71
222	COMB4	125,7728	-2169,06	1541,22	12,04	-86,76	0,50	151,72
232	COMB1	-37,5218	-563,49	1986,403	15,52	-22,54	-0,15	47,40
232	COMB2	85,2919	-807,48	1723,071	13,46	-32,30	0,34	60,61
232	COMB3	95,8184	425,5132	2437,379	19,04	17,02	0,38	44,24
232	COMB4	64,3178	-2277,23	1719,527	13,43	-91,09	0,25	159,48

As you can see in node 7 the value of the $\sigma_{eq} = 170,7 \text{ N/mm}^2$ is superior to that admissible, a fact that proves the actual yield and the consequent plastic deformation of the beam; the most critical condition therefore is given by the COMB4. Because of the peculiarity of Campo Imperatore site, snow and wind loads have to be necessarily considered as inferior limits. We can reasonably affirm insofar that σ_{eq} value actually overcomes the admissible threshold also in other nodes, subsequently confirming our conclusions.

12. Strain verification

The check with Tresca method, for mono and pluriaxial stress conditions, is valid within the limits of the beam theory of De Saint Venant, i.e. some conditions must be fulfilled (see Fig 8):

- the solid has a length far larger than the section size;
- the material is elastic, linear, homogeneous and isotropic;
- mass forces are equal to zero and lateral surface is unloaded;
- the solid has no restraint, coherently with the hypothesis of a system of balanced forces.

It is finally assumed that in the plain elements parallel to longitudinal axis, the normal tension is zero, hence:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= 0; \\ \sigma_{mn} &= \sigma_{ij} \alpha_i \alpha_j = \sigma_{11} \alpha_1^2 + 2\sigma_{12} \alpha_1 \alpha_2 + \sigma_{22} \alpha_2^2 \end{aligned} \quad (19)$$

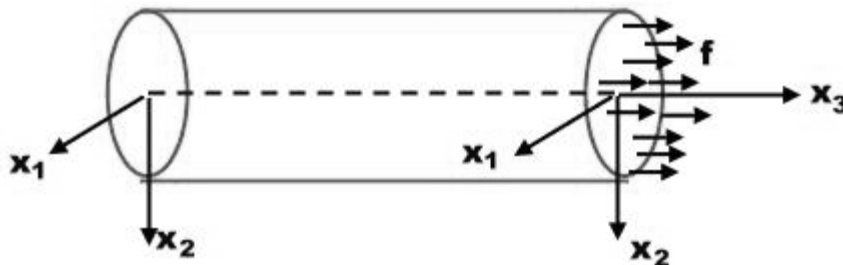


Fig. 6. State of tensions according to De Saint Venant theory of beams.

It follows that $n_{ij} = (\alpha_1, \alpha_2, 0)$. For the arbitrariness of choice of component forces, provided that $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1$, $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$, the stress tensor is given by:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{13} \\ 0 & 0 & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (20)$$

And it is biaxial. Instead, deformation has been produced right in the restraints, that are the bolts, which caused torsion on the cross section.

For this purpose a further program in SAP2000N has been implemented for the most loaded section (relative to node 7), with the intention to estimate the maximum displacement of the superior part, and to compare it with the acceptable one.

In the Figure 9 it can be noticed that upper left extreme of superior part of the section has an horizontal and vertical displacement, which are respectively $x = 8.133 \text{ mm}$ and $z = -5.388$ (see Table 2), that exceeds the allowed deformation, given by :

$$\delta_H = \frac{l}{1600} ; \delta_V = \frac{l}{800}$$

where l represents the distance between two bolts along the circumference, supposed to be equal to: $l = \frac{\pi D}{12} = 2487\text{mm}$, thus: $\delta_H = 1.55$ and $\delta_V = 3.108$ and values referred to the joint with the maximum displacements [mm].

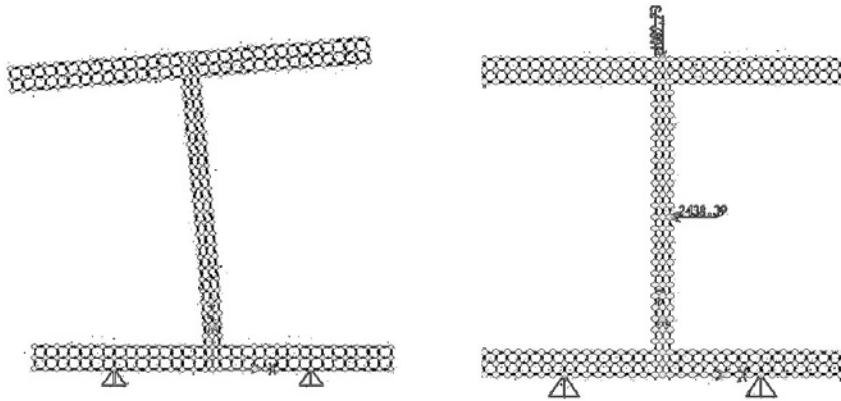


Fig. 9. A view of the deformed section.

Table 2.

Joint Displacements			
Joint ID 8	X	Y	Z
Trans	-8,13368	0,00000	-5,38830
Rotn	0,00000	-0,08914	0,00000

In this model it was supposed that stresses influence the cross sections in the range of $\pm 45^\circ$, i.e. within a length of 240 mm (see Fig.10):

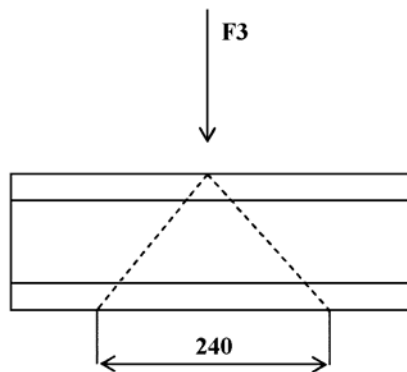


Fig. 10. The stress range of influence for the estimation of strains.

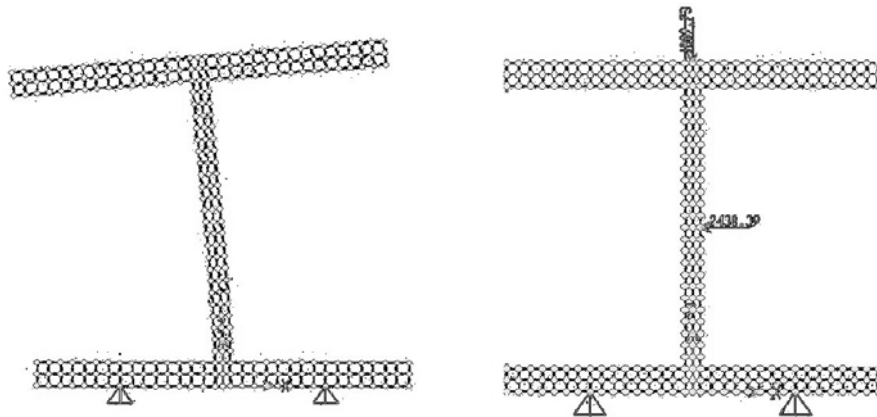


Fig. 11. Stress configuration for forces F3 and F2.

13. Conclusions

In order to bring back the stresses below the threshold and to contain deformations, it is necessary to replace, all dimensions being equal, the above-mentioned rail with one of the same type HE 120 M, but with a thicker core. In fact the shear reaches the maximum value at its centre, while it is damped on the peripheral parts. Replacing the new values in the equation of the σ_{eq} seen before, it leads to:

$$\tau_3 = 5.12 \text{ N/mm}^2, \tau_2 = 20 \text{ N/mm}^2, \sigma_1 = 0.15, \text{ and at last:}$$

$$\sigma_{eq} = 35.75 \text{ N/mm}^2 .$$

In this way we contain the stress far below σ_{adm} , remaining in the domain of elastic deformations.

In conclusion, in the present work we have demonstrated that the most critical element in the design of an astronomy dome is the tambour on which it lays, and in particular the rail around which it moves by means of motors and trolley accurately selected, rather than the skeleton that it's made up of. For this reason in design we need to consider carefully the influence of climatic and environmental factors of the building site.

References

1. **F. D'Alessio, A. Di Paola**, *Dome Control System for the AZT-24 Telescope at Campo Imperatore*, OAR/00/IR6, 2000.
2. **J.S. Przemieniecki**, *Theory of matrix structural analysis*, Mc Graw Hill Book Company, NY 1968, pp.7-9.
3. **AA.VV.**, *Manuale dell'Ingegnere Meccanico*, Hoepli, Milano 1996.
4. **Ministero dei lavori pubblici**, *Decreto Ministeriale del 16/01/96*, "Gazzetta Ufficiale", n.29, 1996, pp. 636-646.
5. **CNR 10021**, *Prospetto 4-Ib - Costruzioni metalliche*, n.3, 1986-85, p.12.

ПУЛКОВСКИЙ МЕРИДИАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ МАГИС
(Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент им. Л.А. Сухарева)
Конструктивные особенности и принцип работы

**Канаев И.И., Кирьян Т.Р., Шкутова Н.А. Наумов К.Н., Никифоров В.В.,
Девяткин А.В., Шумахер А.В., Русаков О.П., Кондратенко И.Н., Горшанов Д.Л.**

Дано описание конструктивных особенностей меридианного телескопа горизонтального типа МАГИС Пулковской обсерватории и принципа его работы. Рассмотрены вопросы технологического и метрологического обоснования выбора материалов для его узлов. Меридианный круг МАГИС предназначен для дифференциальных определений координат (прямых восхождений и склонений) объектов до 15 –17 звездной величины на небесной сфере в полосах В, V, R фотометрической системы Джонсона и в интегральной полосе чувствительности приемника

Опыт развития современной астрометрии доказал нецелесообразность отказа от традиционных наземных методов наблюдений, возможности их эффективного использования для решения задачи получения высокоточных координатных измерений. Однако для этого меридианные инструменты должны быть обновлены. Полная автоматизация процесса наблюдений, применение ПЗС-матриц в качестве приемников света, согласование их характеристик с параметрами оптики, являются необходимыми условиями работы такого телескопа.

В качестве одного из телескопов для решения этих задач используется меридианный автоматический горизонтальный инструмент им. Л.А. Сухарева – МАГИС.

1. Область применения

Меридианный круг МАГИС [1] предназначен для дифференциальных определений координат (прямых восхождений и склонений) объектов до 15 –17 звездной величины на небесной сфере в полосах В, V, R фотометрической системы Джонсона и в интегральной полосе чувствительности приемника.

2. Научные задачи, решаемые с помощью телескопа МАГИС

Сохранение фундаментальной оптической системы координат, создаваемой на основе наблюдений космических астрометрических спутников (HIPPARCOS, и др.) и распространение ее на слабые объекты методами наземной меридианной астрометрии.

Связь оптической системы координат с другими фундаментальными системами.

3. Конструкция телескопа

В основу телескопа МАГИС положена конструкция Пулковского горизонтального меридианного круга Л.А.Сухарева (ГМК) [2,3].

Основные геометрические параметры МАГИС следующие:

- световой диаметр объектива – 190 мм;
- фокусное расстояние объектива – 8000 мм;
- размер отражающей поверхности зеркала 210 x 300 мм;
- длина оси вращения зеркала – 760 мм;
- диаметр разделенной окружности лимбов – 412 мм;
- диаметр рабочего сечения цапфы - 80 мм;
- цена деления лимба – 5 угловых минут.

Принцип действия телескопа МАГИС заключается в следующем. Центральное плоское зеркало (1) (Рис. 1) направляет свет от наблюдаемого объекта в объектив (8) южного горизонтального коллиматора, установленного в плоскости меридиана центрального зеркала. Ось вращения зеркала (1) совпадает с плоскостью первого вертикала. Угол поворота зеркала относительно плоскости горизонта измеряется с помощью разделенных стеклянных лимбов (7), жестко связанных с осью вращения зеркала, и измерительных микроскопов (6) системы измерения угла поворота и наведения зеркала на наблюдаемый объект.

Положение изображения объекта в фокальной плоскости объектива (8) регистрируется с помощью окулярного микрометра (3).

Барабаны с микроскопами, опорные лагера оси вращения зеркала смонтированы на столбах (9) в плоскости первого вертикала. Все устройства на столбах (9) закрываются защитными кожухами (4).

Опорная колонна (5) обеспечивает разгрузку центрального узла с зеркалом – остаточное давление на лагера должно быть $10 \div 20$ кг на каждый лагера.

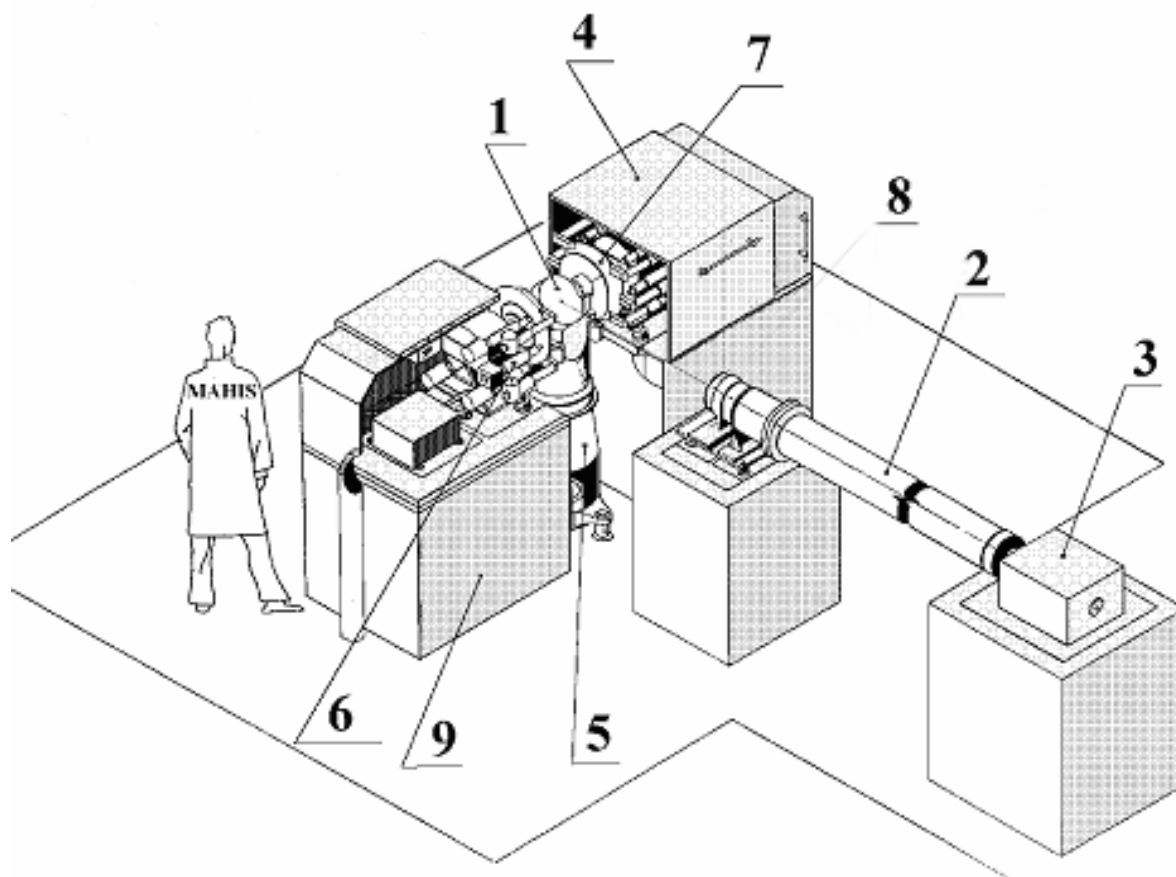


Рис. 1.

3.1. Блок главного зеркала МАГИС

Опыт работы на ГМК показал, что цельнометаллическое зеркало, использованное Л.А. Сухаревым, действительно обладало высокой стабильностью основного параметра – коллимации [4] (отклонение от 90° угла между нормалью к отражающей поверхности зеркала и его осью вращения), важнейшего при абсолютных наблюдениях (температурный коэффициент коллимации металлического зеркала - $0.004 \text{ ''} / ^\circ\text{C}$ [2]). Однако при работе в открытом павильоне металл сильно ржавеет (как отражающая поверхность, так и цапфы оси вращения). Зеркало довольно быстро приходит в негодность.

Оптическая же обработка металлической поверхности - достаточно сложный технологический процесс.

В процессе эксплуатации также было обнаружено значительное изменение формы отражающей поверхности [3]. Плоская поверхность зеркала, использовавшегося на ГМК в 1981-90 гг., превратилась в приближенно сферическую. Деформация составила 2 кольца и, вероятно, явилась следствием внутренних напряжений в металле, не снимаемых при изготовлении крупногабаритного блока зеркала.

В силу сложности изготовления цельнометаллического зеркала была предпринята попытка разработки конструкции зеркала МАГИС с применением новых перспективных технологий, которая завершилась достаточно успешно.

Для МАГИСа было изготовлено зеркало из силицированного карбида кремния (SiC). Этот материал лишь немного уступает алмазу по твердости, обладает высокой теплопроводностью, высоким модулем упругости, не подвержен окислению, имеет малый удельный вес. Благодаря таким свойствам SiC считается одним из самых перспективных материалов, например, в космическом телескопостроении.

Для сравнения в Таблице 1 приведены величины коэффициента Д.Д. Максудова $\psi = E \cdot q / \alpha$, характеризующего материал с точки зрения «эффекта края», то есть, степени деформируемости зеркала при наличии в нем градиента температуры. Здесь E - модуль упругости материала, q - коэффициент теплопроводности, α - коэффициент линейного расширения [5].

Таблица 1.

Материал	SiC	Бериллий	Медь	Ситалл	Алюм. сплав	Сталь	Плав. кварц	Пирекс	Кронгласс
ψ	697	136-165	76	27	11-26	25	13	1.2	0.4

Из таблицы следует, что даже бериллий - "космический" металл - значительно уступает SiC по этому показателю. Благодаря очень высокому значению модуля упругости SiC возможно изготавливать зеркала сотовой конструкции с малой толщиной стенок (до 5 мм для оптической поверхности).

Можно сказать, что при длительной работе в открытом павильоне зеркало МАГИС находится даже в более сложных условиях, чем при работе в космосе. Пыль, влага, кислотные компоненты в атмосфере, температурные градиенты до 2°C / м и скорости изменения температуры до 3 - 5 °C/час - обычные явления при астрономических наблюдениях. То есть, применение этого материала для наших целей оправдано и перспективно.

Зеркало (Рис.2) представляет из себя достаточно сложную конструкцию из силицированного карбида кремния (отражающий элемент) и инваровых сплавов, согласованных с SiC по коэффициенту температурного расширения (элементы сборной оси вращения).

В ГОИ была разработана технология изготовления оптической поверхности непосредственно на карбиде кремния.

Отражающий элемент из SiC имеет две плоских отражающих поверхности, отстоящих от оси вращения на половину толщины карбидного блока, равной 65 мм. В осевое отверстие блока из SiC вклеивается металлическая втулка, через которую пропускается вал. Концы вала обработаны на конус (конус Морзе) и на них насаживаются полуоси. Втулка, вклеиваемая в блок зеркала, соединена с валом так, что отражающая поверхность может поворачиваться специальным механизмом относительно оси вра-

щения, то есть, и относительно оси вращения зеркала, задаваемой цапфами полуосей. Это позволяет регулировать угол коллимации.

На полуосях крепятся цапговыми зажимами оправы лимбов, шестерен привода вращения зеркала, подшипники системы разгрузки зеркала.

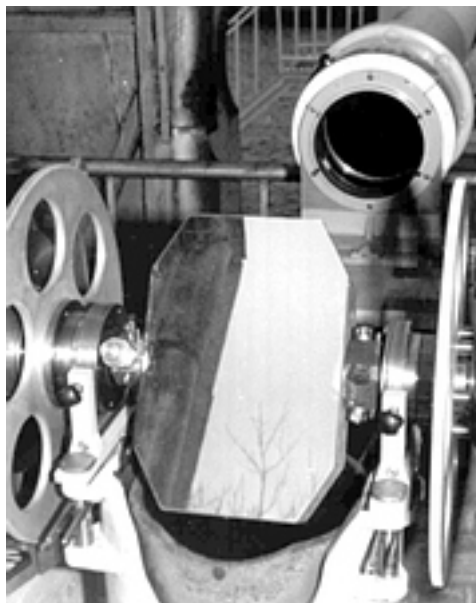


Рис. 2.

В соответствии с технологией, разработанной ГОИ, рабочие поверхности цапф подлежат азотированию, что дает возможность выполнить их обработку с требуемой точностью (отклонение рабочего сечения от окружности не более нескольких мкм, шероховатость - не более нескольких десятых мкм), повысить износостойкость, долговечность профилей рабочих сечений. Однако в связи с тем, что процесс азотирования происходит при достаточно высоких температурах, имеется риск деформаций деталей. После консультаций со специалистами ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург) было решено заменить азотирование цапф нанесением специального покрытия ($Al_2O_3 + 5\% Cr_2O_3$) детонационным методом по технологии, разработанной в ЦНИИ КМ «Прометей». Там же эта работа была выполнена вплоть до обработки нанесенного покрытия с требуемой для сборки осевой системы и дальнейшей работы зеркала МАГИС точностью.

В результате мы получили цапфы, профили рабочих сечений которых не уклоняются от окружности более чем на 3 мкм, шероховатость в пределах 0.1 -0.3 мкм (измерения произведены после сборки зеркала и установки его на штатных лагерах в павильоне МАГИС с помощью индикатора вертикальных перемещений с ценой деления 1 мкм). По испытаниям на твердомере Виккерса (в соответствии с паспортными данными) по ГОСТ 2995-95 при нагрузке 2Н твердость покрытия составила 1100 кгс/мм². Прочность сцепления определялась на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 1497-84 на адгезионных образцах (диаметр шайб 20 мм, диаметр штифта 2 мм) и составила 42 Мпа.

Используемый отражающий элемент имеет сотовую конструкцию, благодаря чему его вес равен 5 кг вместо 13.4 кг при сплошном блоке. Все детали крепления на оси лимбов, их оправ, шестерен привода вращения зеркала, подшипников разгрузочного устройства также изготовлены из инваровых сплавов. В результате суммарный вес центрального узла зеркала в сборе равен 45 кг и возможно выполнять наблюдения без его

разгрузки. Для сравнения скажем, что цельнометаллическое зеркало ГМК в сборе весило 106 кг.

3.1.2 Узел лимба

На телескопе МАГИС использованы достаточно распространенные на данный момент стеклянные лимбы, изготовленные киевским заводом «Арсенал»:

- толщина стеклянного диска - 16 - 20 мм,
- диаметр - 425 мм;
- диаметр разделенной окружности - 412 мм (1 " /мкм);
- цена деления лимба - 5';
- толщина штрихов - 8 - 10 мкм;
- длина штрихов - 1 мм;
- штрихи нанесены на стекло и запущены черной краской.

Впервые лимбы такого типа для меридианного инструмента, по крайней мере, в России были применены Л.А.Сухаревым на телескопе ГМК, изготовленном заводом «Арсенал» в 1957 г. Технологию их изготовления завод разрабатывал при активном участии Л.А.Сухарева. Лимбы прошли успешные многолетние испытания на ГМК [3]. У лимбов МАГИС, как и у лимбов ГМК, были выявлены следующие особенности:

- очень малый уровень случайных ошибок нанесения штрихов - ср.кв. ошибка положения штриха не превышает $\pm 0.04'' - 0.05''$;
- наличие двух систем штрихов, сдвинутых относительно друг друга на некоторый угол (на лимбах МАГИС нечетные штрихи сдвинуты по отношению к четным на $0.75''$);
- систематическая составляющая ошибок диаметров имеет синусоидальную составляющую с амплитудой около $1''$;
- стабильность системы делений стеклянного лимба удовлетворяет требованиям астрометрических наблюдений.

Эти особенности объясняются, во-первых, высоким качеством делительной машины и, во-вторых, технологией деления - нанесением поочередно системы четных и нечетных штрихов, принятой на заводе «Арсенал».

Кроме перечисленных выше свойств, в процессе эксплуатации лимбов ГМК также было выявлено заметное влияние оправы, системы соединения стеклянного диска с осью, на ошибки измерения угла поворота зеркала с их помощью. В используемой на ГМК конструкции диск стекла удерживается в заданном положении только благодаря силам трения при его сжатии с двух сторон металлическими дисками оправы. Это приводит к возникновению напряжений и деформаций стеклянного диска при неправильной сборке или при изменении температуры, при появлении градиентов температуры в стекле, что влияет на положение штрихов.

С целью устранения выявленных негативных моментов была разработана новая оправа лимба, принципиально отличающаяся от оправы лимба ГМК. Был использован принцип самоцентрирующейся оправы, предложенный в свое время Л.А. Сухаревым для астрометрических объективов. Особенность такой оправы состоит в том, что на краю центрального отверстия стеклянного диска лимба изготавливается сферическая фаска, по поверхности которой диск опирается на ответную деталь оправы лимба, также имеющую сферическую фаску, но обратного знака. Таким образом, стеклянный диск центрируется относительно посадочного отверстия оправы (и, следовательно, оси вращения зеркала), не требуется больших усилий для его фиксации относительно деталей оправы, упрощается процесс юстировок лимба. Эффективность примененных решений была подтверждена исследованиями при эксплуатации лимбов на МАГИС.

3.2. Опорная колонна

Опорная колонна, устанавливаемая под блоком зеркала, используется для его подъема-перекладки. Кроме того, на ней монтируется механизм разгрузки узла зеркала. Использована разгрузка рычажного типа, аналогичная той, которая испытана на ГМК [2].

В соответствии с ТЗ, остаточное давление узла зеркала на каждый лагерь должно быть порядка 10 кг. Эта величина является эмпирической, установленной на основании исследований поведения оси вращения многих меридианных кругов классического типа. Считается, что при меньшей нагрузке на лагеря поведение оси становится не достаточно определенным, а при бóльших заметно увеличивается износ поверхности цапф, быстрее появляются пятна коррозии поверхности цапф, соответствующие точкам опоры при длительном нахождении инструмента в одном и том же положении (например, в нерабочем положении). Величина остаточного давления оси на лагеря для разных меридианных кругов колеблется от 10-15 кг до 20-25 кг. Известны опыты наблюдений при нагрузке порядка 40 кг на лагерь.

Подъем и перекладка зеркала МАГИС (поворот его на 180°) используются только в режиме лабораторных исследований или как разовые операции.

Следует отметить, что конструкция колонны полностью аналогична таковой для ГМК. Она изготовлена из литых чугунных деталей и представляет собой весьма громоздкое сооружение. Аналогия с ГМК была сохранена в предположении, что зеркало МАГИС также будет цельнометаллическим и вес всего блока равным 100 кг. Но зеркало из карбида кремния и инваровых сплавов имеет вес около 45 кг. С ним можно работать и без разгрузки, оставаясь в пределах допустимых нагрузок на лагерь даже в рамках прежних представлений. Учитывая тот факт, что новое зеркало имеет цапфы, материал которых значительно тверже закаленной стали и не подвержен окислению, изменение нагрузки на лагерь с 10 кг. до 22.5 кг. повысило стабильность положения оси вращения зеркала и не привело к порче поверхностей цапф.

3.3. Барабаны с микроскопами

Барабаны, предназначенные для крепления микроскопов системы отсчета угла поворота зеркала, должны обеспечивать жесткость крепления микроскопов относительно лимба и друг друга, стабильность всей системы при изменении внешних условий, возможность выполнения юстировок положения микроскопов относительно лимба.

Для обеспечения этих требований использованы барабаны довольно массивной сварной конструкции. Вся система, установлена на центральных столбах.

Предусмотрена возможность закрепления на барабанах индикатора вертикальных перемещений, используемого для исследования фигуры цапф, что облегчает процедуру исследования и контроля качества поверхности цапф.

ПЗС-матрицы микроскопов имеют размер пиксела 10x10 мкм, размер светочувствительной области 4.48 x 3.36 мм. Пятиминутный интервал между штрихами лимба равен 0.3 мм. Используемая оптическая схема такова, что мы имеем изображения 7-8 штрихов на матрице (6-7 интервалов). При этом на матрице изображаются также градусные и минутные (0, 20, 40) наименования измеряемых штрихов.

Масштаб в плоскости измерений таков, что угловой размер пиксела равен 4.8". Отсчет положения штриха интегрируется по его высоте примерно по 100 строкам (на матрицу проецируется не менее половины длины штриха - 0.5 мм). При точности определения положения энергетического центра изображения штриха в строке 0.5 пиксела получим результирующую точность отсчета 0.017 пиксела или 0.08". То есть, при ис-

пользовании весьма грубого алгоритма определения положения центра изображения на матрице мы получим удовлетворительную точность измерений.

3.4. Объектив, труба коллиматора

Как и на ГМК, на МАГИС применена трехэлементная схема трубы телескопа (коллиматора) - объектив, труба, окулярный микрометр являются независимыми узлами, не связанными друг с другом конструктивно (как это делается в классическом меридианном круге). Труба телескопа в этом случае не является несущей конструкцией и выполняет роль светозащитного кожуха. Она устанавливается на независимых опорах, не связанных с основным фундаментом инструмента, на котором устанавливаются столбы узла зеркала, объектива, окулярного микрометра.

Для устранения влияния турбулентции на качество изображений и точность измерений труба МАГИС вакуумируется. Остаточное давление не превышает 1 - 10 мм рт. ст. Герметичность конструкции трубы характеризуется следующими цифрами. После откачки на заводе в конце 1993г. и хранения в таком состоянии вплоть до лета 1997г. давление внутри трубы увеличилось всего лишь до 0.1 атмосферы или 76 мм рт.ст. То есть, за прошедшее время натекание было порядка 20 мм рт.ст. за год.

Торец трубы со стороны объектива закрыт концентрическим мениском и плоско-параллельной пластинкой - со стороны окуляра. На схематическом рисунке ниже изображены оптические элементы трубы телескопа, а в таблице приведены значения радиусов кривизны, толщины и сорт стекол.



Рис. 3.

Здесь 1-2 – первая линза объектива, 3-4 – вторая линза, 5-6 – мениск, 7 – плоско-параллельная пластинка.

номер поверхности	радиус кривизны, мм	толщина, мм	среда, стекло
1	4742.0	25.0	К8
2	-2780.0	2.0	воздух
3	-2780.0	25.0	Ф1
4	-12246.0	50.0	воздух
5	7971.0	25.0	К8
6	7946.0	7846.0	воздух
7	∞	4.0	К8

Как уже отмечалось, объектив МАГИС аналогичен объективу ГМК. Это двухлинзовый астрометрический объектив, ахроматизированный в интервале длин волн полос С - F со световым диаметром 190 мм и фокусным расстоянием 8000 мм. Отличие заключается не только в фокусном расстоянии (для ГМК - 4200 мм), но и в устройстве оправы. На ГМК Л.А.Сухарев применил оправу лагерного типа - линзы объектива удерживаются относительно друг друга специальной оправой, создавая автономный блок, который укладывается в гнездо лагерного типа. Причем, в точках опоры на лагерь оправка имеет вырезы, благодаря которым линзы объектива непосредственно опираются на щечки лагера. Тем самым Л.А.Сухарев стремился исключить влияние металла оправы на поведение объек-

тива. Однако в течение многолетней работы ГМК не было обнаружено фактов, которые бы подтверждали преимущества такого устройства или опровергали его. За исключением, может быть, следующего: было обнаружено, что объектив ГМК, изготовленный в 1955 г., после 25 лет пребывания в лагере приобрел стойкую деформацию линз, в результате чего его пришлось заменить из-за недопустимо большого астигматизма. Вид изображения подтверждал деформацию линз в точках опоры. Возможно, сказался факт длительной опоры линз непосредственно на лагерь. В то же время, оправа лагерного типа позволяет убирать - ставить объектив без заметного влияния этой процедуры на положение визирной оси в пространстве.

Поскольку объектив МАГИС в рабочем положении неподвижен, и закреплен на столбе в вертикальном положении (его оптическая ось горизонтальна), то изготовитель, завод КОМЗ, счел целесообразным использование оправы, имеющей две жесткие точки опоры и одну (верхнюю) - пружинную. При весе линзы 2 - 2.5 кг выбирается пружина с усилием в 3 кг.

Перед объективом устанавливается противоросник, отличительной особенностью которого является наличие пенопластовой термоизоляции толщиной 15 мм. Такого же типа термоизоляция применена и для стального кольца между мениском и объективом, экранирующего этот промежуток.

На КОМЗ был выполнен расчет теплового состояния узла объектива и конца трубы с мениском для оценки влияния теплоизоляции на динамику изменения температуры оптических элементов и возможности их запотевания. Расчеты выполнены для «холодного» и «теплого» режимов, когда суточные колебания температуры составляют соответственно $-20^{\circ}\text{C} \div -35^{\circ}\text{C}$ и $+20^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчетов показали, что применение теплоизолированных противоросника и кольца уменьшает колебания температуры оптики с 15°C до 3°C , перепады температур на линзах при этом менее 1°C . Температура линз в течение всего времени при открытом противороснике выше температуры окружающего воздуха, что уменьшает вероятность запотевания. В отсутствие теплоизоляции суточные колебания температуры оптики достигают 12°C , температура линз в утренние часы опускается ниже температуры воздуха на $2^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C}$.

Эффективность применения концентрического мениска (с радиусом кривизны примерно равным фокусному расстоянию объектива) для изоляции вакуумированного объема трубы также была проверена и подтверждена расчетами оптических аберраций при его смещениях, поворотах, вызванных деформациями стальной трубы (толщина стенок - 15 мм) под действием силы тяжести, температурных градиентов. При величине смещения мениска до 2 мм и углах наклона 5 - 6 минут дуги практически не изменяется распределение энергии в изображении звезды. Такого порядка смещения конца трубы возникают при градиенте температуры на диаметр в 4°C .

На основе расчетов деформаций также были выбраны оптимальные точки опоры для трубы - на расстоянии порядка 2350 - 2450 мм от ее концов.

Эффективности принятых мер уменьшения деформаций, градиентов температуры, минимизации их влияния на качество оптики, соответствие расчетов реальным условиям наблюдений подтверждено опытом работы телескопа МАГИС.

3.5. ПЗС-камера окулярного микрометра

Малый линейный размер светочувствительной области ПЗС-матриц представляет серьезную проблему при их применении для целей современной наземной астрометрии. От телескопа требуется высокая производительность - наблюдения десятков тысяч звезд в час, что обеспечивается как его проникающей способностью, так и наблюдением площадок неба с большим угловым размером. В то же время, требование обеспече-

ния предельной точности координатных измерений предполагает использование объектива с достаточно большим фокусным расстоянием, что приводит к увеличению линейных размеров рабочего поля окулярного микрометра.

Одним из решений этой задачи является создание мозаичных ПЗС-приемников. В случае создания мозаики из отдельных матриц, расположенных относительно друг друга на минимальных расстояниях, определяемых их конструкцией, это решение является самым реализуемым для нас с технологической и финансовой точек зрения.

В конце 1999 года фирма «Заряд» завершила изготовление ПЗС-микрометра из пяти матриц (Рис.4). Конструкция микрометра оригинальна. Аналогов в отечественной астрономии и в зарубежной астрометрии он не имеет.

Основные параметры микрометра следующие:

- количество матриц: 5;
- размеры каждой матрицы в мм 15.7 x 20.7;
- количество пикселей в матрице 768 x 580;
- размер пиксела 27x27 мкм;
- разрядность АЦП 16 бит;
- спектральный диапазон приемников в нм 400 ÷ 1000;
- наборы стеклянных фильтров позволяют наблюдать объекты в полосах В, V, R фотометрической системы Джонсона;
- рабочие режимы: ВЗН и кадровый; режим ВЗН задается для каждой из матриц независимо;
- температурный режим: охлаждение по отношению к температуре воздуха на 60°С;
- линейный размер поля зрения в мм 95.7x15.7
- соответствующий линейному суммарный угловой размер поля зрения по склонению при фокусе телескопа 8000 мм равен 40' и минимальная площадь такого кадра (40'x6'.5) равна 260 .

Микрометр в 2000 году работал на телескопе МАГИС в ГАО РАН.



Рис. 4.

В настоящее время совместно с фирмой «Заряд» ведутся работы по созданию нового более совершенного ПЗС-микрометра.

4. Заключение

Опыт эксплуатации телескопа МАГИС в Пулковской обсерватории в 1999-2006 годах показал правильность технологических и конструктивных решений его узлов.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам ОРИНАТ и ОП ГАО РАН за участие в работах по конструированию и изготовлению узлов телескопа.

Литература

1. **МАГИС.** Пояснительная записка к эскизному проекту. 1989. ГАО РАН.
2. **Г.И. Пинигин.** Исследование пулковского горизонтального меридианного круга Л.А. Сухарева по наблюдениям прямых восхождений. Дисс. канд. ф.-м. н., Ленинград, 1973.
3. **Т.Р. Кирьян.** Исследование системы склонений пулковского горизонтального меридианного круга Л.А.Сухарева. Дисс. канд. ф.-м. н., Ленинград, 1987.
4. **Л.А. Сухарев.** Теория горизонтального меридианного инструмента. Изв.ГАО, № 166, 1960, с. 38-48.
5. **Д.Д. Максумов.** Изготовление и исследование астрономической оптики. ОГИЗ. Ленинград-Москва. 1948, с. 19-33.

PULKOVO MERIDIAN TELESCOPE 'MAHIS'

(Meridian Automatic Horizontal Instrument named after L.A. Sukharev)

Design Features and Functioning Principle

Kanaev I.I., Kiryan T.R., Shkutova N.A., Naumov K.N., Nikiforov V.V., Devyatkin A.V., Shumakher A.V., Rusakov O.P., Kondratenko I.N., Gorshanov D.L.

Summary

A description of the design of the meridian telescope of the horizontal type MAHIS of the Pulkovo astronomical observatory and the principle of its work are given. Issues of a technological and metrological substantiation of a choice of materials for its units are considered. The meridian circle MAHIS is intended for differential definitions of objects coordinates up to 15-17 magnitude on celestial sphere in the bands B, V, R Johnson's photometric system and in an integrated band of sensitivity of the CCD camera.

ПУЛКОВСКИЙ МЕРИДИАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ МАГИС
(Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент им. Л.А. Сухарева).
Автоматическая система управления и первые результаты наблюдений

**Канаев И.И., Кирьян Т.Р., Наумов К.Н., Никифоров В.В., Девяткин А.В.,
Тихонов А.В., Русаков О.П., Кондратенко И.Н., Куприянов В.В.,
Горшанов Д.Л., Фролов В.Н.**

Дано описание автоматической системы управления телескопа МАГИС Пулковской обсерватории. Показана эффективность использования телескопа МАГИС на примере результатов наблюдений рассеянных скоплений.

**1. Аппаратно-программные средства автоматической системы управления (АСУ)
телескопа МАГИС**

В 2005 году на телескопе МАГИС была осуществлена полная автоматизация процесса наблюдений, которая позволила повысить производительность телескопа в несколько раз и, максимально формализовав процесс наблюдений, исключить влияние человеческого фактора на конечный результат.

АСУ телескопа МАГИС предназначена для управления исполнительными и регистрирующими устройствами, контроля их точностных характеристик, управления потоками данных, предварительной обработки полученных результатов.

Аппаратно-программные средства АСУ состоят из следующих систем:

- программные средства АСУ;
- система наведения зеркала (СНЗ);
- автоматическая отсчетная система круга (АОС);
- окулярный микрометр на основе ПЗС-матрицы.

Автоматическая система управления реализована на основе двух персональных ЭВМ IBM PC, соединенных в локальную сеть, и работающих по схеме клиент-сервер с разделением управляющих функций. Серверная часть системы, управляющая ПЗС камерой, во время наблюдений находится в режиме ожидания сигнала на запуск сканирования в ВЗН режиме от клиентской части, которая в свою очередь управляет системой наведения зеркала, автоматической отсчетной системой стеклянного лимба на основе ПЗС камер, осуществляет эфемеридное обеспечение, синхронизирует все процессы с привязкой к шкале звездного времени. Роль наблюдателя сводится лишь к контролю за состоянием работы регистрирующих и исполнительных устройств.

1.1 Программные средства АСУ

Программные средства АСУ МАГИС разработаны на основе интегрированной среды визуального программирования Delphi и предназначены для работы в операционной системе Windows98/XP. Они предоставляют наблюдателю большие возможности по гибкому управлению процессом наблюдений. Благодаря использованию этой среды, ее высокой степени структурированности и модульности, разработчик программного обеспечения имеет широкие возможности по его быстрому наращиванию, учитывающему изменения в АСУ МАГИС.

Интерфейс пользователя представляет собой многооконную диалоговую среду, использующую средства управления, соответствующие стандарту операционной системы Windows, а поэтому интуитивно понятные практически для любого пользователя.

Все процессы управления и регистрации автоматизированы, и наблюдателю необходимо лишь выполнить ряд стандартных процедур: определить метеопараметры, осуществить выбор наблюдаемых объектов из базы данных с последующим вычислением видимых мест с учетом рефракции и получением установочных координат зеркала и, наконец, запустить процесс наблюдения.

1.2 Система наведения зеркала (СНЗ)

Аппаратные средства СНЗ состоят из шагового двигателя, соединенного через редуктор и ведомую шестерню с горизонтальной осью вращения зеркала; одного из отсчетных микроскопов и его осветителя. Управление шаговым двигателем и осветителем осуществляется через параллельный порт компьютера с помощью соответствующего программного обеспечения. Отсчетный микроскоп на основе ПЗС-матрицы управляется с помощью специальной ISA-платы. В настоящее время один шаг шагового двигателя равен повороту зеркала на $38,5''$, максимальная скорость вращения зеркала – 1.25 шаг/мсек. Завершающее вращение при наведении всегда одного направления для устранения влияния люфта привода центрального зеркала.

Программа управления СНЗ включает в себя модули вычисления установочных координат зеркала наблюдаемого объекта, получения изображения с ПЗС-матрицы установочного микроскопа, его обработки до определения текущих координат зеркала на основе анализа взаимного расположения штрихов и оцифровки лимба. Все это в совокупности дало возможность полностью автоматизировать процесс наведения зеркала по зенитному расстоянию на наблюдаемый объект.

1.3 Автоматическая отсчетная система круга (АОС)

АОС состоит из четырех микроскопов на основе ПЗС-матриц, расположенных относительно друг друга под углом 90° , и их осветителей - светодиодных матриц. В автоматическом режиме время опроса всех четырех микроскопов составляет ~ 1 сек. Наблюдатель имеет возможность контролировать изображение каждого микроскопа и получать полный отсчет лимба по каждому микроскопу.

1.4 Система управления окулярным микрометром на основе ПЗС-матрицы

Программа, управляющая работой ПЗС-камеры в режиме временной задержки и накопления - ВЗН, позволяет записывать полученные файлы данных на жесткий диск компьютера, реализует режим вывода наблюдаемых данных на монитор.

При загрузке программы производится очистка всех матриц, и программа переходит в главное окно, позволяющее производить следующие действия:

- Операции для приема изображений с матриц: начало сканирования, очистку матриц, задание вида экрана, запись/останов записи по каждому каналу или всех пяти одновременно (для микрометра из пяти ПЗС-матриц), выбор битовых плоскостей, которые будут отображаться на экране монитора.
- Операции по установке режимов работы программы: независимая установка параметров приема изображений с каждой матрицы - включение/выключение работы канала, скорость сканирования, задание имени файла для приема изображений, задание параметров, характеризующих работу каждой матрицы в отдельности.

Однако в автоматическом режиме наблюдений все эти операции осуществляются без участия наблюдателя.

Для обработки наблюдений на ПЗС-микрометре используется пакет программ «Апекс», разработанный В.В. Куприяновым в Пулковской обсерватории в Лаборатории фотометрии в группе ЗА-320 под руководством А.В. Девяткина, обеспечивающий получение координат (X, Y) звездообразных объектов ПЗС-кадра в долях пикселей матрицы,

позволяющий также производить определение интегральных световых потоков в изображениях звезд и дифференциальную обработку наблюдений вплоть до получения координат (α, δ).

2. Результаты предварительных наблюдений

Следует отметить, что во время наблюдений в 1999 году использовался макетный экземпляр ПЗС-камеры с матрицей инженерного класса, чувствительность которой более чем в два раза хуже матриц рабочего варианта, темновой сигнал значительно выше, отсутствовала температурная стабилизация. Все эти недостатки отсутствуют в рабочем варианте ПЗС-камеры. Кроме того, макетный экземпляр камеры не имел тонкой регулировки скорости переноса заряда в режиме ВЗН, вследствие чего изображения звезд были растянуты вдвое вдоль траектории их движения (размер изображения 4 x 9 пкс).

Была произведена оценка внутренней координатной точности окулярного микрометра: ошибка одного наблюдения, полученная по разностям координат одноименных звезд нескольких вечеров представлена на Рис.1 и Рис.2.

Телескоп МАГИС. Межвечеровая сходимость.

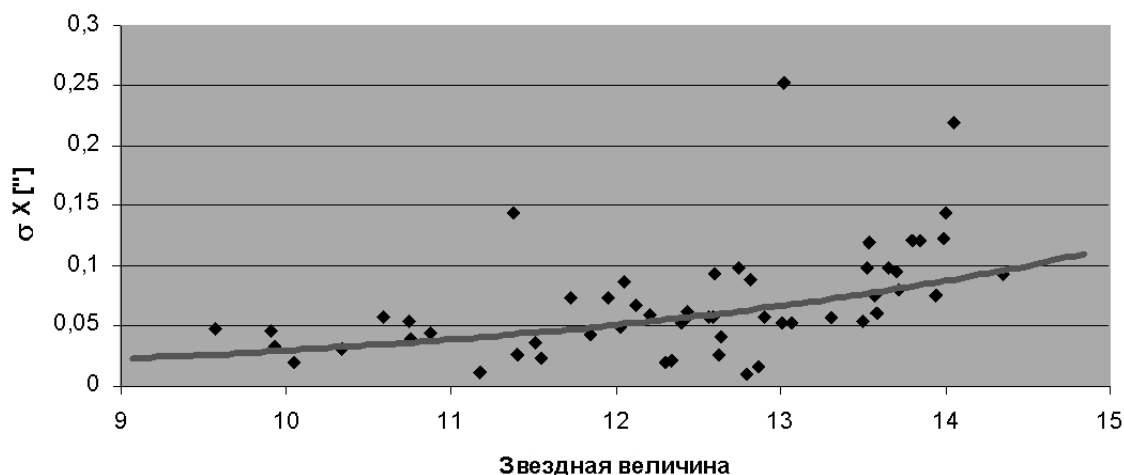


Рис.1.

Телескоп МАГИС. Межвечеровая сходимость.

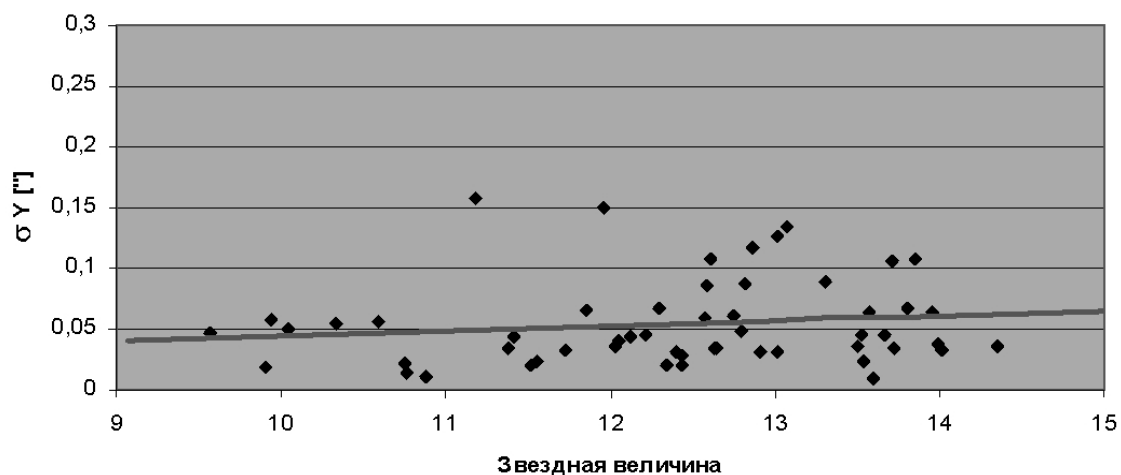


Рис.2.

Различие в графиках обусловлено наличием аппаратной погрешности подачи синхроимпульсов для перевода столбца ПЗС матрицы в выходной регистр, что приводит к искажению формы звезд по оси X, что особенно сказывается на слабых объектах. Этот недостаток отсутствует в ПЗС камере с новым блоком управления, который прошел испытание на МАГИСе в октябре 2005 года.

Учитывая, что ПЗС-матрицы позволяют получать точность координатных измерений до 0.02–0.03 пкс при угловом размере пиксела 0."67 мы рассчитываем получить точность координатных измерений $\pm 0."$ 02–0."03 и точность каталожных положений порядка $\pm 0."$ 01.

В 1998 году был выполнен предварительный расчет предельной звездной величины, доступной для наблюдений на МАГИС. Расчет выполнен с учетом следующих условий.

- Использовалась средняя кривая спектральной чувствительности матриц, среднее значение теплового шума матриц производства предприятия «Электрон» (СПб): кривая реакции ПЗС-матрицы соответствует спектральному интервалу 0.35-1.0 мкм и имеет максимум квантовой эффективности 50%; тепловой шум составляет 100 электронов в секунду на пиксел.
- Учитывалось поглощение и отражение всех элементов оптики телескопа.
- Предполагалось, что размер изображения звезды равен 4" (средний размер турбулентного диска изображений звезд при наблюдениях в Пулковке равен 4" -5").
- Расчет выполнялся для матрицы с размером пиксела 27x27 мкм, размером рабочей площади 768x580 пикселов. Площадь изображения звезды при перечисленных условиях равна 28 пикселям (при фокусном расстоянии объектива 8000 мм).
- Вычисления сделаны для звезды класса G0 IV.
- Фон неба принят равным 19 зв. вел. с квадратной секунды.

Результаты расчетов:

1. Отношение сигнал/шум = 5 при времени накопления 1 секунда для звезд $m = 12$ (минимальное отношение с/ш, подходящее для проведения координатных и фотометрических измерений) и с/ш = 2 для $m = 13$ (отношение, необходимое для уверенного выделения объектов).
2. При времени накопления 26 секунд (время прохождения экваториальной звездой 580 пикселов матрицы) возможны координатные измерения звезд до $m = 14$ и уверенное выделение звезд до $m = 15.5$. Увеличение времени экспозиции в 6-7 раз (до 3-х минут) увеличит указанные значения на $\Delta m = 1$.
3. Применение фильтров В, V, R системы Джонсона приведет к уменьшению предельных звездных величин в пунктах 1, 2 (рассчитаны для наблюдений в интегральной полосе чувствительности матрицы) на $\Delta m = 1.5$.
4. При размере изображения звезды 1.3" (близком к «идеальному») его площадь на матрице равна 4 пикселям и соотношение с/ш = 5 достигается при наблюдении звезд с $m = 16$ при экспозиции 26 секунд.
5. Уменьшение темнового шума матрицы в два раза (до 50 электр./пиксел.сек) увеличит предельную звездную величину на $\Delta m = 0.5$.
6. Использование матрицы с размером пиксела 10x10 мкм ухудшит все приведенные выше значения на $\Delta m = 1.0$, что подтверждает эффективность применения матриц с размером пиксела 27x27 мкм.

Таким образом, результаты расчетов для оптимального варианта параметров оптики, матрицы, атмосферы при времени накопления 2-3 минуты (близполюсная зона) позволяют рассчитывать на наблюдения на МАГИС звезд до 17 звездной величины в

полосах фотометрической системы Джонсона В, V, R и до $m = 18.0-18.5$ в интегральной полосе чувствительности матрицы.

В 2002-2004 годах на телескопе МАГИС проводились наблюдения рассеянных скоплений, которые продолжили более чем 100-летний ряд наблюдений рассеянных скоплений, выполненных на Нормальном Астрографе Пулковской обсерватории. Сейчас такие наблюдения на Нормальном Астрографе затруднены из-за значительной засветки неба со стороны Санкт-Петербурга. Мы исследовали возможности МАГИСа для определения относительных собственных движений звезд в рассеянных скоплениях.

Программа наблюдений включала более 20 рассеянных скоплений, а именно: NGC6205, NGC7789, NGC7142, NGC7092, NGC869, NGC2281, NGC7654, NGC7243, M67 и др. Наблюдения данных объектов проводились в период с сентября 2002 по май 2004, каждое скопление наблюдалось около 10 раз, наблюдения выполнялись без фильтров, большинство из них наблюдались на значительных зенитных расстояниях. Таким образом, между наблюдениями на МАГИСе и Нормальном Астрографе может существовать систематическая ошибка, вызванная хроматической рефракцией, влияние которой изучается в настоящее время.

Используемая в указанный выше период наблюдений ПЗС-камера позволяла получать хорошо измеряемые изображения звезд до 14.5 звездной величины.

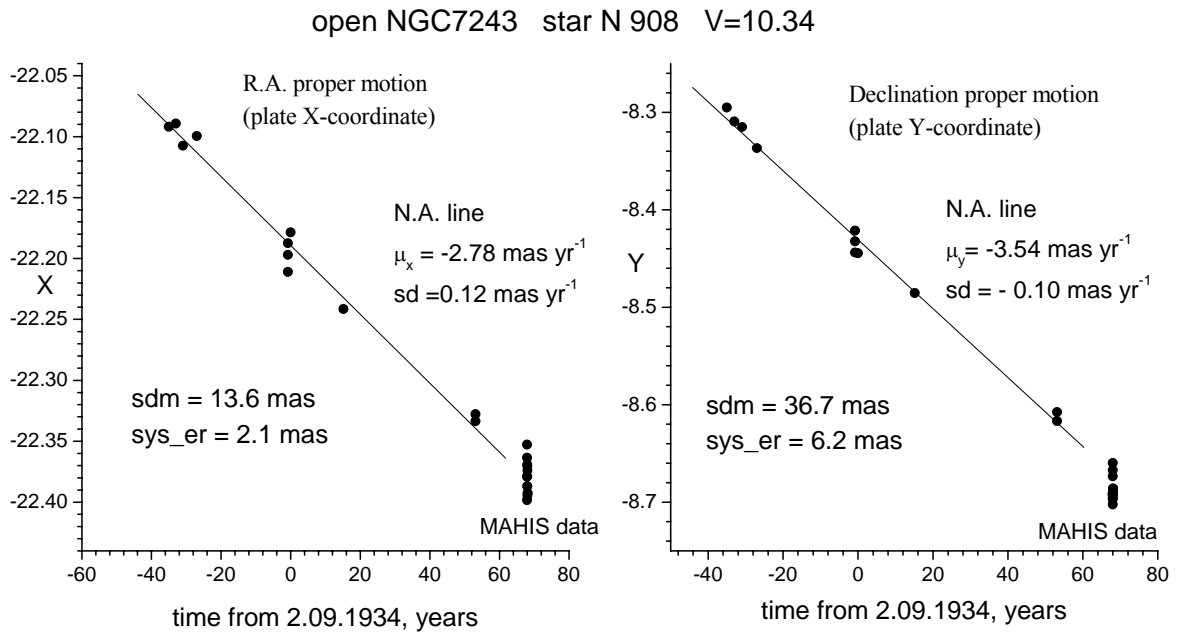
В данной статье мы представляем результаты обработки наблюдений двух рассеянных скоплений NGC7243 и M67.

Наблюдательный материал, полученный до 2000 года, использовавшийся для определения относительных собственных движений, состоял из пластинок, взятых из архива Нормального Астрографа Пулковской Обсерватории. Эти пластинки измерялись полуавтоматической координатной измерительной машиной "Аскорекорд" с точностью около 0.01 мм (масштаб Нормального астрографа 60"/мм). Пластинки с рассеянным скоплением NGC7243 были измерены с помощью PDS 1010 microdensitometer of the Observatorio Nanal (Brazil). Эти данные были любезно предоставлены В.Н. Фроловым (Пулково).

Обработка изображений, полученных на МАГИСе, была сделана по оригинальным программам, разработанным авторами. Координаты изображений звезд определялись посредством двумерного профиля Лоренца. Точность измерений положений звезд около 0.02". Использовался стандартный астрометрический метод редукции координат звезд: все пластинки Нормального Астрографа и ПЗС-изображения МАГИСа приводились к одной средней эпохе для всех серий (3.02.1978 для NGC7243 и 2.09.1934 для M67).

Опорные звезды выбирались со звездными величинами 11.5 - 13.0 (V) с равномерным распределением в измеряемой области и с малыми относительными собственными движениями, чтобы быть уверенными, что они с высокой степенью вероятности входят в состав скопления.

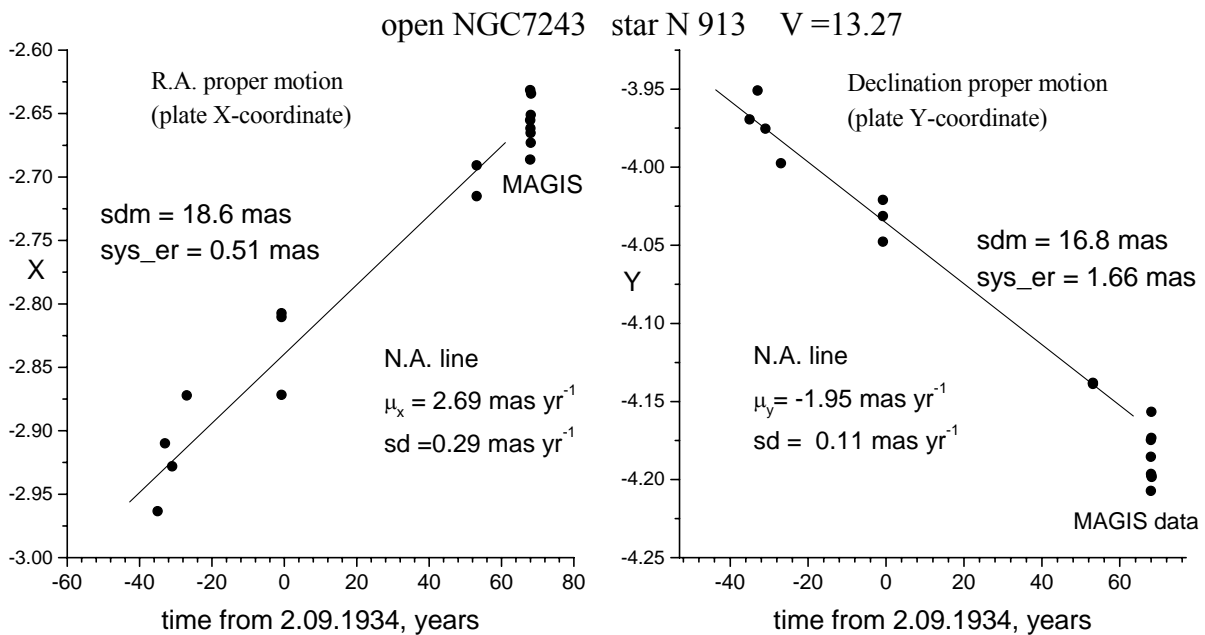
Для иллюстрации возможностей МАГИСа здесь представлены звезды со значительными относительными собственными движениями (две из NGC7243 и одна из M67). Результаты показаны на рисунках 4-6. Сглаживающая прямая (МНК) проведена для координат звезд пластинок Нормального Астрографа.



sdm – стандартное отклонение координат звезды в системе МАГИСа в различные ночи наблюдений (2002-2003 г.)

sys_er – отклонение средних координат МАГИСа от аппроксимирующей линии Нормального Астрографа относительных собственных движений для той же звезды.

Систематическое отклонение на пластинке средних положений МАГИСа от линии Нормального Астрографа значительно больше (в 3 раза) по координате Y (склонений), чем по координате X (прямое восхождение). Вероятнее всего это вызвано хроматической рефракцией.



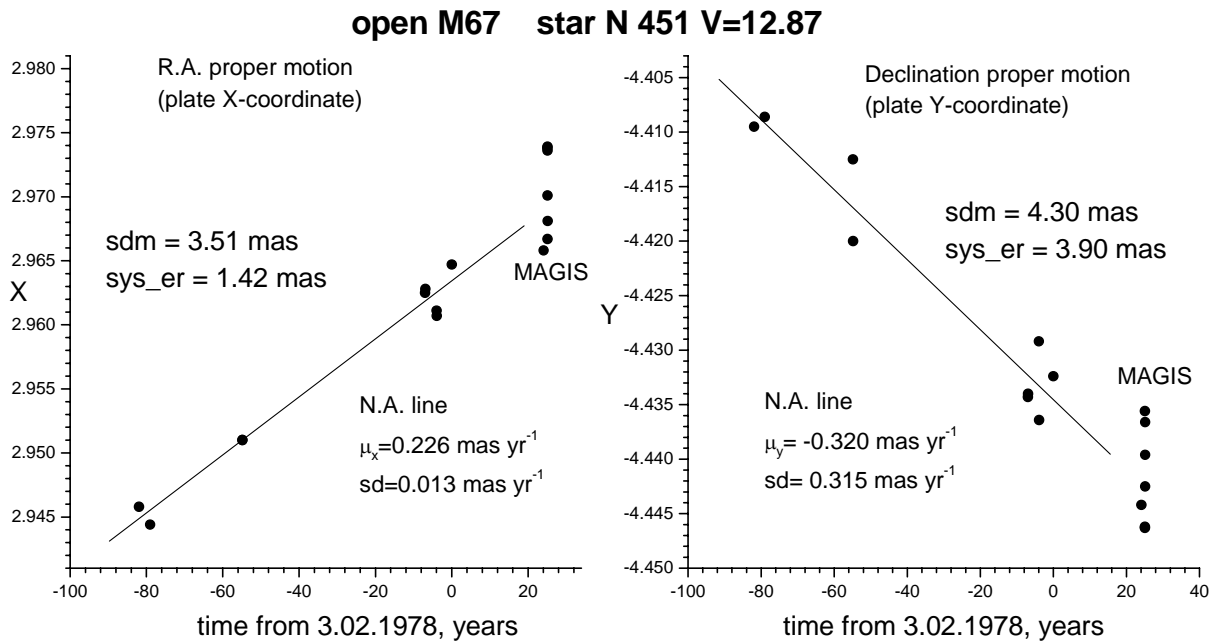


Рис.5.

Предварительные результаты показывают маленькие различия ($\text{sys_er} \sim 0.5\text{--}6 \text{ mas}$) между средними положениями звезд в системах МАГИСа и Нормального Астрографа. Ошибка МАГИСа определения положений звезд ($\text{sdm} \sim 3\text{--}0 \text{ mas}$), полученная для одинаковых полей в различные ночи, достаточно мала. Собственные движения около 20 звезд, вычисленные с помощью средних положений МАГИСа (вместе с точками Нормального Астрографа) показывают хорошее соответствие с ранее полученными значениями другими авторами (В.Н. Фролов и др.).

Заклучение

Наблюдения на МАГИСе могут успешно продолжать серию более чем столетних пулковских наблюдений Нормального астрографа, особенно для определения относительных собственных движений звезд.

PULKOVO MERIDIAN TELESCOPE ‘MAHIS’ (Meridian Automatic Horizontal Instrument named after L.A. Sukharev) Automatic Control System and the First Results of Observations

**Kanaev I.I., Kiryan T.R., Shkutova N.A., Naumov K.N., Nikiforov V.V., Devyatkin A.V.,
 Shumakher A.V., Rusakov O.P., Kondratenko I.N., Gorshanov D.L., Frolov V.N.**

Summary

A description of an automatic control system of the telescope MAHIS of the Pulkovo astronomical observatory is given. Efficiency of use of the telescope MAHIS is shown within the context of open cluster observations.

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЗЛОВ МИКРОМЕТРЕННЫХ ПОДАЧ МОНТИРОВКИ АПШ-5 АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЗЕРКАЛЬНОГО АСТРОГРАФА ЗА-320М

Кулиш А.П., Девяткин А.В.

Описаны кинематические схемы приводов поворотов осей (часовой и склонений) широтной головки типа АПШ. Приведен анализ работы звеньев механизмов микрометрических подач осей. Представлен осуществленный вариант усовершенствования шарнирных связей механизмов микрометрических подач с системами приводов осей широтной головки монтировки АПШ-5 автоматизированного астрономического комплекса зеркального астрографа ЗА-320М.

В предыдущей статье [1] было дано краткое описание штатных механизмов микрометрических подач (ММП) осей широтной головки (ШГ) монтировки АПШ-5 и сообщено о той модернизации, которой эти механизмы были затронуты с целью их включения в общую систему автоматизированного комплекса ЗА-320. Тогда были модернизированы только приводные и страховочные устройства: к ходовым винтам механизмов пристыкованы шаговые электродвигатели и поставлены ограничители перемещений ходовых гаек (концевые выключатели).

Однако эксплуатация комплекса, показавшая в целом его устойчивую работу, выявила ряд проблем при использовании ММП (при гидировании и тонких доворотах осей после их грубых поворотов). Эти проблемы проявлялись в нарушении плавности ведения, кратковременных остановках поворотов осей и, после этого, скачкообразных изменениях в показаниях лимбов угломерных устройств. Никакой периодичности сбоев при этом не наблюдалось. Обследование пар винт-гайка ММП было лишним, хотя оно и было проделано, так как дефект (или дефекты) в этих парах давали бы периодически повторяющиеся погрешности. Контроль работы приводных шаговых электродвигателей показал их безукоризненную работу. Ни пропусков импульсов, подававшихся на них, ни неравномерности их подач отмечено не было.

При анализе цепи звеньев механических систем, участвующих не только в микрометрических подачах, но и в рабочих и установочных поворотах осей широтной головки (ШГ) монтировки АПШ-5 и сопряжений звеньев, были выявлены существенные конструктивные подробности некоторых узлов этих систем и нюансы во взаимодействии звеньев, их составляющих. ММП не автономны. Они являются составными частями в механизмах передач вращений (грубых, тонких, суточных – для полярной оси) осям ШГ. Поэтому рассматривать работу и поведение ММП в них (механизмов передач вращений) любой из осей ШГ в отрыве от его кинематической связи с этой осью невозможно. Полагаем, что для понимания этого будет нелишним привести здесь и проанализировать принципиальную кинематическую схему одной из осей ШГ. Тем более, что в известной нам литературе по телескопостроению подробностей по данной теме нами не обнаружено.

Для примера рассмотрим наиболее насыщенную элементами принципиальную кинематическую схему системы приводов полярной оси ШГ монтировки АПШ-5 (рис.1, масштаб не соблюден).

Ось 17 – полярная (перпендикулярна плоскости чертежа) – может свободно поворачиваться внутри червячного колеса 1, зацепленного с главным червяком 2. Эта червячная пара 1-2 является последней в системе привода суточного (часового) поворота полярной оси. К оси 17 жестко прикреплен кронштейн-рычаг 18, несущий на свобод-

ном конце ММП. В упрощенном виде ММП состоит из корпуса 4, жестко закрепленного на кронштейне 18, ходового винта 6, ходовой гайки 3 и приводного электродвигателя Д. Системой шарнирных связей 7-8-10-11 ходовая гайка 3 ММП соединена с другим жестким рычагом – 19, и закрепленным на нем хомутом 16, замыкающим кинематическую цепь данной схемы. Хомут 16 охватывает тормозной барабан 15, являющийся конструктивным элементом червячного колеса 1.

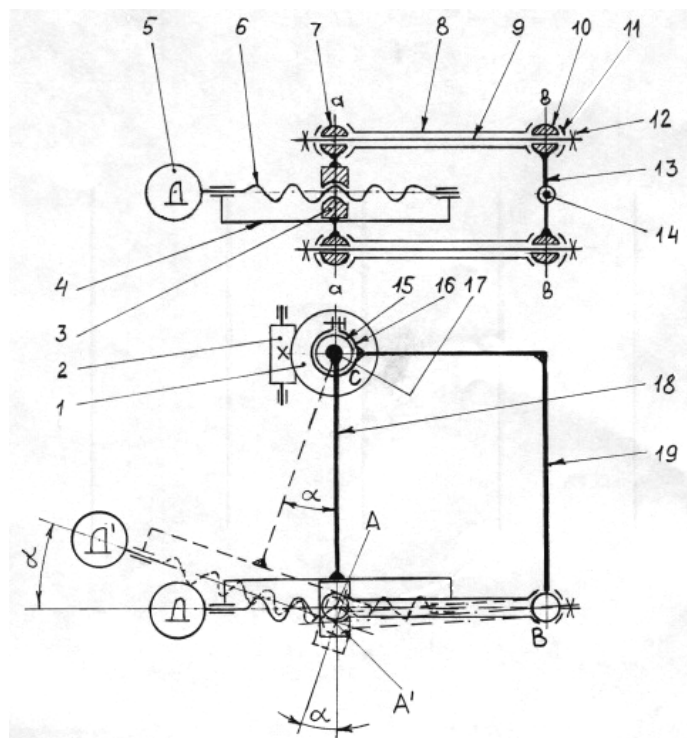


Рис. 1.

Так составленная система звеньев образует плоскую замкнутую кинематическую цепь с вращательными парами А, В и С, в которой звено АС – мнимое, переменной длины, т.к. вращательная пара А подвижна относительно вращательной пары С. Если хомут 16 разжат, т.е. не сцеплен с барабаном 15 червячного колеса 1, система АВС может свободно вращаться вокруг точки С вместе с осью 17. Таким образом производятся грубые (установочные) повороты полярной оси 17 ШГ. Если хомут 16 сжат, система сцепляется через барабан 15 с червячным колесом 1 и, при вращении червяка 2, сообщает полярной оси 17 суточный поворот.

Кинематическая схема приводов оси склонений ШГ, в основном, аналогична кинематической схеме приводов полярной оси с теми отличиями, что в ней отсутствует червячная пара 1-2, барабан 15 закреплен на корпусе оси склонений, а кронштейн-рычаг 18 жестко связан с осью 17, которая должна быть названа, по принадлежности схемы, осью склонений.

Микрометрические подачи (повороты) полярной оси 17 производятся узлом ММП. Их смысл и эффективность проявляется при сцеплении представленной кинематической цепи с червячным колесом 1. При работе ММП в действие включается система ее шарнирных связей с рычагом 19. Об этой системе ранее в тексте было упомянуто вскользь, и именно сейчас мы акцентируем на ней внимание, т.к., по нашему мнению, она есть тот “корень зла”, который наносит вред качеству микрометрических подач трубе телескопа.

Система связей ММП с рычагом 19 представляет собой следующее. Ходовая гайка 3 ММП и рычаг 19 несут на себе по две шаровых опоры, соответственно 7 и 10. Шаровые опоры 7 жестко соединены с ходовой гайкой 3 (в натуре они изготовлены как единые с гайкой детали) и расположены симметрично относительно оси ее (гайки) резьбового отверстия. Ось, соединяющая центры шаровых опор 7, перпендикулярна оси ходового винта 6. Противоположные им шаровые опоры 10 размещены по краям коромысла 13, смонтированного на оси 14 рычага 19. Расстояния между центрами шаровых опор 10 равно расстоянию между центрами шаровых опор 7. Центры шаровых опор 10 симметричны относительно центра их качания на оси 14. Между шаровыми опорами 7 и 10, “в два этажа”, помещены дистанционные трубки 8 равной длины. Их торцы имеют внутренние конусные заточки, которыми они самоустанавливаются на шаровых поверхностях противоположных опор 7 и 10, будучи притянутыми к ним стержнями 9. Для пропуска стержней 9 в шаровых опорах 7 и 10 имеются встречные соосные проходные отверстия. Стягивание звеньев 7, 8 и 10 стержнями 9 производится гайками 12 через конусные шайбы 11. Размещение шаровых опор 10 на имеющем возможность покачиваться на оси 14 коромысле 13 применено конструктором этой системы для того, вероятно, чтобы была возможность компенсировать разницу в длинах дистанционных трубок 8 в пределах технологического допуска при их изготовлении.

Отработка ММП микрометричных подач оси 17 происходит следующим образом. При левом вращении электродвигателем Д ходового винта 6 (с правым направлением витков резьбы) он (винт) вывинчивается из ходовой гайки 3. Поскольку ось а-а шаровых опор 7 на ходовой гайке 3 (точка А) закреплена ($AB = \text{const}$) и может только поворачиваться, а точка В системы неподвижна относительно барабана 15, ходовой винт 6 как бы отталкивается от ходовой гайки 3, разворачивая ее вместе с шаровыми опорами 7 в шарнирных отверстиях, составленных прижатými к их (опор 7) поверхностям, с двух сторон, конусами: дистанционных трубок 8, с одной стороны, и шайб 11 – с другой. Поворот ходовой гайки 3 позволяет отклониться ММП, связанному с ним кронштейну-рычагу 18 и, соответственно, полярной оси 17 по часовой стрелке. На схеме это отклонение на угол α показано пунктирными линиями. При правом вращении ходового винта 6 ММП произойдет противоположный поворот шаровых опор 7 в их шарнирных отверстиях, а ММП относительно центра С повернется вправо, повернув полярную ось 17 против часовой стрелки (не показано).

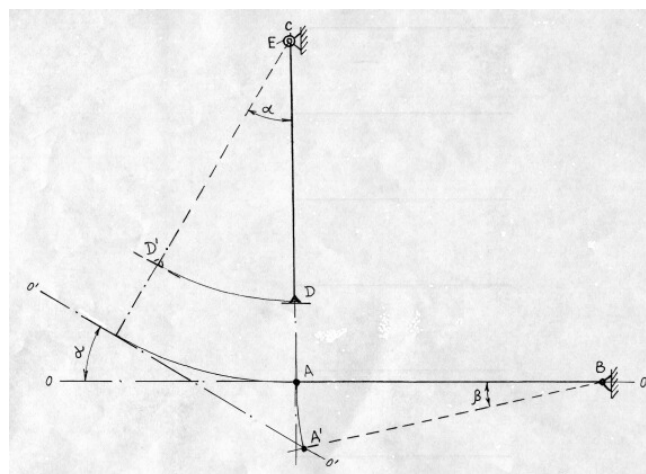


Рис. 2.

При повороте ММП на угол α ходовая гайка 3 вместе с шаровыми опорами 7, следуя за поворотом на тот же угол ходового винта 6 не только повернется вокруг своей

оси а-а, но и изменит свое место положения. Ее центр из точки А переместится в точку А', изменив длину звена АС, но не удалившись при этом от шарнирной пары 10 (пары 7 и 10 притянуты друг к другу стержнями 9). Это хорошо видно на вспомогательном рис.2, на котором представлена схема изменения геометрии плоской замкнутой кинематической цепи связи ММП со звеньями общей кинематической схемы приводов полярной оси ШГ монтировки (рис.1). На рис.2: точки А,В и С – центры шарнирных пар звеньев, точка D – место жесткой связи рычага поз.18 (рис.1) с корпусом 4 (рис.1) ММП, ось О–О – ось ходового винта 6 (рис.1) ММП, шарнир Е – имитация тормозного барабана 15 (рис.1).

Обратимся вновь к рис. 1. Контакты конических поверхностей дистанционных трубок 8 и шайб 11 со сферическими поверхностями шаровых опор 7 и 10 происходят не по поверхностям, а по узким кольцевым дорожкам. Поскольку поворот шаровых опор 7 вокруг их оси а-а относительно обхватывающих их пар 8-11 и поворот противоположных пар 8-11 относительно неподвижных шаровых опор 10 происходит в плоскостях взаимно перпендикулярных осям контактирующих поверхностей (кольцевых дорожек), в моменты их перемещения друг относительно друга возникает эффект юза – поперечное скольжение с сухим, обычно, трением, без вращения указанных контактирующих кольцевых дорожек. В этот момент в зонах контактов происходят явления зацепов на неровностях сфер, заедания, а то и задиры. Возможно возникновение упругих изгибных деформаций дистанционных трубок 8. Многие из перечисленного вызывается также отклонениями форм сфер 7 от оптимально предполагаемых и чистоты механической обработки их поверхностей и прочими технологическими несоответствиями.

Кроме того, на плавность (равномерность) скольжения кольцевых дорожек по сферам значительное влияние оказывают усилия сжатия – смыкания попарных шарнирных соединений стержнями 9. Усилие сжатия не должно превышать допускаемой величины, ибо ее превышение вызывает в зонах контактов, так называемые, контактные напряжения материалов, выше допускаемых. Это приводит к смятию материалов в зонах контактов – повреждению поверхностей и к их преждевременному износу. Последний вызывает образование зазоров в системах и, как следствие из этого, “мертвый ход” (“болтанку”) трубы телескопа на осях. Неконтролируемое по допускаемому усилию (для контроля нужно иметь специальный инструмент – ключ с динамометром) новое стягивание шаровых опор приводит к усугублению положения. Практически не отзываются шарнирные звенья на перепады температур воздуха, т.к. при этом удлинение или укорочение стержней 9 компенсируются однонаправленными деформациями дистанционных трубок 8. К сожалению, в разделе “Уход за монтировкой” описаний монтировок типа АПШ вопросу ухода за шарнирными системами не уделено ни малейшего внимания. Кстати, ничего не сказано в упомянутых описаниях и о методике регулировки шарнирных систем.

Практически не чувствительны к явлениям юза в шарнирных сочленениях 7 и 10 звеньев проанализированной нами плоской кинематической цепи приводов осей ШГ были ее штатные угломерные устройства при ручном управлении ММП и визуальном способе отсчета кругов. Как известно, ШГ монтировки АПШ-5 (и других монтировок этого типа) оборудована штатными кругами, разделенными через 5^m на часовом круге и через 1° - на круге склонений. При таких кругах навести телескоп на заданный объект точнее 10' не представляется возможным. Конструктивные и, может быть, технологические несовершенства, а точнее несоответствия, проявились при применении на осях ШГ более точных угломерных устройств [2] при автоматизации управления телескопом, когда отсчет лимбов производится с точностью до секунд. Поэтому усовершенствование связей ММП с рычажными системами приводов ШГ было крайне необходимо.

Вид конструктивного решения шарнирных связей ММП осей ШГ монтировок типа АПШ (и оси склонений монтировки МТМ-500) показан на рис.3. Здесь: 1 – механизм микрометричных подач (ММП), 2 – сжимные гайки, 3 – конусные шайбы, 4 – шаровые опоры на ходовой гайке ММП, 5 – стяжные стержни, 6 – дистанционные трубки, 7 – коромысло рычага (поз. 19 на рис. 1), 8 – шаровые опоры на коромысле 7.

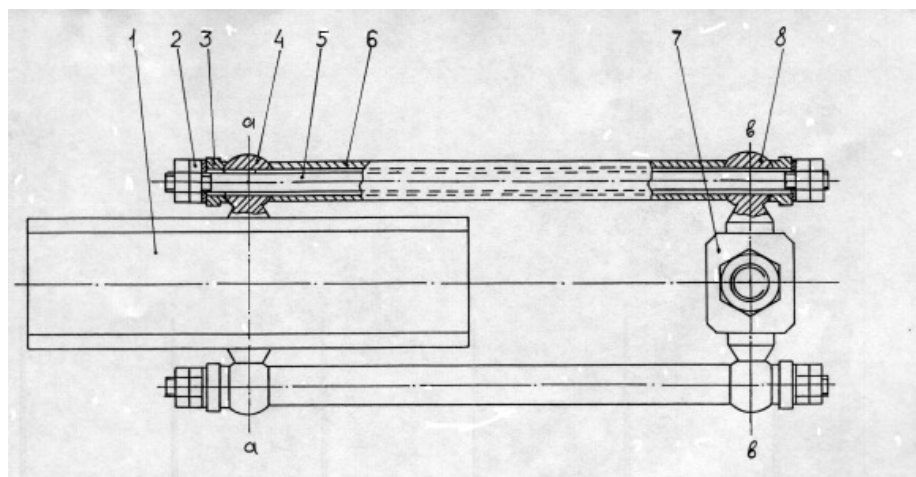


Рис. 3.

Поправить положение с тем, что происходит в системах шарнирных связей штатного варианта можно двумя путями. Один путь – кардинально переконструировать шарнирные узлы, т.е. заменить конические поверхности опорных торцов дистанционных трубок 6 и шайб 3 на сферические с притиркой их к сферам шаровых опор 4 и 8. Но этот путь долог и дорог. Ведь мы не знаем истинных форм шаров 4 и 8 и не можем их проверить, и даже поправить в случае надобности, т.к. общие оси а-а и б-б указанных пар шаров технологически не зацентрированы. Поэтому данный путь мы посчитали неприемлемым на нынешнем отрезке времени, т.к. пришлось бы изготовить новые детали с шаровыми опорами 4 и 8, и, в добавок к этому, разобрать ММП, чтобы извлечь из них ходовые винты, по которым производственники могли бы также изготовить точные беззазорные резьбовые отверстия в ходовых гайках – принадлежностях деталей с шаровыми опорами 4.

Мы пошли по другому пути – по пути создания “облегченного” варианта усовершенствования штатных шарнирных связей применительно к существующей конструкции, с минимумом доработок. Этот вариант представлен на рис.4. Здесь: позиции 1..4, 6..8 идентичны названным на рис.3 остались без изменений (штатные). Система дополнена пружинами сжатия 10, центрирующими пружины шайбами 9 и 12 и антифрикционными (проскальзывающими) шайбами 11. Стержни 5, по сравнению со стержнями 5 на рис.2, удлинены и снабжены сквозными отверстиями “с” на концах со сторон размещения пружин 10.

На наш взгляд, достоинство этой сконструированной системы в том, что при стягивании опор 4 и 8 гайками 2, мы можем контролировать сжимающие усилия по величинам деформаций пружин 10, по усилиям на пружины 10 от моментов трения в опорах соответствующих осей и от внешнего воздействия на телескопическую трубу, например, от ветровой нагрузки на нее. Пружины 10, кроме того, являются элементами системы, демпфирующими неплавность, скачкообразность скольжения (юз) торцов дистанционных трубок и шайб 3 по поверхностям шаровых опор 4. Отверстия “с” в стержнях 5 служат для предотвращения их поворотов при навинчивании гаек 2 (в них вставляется шпилька).

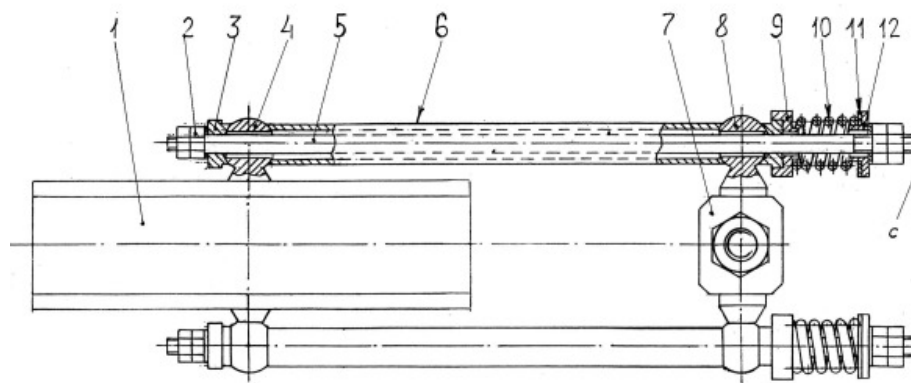


Рис. 4.

Детали для усовершенствования систем обеих осей ШГ по этому варианту были изготовлены в ОП ГАО и смонтированы по месту. Годичный срок эксплуатации телескопа с усовершенствованными системами шарнирных связей ММП с кинематическими схемами осей телескопа дал положительный результат: улучшилась плавность поворотов осей, уменьшились количества и величины скачков показаний лимбов угломерных устройств, сократились периоды установок трубы телескопа на требуемые небесные объекты.

Считаем, что усовершенствование шарнирных систем с объединением обоих предложенных нами вариантов в один дал бы больший положительный эффект. Но это – дело будущего.

Авторы выражают свою благодарность начальнику цеха ОП ГАО А.А. Ильину за содействие в осуществлении данного усовершенствования.

Литература

1. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Грицук А.Н., Шумахер А.В.* // Система наведения зеркального астрографа ЗА-320, Изв.ГАО, 2000, №214, с.523-532.
2. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С.* // Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320М II, Изв.ГАО, 2004, №217, с.505-530.
3. *И.И. Артоболевский* // Теория механизмов и машин, ГИЗ технико-теоретической литературы, М. 1953, с.712.
4. *Параллактическая монтировка АПШ-5.* Описание и руководство к использованию. ГОМЗ, 1954, 17 с.

MODERNIZATION OF MICROMETER MOVEMENT OF APSh-5 MOUNTING OF ZA-320 AUTOMATIC MIRROR ASTROGRAPH

Kulich A.P., Devyatkin A.V.

Summary

The cinematic schemes of axis drives (for the hour and declination axes) of APSh-type latitude head are described. The analysis of work of mechanism units of micrometer movements of axes is also given. A description of the performed improvement of articulate links between micrometer movement mechanisms and systems of the axes movement of the head of APSh-5 mounting of ZA-320 automatic mirror astrograph is presented.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

Малкин З.М.

В работе приводятся некоторые статистические характеристики астрометрических и геодезических РСДБ-наблюдений. История этих наблюдений охватывает интервал с 1979 г. до наших дней. Всего за это время проведено почти 10 тысяч наблюдательных сессий, в которых получено более 6 миллионов наблюдений на более чем 160 станциях. Приведенная статистика показывает прогресс в точности наблюдений и определяемых параметров, а также может служить материалом для построения систем моделирования РСДБ-наблюдений.

История РСДБ-наблюдений началась в 60-х годах прошлого века, и с самого начала эти наблюдения начали вносить все больший вклад в решение как астрофизических, так и астрометрических и геодезических задач. Поскольку, по своей сути, качество научных результатов напрямую зависит от количества участвующих в наблюдениях станций и длин баз между ними, наиболее ценный наблюдательный материал может быть получен только при широкой международной кооперации. Для лучшей организации и координации международных астрометрических и геодезических проектов в области астрометрии, геодезии и геодинамики в 1997-98 гг. была проведена работа по созданию соответствующей международной службы, которая получила название IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) [1]. В задачи этой статьи не входит описание истории создания и деятельности IVS. Здесь только отметим, что одной из важных составляющих ее деятельности является архивирование РСДБ-наблюдений и обеспечение к ним открытого доступа. В настоящее время архив IVS, также как результаты научного анализа и многие другие полезные и интересные материалы, можно найти на Интернет-сайте IVS <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>. Все результаты настоящей работы получены на материале этого архива.

Первая РСДБ-сессия, хранящаяся в архиве IVS была проведена 3 августа 1979 г. на трех американских станциях HAystack, NRAO 140 и OVRO 130 (здесь и далее приводятся имена станций по каталогу IVS). Во время этой сессии в течение 63 часов было получено 525 наблюдений. В дальнейшем стандартной длительностью сессии стало 24 часа. Кроме таких стандартных сессий проводятся также короткие сессии длительностью 1-2 часа (intensives) для оперативного определения всемирного времени (UT1) – одного из важнейших приложений РСДБ.

Поскольку основная научная информация получается из суточных серий наблюдений, дальнейшая статистика относится именно к ним, хотя деление сессий на суточные и intensives иногда условно. Однако, чтобы не забывать немалый труд, вкладываемый в программы наблюдений типа intensives, приведем основные данные по этим сессиям. Всего было проведено более 5300 сессий (80 тыс. наблюдений), в основном на базах WETTELL–NRAO 20 (19.4 тыс. наблюдений), WETTZELL–WESTFORD (21.4 тыс.) и WETTZELL–KOKEE (21.9 тыс.). В последние годы такие наблюдения проводятся ежедневно на базах WETTZELL–KOKEE с периодическим подключением российской станции SVETLOE (по будним дням) и WETTZELL–TSUKUB32 (по выходным дням).

На момент написания этой статьи (сентябрь 2006 г.) в архиве IVS хранились данные о 4241 суточной сессии (за таковые приняты все сессии продолжительностью не менее 18 часов), во время которых было получено 6.2 млн. наблюдений. Часть из

них была забракована при корреляционной обработке, пригодными для научного анализа являются 5.3 млн. наблюдений, что является выдающимся результатом многолетней работы астрономов и радиофизиков, инженеров и программистов, персонала станций и корреляторов! Эти наблюдения были получены на 157 станциях (формально в файлах наблюдений присутствуют 163 станции, но 6 из них являются просто вариантами регистрирующего оборудования) и 1442 базах. Всего было наблюденно 4363 источника (основная часть из них – во время пяти специальных экспериментов VLBA Calibrator Survey, предназначенных для астрометрического обзора неба и получения координат большого числа радиоисточников с точностью порядка 1 мс дуги). На рис.1 приведена динамика основных статистических характеристик наблюдений.

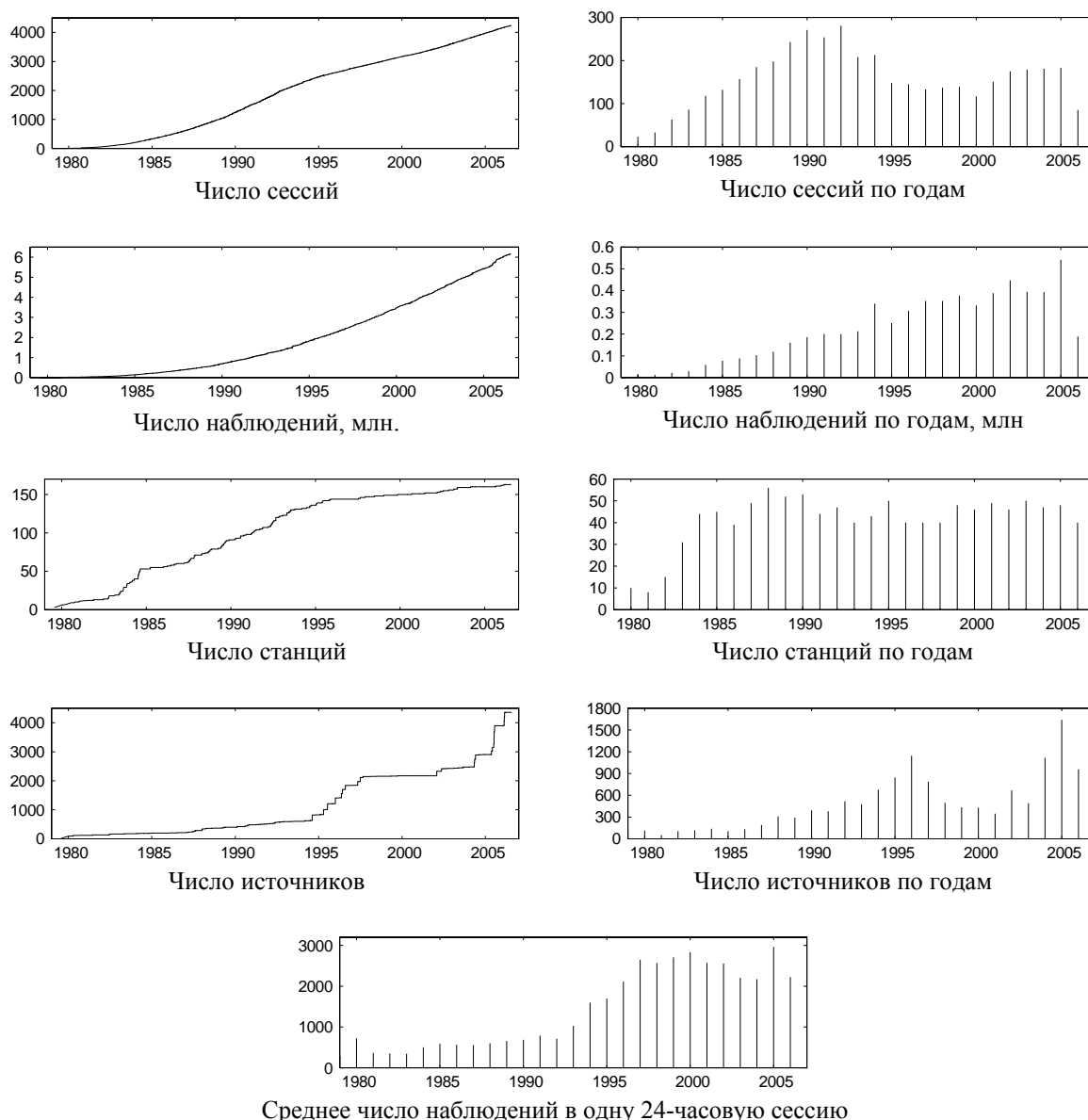


Рис 1. Динамика статистических характеристик РСДБ-наблюдений.

Суммарная продолжительность всех сессий составила более 4300 дней, или почти 12 лет непрерывных наблюдений! Интересно видеть, какое время потребовалось для достижения каждого миллиона наблюдений (табл. 1). Данные рис. 1 и табл. 1

показывают, что существующая сеть станций IVS, по-видимому, близка к насыщению из-за ограниченности ресурсов наблюдательных станций и корреляторов. На решение, в частности, этой проблемы направлена работа комитета IVS VLBI2010.

Таблица 1. Динамика получения каждого миллиона наблюдений.

Миллион:	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Интервал дат	1979.6–1991.6	–1995.6	–1998.7	–2001.4	–2003.9	–2006.1
Продолжительность, лет	12.0	4.0	3.1	2.7	2.5	2.2
Число сессий	1671	892	430	355	438	384

Некоторые экстремальные величины выглядят следующим образом:

Максимальное число станций в одной сессии	20
Максимальное число баз в сессии	188
Максимальное число источников в сессии	268
Максимальное число наблюдений в сессии	34221

Ниже приведены источники, станции и базы с наибольшим числом наблюдений.

0552+398	216325	GILCREEK	1170198	WESTFORD – WETTZELL	177287
0923+392	216325	WETTZELL	1158945	GILCREEK – WESTFORD	156474
0059+581	205268	WESTFORD	996359	GILCREEK – KOKEE	135522
1739+522	165480	KOKEE	657071	GILCREEK – WETTZELL	135168
0851+202	148997	NYALES20	552760	NYALES20 – WETTZELL	122829
1803+784	148225	LA-VLBA	360716	FORTLEZA – WETTZELL	72861
1357+769	148141	ONSALA60	359559	MATERA – WETTZELL	71388
0528+134	124584	ALGOPARK	357267	ONSALA60 – WETTZELL	71117
1741-038	121570	MATERA	344782	GILCREEK – NYALES20	70691
1308+326	110746	FD-VLBA	344583	HRAS 085 – WESTFORD	70233

На рис. 2 приведена статистика наблюдений по сессиям (каждая точка соответствует одной сессии). По этим данным можно видеть, что число наблюдений и станций мало менялось за последние 10-12 лет, что свидетельствует в пользу вывода об исчерпании возможностей существующей РСДБ-сети, что отмечалось выше. В то же время заметен рост числа источников, наблюдавшихся в одну сессию, что объясняется предпринятой IVS в последние годы работой по вовлечению в регулярные наблюдения большего числа источников для уточнения небесной системы координат ICRF.

На рис. 3 показаны ошибки радиоинтерферометрических задержек и их производных, которые получены во время корреляции. Обращает на себя внимание увеличение в последние годы ошибки производной от задержки (частоты интерференции). Скорее всего, это объясняется тем, что по мере повышения чувствительности РСДБ-систем для увеличения плотности наблюдений постепенно уменьшается длительность сканов.

На рис. 4 показана зависимость точности определения координат полюса от различных факторов. Некоторые графики повторены с выделением данных за последние годы. Для других ПВЗ зависимости имеют такой же характер. На рис. 5 приведены ошибки определения длин некоторых баз по данным пилотного проекта IVS "Baseline lengths" (<http://vlbi.geod.uni-bonn.de/baseline-project/index.php>).

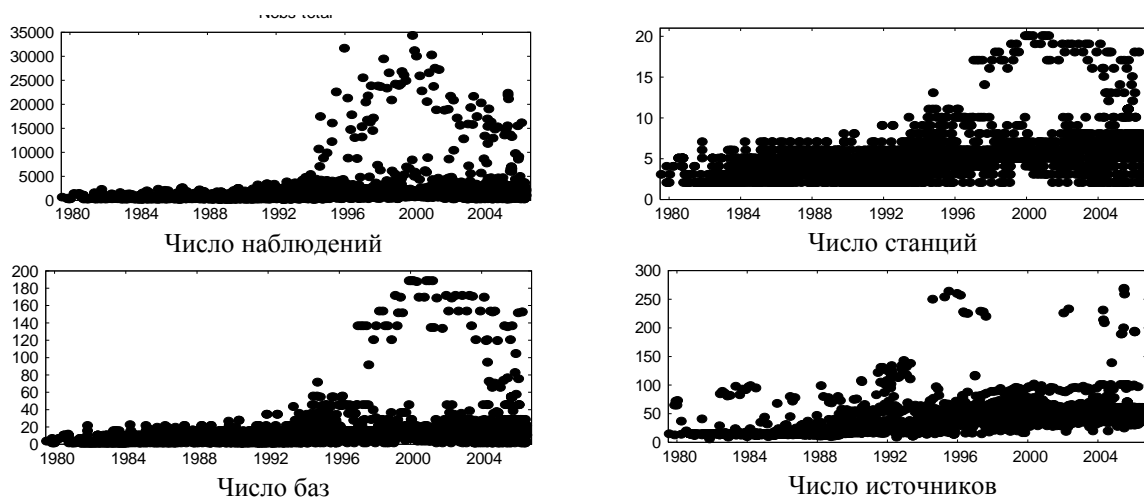


Рис. 2. Статистика наблюдений по сессиям.

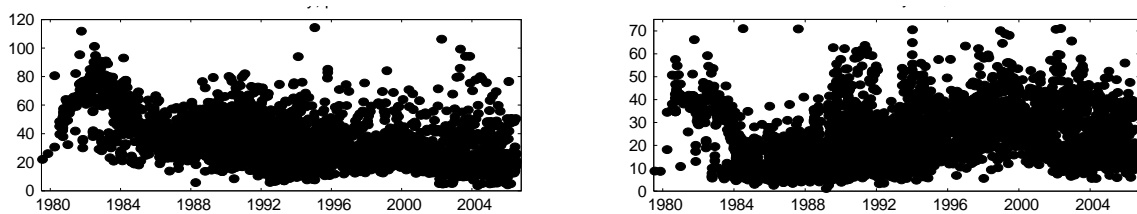


Рис. 3. Ошибки задержек (слева, пс) и их производных (справа, фс/с).

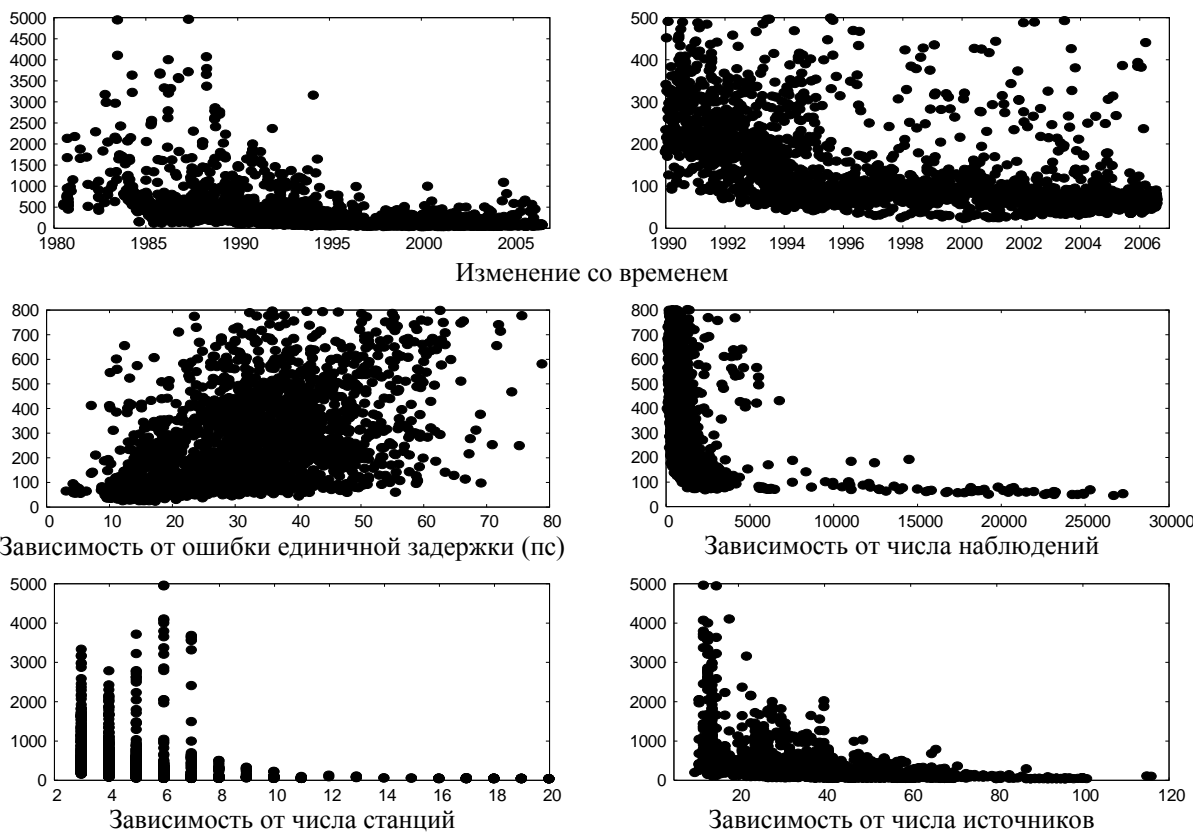


Рис. 4. Ошибка определения координат полюса, мкс дуги.

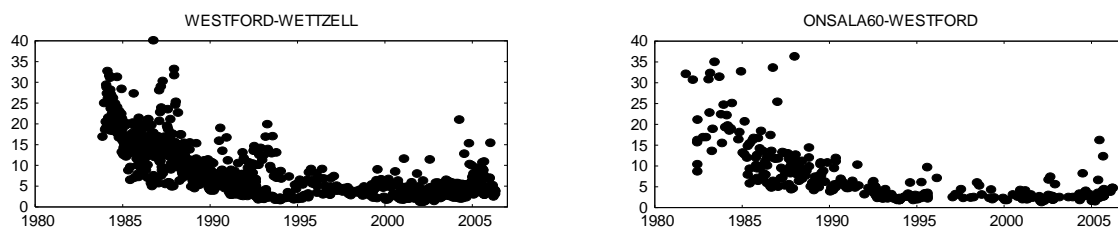


Рис. 5. Точность определения длин баз, мм.

Приведенная статистика показывает прогресс в точности наблюдений и определяемых параметров. В частности, статистика подтверждает вывод, сделанный на основании изучения результатов определения углов нутации [2] о нецелесообразности использования наблюдений, сделанных до 1990 г., для высокоточного анализа данных. Статистика наблюдений и точности определения основных результатов может также служить материалом для построения систем моделирования РСДБ-наблюдений (предельные значения параметров, зависимость ошибки наблюдений и результатов от различных факторов и др.). Другим важным практическим применением статистики наблюдений является идентификация станций и баз, имеющих сравнительно небольшое число наблюдений, и которые, таким образом, желательно в первоочередном порядке включать в специальные наблюдательные программы, предназначенные для уточнения и уплотнения опорной земной системы координат.

Литература

1. *Schlueter W., Himwich E., Nothnagel A., Vandenberg N., Whitney A.* IVS and Its Important Role in the Maintenance of the Global Reference Systems. *Advances in Space Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 145-150, 2002.
2. *Malkin Z.M.* Comparison of VLBI nutation series with the IAU2000A model. In: Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2003, St. Petersburg, Russia, September 22-25, 2003, Eds. A. Finkelstein, N. Capitaine, pp. 24-31, 2004.

HISTORICAL STATISTICS OF THE VLBI OBSERVATIONS

Malkin Z.M.

Summary

The paper presents some statistics of the astrometric and geodetic VLBI observations made in the period from 1979 up to the present. During this period almost 10,000 VLBI sessions were performed, and more than 6,000,000 observations were obtained at more than 160 stations. This statistics shows the progress in accuracy and precision of VLBI observations and the obtained parameters. It can also help in construction of simulation models.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА РСДБ-ЛОКАЦИИ В ПРОЕКТЕ LFBVN

Молотов И.Е.^{1,2}, Нечаева М.Б.³, Коноваленко А.А.⁴, Туккари Дж.⁵, Лю Ш.⁶,
Дементьев А.Ф.³, Антипенко А.А.³, Дугин Н.А.³, Пушкарев А.Б.^{1,7}, Агапов В.М.²,
Титенко В.В.¹, Шишов В.А.², Степаньянц В.А.², Фалькович И.С.⁴, Вольвач А.Е.⁷,
Горшенков Ю.Н.⁸, Харламов Г.Ю.⁸, Орешко В.В.⁹, Языков В.П.¹

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

²Институт Прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский Радиофизический институт, Н. Новгород, Россия

⁴Радиоастрономический институт НАНУ, Харьков, Украина

⁵Институт радиоастрономии, Ното, Италия

⁶Астрономическая обсерватория в Урумчи, НАО КАН, Урумчи, Китай

⁷НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Кацивели, Крым, Украина

⁸Особое конструкторское бюро МЭИ, Москва, Россия

⁹Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, Россия

Представлены результаты отработки метода РСДБ-локации, сочетающего радиозондирование тел Солнечной системы планетным радиопередатчиком РТ-70 в Евпатории и прием отраженных эхо-сигналов на РСДБ-сети LFBVN. 11 пробных экспериментов позволили зарегистрировать эхо-сигналы Марса, Венеры, Луны, астероида 2004XP14 и около 100 объектов космического мусора. На спецпроцессоре НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде освоено получение методом кросс-корреляционной обработки эхо-сигналов прецизионных измерений сдвигов Доплера и частот интерференции, определение периода вращения и ориентации оси вращения космических объектов. Использование данных РСДБ-локации на порядок повышает точность орбитальных определений.

Введение

В 1996 г. была предложена концепция «Низкочастотной РСДБ-сети LFBVN» [1,2]. Основной задачей проекта, координируемого инициативной группой сотрудников ГАО РАН, ИПМ им. Келдыша РАН, НИРФИ, РИ НАНУ и КрАО, являлось создание международной РСДБ-кооперации с участием российских и украинских радиотелескопов для проведения экспериментов по заявкам отечественных ученых. В проекте, базировавшемся на РСДБ-опыте НИРФИ и АКЦ ФИАН, была предпринята попытка объединить усилия всех РСДБ-групп России и Украины. За время выполнения проекта 14 антенн – РТ-64 в Медвежьих Озерах, РТ-22 в Пушино, РТ-64 в Калязине, РТ-15 в Зименках, РТ-14 в Старой Пустыни (Россия), РТ-70 в Евпатории и РТ-22 в Симеизе (Украина), РТ-32 в Вентспилсе (Латвия), РТ-32 в Ното (Италия), РТ-14 в Торунь (Польша), 500x30 (параболический цилиндр) в Ути и РТ-45 в Пуне (Индия), РТ-25 в Урумчи и РТ-25 в Шанхае (Китай) были дооснащены приемно-регистрирующей радиоастрономической аппаратурой. Организовано 24 РСДБ-эксперимента на длинах волн 92 см, 18 см, 13 см, 6 см и 3,6 см с использованием в разных комбинациях радиотелескопов Австралии, Англии, Индии, Италии, Канады, Китая, Латвии, Польши, России, США, Украины, Южной Африки и Японии, а также центров корреляционной обработки в Австралии, Канаде, России и США. Первые РСДБ-лепестки были получены на базах с РТ-14 в Старой Пустыни и РТ-45 в Пуне на длине волны 92 см; с РТ-22 в Пушино и РТ-32 в Светлом на длине волны 18 см с терминалом регистрации S2; с РТ-70 в Евпатории на длинах волн 6 см, 13 см, 3,6 см; с РТ-64 в Медвежьих Озерах на длинах волн 6 см и 13 см.

На первом этапе развития LFVN главными научными задачами являлись построение РСДБ-изображений квазаров [3,4] и освоение РСДБ-методов исследований солнечного ветра [5]. В период с 1999 по 2006 гг. усилия LFVN, поддержанные грантом ИНТАС 2001-0669, были сосредоточены на отработке применения методов РСДБ-локации [6,7] для изучения тел Солнечной системы – планет земной группы, сближающихся с Землей астероидов, Луны, объектов космического мусора на различных типах орбит. Исследования проводились в следующих основных направлениях:

- определение характеристик вращения околоземных космических объектов (период вращения, его короткопериодические вариации, ориентация оси вращения), получение информации о рельефе их поверхности;
- уточнение траекторий движения околоземных космических объектов (измерение сдвигов Доплера для определения радиальной скорости и угловых координат), в том числе в квази-инерциальной радиосистеме координат;
- отработка техники РСДБ в квази-реальном времени через Интернет;
- организация сети оптических станций (при поддержке гранта Минобрнауки и ИНТАС 03-70-567) для обнаружения космических объектов и уточнения их эфемерид.

Первые полученные результаты рассматриваются в данной статье.

1. Эксперименты по РСДБ-локации

Радиолокация является мощным средством исследования околоземного космического пространства. С ее помощью можно получать наиболее полные данные о телах Солнечной системы, включая точные орбитальные параметры, период вращения, ориентацию в пространстве, форму и размер, структуру и состав поверхности. Использование метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) для приема отраженных эхо-сигналов способно расширить перечень измеряемых параметров и увеличить точность получаемых измерений. Комбинация классической радиолокации и РСДБ (т.н. РСДБ-локация) позволяет создать уникальный инструмент для трехмерных измерений:

- радиолокатор имеет разрешение по дальности и радиальной скорости РСДБ обеспечивает измерение угловых координат и угловой скорости.

Метод РСДБ-локации направлен на решение задач фундаментальной астрометрии – определение параметров векторов собственного вращения небесных тел, включая их короткопериодические (внутриорбитальные) вариации, а также определение методом дифференциальных координатных измерений точного положения центров масс небесных тел (траекторий их движения) в квазиинерциальной системе координат, опирающейся на внегалактические радиосточники, имея конечной целью установление точной взаимной связи динамической барицентрической и радио-систем координат. Важными прикладными аспектами проводимых исследований являются определение точных траекторий астероидов, потенциально опасных для Земли, и фрагментов «космического мусора» в интересах безопасности использования космического пространства.

РСДБ-локация – новое в мировой практике направление. Известны только две попытки применения РСДБ-локации для визуализации поверхности небесных тел в США и Японии [8]. Поэтому первые LFVN эксперименты в этой области были направлены на создание методической, технической и программной базы метода РСДБ-локации. В VLBR (very long baseline radar) наблюдениях, которые проводятся с июня 1999 г., радиозондирование тел Солнечной системы обеспечивается передатчиком РТ-70 в Евпатории на частоте 5010,024 МГц (непрерывная мощность 2-х канального передатчика может достигать 200 кВт, с 2000 г. задействуется только один канал с максимальной мощностью 60 кВт). В РСДБ-локации используется два режима излучения – немодули-

рованная несущая и линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал с размахом 512 кГц и периодом повторения 32 мс. Два пробных эксперимента (в 2001 и 2006 гг.) были проведены с РТ-70 в Голдстоуне (США) на длинах волн 13 см и 3,6 см. Прием отраженных эхо-сигналов осуществлялся различными комбинациями приемных антенн, пока в в 2003 г. не сложилась подсистема LFN «РСДБ-локатор», которая включает РТ-64 в Медвежьих Озерах, РТ-22 в Симеизе, РТ-32 в Ното и РТ-25 в Урумчи. В 2006 г. вместо РТ-64 в Медвежьих Озерах в эксперименте VLBR06.1 участвовал РТ-64 в Калязине. В дополнение проводится дооснащение РТ-32 в Вентспилсе (Латвия). На рис. 1 представлено географическое расположение радиотелескопов, входящих в подсистему LFN РСДБ-локатор. Перечень экспериментов по РСДБ-локации тел Солнечной системы представлен в таблице 1. В результате проведенных работ на видеокассеты и магнитные диски были записаны эхо-сигналы от Марса, Венеры, Луны, астероида 2004XP14



Рис. 1. Географическое расположение антенн LFN, участвующих в VLBR наблюдениях.

Таблица 1. Эксперименты LFN по РСДБ-локации.

Название	Даты проведения	Исследуемые объекты	Участвующие радиотелескопы
VLBR99.1	02-08 июня 1999	Венера, Марс	Евпатория, Светлое, Шанхай Урумчи, Торунь, Кашима
VLBR00.2	03-09 августа 2000	Венера, Меркурий, астероиды Митра и 2000CE59	Евпатория, Светлое, Шанхай Урумчи, Торунь, Медвежье Озера
VLBR01.1	23-29 мая 2001	Венера, Меркурий, астероид 1999KW4, 7 ГСО-объектов	Евпатория, Светлое, Шанхай, Кашима, Ното, Урумчи, Торунь, Медвежье Озера МЕРЛИН
VLBR01.2	14-19 декабря 2001	астероид 1998WT24 5 ГСО-, 4 ВЭО-объекта, пробный «бим-парк» на ГСО	Евпатория, Голдстоун, Светлое, Шанхай, Урумчи, Торунь, Калязин, Зеленчук, Алгонкуин
VLBR02.1	23-29 июля 2002	Астероид 2000PH5, Венера, 7 ГСО-, ВЭО-, ПСО-объекта	Евпатория, Медвежье Озера, Калязин, Ното, Шанхай, Урумчи
VLBR03.1	23-29 июля 2003	Астероид 2000PH5, Марс, 10 ГСО-, ВЭО, ПСО-объектов, пробный бим-парк на НО	Евпатория, Медвежье Озера, Ното, Урумчи, Симеиз

VLBR04.1	21-25 июня 2004	Астероид Итокава, 15 объектов на ГСО, ВЭО и ПСО, бим-парк, пробный «бим-трек»	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз
VLBR04.2	23-29 июля 2004	астероид 2000PH5, Венера, 18 ГСО-, ВЭО, ПСО-объектов, бим-парк, бим-трек	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз
VLBR04.3	29 сент.- 5 окт. 2004	астероид Таутатис, Венера, Луна, 12 ГСО, ВЭО и ПСО, бим-парк, бим-трек	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз
VLBR05.1	10-16 сентября 2005	астероид 1999 RQ36, Марс, Луна, 18 ГСО и ВЭО объектов, включая малоразмерные, бим-парк, бим-трек	Евпатория, Медвежьи Озера, Симеиз, Пушино, Урумчи
VLBR06.1	3-9 июля 2006	Астероид 2004XP14, Меркурий, Луна, 20 ГСО и ВЭО объектов, включая малоразмерные, бим-парк, бим-трек	Евпатория, Голдстоун, Калязин, Зеленчукская, Симеиз, Ното, Урумчи

и около 100 объектов космического мусора размером от нескольких десятков метров до 0,5 м на различных типах орбит, обработка которых проводится на корреляторе LFVN НИРФИ-3 в НИРФИ, Н. Новгород.

2. Обработка результатов экспериментов

Попытки корреляционной обработки записей РСДБ-локационных экспериментов проводились на различных российских и зарубежных корреляторах. Но первые практические результаты удалось получить только в 2002 г. после ввода в опытную эксплуатацию коррелятора НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде [9]. До 2005 г. коррелятор мог обрабатывать записи только в РСДБ-формате Мк-2, а в 2006 г. он был переведен на новый формат – NRTV (near real time VLBI). Обработка эхо-сигналов выполняется в несколько этапов и на сегодняшний день представляет собой установившуюся схему работы с РСДБ-локационными данными, которая применяется в НИРФИ. При обработке используется модель траектории объекта, координаты приемной антенны, дата и время измерений, учитывается эффект ближней зоны, движение объекта относительно геоцентра и вращение Земли.

На первом этапе проводится автокорреляция записанного сигнала в каждом пункте и его спектральный анализ для определения наличия отраженного сигнала от лоцируемого объекта на ожидаемой расчетной частоте (необходимые траекторные и эфемеридные расчеты выполняются в Баллистическом центре ИПМ им. Келдыша РАН). По результатам автокорреляции (см. примеры на рис. 2) определяется также наличие помех и паразитных сигналов в приемной системе.

На втором этапе выполняется корреляция сигнала передатчика (или модели излученного сигнала) и эхо-сигнала, принятого в каждом приемном пункте. Результат корреляции подвергается спектральной обработке. По частоте максимума спектрального отклика с точностью до тысячных долей Гц определяется частота сдвига Доплера (см. пример на рис. 3а), которая несет информацию о радиальной скорости движения объекта (в стадии отладки находится процедура измерения дальности по геометрической задержке с использованием при локации ЛЧМ сигнала). Кроме того, анализ зависимости от времени амплитуды максимума спектрального отклика (взаимно-корреляционного спектра сигнала передатчика и эхо-сигнала) дает возможность определить период вращения исследуемого объекта (см. пример на рис. 3б). Для спутника «Горизонт-3» период вращения определяется как 84 с. В случае наличия симметричных элементов конструкций на космическом аппарате, может возникнуть неоднозначность измерений.

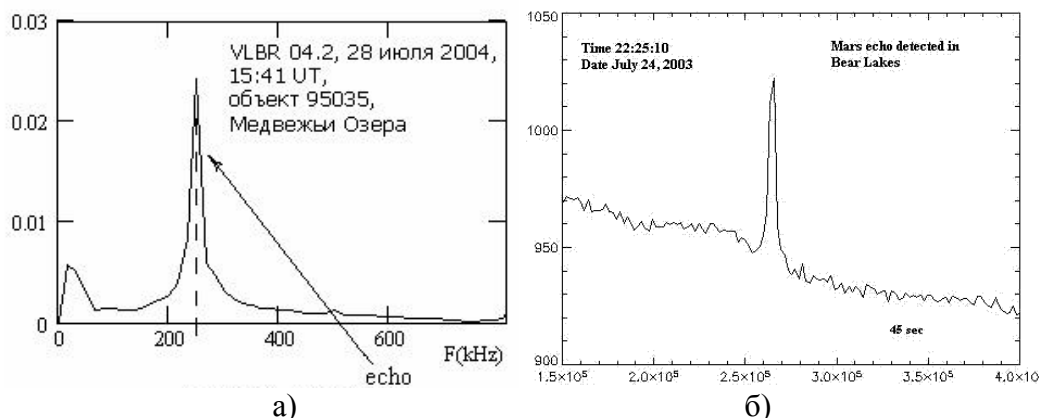


Рис. 2. а) Спектр мощности результата автокорреляции эха геостационарного объекта 95035, принятого на пункте Медвежье Озера 28.07.2004 г. б) Спектр мощности результата автокорреляции эха планеты Марс, принятого на пункте Медвежье Озера 24.07.2003 г.

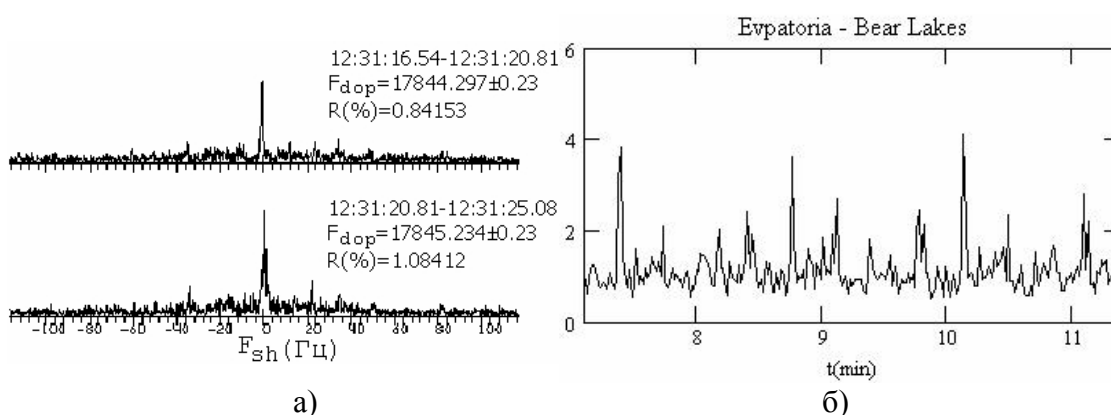


Рис. 3. а) Спектрограммы для двух последовательных по времени участков корреляционного сигнала на базовой линии Евпатория-Медвежье Озера для эха геостационарного спутника «Космос-1366» 15.09.2005 г. б) Временная зависимость амплитуды максимума кросс-спектра зондирующий-эхо сигнала для геостационарного спутника «Горизонт-3» на базовой линии Евпатория-Медвежье Озера 29.07.2003 г.

На рис. 4 приведены временные зависимости амплитуды максимума спектра, полученные в результате корреляционной обработки сигналов пунктов Урумчи (принятый сигнал) - Евпатория (излученный сигнал) и Медвежье Озера (принятый сигнал) - Евпатория (излученный сигнал) по результатам двух сканов по спутнику "Радуга-9", которые проводились с интервалом три дня. По корреляционному сигналу в Медвежьих Озерах определяется период вращения КА, равный 82 с. Отчетливо видно, что в сигнале Урумчи-Евпатория нечетные импульсы "развалились". Это указывает на то, что на объекте имеются два крупных отражающих элемента с несколько различной ориентацией в пространстве, видимых с РСДБ-пунктов под разными углами зрения, поэтому период вращения объекта следует считать равным 164 с. Четкая периодичность появления импульсов указывает на стабильность оси вращения аппарата. Характер сигнала за трое суток практически не изменился, что также свидетельствует о стабильности параметров вращения (это также подтверждают данные на рис. 7).

На рис. 5а представлена временная зависимость амплитуды максимума спектра, полученная в результате корреляционной обработки сигналов пунктов Калязин (принятый сигнал) - Евпатория (излученный сигнал) для малоразмерного фрагмента 90022 на геостационарной орбите. Этот объект был обнаружен в КрАО 30 апреля на оптическом телескопе АТ-64 и имеет блеск 17 звездной величины (что примерно соответствует

размеру 40 см). Фотометрия такого рода объектов затруднена, поэтому возможность оценки периода вращения по радиолокационным данным очень важна.

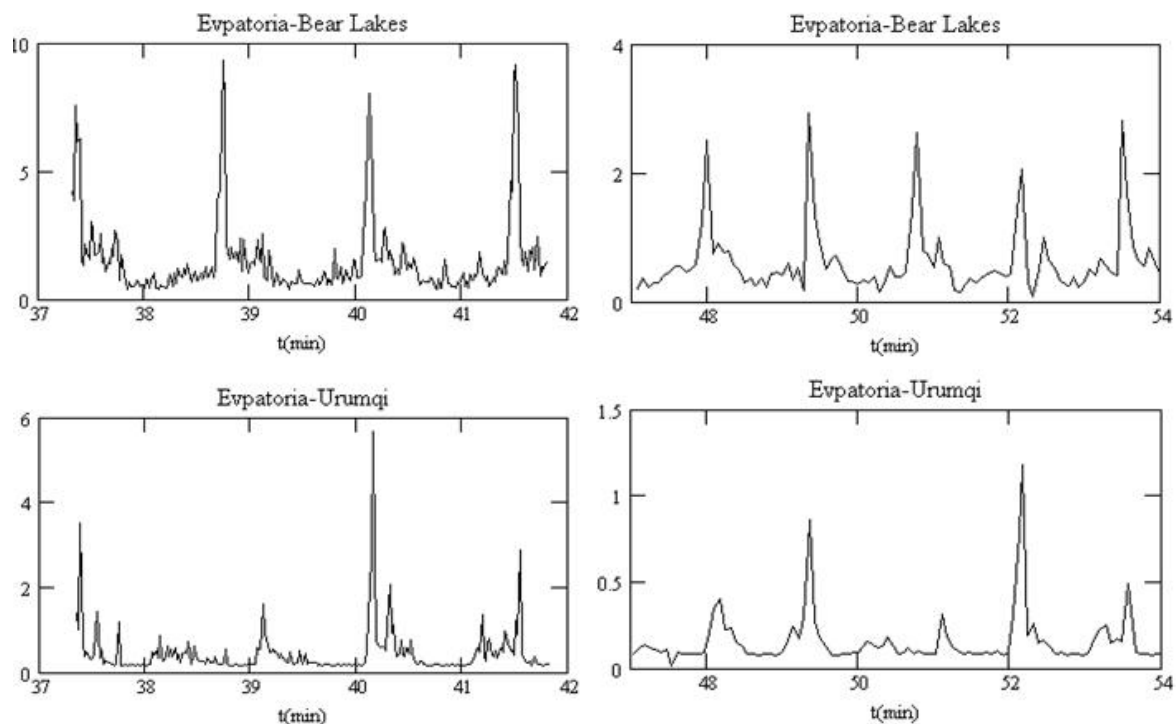


Рис. 4. Временные зависимости амплитуды максимума кросс-спектра зондирующий-эхо сигнала для спутника «Радуга-9» на базовых линиях Евпатория-Медвежья Озера и Евпатория-Урумчи в двух разных сканах с интервалом 3 дня, 25 и 28.07.2004 г..

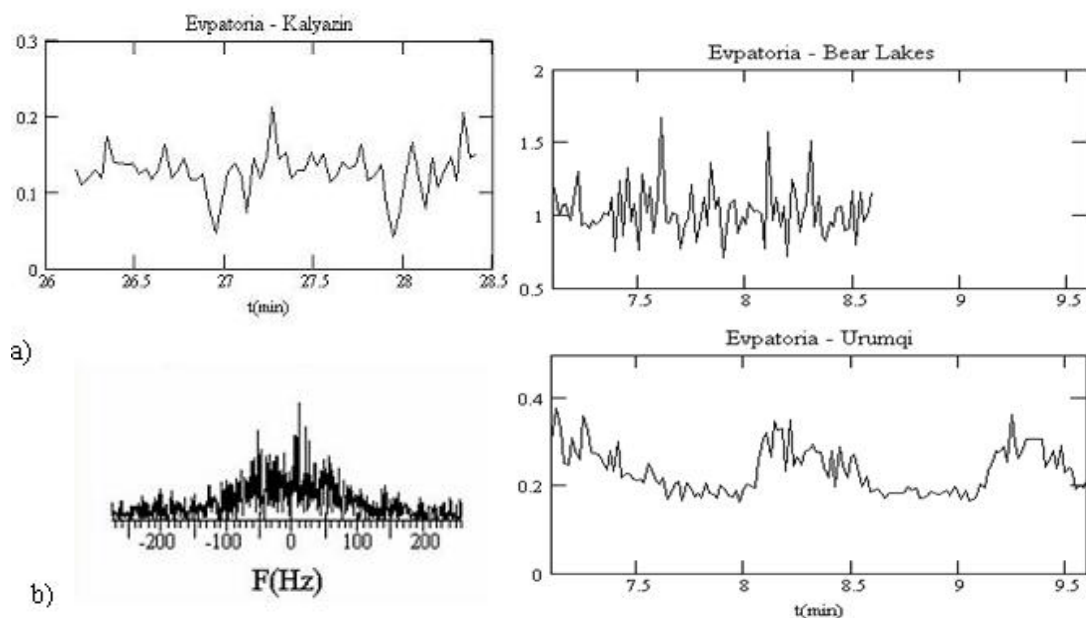


Рис. 5. а) Временная зависимость амплитуды максимума кросс-спектра зондирующий-эхо сигнал для геостационарного фрагмента 90022 на базовой линии Евпатория-Калязин 06.07.2006 г.; **б)** кросс-спектр для быстровращающегося геостационарного объекта и его временные зависимости на базах Евпатория-Медвежья Озера и Евпатория-Урумчи 28.07.2003 г.

На рис. 5б показан результат корреляционной обработки переданный-принятый сигналы для быстровращающегося геостационарного объекта, 4-й ступени р/н «Протон» (на быстрое вращение указывает значительное - до 200 Гц размывание спектра, см. рис. 4б), а также временные зависимости амплитуды максимума этого спектра на базовых линиях Евпатория-Медвежьи Озера и Евпатория-Урумчи. В Медвежьих Озерах виден сильный сигнал от всего аппарата с характерными всплесками от ярких элементов конструкций. Характер сигнала пункта Урумчи сильно меняется: наблюдается периодическое появление сигнала от корпуса с всплесками от ярких фрагментов длительностью около 30 с. Данное обстоятельство можно интерпретировать как быстрое вращение аппарата с биением оси вращения.

На третьем этапе обработки вычисляется взаимная корреляционная функция эхосигналов для всех баз РСДБ-сети и выполняется спектральный анализ. Измеряемыми параметрами являются частота интерференции (в случае зондирования немодулированной несущей) и временная задержка между приходом волнового фронта на разные

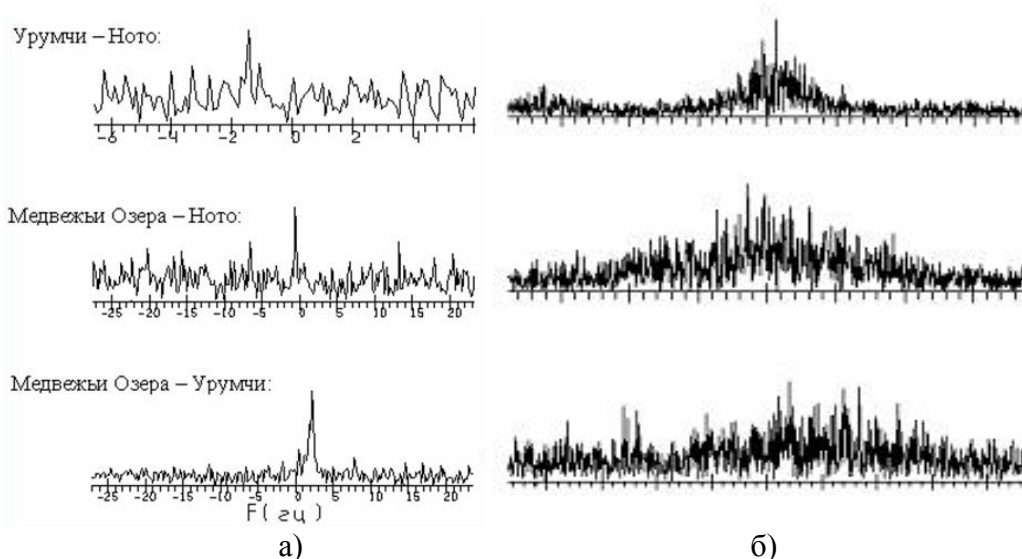


Рис.6. а) Кросс-корреляционные спектры эхо-сигналов от геостационарного спутника «Космос-1366», полученные одновременно на трех базовых линиях Медвежьи Озера – Ното – Урумчи 25.07.2003 г.; **б)** кросс-корреляционные спектры эхо-сигналов Луны на базовых линиях (сверху вниз) Медвежьи Озера – Ното, Медвежьи Озера-Симеиз и Ното-Симеиз 30.09.2004 г.

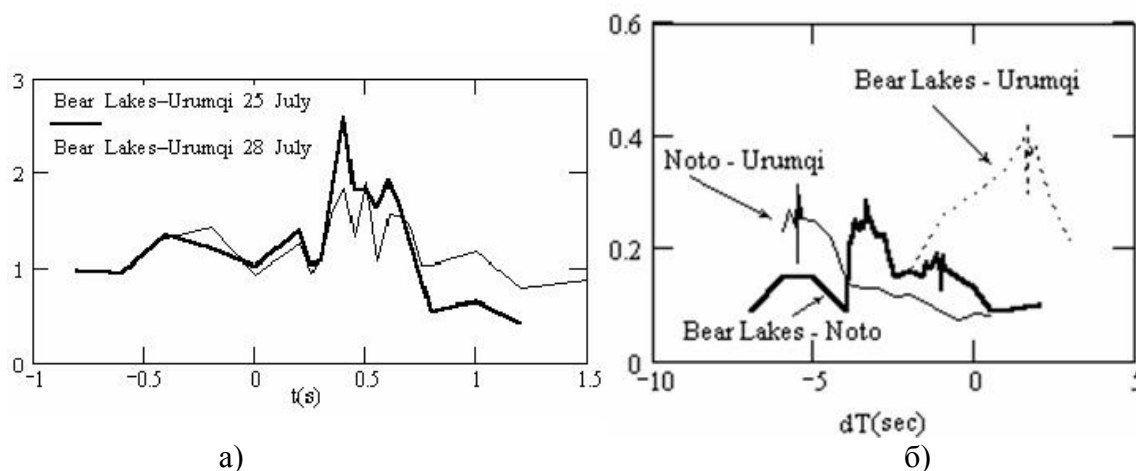


Рис. 7. а) Временные зависимости амплитуды максимума кросс-спектра эхо-сигнала от геостационарного спутника «Радуга-9» за 25 и 28.07.2003 г.; **б)** Временные зависимости амплитуды максимума кросс-спектра эхо-сигнала от геостационарного спутника «Космос-1366» на базовых линиях Медвежьи Озера-Ното, Медвежьи Озера-Урумчи, Ното-Урумчи.

антенны РСДБ-сети (при использовании ЛЧМ-сигнала). Примеры кросс-спектров для эхо-сигналов от аппарата "Космос-1366" на базовых линиях Медвежьи Озера - Ното – Урумчи приведены на рис. 6а., а для эхо-сигналов Луны на базовых линиях Медвежьи Озера-Ното-Симеиз – на рис. 6б. Анализ временной эволюции амплитуды этих максимумов (см. рис. 7б) дает информацию об ориентации оси вращения объекта. Относительно Медвежьих Озер, максимум сигнала опережает в Ното на 2,15 с и запаздывает в Урумчи на 5 с. Диаграмма рассеяния объекта захватывает сразу все три РСДБ-пункта, но существенно разными по уровню участками. При вращении объекта максимум диаграммы рассеяния последовательно проходит пункты приема.

3. Оценки точности полученных измерений

С целью анализа точности, методом кросс-корреляции переданного и принятых сигналов, было получено 17 измерений Доплера для геостационарного спутника «Космос-1366» в пунктах Медвежьи Озера и Ното (см рис. 8). Точность единичного измерения составляет 0,03 Гц или 1 мм/с по радиальной скорости, а среднеквадратичная ошибка равна 0.096 Гц (соответствует скорости 3 мм/с), что в 3 раза хуже, чем аппаратная ошибка.

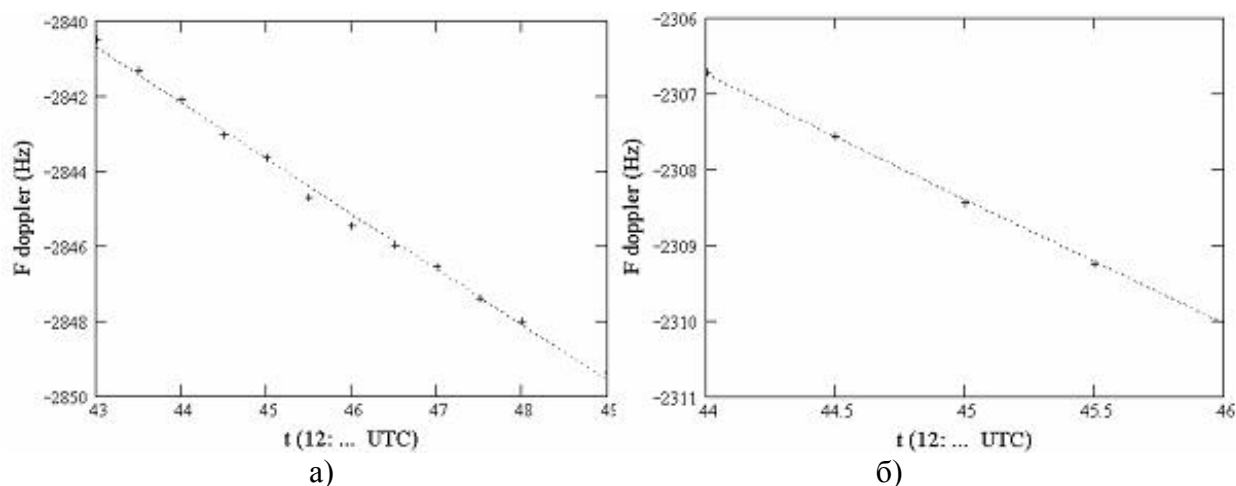


Рис. 8. Измерения сдвига Доплера для эхо-сигнала от Космоса-1366 в зависимости от времени и его отклонение от аппроксимирующего сглаживающего полинома для баз Евпатория-Медвежьи Озера (а) и Евпатория-Ното (б), 25.07.02.

Это может объясняться как вращением объекта, так и неоднозначностью измерений максимума спектра РСДБ-отклика. В Баллистическом центре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН было проведено уточнение орбитальных параметров спутника «Космос-1366» с использованием полученных измерений радиальной скорости. Эти данные были обработаны совместно с оптическими измерениями прямого восхождения и склонения объекта. В целом интервал измерений охватывает период с июля 2002 года по июль 2003. Для сравнения уточнение орбиты спутника «Космос-1366» было получено также и только по оптическим измерениям. Результаты апостериорной оценки точности определения элементов орбиты в каждом из этих случаев приведены в таблице 2. На рис. 9 представлены рассогласования измеренных и расчетных значений оптических и радиолокационных измерений.

Таблица 2. Сравнение ошибок определения параметров орбиты спутника «Космос-1366» с использованием оптических и оптико-радиолокационных измерений.

Параметр	Ошибка определения	
	Только по оптическим данным	По оптическим и РСДБ-локационным измерениям
Период (сек)	0.00039	0.00016
Эксцентриситет	0.000001289	0.00000011
Наклонение (градусы)	0.0000397	0.0000385
Долгота узла (градусы)	0.0001523	0.0001443
Аргумент перицентра (градусы)	0.3186443	0.0553811
Время перицентра (сек)	0.08468	0.03756

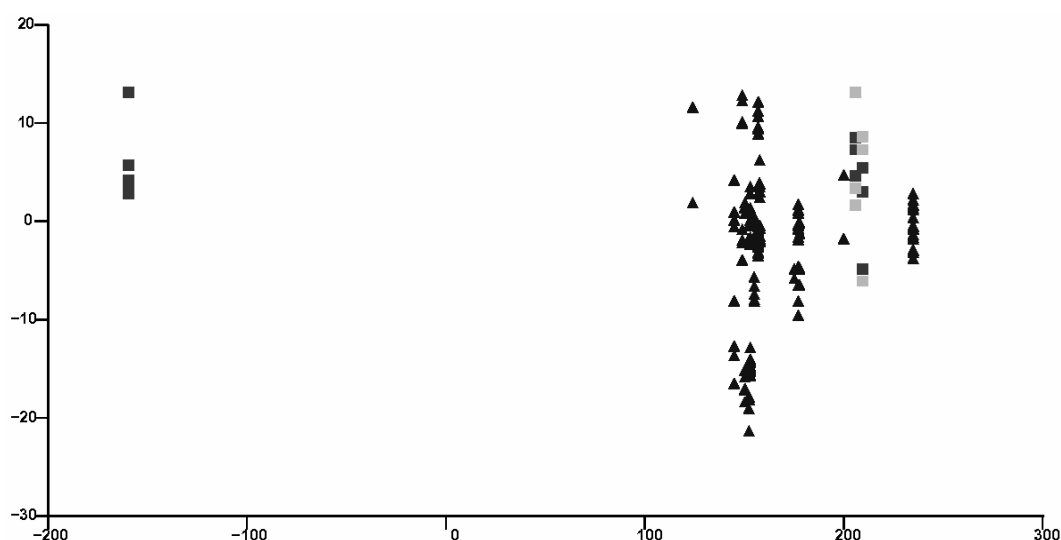


Рис. 9. Рассогласования измеренных и расчетных значений оптических и радиолокационных измерений. По оси абсцисс отложено время, отсчитываемое в сутках от 1 января 2003 года. По оси ординат отклонения измеренных значений от их расчетных аналогов. Отклонения оптических измерений (треугольники) приведены в угловых секундах. Отклонения измерения радиальной скорости (квадраты) в мм/сек.

Привлечение измерений радиальной скорости обеспечивает существенное повышение точности определения орбиты рассматриваемого объекта. При совместной обработке доплеровских данных с двух пунктов (Медвежья Озера и Ното) с результатами оптических наблюдений, невязки орбиты уменьшились в 7 раз, по сравнению с обработкой только оптических наблюдений.

На следующем этапе обработки использовались интерферометрические измерения двух типов. Первый тип измерений характеризуется тем, что проводится корреляция излученного сигнала с принятым. Результат корреляции – смещение принятой доплеровской частоты относительно излученной – преобразуется в полусумму радиальных скоростей объекта относительно излучающей и приемной антенн. При проведении измерений второго типа проводится корреляционная обработка эхо-сигнала на двух приемных антеннах. Полученное в результате смещение доплеровской частоты сигналов одной приемной антенны относительно другой преобразуется в разность радиальных скоростей объекта относительно двух приемных антенн. В таблице 3 приведены откло-

нения (О-С) измеренных значений измерений первого и второго типа от их расчетных аналогов, полученных на уточненной орбите.

Таблица 3. Сравнение точности измерений Доплера и частоты интерференции для спутника «Космос-1366» на различных базовых линиях.

Дата	Время	О-С мм/с	О-С мм/с	О-С мм/с
Сдвиг Доплера на базах		Евпатория-Медв. Озера	Евпатория-Ното	Евпатория-Урумчи
2002/07/25	12:44:00	-0,41	2,21	-2,98
2002/0725	12:45:00	-3,29	1,66	-4,70
2002/0725	12:46:00	4,37	-3,34	6,78
Частота интерференции на базах		Медв. Озера-Ното	Урумчи-Ното	Медв. Озера-Урумчи
20030725	22:23:14	20,2	24,2	-94,0
20030725	22:23:15	20,1	24,9	-94,6
20030725	22:23:16	13,2	78,0	-96,2

Как видно из приведенных данных отклонения измеренных значений от расчетных для измерений первого типа составляет единицы миллиметров в секунду, что свидетельствует о высокой точности измерений даже по сравнению со штатными измерительными российскими системами. Измерения второго типа, судя по отклонениям, имеют точность в несколько раз ниже. Однако эта точность также сопоставима с точностью российских измерительных систем. Такая относительно невысокая точность объясняется как неоднозначностью измерений максимума спектра РСДБ-отклика, так и недостаточным частотным разрешением используемом при их спектральном анализе. Тем не менее, методика получения нового типа измерений практически отлажена и будет постепенно совершенствоваться.

Теперь оценим точность определения ориентации оси вращения спутника «Космос-1366». Поскольку при РСДБ-локации использовался монохроматический узкополосный сигнал, то при корреляционной обработке, вводя сдвиг по времени между пунктами, находим максимум кросс-корреляционного сигнала и соответствующий временной сдвиг, т.е. совмещаем максимумы сигналов в двух пунктах. По временному сдвигу между пунктами каждой базовой линии получим информацию о направлении оси вращения объекта. Сдвиг максимума для трех баз относительно начальной точки отсчета $t_0 = 22:23:11$ при наблюдении спутника "Космос 1366" составил -3.35 с для базы Медвежьи Озера – Ното, $+1.65$ с для базы Медвежьи Озера – Урумчи, -5.5 с для базы Ното – Урумчи (см. рис. 7б). Данный факт указывает на то, что максимум отраженного сигнала последовательно проходит через три приемных пункта. Это обстоятельство позволяет провести расчет направления оси вращения лоцируемого объекта в предположении, что ориентировочно известны средняя дальность R_{cp} до спутника, его координаты и период вращения $T_{вр}$.

Для конфигурации системы «спутник-РСДБ-сеть» рассчитываются величины проекций баз на картинную плоскость источника, т.е. на UV-плоскость (см. рис. 10). Для объекта «Космос-1366» величины проекций баз для трех пунктов приема получились равными: $B(МО-У) = 3372$ км, $B(МО-Н) = 2670$ км, $B(Н-У) = 5694$ км.

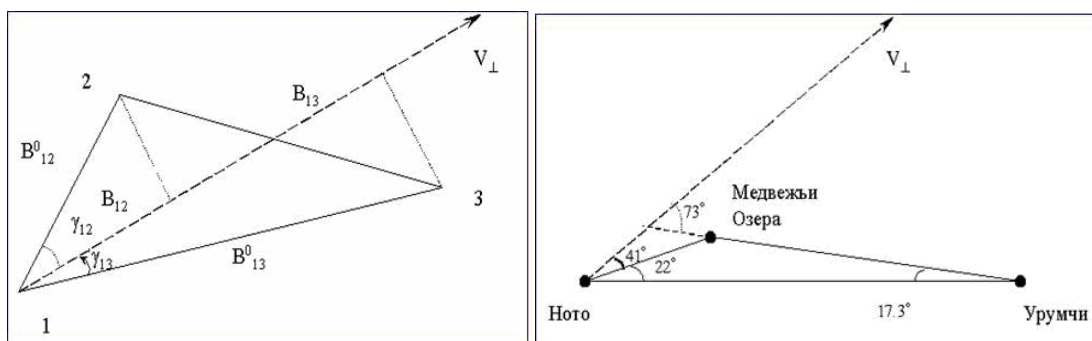


Рис. 10. Проекция базовых линий РСДБ-локатора на UV-плоскость.

Скорость движения “пятна” диаграммы рассеяния по Земле определяется как:

$$V = 2\pi R_{cp} / T_{ep}.$$

Время, за которое “пятно” дойдет от одного приемного пункта до другого:

$$\tau_{ij} = \frac{B_{ij}}{V} = \frac{B_{ij} T_{ep}}{2\pi R_{cp}}$$

или для проекций баз на картинную плоскость: $B_{ij} = \frac{2\pi R_{cp} \tau_{ij}}{T_{ep}} = B_{ij}^0 \cos \gamma_{ij}$,

где B_{ij}^0 – величина базовой линии между пунктами на картинной плоскости, B_{ij} – проекция базы на направление движения «пятна», γ_{ij} – угол между вектором базы и направлением движения “пятна” диаграммы рассеяния.

Для “треугольника” баз МО-Н-У получены следующие значения углов γ (рис. 10):

$$\gamma(\text{МО-У}) = 73^\circ, \quad \gamma(\text{МО-Н}) = 41^\circ, \quad \gamma(\text{Н-У}) = 55^\circ.$$

При отсчете от направления линии базы Н-У значения углов равны 55.07° , 63° и 55° , т.е. среднее значение угла, под которым движется максимум сигнала относительно базы Н-У, равно 57.9° и определяется с максимальной ошибкой менее 3° , которая зависит, в основном, от погрешности определения временных задержек появления максимума сигнала на пунктах. Вектор оси вращения аппарата направлен перпендикулярно этой линии. Развитие данной методики позволит получить более полные сведения о параметрах вращения исследуемых объектов.

Заключение

За период 1999-2005 гг. наработана методическая, аппаратная и программная база РСДБ-локации. В рамках проекта LFNV создан новый научный инструмент РСДБ-локатор, предназначенный для исследования тел Солнечной системы. Отработано получение прецизионных измерений Доплера и частот интерференции по эхо-сигналам объектов космического мусора и планет. Первые доплеровские измерения получены для сближающегося с Землей астероида. 2004XP14 пролетел на расстоянии 430000 км, и его успешная локация была организована почти одновременно из Голдстоуна на длине волны 3,6 см и Евпатории. Результаты обработки эхо-сигналов представлены на рис.11.

РСДБ-локатор сети LFNV уже может быть использован для регулярных измерений. Ввиду высокой точности получаемых данных РСДБ-локация должна применяться для уточнения прогноза опасных сближений космических объектов с работающими спутниками. В ближайших планах освоение измерений дальности с зондирующим ЛЧМ-сигналом. В 2007 г. будет продолжена отработка метода для получения высокоточных эфемерид планет земной группы, что должно найти свое приложение в рамках космического проекта «Фобос-грунт».

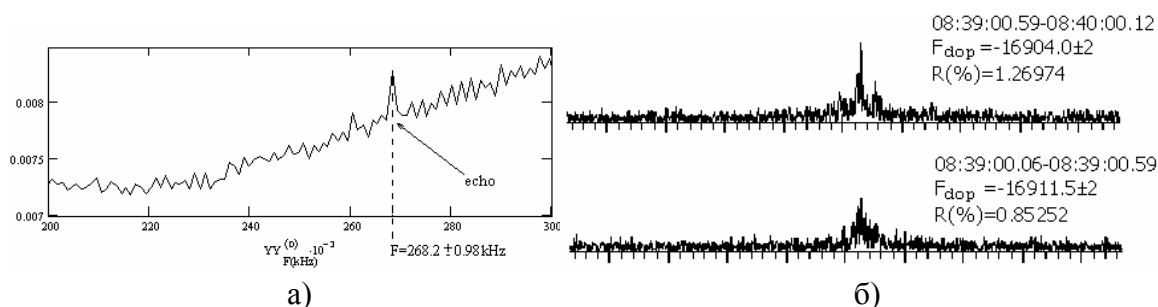


Рис. 11. а) Спектр мощности результата автокорреляции эха астероида 2004XP14, принятого на пункте Калязин при его локации из пункта Евпатория 3.07.2006 г.; **б)** спектрограммы для двух последовательных по времени участков корреляционного сигнала на базовой линии Голдстоун-Евпатория для эхо-сигнала астероида 2004XP14, 3.07.2006 г.

В 2003-2006 гг. проводился поэтапный переход LFN на новый тип РСДБ-регистратора NRTV (near-real time VLBI) [10], позволяющего записывать данные в полосе до 48 МГц на жесткий диск компьютера, а затем передавать их в центр обработки через Интернет. NRTV-терминал был разработан при поддержке ИНТАС-2001-0669 и в настоящий момент стоит на 6 радиотелескопах LFN. В 2006 г. коррелятор НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде был модернизирован под NRTV-формат (спектры сигналов, представленные на рис. 2б, 5а, 11а получены по NRTV-данным). Организованы пионерские российские эксперименты по РСДБ в квази-реальном времени через Интернет (в 2007 г. планируется завершить отработку РСДБ-техники квази-реального времени).

Кроме того, эксперименты по РСДБ-локации инициировали проект научной сети оптических телескопов ПулКОН (Пулковская кооперация оптических наблюдателей) [11]. Одной из задач ПулКОН является наблюдение космических объектов из перечня радиолокационных целей для уточнения их эфемерид.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам радиотелескопов и оптических обсерваторий, участвовавших в этих работах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №05-02-16838-а).

Литература

1. **Молотов И.Е.** Проект «Низкочастотная РСДБ-сеть LFN»: история и первые результаты. «Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове» № 216, 2002 г. с. 457-470.
2. **Molotov I., Dementiev A., Antipenko A., Nechaeva M., Konovalenko A., Falkovich I., Gorshenkov Yu. Et al.** International Low-Frequency Very-Long-Baseline Interferometry Network Project Milestones. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, Vol. 22, Nos. 4-5, August-October 2003, pp. 743-752.
3. **Пушкарев А.Б., Ковалев Ю.Ю., Молотов И.Е., Нечаева М.Б., Горшенков Ю.Н., Туккари Дж, Стангелини К., Хонг Ш., Куик Дж., Доугхерти Ш., Лю Ш.** Квази-одновременные наблюдения активных ядер галактик с помощью РСДБ и на РАТАН-600. *Астрономический журнал*, 2004, том 81, № 11, с. 988-997.
4. **Pushkarev A., Kovalev Y. Y., Molotov I., Tuccari G., Hong X., Quick J., Dougherty S., Shanks R., Liu X., Kovalenko A.** BL Lac Objects and Quasars in Global S2 18 cm VLBI Experiment. *Baltic Astronomy*, Vol. 14, p. 395-398, 2005.
5. **Nechaeva M.B., Gavrilenko V.G., Gorshenkov Yu.N., Lipatov B.N., Liu Xiang, Molotov I.E., Pushkarev A.B., Shanks R.** VLBI-observations of Solar Wind Plasma by the method of radio raying; theory and experiments. *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*, IAU Symposium, No. 223. Saint Petersburg, Russia, June 14-19, 2004, Cambridge University Press, p.655-656.

6. **Молотов И.Е., Вольвач А.Е., Коноваленко А.А., Фалькович И.С., Литвиненко Л.Н., Негода А.А., Федоров О.П., Лунатов Б.Н., Горшенков Ю.Н., Агапов В.М., Туккари Дж., Лю Ш.** Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации. *Космическая наука и технология*, т.10, №2/3, 2004, с. 87-92.
7. **Molotov I., Konovalenko A., Agapov V., Gorshenkov Yu., Falkovich I., Stepaniants V., Dementiev A., Antipenko A., Nechaeva M., Volvach A., Pushkarev A. et al.** Radar interferometer measurements of space debris using the Evpatoria RT-70 transmitter. *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, 2004, Pages 884-891.
8. **Margot, J.L., M.C. Nolan,** Radar Interferometric Imaging of Near-Earth Asteroids, American Astronomical Society, DPS meeting #31, #20.02, 1999.
9. **Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Князев Н.А., Лунатов Б.Н., Молотов И.Е., Нечаева М.Б., Резникова В.Э., Окмянский В.А.** Система обработки MARK-2 с высоким временным разрешением для низкочастотной РСДБ-сети LFN. Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы заявленных докладов. - СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001, с.7.
10. **Tuccari G., Molotov I., Buttacio S., Gorshenkov Yu., Liu X., Hong X., Nechaeva M., Nicotra G., Volvach A.** E-LFN - An Internet Based VLBI Network. Proceedings of the 3rd e-VLBI Workshop, Makuhari, October 6-7, 2004. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, NICT Technology Development Center News No. 25, November 2004, National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan, p. 59-63.
11. **Molotov I.** Pulkovo cooperation of optical observers. Programme&Abstracts of Fourth European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 18-20 April, 2005, ESA Publication Division, p.173.

VLBI RADAR METHOD DEVELOPMENT UNDER LFN PROJECT

**Molotov^{1,2} I.E., Nechaeva M.B.³, Konovalenko A.A.⁴, Tuccari G.⁵, Liu X.⁶,
Dementiev A.F.³, Antipenko A.A.³, Dugin N.A.³, Pushkarev A.B.^{1,7}, Agapov V.M.²,
Titenko V.V.¹, Shishov V.A.², Stepaniants V.A.², Falkovich I.S.⁴, Volvach A.E.⁷,
Gorshenkov Yu.N.⁸, Kharlamov G.Yu.⁸, Oreshko V.V.⁹, Yazykov V.P.¹**

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo, RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, Russia*

³*Radiophysical Research Institute, N. Novgorod, Russia*

⁴*Radio Astronomical Institute, NASU, Kharkov, Ukraine*

⁵*Istituto di Radioastronomia, Noto, Italy*

⁶*Urumqi Astronomical Observatory, NAO CAS, Urumqi, China*

⁷*SRI "Crimean Astrophysical Observatory", Simeiz, Ukraine*

⁸*Special Research Bureau, MPEI, Moscow, Russia*

⁹*Puschino Radio Astronomical Observatory ASC LPI, Puschino, Russia*

Summary

The results of the VLBI radar (VLBR) method adjustment are presented. VLBR combines the radio sounding the Solar system bodies using planet transmitter of RT-70 in Evpatoria and receiving the reflected echo-signals with LFN VLBI network. The echo-signals of Mars, Venus, Moon, 2004XP14 asteroid and about 100 space debris objects were detected during 11 trial experiments. The special NIRFI-3 processor in N. Novgorod allowed for the procedure of radar echo cross-correlation that permitted to obtain the precise Doppler shift and VLBI fringe rate measurements, to fix the period of rotation and orientation of rotation axis of space objects. The application of VLBR data can result in a considerable improvement of the orbital parameter determination.

**БОЛЬШОЙ ПУЛКОВСКИЙ РАДИОТЕЛЕСКОП:
МОДЕРНИЗАЦИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА В ПЕРИОД 1976 – 2006 гг.
(к 50-летию инструмента)**

**Петерова Н.Г.¹, Зверев Ю.К.¹, Топчило Н.А.², Борисевич Т.П.³,
Голосова С.Я.⁴, Ильин Г.Н.⁵, Коржавин А.Н.¹ Потапович А.В.³**

¹Санкт-Петербургский Филиал САО РАН

²Санкт-Петербургский Государственный Университет

³Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН

⁴Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН

⁵Институт Прикладной Астрономии РАН

Подведены итоги работы Большого Пулковского радиотелескопа (БПР), начиная с 1974 года, когда БПР стал специализированным инструментом для исследований Солнца. Все эти годы одновременно с ежедневными наблюдениями Солнца велась модернизация инструмента, благодаря которой БПР продолжает оставаться в числе крупнейших действующих радиотелескопов России. Приведены основные результаты модернизации всех служб инструмента.

Основной тематикой БПР в последние 30 лет является развитие методов прогнозирования вспышечной активности Солнца и исследования солнечно-земных связей. Уточнен метод (критерий Танаки-Эноме), дающий возможность выявлять вспышечно опасные области на Солнце. Предложен новый индекс солнечной активности, фиксирующий появление на диске Солнца крупных активных областей. Разработана оригинальная методика определения процентного содержания горячей (7 МК) материи в корональной плазме над активными областями. Обнаружена корреляция между характером циркулирующей земной атмосферы и асимметрией распределения активности на диске Солнца.

Введение

Большой пулковский радиотелескоп (БПР) относится к инструментам, которые получили название «антенны переменного профиля (АПП)». Радиотелескопы такого типа, к которым принадлежит и РАТАН-600, имеют оригинальную конструкцию: отражающая поверхность рефлектора состоит из отдельных элементов (щитов). Рефлектор БПР образуют 90 щитов (каждый размером 1.5 м × 3 м), которые установлены на железобетонной эстакаде, возвышающейся над уровнем земли на 3 м (см. фото на рис.1). Эстакада расположена вдоль дуги окружности с радиусом 100 м. Длина хорды, стягивающей концы этой дуги, равна ~ 140 м. Такой принцип построения отражающей поверхности рефлектора позволяет достичь высокую одномерную разрешающую способность – в направлении E–W она составляет ~ 1 угл. мин. на волне 3 см. Одним из главных достоинств антенн типа АПП является их спектральная характеристика, обеспечивающая возможность проведения одновременных наблюдений в широком диапазоне волн (0.8–30) см, что выгодно отличает эти инструменты от интерферометров.

БПР был введен в эксплуатацию в 1956 году [1], и на этот момент его разрешающая способность на волне 3 см была рекордной. Вначале исследования радиоизлучения Солнца на БПР проводились наряду с другими астрофизическими задачами, такими как исследование Луны, Венеры, межзвездного газа, галактических и внегалактических источников. А.П. Молчанов, возглавивший исследования Солнца, сформулировал основные принципы, которым должны удовлетворять эти исследования – регулярность наблюдений (Солнце – объект переменный) и обязательно спектральных, что необходимо для изучения природы солнечного радиоизлучения. Реализация этих принципов нача-

лась с 1963 года под руководством Г.Б. Гельфрейха, с этого момента наблюдения Солнца на БПР приобрели характер регулярной (ежедневной) Службы радиоизлучения Солнца с высоким разрешением. Благодаря сочетанию высокого пространственного разрешения и возможности проводить спектрально-поляризационные исследования, были получены новые результаты [2], что оказало большое влияние на развитие представлений о природе солнечного радиоизлучения. В частности, анализ наблюдений Солнца на БПР [2] привел к совершенно новому выводу, отличному от господствовавшего в то время [3], а именно: при интерпретации результатов наблюдений источников S- компоненты необходимо привлекать не только тепловые, но и нетепловые механизмы излучения. В последующем этот вывод полностью подтвердился наблюдениями на РАТАН-600 и ССРТ [4].



Рис.1. Основная отражающая поверхность Большого пулковского радиотелескопа (БПР).
Фото 2003 г.

Архив регулярных наблюдений Солнца на БПР охватывает почти 4 солнечных цикла и пополняется до сих пор. Таким образом, накоплен большой наблюдательный материал, который позволяет проводить статистические исследования на основе однородного ряда данных, полученных и обработанных по единой методике. Этот ряд дает возможность изучать процессы различной длительности – от довольно коротких периодов развития конкретной активной области вплоть до исследований на протяжении нескольких (1-4) солнечных циклов.

Своим долголетием БПР обязан постоянному обновлению и модернизации, которую все эти годы удавалось проводить, не прерывая наблюдений. БПР является сложным комплексом механических устройств и аппаратуры. Модернизация касалась всех служб инструмента и проводилась одновременно по нескольким направлениям:

1. обновление приемной аппаратуры;
2. совершенствование системы сбора данных и их обработки;
3. реконструкция антенного хозяйства;
4. проведение юстировки;
5. создание электронного архива.

Ниже приведены основные результаты модернизации БПР, а также наиболее значимые результаты исследований Солнца, полученные за последние 30 лет и касающиеся указанной выше тематики – исследования солнечно–земных связей и разработки методов прогнозирования мощных вспышек на Солнце.

Приемная аппаратура

Спектрально-поляризационный комплекс приемной аппаратуры БПР представляет 10-канальную систему, состоящую из 5-ти поляриметров, работающих на фиксированных частотах в диапазоне (2–20) см. Каждый поляриметр регистрирует два параметра Стокса – I и V. Распределение значений фиксированных частот по диапазону выбрано неслучайно – они отличаются в ~ 1.5 раза, что исторически было продиктовано требованиями циклотронного механизма [2], который, как считалось, объяснял характеристики источников S–компоненты радиоизлучения Солнца. В целях сохранения однородности получаемого на БПР материала, при модернизации аппаратуры прилагались усилия для поддержания этого распределения неизменным. В таблице 1 приведены значения частот, на которые были настроены приемники в ранний период до 1976 г., и их изменения со временем.

Таблица 1.

Год	Длина волны, см					Кол-во наблюдений за год
	2.3	3.2	4.5	6.6	9.0	
1976	2.3	3.2	4.5	6.6	9.0	310
2004	2.7	3.2	4.5	6.2	20.0	360

Модернизация приемной аппаратуры началась в 1979 году с замены ламповых супергетеродинных приемников на твердотельные супергетеродинные приемники. Первые два поляриметра нового поколения (на волну 2.3 см и 3.2 см) были сконструированы, изготовлены и установлены на БПР Болдыревым С.И. В дальнейшем работа по обновлению аппаратуры на БПР, проходившая в несколько этапов, была продолжена Ильиным Г.Н. (6.2 см), Венгером А.П. (20 см) и Богодом В.М. (4.5 см, 2.7 см и 3.2 см). К 1990 году на всех частотах были введены в эксплуатацию транзисторные приемные устройства (ПУ) прямого усиления модуляционного типа.

ПУ содержат один или несколько транзисторных усилителей с вентиляемыми элементами развязки, полосно-пропускающий фильтр, формирующий полосу принимаемых сигналов, квадратичный детектор и предварительный усилитель низкой частоты. Шумовая температура ПУ определяется типом входного транзисторного усилителя и омическими потерями во входном тракте. Она находится в пределах 400–600 К, что вполне достаточно для приема излучения такого мощного источника, каковым является Солнце.

Серьезную проблему для наблюдений на БПР представляет большая длина кабельных линий, соединяющих приемные устройства, расположенные в термостатируемом контейнере под вторичным зеркалом антенны, с помещением аппаратной БПР, находящейся на расстоянии ~ 150 м. В настоящее время введена новая система передачи выходных сигналов ПУ на основе линий типа «витая пара». Использование в качестве передатчиков и приемников сигналов комплекса микросхем Analog Device AD8132,

AD8130 позволило реализовать передачу слабых (~ 50 мВ) сигналов на указанное расстояние и практически избавиться от синфазной (50 Гц) наводки, что в значительной мере увеличило стабильность наблюдений.

Наиболее насущной задачей дальнейшей модернизации приемной аппаратуры БПР является возобновление наблюдений Солнца в диапазоне 10 см. Это потребует конструирования и изготовления соответствующего ПУ и первичного облучателя.

Система сбора данных и их обработки

Совершенствование этой системы долгое время не находило своего решения. До 1999 года регистрация наблюдений велась с помощью самописцев на бумажную ленту с дальнейшей ручной оцифровкой 20% всех записей (только на одной из волн). С 2000 года начался постепенный перевод записи наблюдений непосредственно на магнитные носители. В 2004 году была разработана принципиально новая система регистрации, которая (кроме основной задачи – сбора данных) позволила вплотную приблизиться к решению проблемы полной автоматизации наблюдений, сведя работу оператора к минимуму.

Новая система регистрации использует принцип цифрового синхронного детектирования принимаемого сигнала и, таким образом, заменяет собой громоздкую и трудоемкую в эксплуатации аналоговую систему. Управляющие модуляторами сигналы вырабатываются программным способом и поступают к модуляторам через соответствующий драйвер по гальванически развязанным линиям. Основой системы сбора является совместное использование PC1300MHz/Intel Pentium и многофункциональной платы аналого-цифрового ввода-вывода (PC ATX/AMD 1300Мгц и ICPDAS Co., LTD, Taiwan – PCI-1802L). В результате работы программы на жестком диске компьютера получается файл с именем, соответствующим текущей дате, содержащий все записи данного дня. Стандартный размер файла наблюдений вместе с калибровками составляет около 400 Кб. На рисунке 2 показано, как выглядит скан Солнца, полученный на БПР 25 августа 2006 года на волне 4.5 см, и его совмещение с изображением Солнца. На этом этапе регистрации и первичной обработки получают данные, пригодные для оперативного представления в различные информационные системы и бюллетени.

На втором этапе обработки с целью получения характеристик источников радиоизлучения по наблюдениям на БПР (поток, размер, яркостная температура, знак и степень поляризации) в настоящее время используется версия программы Work Scan. Она была разработана для обработки сканов Солнца, получаемых на РАТАН-600 [5], и пересмотрена нами с учетом параметров БПР и особенностей обработки наблюдений Солнца на этом инструменте [6]. Для преобразования первичных данных, регистрируемых системой сбора, в модифицированный Fit-формат для ввода в программу Work Scan были разработаны в 2000 году программа SunW (автор Курочкина Е.Н.), а с 2002 года – Fconvertor (автор Топчило Н.А.). С помощью этих программ, кроме преобразования форматов данных, выполняются также калибровки регистрируемых сигналов.

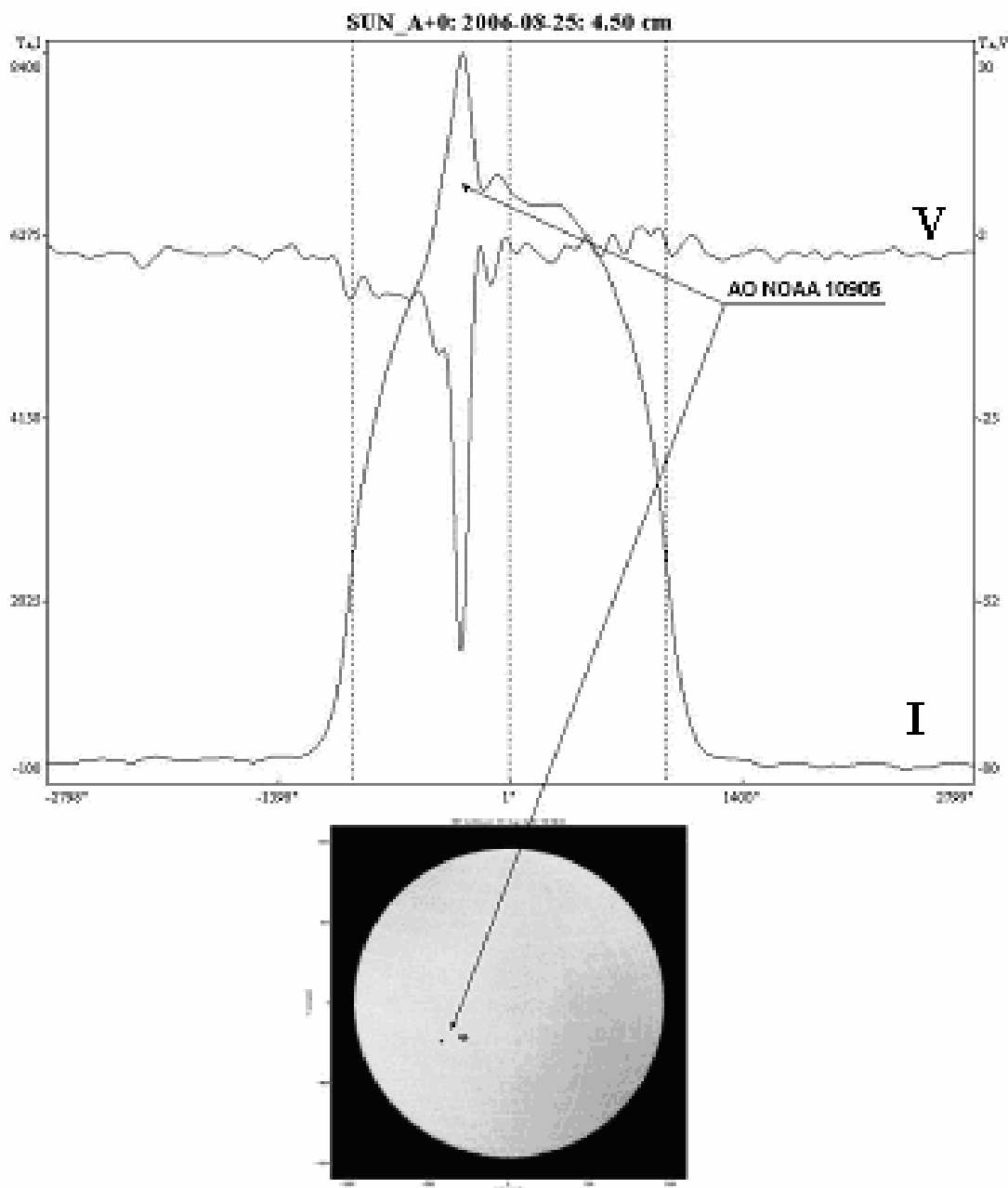


Рис. 2. Образец скана Солнца, полученного на БПР 25 августа 2006 г. на волне 4.5 см, и его сопоставление с изображением Солнца по данным <http://www.solarmonitor.org/>.

Реконструкция антенного хозяйства

Основное направление реконструкции после 1974 г. касалось вторичного облучателя. Была произведена замена открытой каретки, где располагалась высокочастотная часть приемной аппаратуры, на закрытый термостатируемый контейнер (см. фото на рис.3), изготовленный по проекту Коркина Э.И. силами мастерских Филиала САО. Это исключительно важное мероприятие не только положительным образом отразилось на работе приемной аппаратуры, но и явилось тем фактором, который до сих пор обеспечивает ее сохранность в условиях местонахождения на неохраняемой территории.

Наиболее насущной задачей дальнейшей модернизации антенного хозяйства является реконструкция рельсового пути и колесной пары облучателя. Разработан эскизный проект (см. рис. 3), который можно было бы осуществить силами мастерских ГАО,

но его реализация упирается в финансовые трудности. В стадии разработки находится также проект автоматического управления шторкой, закрывающей (открывающей) первичные облучатели, что необходимо для планируемого перехода на полностью автоматизированный режим наблюдений.

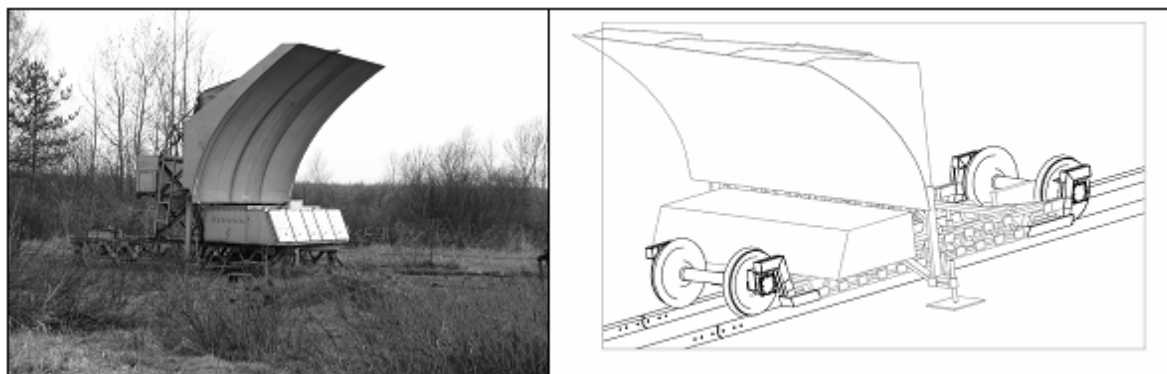


Рис. 3. Вторичный облучатель БПР (фото 2003 г.) и проект реконструкции рельсового пути и передвижной части вторичного облучателя (автор А.В. Потапович).

Юстировка

Для юстировки поверхности основного отражателя АПП разработано несколько методов: геодезический, радиотехнический, радио-автоколлимационный и радиоастрономический. Конструкция телескопов типа АПП требует проведения регулярной юстировки основного отражателя. Однако этот режим не удалось сохранить на БПР, когда в 1974 г. служба юстировки перешла на РАТАН-600, и в последние годы юстировка БПР проводилась эпизодически. Это не означает, что в отсутствие юстировок состояние отражающей поверхности главного отражателя никак не контролировалось. Качество наблюдений постоянно оценивалось косвенным методом – путем сопоставления с результатами независимых наблюдений, в частности, с наблюдениями на РАТАН-600 (см. пример на рис. 4).

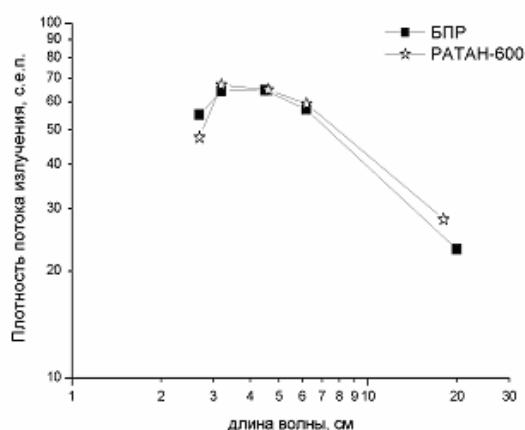


Рис. 4. Результаты сопоставления измерений спектральной плотности потока излучения АО по наблюдениям на БПР и РАТАН-600.

Как правило, результаты совпадали с точностью не хуже 20%, включая коротковолновый диапазон, что в среднем соответствует точности самих измерений. Здесь уместно отметить, что такого рода проверка была полезна и для РАТАН-600, особенно в периоды ввода в эксплуатацию новой аппаратуры.

Ситуация изменилась к лучшему в 2002 г., когда была возобновлена юстировка БПР геодезическим методом. Сейчас она проводится с использованием лазерного дальномера, что существенно сокращает трудоемкость процесса и затрачиваемое на него время. Результаты геодезической юстировки БПР, выполненной в 2006 г., сведены в Таблицу 2.

Таблица 2.

Шкала	Ошибка МО	Эквив. ошибка поверхности
Азимут	0.15 мм	0.2 мм
Угол места	$\pm 0.8 \text{ '}$	$< 0.15 \text{ мм}$
Расстояние	$\pm 0.4 \text{ мм}$	$\pm 0.4 \text{ мм}$ (при $h = 40 \text{ град.}$)

Примечание. В таблице приведены ср. кв. значения величин, h – высота Солнца над горизонтом, МО – места нулей.

Таким образом, суммарное влияние ошибок определения МО всех трех шкал характеризуется ср. кв. ошибкой поверхности $\pm 0.5 \text{ мм}$. Точность реальной отражающей поверхности будет хуже, она отягощена еще целым рядом трудно учитываемых ошибок. В их числе ошибки установки щитов в расчетное положение при подготовке радиотелескопа к наблюдениям, ошибки поверхности каждого щита, а также набор ошибок, обусловленных геометрией АПП. Точность реальной поверхности можно оценить по «подложке» на радиоизображении Солнца по методике [7]. Такая оценка произведена по наблюдениям, выполненным после юстировки 2006 г. (см. скан на рис.5). Оказалось, что $\sigma = 1.8 \text{ мм}$. Вид сканов свидетельствует о том, что в настоящее время главный лепесток диаграммы БПР хорошо формируется во всем рабочем диапазоне, включая самую короткую волну 2.7 см, и позволяет уверенно отделить запись в главном лепестке от рассеянного фона («подложки»).

Как известно [1], предельной (самой короткой) проектной границей диапазона, в котором способен был работать БПР, являлась волна 3 см. Поэтому результаты юстировки 2006 г. на первый взгляд кажутся удивительными, если учесть естественное и неуклонное старение поверхности отражателя на протяжении почти полувека. Это объясняется тем, что в 1965–1967 гг. БПР был реконструирован (щиты переобшиты) для работы на более коротких волнах вплоть до 8 мм. К настоящему времени предельной для БПР можно считать волну $\sim 2 \text{ см}$ ($\sigma = 1.8 \text{ мм}$), что подтверждается и сопоставлением с результатами наблюдений Солнца на РАТАН–600. Таким образом, благодаря реконструкции 1967 г. параметры БПР (основной рефлектор и вторичный отражатель) в настоящее время несколько лучше, чем заложенные в проекте.

В целом, анализ качества наблюдений Солнца на БПР в последние 30 лет показывает, что фундамент инструмента давно устоялся, и сезонные подвижки уже не носят необратимый характер. Поэтому юстировки можно проводить реже, чем это требовалось в первые годы работы инструмента.

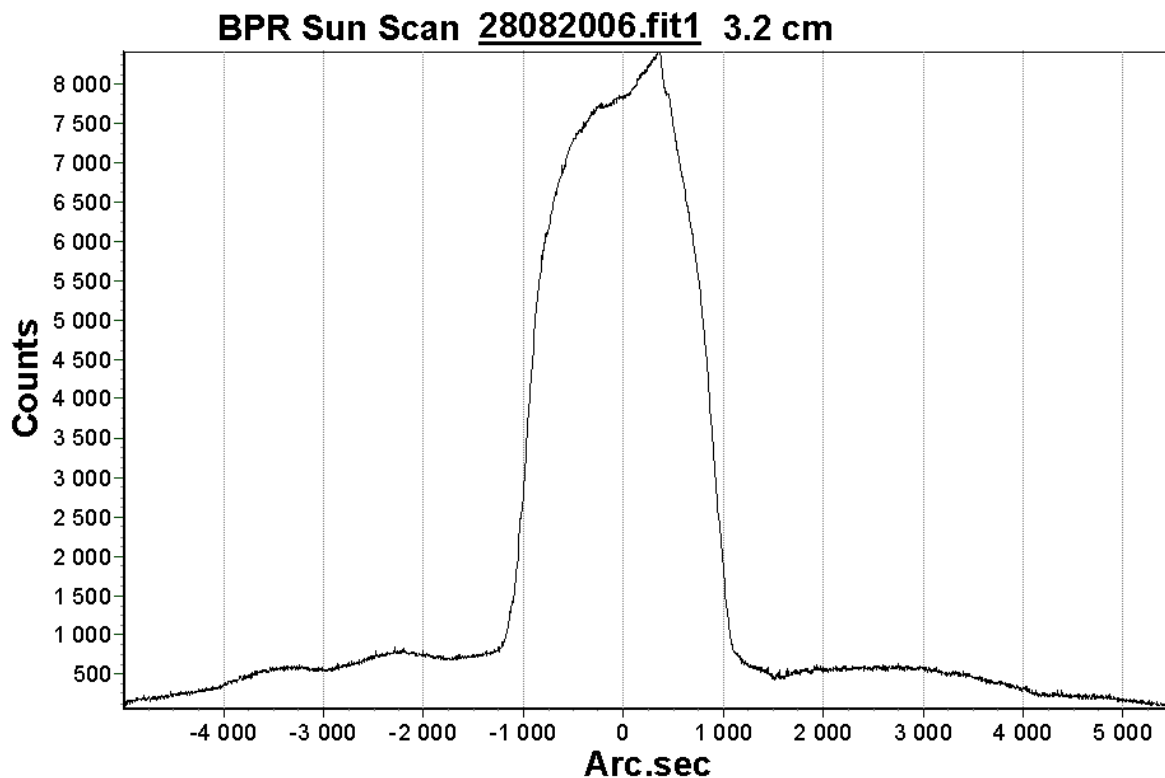


Рис.5. Скан Солнца, полученный по наблюдениям на БПР на волне 3.2 см.

Создание электронного архива

Как указано выше, регулярные наблюдения Солнца на БПР начались в 1963 г. В период до 1974 гг. архив спектрально-поляризационных наблюдений создавался совместными усилиями целого коллектива авторов, каждый из которых (на своей волне) проводил ежедневные наблюдения с помощью созданной им аппаратуры, участвовал в исследовании диаграммы БПР и проведении юстировки, а также в решении методических задач, связанных с обработкой и интерпретацией наблюдательных данных:

- 2.0 см – Нагнибеда В.Г;
- 3.2 см – Боровик В.Н.;
- 4.5 см – Петерова Н.Г.;
- 6.6 см – Гольнев В.Я. и Ихсанова В.Н.;
- 9.0 см – Ахмедов Ш.Б.

После перехода части этого коллектива на РАТАН-600, накопленный к тому времени архив наблюдений Солнца на БПР (на всех волнах) был собран в единое целое Н.Г. Петеровой, систематизирован и в дальнейшем пополнялся и контролировался под ее руководством. До 1999 г. запись проводилась на бумажной ленте.

Работа по переводу бумажного архива наблюдений в электронную форму была организована Абрамовым-Максимовым В.Е. (ГАО РАН). Под его руководством отсканирован материал за период 1970-1996 гг., а при участии Гречнева В.В. разработана методика оцифровки отсканированного материала, опубликованная в [8]. Таким образом, обеспечены условия для создания электронного Каталога наблюдений Солнца на БПР.

Исследования солнечно-земных связей

Влияние солнечной активности (СА) на земную жизнь столь велико, что современный человек должен знать о ее состоянии на повседневном уровне, наравне с прогнозом погоды. Развитие СМИ позволяет в наше время оперативно довести эти сведения до широкой аудитории. Необходимо только, чтобы эта информация была доступна для понимания населением, не имеющим астрономического образования. В этих целях по наблюдениям Солнца на БПР была разработана относительная 10-бальная шкала для оценки уровня СА [9], которая бы легко воспринималась по аналогии, скажем, со шкалой Рихтера для землетрясений. Предлагаемая методика достаточна, чтобы отмечать прохождение по диску Солнца наиболее крупных активных областей (площадь пятен S_p более $500 \cdot 10^6$ долей площади полусферы Солнца), когда возрастает вспышечная активность Солнца, а, следовательно, и геоэффективность проявлений СА. В отличие от общеизвестных, новый индекс СА фиксирует не количество активных областей (АО) или интенсивность их интегрального радиоизлучения, а характеризует величину потока излучения в диапазоне (3-5) см самой крупной АО, присутствующей на диске Солнца в данный момент. Использование этой методики в реальном времени было опробовано на телевидении в программе ТНТ "Солнечный прогноз" в апреле-декабре 2001 г. и не получило развития только из-за трудностей с финансированием.

Существование гелиообусловленных изменений земной погоды не вызывает сомнения, тому есть подтверждение в многочисленных исследованиях солнечно-погодных связей. Однако характер этих связей зависит от места и времени наблюдений. Это свидетельствует о том, что атмосферные процессы определяются в основном земными условиями, а солнечное воздействие выражается в некоторой модуляции этих процессов.

По наблюдениям Солнца на БПР в течение последних 10 лет ведется исследование гелиообусловленных изменений земной погоды на Северо-Западе России. Были обнаружены эффекты, связанные с прохождением по диску Солнца отдельных АО [10]. Оказалось, что эти эффекты знакопеременны и зависят от асимметрии распределения АО на диске Солнца, причем характер зависимости различен для холодного и теплого сезона года. Глубина модуляции температуры воздуха зимой может достигать 10°C .

В согласии с результатами исследования эффектов, связанных с прохождением по диску Солнца отдельных АО, находятся и исследования температурного ряда за длительный период ~ 60 лет. Обнаружена положительная корреляция среднегодовой температуры воздуха ($\Delta t^\circ\text{C}$) с числом Вольфа (W) со сдвигом в ~ 2 года, которая резко нарушается в 20-м цикле СА. Этот цикл оказался аномальным и по многим другим параметрам.

Сопоставление астрономических и метеоданных показало, что усиление СА приводит к изменению характера циркуляции земной атмосферы, а именно, к усилению ее зональной составляющей. Этим можно объяснить наблюдаемые гелиообусловленные вариации погоды на Северо-Западе России, ибо данный регион находится под влиянием теплой Атлантики. В рамках такого подхода открывается возможность согласовать между собой разноречивые результаты исследований. Действительно, один и тот же процесс, к примеру, усиление зональной циркуляции, может сопровождаться совершенно разными эффектами в географически удаленных регионах земного шара. Практическая значимость этих работ – увеличение оправдаваемости метеопрогнозов – очевидна.

Разработка методов прогнозирования мощных вспышек

Исследование СА и развитие методов ее прогнозирования продолжает оставаться в числе приоритетных задач физики Солнца. БПР является идеальным инструментом

для прогнозирования мощных вспышек на Солнце с использованием известной методики – критерия Танаки-Эноме [11]. Это одна из немногих методик, развитых по наблюдениям в радиодиапазоне. Она позволяет предсказывать мощные вспышки по спектрально-поляризационным характеристикам микроволнового излучения АО в квазиспокойном состоянии.

БПР – единственный инструмент, на котором можно собрать всю необходимую для критерия информацию, не обращаясь к другим инструментам. По сравнению с РАТАН-600 у него имеется то преимущество, что он «лучше видит» высокоширотные АО. Критерий в свое время был опробован по наблюдениям на БПР [12]. Методика показала хорошую оправдываемость, что в очередной раз было подтверждено на примере активности в октябре–ноябре 2003 г. [13].

Исследование солнечно–земных связей и разработка методов прогнозирования вспышечной активности Солнца, безусловно направлены на решение задач, которые имеют практическое значение. Однако результативность развития этой тематики во многом зависит от достижений фундаментальных исследований в области физики солнечной плазмы, главным образом – проблемы ее нагрева. Такого рода исследования всегда велись и продолжают на основе наблюдений Солнца на БПР. Одним из достижений последних лет является разработка метода, с помощью которого можно оценить содержание горячей (~ 7 МК) и холодной (~ 2 МК) плазмы в короне над АО [14]. При этом удалось объяснить расхождение между результатами наблюдений в радио и рентгеновском диапазонах, что долгое время вызывало вопросы у исследователей. Результаты работы [15] показывают, что наблюдения в радиодиапазоне не дублируют рентгеновские, а дают новые, важные сведения об активной короне Солнца, которые можно извлечь сравнительно просто, используя наблюдения с умеренным пространственным разрешением, в частности на БПР, не прибегая к наблюдениям с высоким пространственным разрешением, требующим более трудоемкого анализа.

Авторы признательны Н.Л. Кайдановскому за замечания, сделанные им при ознакомлении с рукописью.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 06-02-17357, 06-02-16838, договора ОФН-16.

Литература

1. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А., Шиврис О.Н.*, Изв. ГАО, 1960, т. 164, с. 3.
2. *Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гольнев В.Я., Коржавин А.Н., Нагнибеда В.Г., Петерова Н.Г.*, Изв. ГАО, 1970, т. 185, с. 165.
3. *Злотник Е.Я.*, 1968, АЖ, т. 45, с. 310 и с. 585.
4. *Коржавин А.Н.* Докторская диссертация, 1994.
5. *Гараймов В.И.*, 1997, Препринт САО РАН, 127Т, Н.Архыз.
6. *Боровик В.Н., Петерова Н.Г.*, 1987, Солнечные данные, № 1, с.66.
7. *Голосова С.Я. и др.* Астрофиз. Исслед. (Изв. САО) 1982, № 15, с. 132-150.
8. *Grechnev, V.V.; Abramov-Maksimov, V.E.; Peterova, N.G.; Borisevich, T.P.; Kaltman, T.I.; Meshalkina, N.S.*, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg. (ISSN 0320-9318), 2003, V. 56, p. 126.
9. *Peterova N.G., Bogod V.M., Borisevich T.P., Shpital'naja A.A., Il'in G.N., Abramov-Maksimov V.E., Garaimov V.I.*, 2002, Bull. Spec. Astrophys. Obs., v. 54, p. 127.

10. *Петерова Н.Г., Головина Е.Г., Шпитальная А.А., Борисевич Т.П., Ильин Г.Н.*, Сборник докладов конференции стран СНГ и Прибалтики «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности», Н. Новгород, 2-7 июня 2003, т.2, с. 430.
11. *Такака Н., Епоте С.*, 1975, Solar Phys., v. 40, p. 123.
12. *Коробчук О.В., Петерова Н.Г.*, 1980, в сб. “Радиоизлучение Солнца”, изд. ЛГУ, вып. 5, с. 102.
13. *Борисевич Т.П., Ильин Г.Н., Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Шпитальная А.А.*, Космические Исследования, 2004, т. 42, № 6., с. 586-594.
14. *Коржавин А.Н., Борисевич Т.П., Петерова Н.Г.*, Астрономический вестник, 2006, т. 40, № 2, с.181-186.

THE LARGE PULKOVO RADIO TELESCOPE

**Peterova N.G.¹, Zverev Yu. K.¹, Topchilo N.A.², Borisevich T.P.³, Golosova S.Y.⁴,
 П'ин G.N.⁵, Korzhavin A.N.¹, Potapovich A.V.³**

¹*St.-Petersburg branch of the Special Astrophysical Observatory, St.-Petersburg, Russia*

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

³*Central astronomical observatory at Pulkovo of RAS, St.-Petersburg, Russia*

⁴*Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia*

⁵*Institute of Applied Astronomy of RAS, St.-Petersburg, Russia*

Summary

The paper presents the results of the operation of the Large Pulkovo radio telescope (LPR), since 1974 when LPR became the specialized telescope for solar observations. Daily solar observations have been made all these years non-stop, even when the telescope was modernized. In recent years the LPR has been used for development of methods of the forecast of solar activity.

ИСТОРИЯ НАУКИ

**ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ
БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА (БПР)
И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА
(к 50-летию начала наблюдений)**

Ихсанова В.Н.

Статья посвящена истории создания в Пулковской обсерватории отдела радиоастрономии, строительству радиотелескопа с высокой разрешающей способностью в сантиметровом диапазоне волн (БПР) и первым результатам наблюдений радиоизлучения Солнца.

В восстанавливаемой после войны Пулковской обсерватории её директор, член-корреспондент АН СССР А.А. Михайлов, принял решение создать в ГАО совершенно новый отдел - отдел радиоастрономии, и на пост его заведующего пригласить из Москвы профессора Семёна Эммануиловича Хайкина.

А.А. Михайлов был начальником, а С.Э. Хайкин его заместителем экспедиции по наблюдению в 1947 г. солнечного затмения в Бразилии, где проявились его блестящие организаторские способности и научная эрудиция, приведшие к успеху всей экспедиции.

30 мая 1952 г. на Учёном совете ГАО АН СССР С.Э. Хайкин выступил с докладом, в котором определил задачи нового отдела.

В обширном перспективном плане отдела предусматривалось проводить исследования по двум основным направлениям, отвечающим традиционной пулковской тематике. Предполагалось:

- 1) измерение координат радиоисточников (радиоастрометрия),
- 2) исследование их спектральных потоков излучения и поляризации, а также изучение монохроматического излучения дейтерия и водорода (радиоастрофизика);
- 3) разработка новой методики радиоастрономических наблюдений;
- 4) радиотелескопостроение - теоретические разработки и практическая реализация, в том числе изготовление отдельных узлов и приборов в своей мастерской.

Необходимо было построить двухэтажное здание и ряд радиотелескопов различных размеров. Главным радиотелескопом отдела должен был стать Большой пулковский радиотелескоп - БПР - оригинальной конструкции.

За два месяца до этого доклада С.Э. Хайкин и Н.Л. Кайдановский получили авторское свидетельство на новый тип радиотелескопа - антенну с отражателем переменного профиля - АПП - называемую вначале «веерной антенной».

Новаторская идея С.Э. Хайкина состояла, прежде всего, в том, что можно было имеющимися простыми средствами создать радиотелескоп, который по своей разрешающей способности в одном направлении превзошёл бы все, имеющиеся в 50-е годы, радиотелескопы мира. Для этого С.Э. Хайкин смело перешёл на сантиметровый диапазон волн, поскольку, чем короче волна, на которой идёт исследование, тем выше разрешающая способность радиотелескопа, и, во-вторых, от привычных сплошных металлических зеркал он предложил перейти к составной его поверхности.

Из воображаемого эллиптического конуса диаметром 200 м вырезалась лента, которую следовало разделить на отдельные плоские элементы - «щиты» - размером 3×1,5 м и укрепить каждый щит на своём, независимом от других щитов фундаменте. Это второе условие позволило выполнить поверхность каждого отражающего элемента с

отклонением, не превышающим 1 мм, и устанавливать его по трём параметрам: высоте, азимуту и радиальному перемещению по специальным шкалам с точностью, на порядок превосходящую достижимую точность в сплошных металлических конструкциях того же размера.

В целом получалась идеально юстируемая и устанавливаемая часть поверхности эллиптического конуса, формирующая диаграмму направленности радиотелескопа в виде вертикального ножа, поскольку в вертикальном направлении размер такого радиотелескопа составляет 3 метра, а в горизонтальном - это составленная из 90 щитов изогнутая лента, хорда которой равна 130 м. По своему виду антенна напоминает установленный на земле гигантский веер, расположенный симметрично относительно меридиана.

Радиотелескоп преобразует падающую на его поверхность плоскую волну от проходящего через меридиан источника в волну цилиндрическую, фокусируемую на вертикали фокальной плоскости, отстоящей в среднем на 60 м от вершины радиотелескопа, где на тележке, передвигающейся по рельсам, располагается вторичное металлическое зеркало, преобразующее цилиндрическую волну в сферическую, которая и поступает в тракт приёмной аппаратуры.

Доклад С.Э. Хайкина был выслушан с большим интересом, хотя не обошлось и без скептиков, и ещё долго отношение к радиоастрономии со стороны астрономов-классиков определялось «формулой», высказанной в Бразилии А.А. Михайловым, что «в электричестве сидит чёрт».

И, тем не менее, следовало признать, что Пулковская обсерватория вступала на новый, ещё никем не проторенный путь.

Однако, даже такой, не предвещавший колоссальных затрат, (но предвещавший мировой приоритет!) телескоп в первоначальную финансовую смету строительства обсерватории включён не был, поэтому предстояло где-то добывать деньги на его строительство. Требовалось 200 000 руб. (по курсу 50-х годов).

Но А.А. Михайлов и С.Э. Хайкин были единомышленниками и считали, что настоящая слава обсерватории - это, прежде всего, её научный престиж, который завоевывается новыми большими достижениями в астрономической науке. И А.А. Михайлов взял на себя смелость и ответственность перебазировать часть средств, ассигнованных Академией Наук на строительство второй очереди обсерватории (мраморной лестницы, идущей через парк к подножию Пулковского холма) для немедленного строительства здания отдела радиоастрономии и Большого пулковского радиотелескопа.

Организация отдела радиоастрономии в Пулкове началась ещё до официального Второго открытия обсерватории и до перехода проф. С.Э.Хайкина из ФИАН в Москве на работу в Пулковскую обсерваторию. В 1952 г. из Крымской экспедиции ФИАН в ГАО были переведены молодые специалисты радиоинженеры Николай Федосеевич Рыжков и Тамара Михайловна Егорова.

Здание отдела радиоастрономии существовало пока только на чертежах, поэтому первых сотрудников будущего отдела радиоастрономии принял в свою лабораторию старший научный сотрудник Николай Фёдорович Купревич, проводивший впервые в СССР опыты по применению телевизионной техники для целей астрономии. Вскоре в будущем отделе появился первый радиотехник, Николай Степанович Евграфов, а в 1953 г. первый аспирант - молодой специалист ЛГУ, астрофизик Вера Николаевна Ихсанова.

С.Э. Хайкин заботился также о перебазировании из Москвы в Пулково двух малых металлических зеркал с диаметрами 4 м, на которых планировалось начать наблюдение интегрального потока радиоизлучения Солнца и его поляризованной составляю-

шей в сантиметровом диапазоне волн. Для дециметровых волн предполагалось построить интерферометр из 2-х зеркал диаметрами 12 м со стометровой базой.

В 1953 г. по эскизному проекту одного из отражающих элементов веерной антенны С.Э. Хайкин заказал на Сызранском заводе тяжёлого машиностроения 90 таких элементов - всю дугу будущего радиотелескопа. К концу 1955 г. заказ был готов и доставлен в Пулково.

К этому времени будущий отдел радиоастрономии разместили в двух лабораториях восточного корпуса главного здания. Отдел продолжал расти; здесь появились новые молодые специалисты, выпускники Ленинградского Политехнического института: в 1954 г. радиоинженер - исследователь Дмитрий Викторович Корольков и аспирант, специалист по теории антенных систем, Нелли Александровна Есепкина, руководителем которой также стал проф. С.Э. Хайкин.

В мае 1954 г. приказом директора Пулковской обсерватории чл.-корр. АН СССР А.А. Михайлова небольшой коллектив радиоастрономов обрёл статус отдела. Его заведующим был назначен проф. С.Э. Хайкин.

В 1955 г. сотрудниками отдела радиоастрономии ГАО АН СССР стали молодые специалисты МГУ, радиоастрономы Юрий Николаевич Парийский и Наталья Сергеевна Соболева. Тогда же на должность старшего инженера-радиота был принят выпускник Высшего Мореходного училища им. вице-адмирала С.О. Макарова молодой специалист Олег Николаевич Шиврис.

Так постепенно создавался сплочённый коллектив отдела. У Семёна Эммануиловича было правило: за очень редкими исключениями приглашать сотрудников только со студенческой скамьи и передавать им свой опыт, (вместе с которым передавалось и воспринималось и его святое отношение к делу).

В 1955 г. на юго-западном участке территории обсерватории началось строительство 2-х этажного здания отдела радиоастрономии с лабораториями, рабочими кабинетами и механическими мастерскими. Одновременно к западу от здания по дуге круга радиусом 100 м был вырыт котлован для последующей установки фундаментов щитов радиотелескопа и построен центр дуги.

Встала задача определения астропункта этого центра, чтобы через него провести точный меридиан, относительно которого геодезическим способом разметить положения фундаментов каждого из щитов БПР. Для этой цели понадобился оптический универсальный инструмент, с помощью которого по наблюдению звёзд определяются точные широты и долготы мест (для построения географических карт и наблюдений солнечных затмений).

Такого экспедиционного инструмента в обсерватории не было; пришлось добывать и привезти его из учебной обсерватории ЛГУ.

Универсальный инструмент был установлен на высоком фундаменте центра антенны, и с его помощью В.Н. Ихсанова и О.Н. Шиврис получили широту и долготу, т.е. астропункт центра фундамента, который был проверен по «переносу меридиана», проходящего через вертикальный круг на научной площадке обсерватории.

Полученный точный меридиан БПР был закреплён измеренными от него азимутами двух вертикальных металлических шестов, находящихся на куполе центральной башни главного здания обсерватории. На концах этих шестов были укреплены сигнальные красные светильники, защищавшие купол от возможных низких пролётов самолётов. Далее была сделана геодезическая разметка положений фундаментов для всех 90 щитов.

В январе 1956 г. в г. Горьком (Нижем Новгороде) состоялась Всесоюзная радиоастрономическая конференция, участниками которой были известные учёные - радиоастрономы и специалисты антенной техники, среди них: С.Э. Хайкин, И.С. Шкловский,

В.Л. Гинзбург, В.С. Троицкий, Л.Д. Бахрах, Н.Л. Кайдановский, В.В. Виткевич, А.Е. Саломонович, а также представители более молодого поколения этой новой в те времена науки В.В. Железняков, В.А. Разин, И.Г. Моисеев, Д.В. Корольков, Н.Ф. Рыжков, Ю.Н. Парийский, В.Н. Ихсанова.

На одном из первых заседаний С.Э.Хайкин сделал доклад о проекте БПР. Доклад вызвал бурную дискуссию. Выступавшие (И.С. Шкловский, В.С. Троицкий, В.В. Виткевич, В.Л. Гинзбург) один за другим находили «весьма существенные недостатки» проекта. Прежде всего, подверглась критике «ножевая» диаграмма направленности, хотя привычная «игольчатая» уступала ей в те времена на порядок величины. Сомневались в достаточной чувствительности приёмной аппаратуры и, главным образом, не принимались расчленённость поверхности радиотелескопа и отсутствие опыта работы в таких условиях.

С.Э. Хайкин со стенографической скоростью записывал все выступления, задавая ораторам по ходу дела конкретные короткие вопросы. С одобрением проекта БПР выступил только специалист по теории и технике антенн чл.-корр. АН СССР Лев Давыдович Бахрах.

После доклада и выступлений был объявлен перерыв, во время которого все присутствующие шумно обменивались мнениями. Очень огорчённым чувствовал себя при этом Наум Львович Кайдановский и на вопросы к нему отвечал: «Я же всегда говорил, что такая антенна работать не будет».

Когда перерыв закончился, Н.Ф. Рыжкова и В.Н. Ихсанову, как молодёжь, организаторы конференции попросили вести протокол второй части заседания. Предвидя снова жёсткие выступления, решено было писать протокол в 4 руки.

На сцену зала снова вышел С.Э. Хайкин. Вид у него был решительный и воинственный, - решалась судьба его главного детища, - поистине он был «весь, как Божия гроза». Не пропустив ни одного замечания, чётко и со всей строгостью аргументировано он доказывал и убеждал в своей правоте противников его проекта БПР. И поскольку это были, как правило, не конкуренты и не злопыхатели, то большинство из них выходило вторично с выступлением, соглашаясь с новым проектом и даже с извинением, что поначалу не всё было правильно понято. Это была победа прежде всего Семёна Эммануиловича Хайкина, а также БПР и нового молодого отдела радиоастрономии [1].

Вместе с металлическими щитами антенны из Сызрани прибыли приборы для их установки по радиусу, азимуту и высоте. Бригада монтажников, которую фактически возглавлял О.Н. Шиврис, устанавливала фундаменты и щиты антенны. Работа шла слаженно и быстро - к концу лета 1956 г. каждый щит занял своё место на своём фундаменте.

Необходимо было также предусмотреть исследование диаграммы направленности радиотелескопа сначала наземным методом. Для этого требовалось установить источник облучения поверхности в меридиане антенны на вышке на расстоянии в несколько км к югу от центра БПР.

Чтобы отметить место фундамента будущей вышки, С.Э. Хайкин в конце лета 1956 г. организовал поездку на своей машине «Победа», взяв с собой специалиста - антенщика Н.А. Есепкину и в качестве геодезиста В.Н. Ихсанову. В багажник машины погрузили теодолит с треногой. Путь проходил по шоссе от Пулкова к юго-востоку, а затем к западу по полю, где недавно был убран урожай. Н.А. Есепкина рассчитала приблизительное расстояние, с которого надо было вести облучение антенны (измерено это было по спидометру «Победы»), а в задачу В.Н. Ихсановой входило найти место на поле, где должна была быть установлена вышка так, чтобы её центр находился строго в меридиане БПР. Для этого пришлось устанавливать теодолит «методом последовательных приближений», чтобы на визирной линии вместе с центром теодолита выстроились

положения центра антенны и центра прорези поверхности БПР между её центральными щитами, т.е. требовалось отыскать на поле «наш» меридиан.

Работа была не из лёгких, если учесть, что находились мы от БПР на расстоянии не менее пяти километров. Положение меридиана было найдено, каждым тщательно проверено, после чего Семён Эммануилович браво забил в землю большой кол как центр для фундамента будущей вышки, с которой предстояло снимать диаграмму направленности БПР.

Следующим этапом работы была юстировка поверхности радиотелескопа, выполняемая с помощью 100-метровой инварной проволоки, протянутой от центра окружности до краёв каждого из 90 щитов. Инварная проволока была необходима вследствие независимости её длины от температурных изменений.

Начались осенние ветры и заморозки, работа усложнялась. Установкой нульпунктов радиального перемещения щитов командовал О.Н. Шиврис, геодезической разбивкой из центра, на котором помещался теодолит, - В.Н. Ихсанова. Каждая очередная команда с обеих сторон осуществлялась с помощью самодельных рупоров. Инварную проволоку от щита к щиту переносили механики отдела.

К середине ноября 1956 г. юстировка поверхности БПР по радиальному перемещению с точностью менее 2 мм была завершена. 19 ноября в окружении всех сотрудников отдела С.Э.Хайкин завинтил отвёрткой последний винт в поверхность последнего щита - это символизировало окончательное завершение строительства радиотелескопа.

Семён Эммануилович Хайкин со всем вниманием вникал в каждый шаг работ, проводимых на строительстве. Осенью зачастили дожди, и на антенной площадке легко было подчас очутиться по колено в грязи, однако он надевал большие кирзовые сапоги и всегда бывал в курсе всех трудностей, которые с его помощью быстро преодолевались.

Наум Львович Кайдановский тоже интересовался ходом дела, для этого он обзавёлся моноклем, в который из окна 2-го этажа здания радиоастрономии наблюдал строительство, а в погожие дни его с этим же моноклем можно было видеть у западной стены здания.

В задачу Н.Л. Кайдановского входила организация расчёта координат установки каждого щита антенны в соответствии с заданными склонениями светил в меридиане БПР. Это было с успехом и своевременно проведено в одном из вычислительных центров Москвы. По этим координатам на каждый день наблюдений составлялись таблицы установки щитов и фокуса вторичного зеркала.

В это же время в лаборатории здания радиоастрономии № 8 молодой инженер-радиотехник, выпускник Ленинградского Политехнического института 1955 года Александр Фёдорович Дравских заканчивал настройку всех блоков созданного им первого приёмника для волны 3.2 см, с которым планировалось начать наблюдения радиоизлучения Солнца на БПР. Приёмник был рассчитан на широкую шкалу усиления, что позволило впоследствии наблюдать радиоизлучение не только «спокойной» поверхности Солнца и ярких корональных конденсаций над солнечными пятнами, получивших в дальнейшем название локальных источников радиоизлучения, но и высокую вспыхивающую активность, превышающую по интенсивности на два порядка и выше уровень «спокойного» Солнца.

Структура БПР должна была при облучении очень ярким источником давать дифракционную картину, что было с достаточной точностью вычислено теоретически. Следовало, однако, предварительно проверить её на практике. Для этой цели в 1954 г. в лаборатории Н.Ф. Купревича В.Н. Ихсановой было приобретено небольшое оптическое

параболическое зеркало, которое почти полностью диафрагмировалось за исключением проходящей по его горизонтальному диаметру тонкой линии, имитирующей антенну.

Далее, при облучении такого макета антенны Солнцем в фокусе Горизонтального солнечного телескопа производился снимок дифракционной картины, по которому путём фотометрирования исследовалась интенсивность боковых лепестков, оказавшаяся близкой к расчётной.

(В последствии, при наблюдении 3-го и 23-го марта 1958 г. радиоизлучения двух крупных всплесков, сигнал от которых был настолько высок, что не смог быть зарегистрированным самописцем, параметры всплесков удалось определить из исследования их излучения в боковых лепестках антенны. В.Н. Ихсановой был проведён расчёт - сможет ли БПР в своём главном лепестке зарегистрировать излучение вспышечных звёзд. Для всплеска, аналогичного 23 марта 1958 г. на предельной чувствительности тогдашней аппаратуры это оказалось бы возможным.)

Настал день 22 декабря 1956 г. В астрономический полдень ожидалась первая регистрация радиоизлучения Солнца при его прохождении через меридиан БПР. Это первое наблюдение должно было подтвердить правильность смелой идеи С.Э.Хайкина о возможности получить рекордную в мире разрешающую способность радиотелескопа в сантиметровом диапазоне волн.

В лаборатории № 8 собрались все сотрудники отдела. Каждому невольно передавалась торжественность предстоящего момента. У пульта приёмной аппаратуры первые наблюдатели: А.Ф. Дравских и В.Н. Ихсанова.

За пять минут до ожидаемого появления Солнца в диаграмме направленности радиотелескопа включается самописец - регистратор сигнала. Усиление радиометра выбрано «с запасом» на случай, если вдруг наблюдаемый сигнал окажется ниже рассчитанного.

И вот, в точно заданный момент, перо самописца нервно затрепетало и круто устремилось вверх, дойдя за несколько секунд до кромки широкой ленты самописца ... щелчок переключателя прибора - усиление уменьшено вдвое - резкий спад сигнала и снова его быстрый подъём; ещё щелчок и ... нужное усиление установлено: перо выписывает узкие пики, разделённые промежутками более спокойных областей, а затем, спустя две минуты от начала записи, плавно опускается вниз до первоначального уровня нулевого сигнала: Солнце в своей верхней кульминации прошло через меридиан БПР и спокойно продолжало свой путь по небу к западу, оставив на ленте самописца свой автограф.

Не сразу пришли в себя участники этого исторического момента. Первым нашёлся Д.В. Корольков: «Семён Эммануилович, мы Вас поздравляем!». Трудно описать наступившее ликование - результат упорнейшего труда был налицо. Главным же достижением было подтверждение правильности новой системы радиотелескопа, блестяще оправдавшей себя с первого наблюдения: никто в мире не видал до этого дня радиопортрет Солнца с такими подробностями.

Следующий день ожидался с не меньшим волнением. Хотелось убедиться в том, что пики повышенного радиоизлучения соответствуют по своему положению солнечным пятнам. И снова в лаборатории было тесно - все, от заведующего отделом до вахтёра, пришли ещё раз полюбоваться необычным явлением.

Всё шло в соответствии с законом вращения Солнца: «радиопятна» переместились за сутки примерно на 13 гелиографических градусов. Отпали последние сомнения - радиотелескоп работал!

Прошло десять дней. После небольшого мороза к новому 1957 году наступила оттепель, снег почти растаял. На антенне шла ставшей уже привычной работа - Солнце наблюдали ежедневно в полдень.

Однако картина регистрации на самописце стала изменяться: на записях появились широкие «хвосты», острые пики превратились в размытые бугорки: диаграмма направленности разваливалась на глазах.. Долго и упорно искали причину: проверялись эфемериды Солнца и таблицы установки каждого щита, наконец, вместо обученных искусству установки щитов механиков, добросовестно выполнявших свой труд, к установке встали инженеры и аспиранты. Ничего не помогало. Появились скептики и злопыхатели, утверждавшие, что система сработала случайно.

Через месяц безрезультатных поисков О.Н. Шиврис предложил заново провести геодезическую юстировку всех щитов антенны, поскольку глубина их фундаментов могла оказаться недостаточной, чтобы не реагировать на оттепель верхнего слоя земли.

Это был нелёгкий труд - в зимних условиях, по пояс в снегу, надо было переставлять 100-метровую инварную проволоку, натянутую от центра дуги, по которой стояли щиты, до каждого из щитов и проверять нуль-пункты шкал, по которым осуществляется установка всех 90 элементов.

Юстировка тут же показала, что фундаменты, на которых крепились щиты, дали из-за оттепели случайные смещения, достигающие 3-х см, т.е. точность установки при этом ухудшилась в 10 раз. Причина неудач была найдена, таблицы установки пересчитаны на новые нульпункты, и радиотелескоп снова приобрёл диаграмму направленности, близкую к теоретической.

Летом 1957 г. наблюдения Солнца на БПР стали проводиться одновременно на двух длинах волн - 3.2 и 10 см. Приёмная аппаратура на волну 10 см была подготовлена аспирантом Юрием Николаевичем Парийским, он же на этой волне проводил наблюдения.

Исследование радиоизлучения Солнца на БПР привело к следующим новым научным результатам: локальные источники повышенного радиоизлучения уверенно отождествляются с активными образованиями, наблюдаемыми оптически (группами пятен, флоккулами, вспышками). Высокая разрешающая способность БПР позволила оценить размеры локальных радиоизлучающих областей, вычислить их яркостные температуры, определить на какой высоте над фотосферой они расположены, исследовать их эволюцию, провести их классификацию, сделать оценку неоднородности солнечной короны. Всё это позволило построить модель локального источника радиоизлучения.

Если за восточным краем фотосферы крупная активная область близка к восходу, но в оптике ещё не видна, БПР даёт о ней информацию за два дня до её появления, причём локальный источник радиоизлучения наблюдается вначале на более длинной волне сантиметрового диапазона, по интенсивности которого можно сделать прогноз о его мощности на коротких волнах и, в соответствии с этим, о выходящей фотосферной активной области.

Вследствие очень высокой активности Солнца в 19-м цикле уровень его «спокойной» составляющей выделялся статистически из многих нормированных записей. По нему был проведён расчёт распределения радиояркости по диску. На расстоянии 0.8-0.9 солнечного радиуса от центра диска было обнаружено яркое кольцо, интенсивность которого составляла 70-80 процентов от уровня «спокойного» Солнца. Тёмные волокна и протуберанцы, попадая в диаграмму направленности БПР, несколько понижают спокойный уровень его излучения [2,3].

В декабре 1957 г. в Москве состоялась радиоастрономическая конференция, на которой В.Н. Ихсанова докладывала первые результаты наблюдений радиоизлучения Солнца на БПР. Когда на экране была показана первая запись от 22-го декабря 1956 г., В.В. Виткевич объявил, что «этого не может быть!» и в качестве своего доказательства привёл запись этого же локального источника на той же длине волны 3.2 см, полученного им в Крыму на радиотелескопе РТ-22, где в той же области располагался протя-

жённый радиоисточник, интенсивность которого была примерно в три раза ниже, чем на БПР. В.Н. Ихсанова попросила у В.В. Виткевича параметры диаграммы направленности РТ-22 и в перерыве просканировала запись БПР через эту диаграмму, размер которой составлял около 4-х угловых минут. В результате была получена картина радиоисточника, в точности повторившая запись РТ-22. Председатель заседания Эвальд Рудольфович Мустель попросил показать на экране обе записи рядом. Спор был решён в пользу БПР, «свидетельством чему, - как сказал Э.Р., - являются вот эти следы крови» - (расчёт и рисунок записи БПР с диаграммой РТ-22 были сделаны красными чернилами).

В августе 1958 г. в Москве проходил 10-й съезд Международного астрономического союза (МАС), на котором В.Н. Ихсановой были доложены результаты наблюдений радиоизлучения Солнца на БПР, которые были опубликованы в Трудах Парижского симпозиума, проходившего перед съездом МАС в июле 1958 г.

В конце 1958 г. группой Н.Л. Кайдановского, в которую входили Г.П. Апушкинский, В.Н. Ихсанова и О.Н. Шиврис, были начаты исследования радиоизлучения Луны на волнах короткого диапазона: 2.3 см и 3.2 см. Было получено распределение радиояркости по диску Луны, которое практически повторило рассчитанное теоретически горьковским радиоастрономом В.С. Троицким. Отсутствие каких-либо уярчений на кривой распределения радиояркости Луны укрепило уверенность в правильности результата обнаружения яркого кольца на краю диска «спокойного» Солнца.

В 1956 г. на малом зеркале с диаметром 4 м на волне 3.2 см Д.В. Корольковым и Н.С. Соболевой были впервые проведены наблюдения поляризованного радиоизлучения Солнца. 28 июля 1956 г., когда в районе солнечного центрального меридиана находилась большая группа пятен, с точностью измеряемой степени поляризации радиоизлучения до 0.1 процента была обнаружена круговая поляризация радиоизлучения. Знак поляризации повторил полярность магнитного поля на фотосфере [4].

Появилась возможность определять магнитные поля локальных источников радиоизлучения над крупными солнечными пятнами, а с 1959 г. на волнах 5.2 см и 10.6 см группой Д.В. Королькова наблюдения стали проводиться также и на БПР. Были получены оценки величины магнитных полей, кинетической температуры и плотности локальных источников на высотах 0.05 - 0.07 радиуса Солнца над фотосферой [5].

До лета 1960 г. БПР работал как пассажный инструмент при полной установке щитов в меридиане. Однако конструктивно все щиты БПР равноправны и, следовательно, его можно устанавливать для многократных наблюдений вплоть до азимутов 40 градусов в обе стороны от меридиана, при этом в работе участвует половина антенны, вершиной которой служат либо последний западный, либо восточный щиты. В этих азимутах диаграмма направленности в своём малом сечении составляет 2.2 угловых минуты. В промежутке между двумя азимутальными проводились наблюдения в меридиане при полной антенне с максимально возможным разрешением в 1.1 угл. мин. на волне 3.2 см.

Всего было получено и обработано 78 записей за 26 дней наблюдений. Двумерное распределение радиояркости по диску Солнца позволяет однозначно провести отождествление активных образований радиоизлучения с наблюдаемыми оптически. Из трёх ежедневных наблюдений можно определить точное положение центра радиоисточника, найти его высоту над фотосферой, судить о его форме. В ряде наблюдавшихся случаев имело место смещение центра радиоисточника относительно центра оптического пятна, превышающее по величине возможную ошибку наблюдений. Чаще всего это смещение было направлено вдоль меридиана к экватору для групп обоих полушарий.

Имея три наблюдения через интервалы в два часа, можно более детально проследить процесс возникновения активной области как на самом диске Солнца, так и выход

новой из-за восточного края диска, причём предсказать её положение с точностью до нескольких гелиографических градусов [6].

15 февраля 1961 г. на БПР на волнах 3.15 см и 8.7 см проводились наблюдения частного солнечного затмения в пяти азимутах и в меридиане. Во время максимальной фазы затмения, когда диск Луны закрывал локальные источники радиоизлучения, на западном краю кривой прохождения на участке спокойного Солнца был обнаружен небольшой локальный подъём излучения, объяснить который можно наличием яркого кольца на краю диска Солнца. Радиоизлучение внешних слоёв атмосферы Солнца отмечалось на волнах 3.15 см и 8.7 см до 1.3 и 1.45 радиуса Солнца соответственно.

В результате шести наблюдений был более детально прослежен восход локального источника, который при первом наблюдении в 10 час. 40 мин на волне 3.15 см отсутствовал, а на 8.7 см составлял 2.5 процента от потока излучения Солнца. В 13 час. 12 мин. на волне 3.15 см источник был обнаружен, а в 13 час. 56 мин стал отчётливо виден. На следующий день его поток на волне 3.15 см составлял 1.2, а на волне 8.7 см - 7.1 процентах [7].

В годы максимума 20-го цикла активность Солнца также была весьма высокой. Однако при относительном постоянстве наблюдаемых площадей групп пятен сопутствующие им локальные источники радиоизлучения иногда за 1-2 дня резко понижали спектральную плотность потока: от 20 до 50 процентов. Так, с 11-го до 13-го января 1969 г. на волне 6.6 см поток изменился с 54-х до 22-х единиц измерения: 12-го и 13-го января в районе этой группы №7 (Солнечные данные, 1969, 1.) наблюдались две хромосферные вспышки. Подобное явление в 1969 г. отмечалось практически во всех наблюдавшихся крупных локальных радиоисточниках и соответствующих им группах пятен, в районах которых происходили хромосферные вспышки.

Обнаруженное явление может послужить прогнозу вспышечной активности [8].

С началом эры космических полётов ИЗМИР АН СССР обратился к Пулковской обсерватории с просьбой включиться в работу по доставке информации о положении активных радиоизлучающих областей на диске Солнца и оценки их интенсивности с помощью ежедневных кодовых телеграмм. Эту работу, удостоенную на Выставке Достижений Народного Хозяйства (ВДНХ) бронзовой медали в Москве, в течение двух десятилетий выполняла В.Н. Ихсанова, причём в случаях высокой вспышечной активности телеграммы отправлялись МОЛНИЕЙ.

С 1969 г. ежедневные данные о величине потока радиоизлучения «спокойного» Солнца и локальных источников стали публиковаться в Бюллетене «Солнечные данные».

Литература

1. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А., Шиврис О.Н.* Известия ГАО, 1960, 164, с.3.
2. *Ихсанова В.Н.* Известия ГАО, 1958, 162, с.29.
3. *Ихсанова В.Н.* Известия ГАО, 1960, 164, с.64.
4. *Корольков Д.В., Соболева Н.С.* Солнечные данные, 1957, 1, с.149.
5. *Корольков Д.В., Соболева Н.С., Гельфрейх Г.Б.* Известия ГАО, 1960, 164, с.81.
6. *Ихсанова В.Н., Лесник Г.Э.* Солнечные данные, 1961, 1, с.66.
7. *Гольнев В.Я., Ихсанова В.Н., Лесник Г.Э., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С.* Солнечные данные, 1961, 10, с.58.
8. *Ихсанова В.Н.* Солнечные данные, 1971, 4, с.100.

**THE LARGE PULKOVO RADIO TELESCOPE: CONSTRUCTION STAGES
AND THE FIRST RESULTS OF SOLAR INVESTIGATIONS**

Ikhsanova V.N.

Summary

This paper presents a brief history of creating the Department of Radio Astronomy at the Pulkovo Observatory, the construction of the radio telescope with the high resolving power at the centimeter wavelengths and the first results of observations of the solar radio emission.

КИРИЛЛ НИКОЛАЕВИЧ ТАВАСТШЕРНА
(к 85-летию со дня рождения)

Шахт Н.А.

В 1959 году после окончания Ленинградского университета я поступила на работу в отдел фундаментальной астрометрии, который в то время возглавляли М.С. Зверев и А.А. Немиро.



В этом отделе работал Кирилл Николаевич Тавастшерна, который был одним из самых активных наблюдателей и опытным специалистом в фундаментальной астрометрии. Как раз в это время он приступил к созданию каталогов абсолютных склонений и прямых восхождений 2249 звезд списка Баклунда-Хофа, наблюденных астрономами Мельбурнской обсерватории в 1928-1941 гг.

На мою долю выпало счастье работать с этими замечательными людьми, наблюдать в течение нескольких лет звезды, большие планеты и Солнце на Большом пассажном инструменте и помогать Кириллу Николаевичу в обработке Мельбурнских каталогов.

К.Н. Тавастшерна родился 1 мая 1921 года в семье научных работников. В сентябре 1939 года после окончания средней школы он поступил в Ленинградский университет, а в ноябре того же года был призван в армию и принимал участие в финской кампании.

Кирилл Николаевич прошел всю Великую Отечественную войну. Уже с 1941 года он был на фронте и затем, будучи сначала водителем, а потом радистом, служил в авиационном полку, возглавляемом Валентиной Гризодубовой. В составе этого полка он участвовал в Сталинградской битве. К.Н. Тавастшерна был награжден медалью "За боевые заслуги", орденом "Красная звезда", значком "Отличный связист" и закончил войну в звании гвардии старшины.

После войны с 1945 по 1950 гг. Кирилл Николаевич продолжил свое обучение в ЛГУ, затем после окончания университета он был зачислен в аспирантуру при АО ЛГУ.

В 1953 году К.Н.Тавастшерна защитил кандидатскую диссертацию на тему: “Фундаментальное определение разности долгот АО ЛГУ – ВНИИМ фотоэлектрическим методом”.

Знание точного значения долгот АО ЛГУ и Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ) имело большое практическое значение, так как в обеих обсерваториях были расположены первоклассные службы времени, причем во ВНИИМе – одна из старейших в Советском Союзе. Кроме того, АО ЛГУ являлась главным опорным фундаментальным пунктом, на котором астрономы северо-западной зоны СССР регулярно определяли личные уравнения при производстве долготных работ. Упомянутые выше долготы переопределялись неоднократно, однако оставались систематические разности между поправками определения времени на этих двух пунктах по отношению к системе сводных моментов службы времени ГАО РАН. Это указывало о возможной неточности в принятых долготах. У наблюдателей были довольно большие и также различающиеся между собой до $0^s.2$ поправки к долготам этих пунктов.

В это время Н.Н. Павлов предложил провести определение разности долгот АО ЛГУ – ВНИИМ фотоэлектрическим методом. Новый фотоэлектрический метод регистрации звездных прохождений впервые применил и испытал в фундаментальной долготной работе К.Н. Тавастшерна.

Эта работа проводилась с исключительной тщательностью. Были проведены наблюдения на фотоэлектрическом пассажном инструменте Бамберг 6353 попеременно в АО ЛГУ и во ВНИИМе в течение 4-х сезонов, и всего в течение 52 наблюдательных ночей. Также был произведен ряд исследований, основной целью которых являлось выявление возможных источников систематических ошибок определения времени фотоэлектрическим методом и оценка их влияния на полученную разность долгот.

Было определено уравнение яркости каталога FK3 относительно производимых фотоэлектрических наблюдений, в среднем оно оказалось равным $0.^s003$. Таким образом выяснилось, что для более ярких звезд прямые восхождения каталога FK3 преувеличены.

В своей работе К.Н. Тавастшерна также провел ряд теоретических исследований и, в частности, исследование проявления различных форм влияния эффективного термического гнуптия перекладывающихся частей инструмента. Им была использована теория Н.Н. Павлова, посвященная изучению термического гнуптия вертикального круга.

Было решено основное дифференциальное уравнение этой теории и выведен ряд формул, согласно которым можно было установить величину термических гнуптий перекладывающихся частей инструмента не только в зависимости от промежутка времени, прошедшего после перекладки, а также в зависимости от свойств материала данной части инструмента и величины внешнего теплового влияния.

В результате наблюдений и всех проведенных исследований были выведены следующие значения долгот:

АО ЛГУ: $-02^h 01^m 10^s.761$ и ВНИИМа: $-02^h 01^m 15^s.901$.

Эта работа также показала полную пригодность фотоэлектрического метода к проведению фундаментальных долготных работ: точность полученных наблюдений как по внутренней сходимости, так и по сравнению со сводными моментами была выше точности наблюдений лучших визуальных наблюдателей. Автоматическая регистрация звездных положений не только сводила на нет личные ошибки наблюдателя, но и позволяла проводить попутно с наблюдениями ряд дополнительных исследований.

В 1953 г. Кирилл Николаевич начинает работать в Пулковской обсерватории.

Следует сказать несколько слов об истории наблюдений и списка звезд, по которым впоследствии были созданы Мельбурнские каталоги.

История наблюдений и создания программы Баклунда–Хофа, по которой работали астрономы Мельбурнской обсерватории, подробно изложена в работах А.А. Немиро [1], М.С. Зверева и Д.Д. Положенцева [2] опубликованных в юбилейном сборнике, посвященном истории Пулковской обсерватории. Часть сведений из этих работ использована мною в настоящей статье. Здесь можно только упомянуть суть проблемы и основные задачи.

В Пулковской обсерватории в конце XIX в. директора Ф.А. Бредихина сменил О.А. Баклунд, который был директором в течение 20 лет, и при котором также успешно развивалась научная деятельность Пулковской обсерватории и, особенно, меридианная астрономия. Под руководством О.А. Баклунда созданы несколько абсолютных каталогов, также следует отметить его успешное участие в работе Международной комиссии по созданию фотографического каталога “Карта неба”, которая весной 1909 года в Париже провела посвященный этой теме конгресс. На этом конгрессе известный голландский астроном Я. Каптейн выступил с критикой астрометристов, которые, по его словам, не учитывали в своих работах интересов звездной астрономии, остро нуждающейся в однородном каталоге звезд, равномерно распределенных по всему небу с плотностью 1 звезда на 20-25 квадратных градусов. Присутствовавший на собрании Оскар Андреевич Баклунд в ответ на эту критику Каптейна заявил, что такой каталог, содержащий 1200 звезд 5-7-й звездных величин северного неба до склонения -15° , уже составлен за последние годы по наблюдениям на основных инструментах Пулковской обсерватории и ее отделения в Одессе.

Выступление О.А. Баклунда произвело сильное впечатление на участников собрания. Конгресс принял решение о необходимости распространения пулковского списка звезд на южное полушарие неба и об организации в ближайшие годы кооперативных меридианных наблюдений этих звезд на обсерваториях разных стран с целью создания в будущем высокоточного сводного каталога.

Вскоре уже в мае 1909 г. Пулковскую обсерваторию посетил директор Капской обсерватории доктор С. Хоф для переговоров с О.А. Баклундом о составлении списка звезд южного неба. Весь список этой программы получил название списка “Баклунда-Хофа” (ВН). В последующие годы на семи обсерваториях северного полушария, включая Пулково и Николаев, и на двух южных были выполнены меридианные наблюдения звезд Баклунда-Хофа, по которым в 1915 г. были составлены соответствующие каталоги

Их объединение в сводные каталоги для северного неба было сделано в 1930-е годы пулковскими астрономами – для прямых восхождений Ф.Ф. Ренцем, а для склонений – Н.И. Днепровским. Собственные движения в каталогах приведены по данным PGC Л. Босса.

Меридианные наблюдения звезд ВН южного полушария были выполнены в Капской обсерватории и в Мельбурне. Однако австралийские астрономы-наблюдатели не успели обработать свои наблюдения, так как во время Второй мировой войны они ушли на фронт и погибли.

Об этих каталогах пулковские астрономы узнали от королевского астронома Англии Р. Вулли, который раньше много лет работал в Австралии. Он обратился в комиссию №8 МАС с просьбой об организации обработки мельбурнских наблюдений. Обсуждение этого вопроса состоялось в Москве во время съезда МАС в 1958 г. с участием австралийских астрономов Х. Абрахама, Б. Бока и пулковских – М.С.Зверева, А.А. Немиро и К.Н. Тавастшерна. Договорились о передаче всех материалов в Пулковскую об-

серваторию, которые через посольство Англии и были получены осенью 1959 г. в виде 11 огромных переплетенных фолиантов с записями оригинальных наблюдений и их предварительной обработки.

В последующие годы под руководством К.Н.Тавастшерна в Пулковке была проделана большая работа по изучению, детальному анализу и обработке этих наблюдений, выполненных на меридианном круге Мельбурнской обсерватории с 1928 по 1941 год. Результаты этого исследования, вошедшие в докторскую диссертацию К.Н. Тавастшерна, были опубликованы отдельно по каждой координате в виде двух каталогов:

1. Тавастшерна К.Н. Каталоги звездных положений по наблюдениям в Мельбурне с 1928 по 1941 г. Ч.1 Каталог склонений 2249 звезд Баклунда–Хофа от $+32^\circ$ до -90° . Л. 1968.
2. Тавастшерна К.Н. Каталог абсолютных прямых восхождений звезд Баклунда-Хофа от $+32^\circ$ до -90° . Труды ГАО, 1981. Т. 84. с. 61-118.

В некоторых совместных работах авторами были также Н.А. Шахт и Л.И. Ягудин.

Эти наблюдения и каталоги состоят в тесной связи с пулковскими абсолютными определениями координат звезд южного неба, которые, в частности, производились пулковскими астрономами в Чили. Работа же К.Н. Тавастшерна и полученные им каталоги являются существенным вкладом в фундаментальную астрометрию и были использованы при выводе каталога FK5. В процессе выполнения этой работы К.Н.Тавастшерна произвел представляющие большой интерес методические исследования, связанные с учетом влияния погрешностей наблюдений на результаты циклического выравнивания наблюденных значений прямых восхождений звезд.

В представленной К.Н. Тавастшерна докторской диссертации, в частности, говорится, что целью данной работы являются астрометрические исследования звездных положений фундаментальных звезд южного неба и на их базе получение новых астрометрических данных о звездах для различных эпох их наблюдений, позволяющих расширить состав фундаментальных каталогов, повысит их точность и однородность в смысле случайных и систематических ошибок для всех зон склонений от Северного до Южного полюса.

Содержание диссертации отражено в более чем 30 публикациях К.Н. Тавастшерна, в некоторых случаях с соавторами. Так, “Каталог склонений 35 звезд от $+32^\circ$ до -90° по склонению из списка “заменяющих” звезд А. Копффа ” и “ Каталог склонений 38 зенитных звезд Мельбурнской обсерватории” мы с Кириллом Николаевичем опубликовали вместе.

Следует отметить, что К.Н. Тавастшерна, А.А. Немиро и М.С. Зверев всегда внимательно относились к работам молодых специалистов и не боялись давать им достаточно трудные задания, тем самым, помогая их научному росту. При этом у них можно было проконсультироваться по любому вопросу, связанному с данной работой, а также обратиться за советом к другим сотрудникам, работавшим в то время в отделе фундаментальной астрометрии.

Так, в качестве самостоятельной работы мне были поручены обработка и составление абсолютного каталога склонений 144 широтных звезд списка Кимуры. Это была одна из первых моих научных публикаций. Ссылку на эту работу К.Н. Тавастшерна приводит в тексте своего автореферата докторской диссертации.

В приложении к диссертации приводится Мельбурнский каталог фундаментальных звезд, содержащий абсолютные прямые восхождения и склонения 2420 звезд от $+32^\circ$ до -90° по склонению всех программ, наблюдавшихся в Мельбурнской обсерватории с 1928 по 1941 год на меридианном круге Траутона и Симмса. Обработка наблюдений и их дискуссия были проведены в Пулковской обсерватории. Число наблюдений

абсолютного большинства звезд каталога равно восьми, средняя квадратическая ошибка одного каталожного значения прямых восхождений звезд каталога, отнесенная к экватору равна $\pm 0.011^s$, склонения $\pm 0.020''$. Положения звезд даны на эпоху их наблюдений и отнесены к равноденствию 1950.0. Средняя эпоха каталога 1932.9.

Работа К.Н. Тавастшерны по выводу абсолютных каталогов звезд списка Баклунда–Хофа явилась предметом его докторской диссертации, успешно защищенной им в 1982 году.

К.Н. Тавастшерна также был участником, и в ряде случаев инициатором, многих других работ.

Так, в главе 4 рассматриваются работы по организации и проведению абсолютных определений прямых восхождений звезд на больших пассажных инструментах Пулковской обсерватории в северном и южном полушариях Земли, модернизация и исследования большого пассажного инструмента Эртеля в Пулкове, проведение семилетнего ряда наблюдений прямых восхождений ярких и слабых звезд на нем, разработка проектного задания на новый Пулковский пассажный инструмент для южного полушария, курирование строительства фундаментов и павильона, установка инструмента в южном полушарии и производство на нем первых наблюдений. В результате были созданы условия для получения первого абсолютного каталога прямых восхождений ярких и слабых фундаментальных звезд южного неба с применением строгих пулковских методов наблюдений и обработки, и осуществлен план создания абсолютных каталогов прямых восхождений фундаментальных звезд на однотипных инструментах для северного и южного полушарий Земли. В осуществлении этого плана, как указывает К.Н. Тавастшерна, кроме него самого, участвовал большой коллектив астрономов, конструкторов, инженеров и механиков Пулковской обсерватории и обсерватории Серро-Калан.

Кирилл Николаевич был высоко образованным, культурным человеком. Держался он со своими коллегами очень просто и демократично. К нему всегда можно было обратиться с любым вопросом и тогда, когда мы вместе работали в отделе фундаментальной астрометрии, и когда он уже был исполняющим обязанности директора обсерватории.

Будучи в длительных командировках Кирилл Николаевич помнил о своих коллегах и присылал нам и нашим семьям поздравления с праздниками, тем из нас, кто защитил диссертации – поздравления с успешными защитами и т.д. Возвращаясь из командировок, Кирилл Николаевич привозил всем сувениры, которые часто были экзотическими и необычными. Так, вернувшись из Мали, где он был начальником экспедиции по наблюдению солнечного затмения, Кирилл Николаевич привез всем сотрудникам африканские амулеты с изображениями различных животных: крокодилов, слонов и т.д.

Я хорошо помню, как мы вдвоем с Ксенией Сергеевной Тавастшерна осенью 1977 года отправились в морское путешествие с главной целью увидеть озеро метеоритного происхождения, находящееся в Эстонии на острове Сааремаа. Кирилл Николаевич провожал нас до самого трапа корабля и, должно быть, так как погода была не очень хорошая, немного переживал за нас, но не подавал виду и все время шутил. А мы действительно попали в небольшой шторм, потом погода еще больше ухудшилась, обратный рейс был отменен и, повидав озеро, мы возвратились из Таллинна в Ленинград уже поездом.

Сейчас в Пулкове осталось уже немного людей, которые помнят Кирилла Николаевича студентом Ленинградского университета. Но по их рассказам мы знаем, что Кирилл Николаевич был очень хорошим товарищем и мужественным человеком, всегда готовым прийти на помощь своим сокурсникам, попавшим в трудное положение.

У меня на всю жизнь сохранились самые хорошие воспоминания от общения с Кириллом Николаевичем.

С Ксенией Сергеевной Тавастшерна, с которой я познакомилась тогда же, когда и с Кириллом Николаевичем, мы постоянно общаемся и по сей день. Я благодарна ей за предоставленное мне знакомство с материалами из ее личного архива, а также с другими документами, связанными с жизнью и научной деятельностью Кирилла Николаевича.

В отделе фундаментальной астрометрии я проработала 8 лет и затем перешла в отдел фотографической астрометрии и звездной астрономии, возглавляемый Александром Николаевичем Дейчем, у которого я слушала спецкурсы в университете и делала дипломную работу, связанную с наблюдениями двойных звезд.

С сотрудниками отдела фундаментальной астрометрии, несмотря на то, что я уже работала в другом отделе, у меня на долгие годы остались хорошие дружеские отношения.

Кирилл Николаевич Тавастшерна был фактически моим первым научным руководителем, и я на всю жизнь сохранила к нему чувство глубокой благодарности за полученные знания и опыт работы в астрометрии, а также за тот пример для подражания, которым он был для всех, кто с ним работал, и кто его знал лично.

Литература

1. *А.А. Немиро*, 1989, “Пулковские абсолютные определения координат звезд” в сб.”150 лет Пулковской обсерватории”, с.16-40.
2. *М.С. Зверев, Д.Д. Положенцев*, 1989, “Дифференциальная меридианная астрометрия в Пулковской обсерватории “ в сб.”150 лет Пулковской обсерватории”, с.41-86.

СПИСОК АВТОРОВ

- Агапов В.М.* 402
Алексеева Г.А. 339, 351
Алешкина Е.Ю. 13, 68, 78, 87
Антипенко А.А. 402
Ассиновская Б.А. 195, 201, 216
Байкова А.Т., 22, 41, 251, 315
Баршевич К.В. 68, 78, 87
Батурина Г.Д. 68, 78, 87
Бережной А.А. 183, 322
Бехтева А.С. 68, 78, 87, 327
Бирюков Е.Е. 30
Бобылев В.В. 22, 41
Борисевич Т.П. 415
Бронникова Н.М., 57
Васильева Т.А. 57, 59
Верещагина И.А., 61, 68, 78, 87, 327
Вольвач А.Е. 402
Галкин В.Д. 339, 351
Голосова С.Я. 415
Горшанов Д.Л. 68, 78, 87, 374, 384
Горшенков Ю.Н. 402
Горшков В.Л. 209, 216
Гриб С.А. 259
Гроздилов В.М. 357
Даусс Д. 339
Di Varano I. 362
Девяткин А.В. 68, 78, 87, 374, 384, 391
Дементьев А.Ф. 402
Дементьева А.А. 126
Дугин Н.А. 402
Ефимов А.А. 94
Ефремов В.И. 268
Зверев Ю.К. 415
Ибрагимов Ф.М. 68, 78, 87
Иванов В.Ю. 216
Ильин Г.Н. 415
Ихсанова В.Н. 429
Калинин С.И. 102, 171
Калиниченко О.А. 108
Канаев И.И. 374, 384
Карпинский В.В. 216
Кириян Т.Р. 374, 384
Киселев А.А. 102
Киселева Т.П. 108, 171, 188
Кондратенко И.Н. 374, 384
Коноваленко А.А. 402
Копылова Ю.Г. 275
Коржавин А.Н. 415
Красокевич О.В. 68, 78, 87
Кулиш А.П. 391
Куприянов В.В. 68, 78, 87, 327, 374, 384
Куприянова Е.Г. 282
Литвиненко Е.А. 238
Лю Ш. 402
Ляйтерер У. 339, 351
Майгурова Н.В. 126
Малкин З.М. 159, 397
Малова Т.И. 220
Медведев М.Ю. 233
Мельников А.В. 117
Миллер Н.О. 238
Молотов И.Е. 402
Нарижная Н.В. 122, 126
Наумов В.А. 245
Наумов К.Н. 374, 384
Нечаева М.Б. 402
Ниберт Т. 339, 351
Никанорова И.Н. 339, 351
Никифоров В.В. 374, 384
Новиков В.В. 339, 351
Огурцов М.Г. 289
Орешко В.В. 402
Парфиненко Л.Д. 268
Петерова Н.Г. 415
Пинигин Г.И. 126
Полякова Г.Д. 299
Потапович А.В. 415
Процюк Ю.И. 126
Прудникова Е.Я. 238, 245
Пушкарев А.Б. 251, 402
Пушкарь Е.А. 259
Романенко Л.Г. 102
Русаков О.П. 374, 384
Рыльков В.П. 122, 126
Сальников И.Б. 339, 351
Смирнов Б.Н. 94
Смирнов С.С. 135, 141
Соколов В.Г. 147
Соколова Н.В. 238
Соколова Ю.Р. 157
Соловьев А.А. 268
Степанов А.В. 275, 282
Степаньянц В.А. 402
Титенко В.В. 402
Тихонов А.В. 374, 384
Топчило Н.А. 415

Туккари Дж. 402
Фалькович И.С. 402
Фролов В.Н. 374
Харламов Г.Ю. 402
Ховричев М.Ю. 183
Хруцкая Е.В. 171, 183
Цап Ю.Т. 275
Чантурия С.М. 188
Шахт Н.А. 439
Шевченко И.И. 117
Шишов В.А. 402
Шор В.А. 61
Шпитальная А.А. 94
Языков В.П. 402