

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ИЗВЕСТИЯ  
ГЛАВНОЙ  
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ  
В ПУЛКОВЕ**

**№ 217**

Санкт-Петербург  
2004

**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

Компьютерная верстка оригинал-макета Е.Л. Терёхиной

**ИЗВЕСТИЯ**  
**ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ**  
**В ПУЛКОВЕ**  
**№ 217**

Утверждено к печати  
Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН

**ISBN**

© Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2004

## СОДЕРЖАНИЕ

## АСТРОФИЗИКА И ФИЗИКА СОЛНЦА

<i>Абрамов-Максимов В.Е.</i> Форматы первичного архива данных радиоастрономических наблюдений Солнца на РАТАН-600.....	9
<i>Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.</i> Спектрофотометрическая переменность $\alpha$ Cet.....	30
<i>Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Рубан Е.В.</i> Исследование переменности звезд пулковской спектрофотометрической базы данных.....	38
<i>Байкова А.Т.</i> Об исследовании быстрой переменности структуры компактных внегалактических радиоисточников по геодезическим наблюдениям.....	48
<i>Гольдварг Т.Б., Наговицын Ю.А., Соловьев А.А.</i> Периодичность энерговыделения и вспышечные процессы в активных областях Солнца.....	59
<i>Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.</i> Мощные вспышечные конфигурации в солнечных АО: взаимосвязь магнитной топологии и наблюдаемых свойств дельта-структур...	69
<i>Копылова Ю.Г., Курпянова Е.Г., Степанов А.В., Цан Ю.Т.</i> Природа осцилляций излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных арок.....	85
<i>Копылова Ю.Г., Мельников А.В.</i> Излучательные моды колебаний корональной магнитной арки.....	95
<i>Макаров В.И., Тлатов А.Г.</i> Индексы фонового магнитного поля и полярной активности Солнца.....	107
<i>Полякова Г.Д.</i> Сверхновые типа II. II. Яркие спиральные галактики АРМ каталога южного неба.....	120
<i>Правдюк Л.М., Окунев О.В.</i> О некоторых особенностях тонкой структуры солнечной фотосферы.....	133
<i>Стоянова М.Н.</i> Структура полярных областей в нижней короне и переходном слое в эпоху смены знака общего магнитного поля Солнца.....	140
<i>Тавастшерна К.С., Тлатов А.Г.</i> Каталог корональных дыр и полостей волокон за период 1974-2003.....	145
<i>Тлатов А.Г., Макаров В.И.</i> 22-летняя мода вращения Солнца.....	149

## АСТРОМЕТРИЯ И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

<i>Алешкина Е.Ю.</i> О показателях Ляпунова вращения средних и крупных спутников планет.....	157
<i>Бронникова Н.М., Васильева Т.А.</i> Астрометрические наблюдения Урана в 2003 году на нормальном астрографе в Пулкове.....	162
<i>Васильева Т.А.</i> Фотографические наблюдения малой планеты Юнона на нормальном астрографе в Пулкове.....	165
<i>Гончаров Г.А.</i> База данных и каталог спирального рукава Ориона (ORION SPIRAL ARM CATALOGUE, OSACA).....	167
<i>Горшанов Д.Л., Шахт Н.А., Киселев А.А., Поляков Е.В.</i> Исследование движения компонент двойной звезды 61 Лебеда А и В по отношению к опорным звездам.....	182
<i>Десяткин А.В., Алешкина Е.Ю., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Корнилов Э.В., Сидоров М.Ю.</i> Астрометрические наблюдения спутников Юпитера и Сатурна, полученные на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1999-2004 гг.....	194
<i>Десяткин А.В., Горшанов Д.Л.</i> Наблюдения взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера на зеркальном астрографе ЗА-320 в 2002-2003 гг. ....	215
<i>Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Сидоров М.Ю.</i> Астрометрические наблюдения Урана и системы Плутон – Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 2002-2004 гг. ....	223
<i>Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Мельников А.В., Шевченко И.И.</i> Наблюдения и анализ кривых блеска трех спутников Сатурна.....	229
<i>Десяткин А.В., Львов В.Н., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Корнилов Э.В., Сидоров М.Ю.</i> Астрометрические наблюдения малых тел солнечной системы на зеркальном астрографе ЗА-320 в 2002-2004 гг. ....	236
<i>Канаев И.И., Сочилина А.С., Буткевич А.Г., Вершков А.Н., Горшанов Д.Л., Григорьев К.В., Десяткин А.В.</i> КАС «ГЕОБС». Космическая астрометрическая система «Геостационарная обсерватория».....	248
<i>Киселев А.А., Киселева Т.П., Измайлов И.С., Можжаев М.А., Калининченко О.А., Ховричева М.Л.</i> Фотографические наблюдения прохождения Меркурия по диску Солнца 7 мая 2003 года в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе.....	269
<i>Киселев А.А., Кияева О.В.</i> О возможности определения скрытой массы в системах двойных звезд.....	275
<i>Киселев А.А., Романенко Л.Г., Калининченко О.А.</i> Новые орбиты 7 широких визуально-двойных звезд Пулковской программы.....	279
<i>Киселева Т.П.</i> Анализ систематических ошибок масштаба и ориентировки при фотографических и ПЗС наблюдениях главных спутников Сатурна, полученных в Пулкове в 1995-2003 гг. на 26-дюймовом рефракторе.....	286
<i>Киселева Т.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В.</i> Результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна в 2004 г. на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.....	292

<i>Киселева Т.П., Калиниченко О.А., Можяев М.А.</i> Фотографические наблюдения спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в 2001-2003 гг. в Пулкове. Определение координат Сатурна по наблюдениям его спутников.....	297
<i>Кияева О.В.</i> Уточнение спектроскопической орбиты тесной двойной системы ADS 9173 Aa на основе фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.....	306
<i>Куприянов В.В., Шевченко И.И.</i> Размеры и инерционные параметры спутников планет: статистические свойства и зависимости.....	314
<i>Львов В.Н., Смехачева Р.И., Смирнов С.С., Цекмейстер С.Д.</i> Некоторые особенности движения астероидов группы Гильды.....	318
<i>Смирнов С.С.</i> О структуре треугольника Гильд.....	325
<i>Соколов В.Г.</i> О сходимости разложений пертурбационных функций планетной задачи трех тел по степеням эксцентриситетов.....	330
<i>Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю.</i> Новые высокоточные собственные движения звезд в пулковских площадках с галактиками.....	337
<i>Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Измайлов И.С.</i> Система астрометрических баз данных Пулковской обсерватории: фотографические каталоги и оценки точности современных ПЗС-наблюдений малых планет.....	343

## ГЕОДИНАМИКА

<i>Ассиновская Б.А.</i> Методика и результаты сейсмической регионализации Баренцево-морского региона.....	353
<i>Горшков В.Л.</i> О методике прогнозирования в геодинимике.....	365
<i>Горшков В.Л., Воротков М.В.</i> Динамика движения полюса и сейсмический процесс.....	379
<i>Горшков В.Л., Воротков М.В., Миллер Н.О.</i> Проявление солнечной активности в сейсмических и атмосферных рядах.....	388
<i>Даракчиев Ц., Чапанов Я.</i> Определение неприливных изменений направления тяжести перманентными наблюдениями зенит-телескопом.....	393
<i>Костина Л.Д., Миллер Н.О., Наумов В.А., <u>Персиянинова Н.Р.</u>, Прудникова Е.Я.</i> Определение средней широты Пулковской обсерватории на эпоху 2000.0 по наблюдениям на ЗТФ-135 за период 1904.7-2003.0.....	402
<i>Литвиненко Е.А.</i> Физический смысл годовой трансформированной волны суточного члена в наблюдениях широты.....	406
<i>Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.</i> Исследование медленных изменений широты Пулкова по наблюдениям на ЗТФ-135 за 100 лет.....	409
<i>Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.</i> Приливные вариации из столетнего ряда наблюдений широты на ЗТФ-135.....	415
<i>Наумов В.А.</i> Определение средней широты Пулковской обсерватории на эпоху 2000.0 по наблюдениям на Большом вертикальном круге Эртеля.....	420
<i>Прудникова Е.Я.</i> Об учете эффекта ветра в наблюдениях широты.....	426

## МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

<i>Абдусаматов Х.И., Ханков С.И.</i> Термоабerrации солнечного лимбографа космического базирования.....	433
<i>Байкова А.Т.</i> Метод исключения точечных радиоисточников из наблюдаемых карт реликтового излучения.....	441
<i>Байкова А.Т.</i> Решение фазовой проблемы на основе методов нелинейной оптимизации применительно к наземно-космической радиоинтерферометрии.....	459
<i>Галкин В.Д., Сальников И.Б., Никанорова И.Н., Ляйтерер У., Ниберт Т., Алексеева Г.Н., Новиков В.В., Ильин Г.Н., Пахомов В.П.</i> Лабораторный комплекс калибровки фотометров, использующих оптический метод определения содержания водяного пара в атмосфере Земли.....	472
<i>Горшанов Д.Л.</i> Исследование изменений масштаба 26" рефрактора Пулковской обсерватории в период с 1958 по 1997 гг. ....	485
<i>Гроздилов В.М.</i> Высокоэффективная среднеполосная фотометрия на объемных фазовых голограммах.....	493
<i>Гроздилов В.М., Парфиненко Л.Д.</i> Проект создания робота-телескопа на базе параллактической монтировки АПШ-40. 1. Система наведения телескопа.....	499
<i>Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С.</i> Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320. II. ....	505
<i>Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д.</i> Получение лучевых скоростей из цифровых изображений солнечного спектра.....	531
<i>Измайлов И.С., <u>Виноградов В.С.</u>, Румянцев К.В., Шумахер А.В., Бубнов Ю.А., Бубнова Н.Н.</i> Автоматизация астрономических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе.....	536
<i>Наумов В.А.</i> Особенность конструкции зенит-телескопа ЗТФ-135.....	543
<i>Поляков Е.В., Поляков В.В., Федотова Л.А.</i> Высокоточные измерительные шкалы для сканеров.....	546
<i>Шрамко А.Д.</i> Методика наблюдений и обработки солнечных всплесков на радиотелескопе Горной астрономической станции ГАО на волне 5.1 см.....	555

## ИСТОРИЯ НАУКИ

<i>Костина Л.Д.</i> Памяти пулковских широтников С.В. Романской, А.Я. Орлова, В.Р. Берга, В.И. Сахарова.....	565
<i>Соболева Т.В.</i> К 100-летию Большого пулковского зенит-телескопа.....	572
<b>СПИСОК АВТОРОВ</b> .....	581

**АСТРОФИЗИКА**  
**И**  
**ФИЗИКА СОЛНЦА**





## **ФОРМАТЫ ПЕРВИЧНОГО АРХИВА ДАННЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РАТАН-600**

**Абрамов-Максимов В.Е.**

*К настоящему времени накоплен и продолжает пополняться огромный уникальный архив многоволновых спектрально-поляризационных наблюдений Солнца на РАТАН-600, охватывающий более двух циклов солнечной активности. Однако вполне естественно, что в течение этого периода развивались как применяемая для сбора данных и обработки вычислительная техника, так и концепции архивизации и обработки. Поэтому архив представлен на носителях различных типов (ленты самописцев, магнитные ленты, дискеты, стримерные ленты, ZIP-дискеты, CD) и в различных форматах. Причем поскольку различные части этого архива формировались на ЭВМ различных типов и различной архитектуры (Электроника К-200, Электроника 100И, Электроника 60, ДВК-3, М4030, ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, ИВМ РС АТ), то для двоичных данных использованы различные формы представления, а для символьных – различные кодировки (КОИ-7, EBCDIC, ASCII).*

*К сожалению, несмотря на чрезвычайную важность вопросов архивизации наблюдательных данных, до сих пор не существовало единого описания используемых для хранения данных солнечных наблюдений на РАТАН-600 форматов. Более того, некоторые форматы вообще не были документированы, и информацию о них, сохранившуюся в “фольклорном” виде, можно узнать только из разговоров с разработчиками программного обеспечения систем регистрации и непосредственно из текстов соответствующих программ, в которых зачастую разобраться бывает достаточно сложно (например, в программах на ассемблере для ЭВМ “Электроника 100И”).*

*Формат данных, записанных первой очередью системы сбора, достаточно полно описан в [1]. Некоторая информация о первичных форматах автономной системы сбора “ИКАР” “ФОРМАТ-6” и “ФОРМАТ-7” приведена в [2], однако там даны структуры только блоков данных и не приводятся форматы служебных зон. Из всех форматов наиболее полно документирована первая версия формата “АРХИВ-2” [3,4]. Однако внедренная впоследствии вторая версия формата “АРХИВ-2” уже нигде не описана.*

*Поэтому, чтобы не возникла ситуация, при которой сохраняются файлы с данными наблюдений, но сами данные не будут доступны из-за отсутствия сведений об их форматах, представляется чрезвычайно актуальной задача сведения воедино информации о различных форматах, применявшихся для архивизации солнечных наблюдений на РАТАН-600.*

*Материал для данной статьи собран из трех основных источников:*

- кандидатские диссертации разработчиков систем регистрации [1,2,3,14];
- личные “записочки”, которые автор вел во время работы на РАТАН-600, начиная с 1981 г.;
- тексты программ регистрации.

### **1. Солнечные наблюдательные комплексы на РАТАН-600**

Наблюдения Солнца на РАТАН-600 начались в 1974 году на Солнечном спектрально-поляризационном комплексе (ССПК) [5] с использованием пяти радиометров сантиметрового диапазона и аналоговой регистрацией на ленты самописцев. В результате каждого наблюдения получалось 10 сканов (по 2 на каждую волну - интенсивность и круговая поляризация) на диаграммных лентах. Такая система регистрации сохранялась долгое время в качестве резервной и после внедрения цифровой регистрации, и архив на лентах самописцев содержит наблюдательный материал вплоть до 1981 года, когда был создан новый наблюдательный комплекс на базе стандарта КАМАК.

Регистрация на магнитные ленты началась в 1975 году с вводом в эксплуатацию первой очереди системы сбора радиоастрономических данных (Устройство автоматической регистрации – УАР) [6,1]. По мере развития этой системы и программ обработки менялся формат записи. Всего существовало 4 варианта формата. В 1982 году на смену устаревшей системы сбора на базе ЭВМ “Электроника К-200” пришел новый наблюдательный комплекс ИКАР-16 (Интеллектуальный комплекс автоматической регистрации на 16 каналов) [7] на основе международного стандарта КАМАК, дальнейшим развитием которого стали наблюдательные комплексы ИКАР-24 [8] и ИКАР-32 [2]. Соответствующие первичные форматы получили название "ФОРМАТ-5", "ФОРМАТ-6", "ФОРМАТ-7". Наблюдательные комплексы ряда ИКАР использовались до 1991 года, когда для наблюдений Солнца был внедрен Панорамный анализатор спектра (ПАС) [9], использующийся и развивающийся до настоящего времени.

Во всех форматах, применяемых до внедрения ПАС, данные были записаны в шкале звездного времени. Данные, полученные с использованием ПАС, записаны в шкале среднего солнечного времени.

В таблице 1 представлена краткая сводка о различных периодах наблюдений Солнца на РАТАН-600 и используемых форматах и носителях для хранения данных. Подробная сводка о наличии данных в формате "АРХИВ-2" дана в [10]. Твердая копия этого архива частично была опубликована [11,12,13].

**Таблица 1.** Солнечные наблюдательные комплексы на РАТАН-600 и форматы архива

Наблюдательные комплексы	Годы	Носители данных	Форматы архива
ССПК	1974	Ленты КСП	
ССПК-УАР	1975 – 1981	Ленты КСП Магнитные ленты	ФОРМАТ-1 ФОРМАТ-2 <u>ФОРМАТ-3</u> ФОРМАТ-4 АРХИВ-2 (старый)
ИКАР-16 ИКАР-24	1982 – 1989	Магнитные ленты	ФОРМАТ-5 ФОРМАТ-6 АРХИВ-2 (новый)
ИКАР-32	1990 – 1991	Магнитные ленты Дискеты	ФОРМАТ-7 "вторичный" формат
ПАС	1992 - ...	Стримерные кассеты ZIP-диски CD	Форматы данных ПАС, FITS

В целом, имеющиеся форматы разделяются на две группы: первичные, полученные при регистрации наблюдений, и форматы архива второго уровня, полученные после первичной обработки, которые являются базой для астрофизической обработки.

## 2. Концепция двухуровневого архива

В начале 80-х годов в Пулковской группе радиоизлучения Солнца была разработана концепция двухуровневого архива наблюдательных данных и необходимое для работы с таким архивом программное обеспечение [4], реализованное на ЕС ЭВМ. Суть этой концепции состоит в следующем. Весь архив наблюдательного материала состоит из двух глобальных частей:

- архив первого уровня;
- архив второго уровня.

Первичные данные наблюдений, сформированные программами регистрации, составляют архив уровня 1 ("АРХИВ-1"). Формат "АРХИВ-1" является аппаратурно-зависимым. Данные в этом формате содержат большое количество служебной информации, необходимой только для первичной обработки, зачастую необработанные данные калибровок, возможные сбойные отсчеты, которые в ряде случаев достаточно легко корректируются программными методами. Естественно, что по мере развития наблюдательных комплексов и систем регистрации менялся и формат "АРХИВа-1", причем, если внедрялся принципиально новый наблюдательный комплекс на базе ЭВМ нового типа, то и формат менялся кардинальным образом. Количество служебной информации в файле с данными по мере развития систем регистрации на РАТАН-600 постепенно росло от минимальной, как это было в первой очереди системы сбора, выходные файлы которой содержали только дату и время наблюдения и минимум информации о режиме регистрации, до исчерпывающего набора всех данных, необходимых для обработки наблюдения. Служебная информация развитого "АРХИВа-1" включает в себя помимо астрономической большое количество информации о режиме работы приемной аппаратуры и системе регистрации, что позволяет выполнить первичную обработку, но требует детального знания конкретного наблюдательного комплекса и методики наблюдений на нем. Поэтому данные в формате "АРХИВ-1" пригодны только для внутреннего использования и не могут передаваться астрофизикам, работающим в других организациях.

Естественно, что для астрофизической обработки и интерпретации желательно иметь данные, во-первых, в едином формате, вне зависимости от того, какая система регистрации использовалась, и, во-вторых, без излишней аппаратурной информации, которая нужна только для первичной обработки.

Данные, наблюдений подвергнутые первичной обработке и записанные в аппаратурно-независимом формате, составляют архив второго уровня. Первичная обработка включает обработку калибровок (при необходимости, поскольку некоторые системы регистрации выполняли обработку калибровок и в первичный архив записывались уже результаты, а не сами массивы данных с калибровками), коррекцию нефатальных сбоев аппаратуры, необходимые перекодировки числовых и символьных полей (поскольку системы регистрации были разработаны на базе различных ЭВМ), сшивку сканов Солнца за переключения усиления во время регистрации, при необходимости ручной ввод дополнительной (в частности, астрономической) информации, хранение которой не было предусмотрено в первичном архиве, но которая необходима для дальнейшей астрофизической обработки и т.п., а также формирование файлов в формате архива второго уровня. В качестве формата такого уровня был разработан и внедрен формат "АРХИВ-2", реализованный на ЕС ЭВМ на магнитных лентах.

Архив второго уровня (понятие архив второго уровня не следует путать с форматом "АРХИВ-2", "АРХИВ-2" - это название конкретного формата, который в течение длительного времени использовался как реализация архива второго уровня) в течение длительного времени являлся базовым архивом наблюдательного материала для всех периодов наблюдений, независимым от используемой системы сбора. Данные архива второго уровня могли передаваться сторонним пользователям, не знакомым с деталями приемной аппаратуры РАТАН-600, для астрофизической обработки.

Данные в "АРХИВе-2" хранятся не с исходным временным интервалом между точками, с которым производилась регистрация, а в сжатом виде, причем в "новой" версии коэффициент сжатия был различным для разных каналов в зависимости от длины волны, поскольку, если исходить из возможностей пространственного разрешения радиотелескопа, для исследования структуры источников нет смысла снимать отсчеты слишком часто. Это позволило сократить объем файлов с данными. Однако в настоя-

шее время, несмотря на то, что наблюдения Солнца на третьем облучателе РАТАН-600 проводились в режиме пассажного инструмента, стали актуальны задачи исследования не только пространственной структуры источников, но и временных флуктуаций радиоизлучения в них, которые могут быть зарегистрированы за время прохождения источника через диаграмму направленности. Это привело к необходимости вновь обратиться к первичному архиву и формировать архив второго уровня заново, но уже без сжатия данных, сохраняя исходный интервал между точками.

В настоящее время основным форматом для астрофизической обработки данных является FITS формат [15]. Версия FITS формата, используемая для солнечных наблюдений на РАТАН-600, описана в [16].

### **3. Архив первичных наблюдательных данных**

#### ***3.1. Первичный архив, записанный первой очередью системы сбора на базе ЭВМ “Электроника К-200”***

Носителем данных первичного архива, полученного с помощью первой очереди системы сбора на базе ЭВМ “Электроника К-200”, являются магнитные ленты, данные на которых записывались зонами длиной 256 машинных слов. Данные на одной ленте записаны в одном файле, и для поиска какого-либо наблюдения необходимо знать номер первого блока с данными наблюдения и количество блоков, занимаемых наблюдением. Стандартное наблюдение в режиме прохождения состоит из трех частей: первая калибровка, запись источника, вторая калибровка. Программа регистрации не делала различий между калибровками и наблюдением, поэтому для их разделения по команде оператора записывалась специальная маркерная зона.

Следует заметить, что магнитные ленты, записанные на ЭВМ “Электроника К-200”, из-за несоответствия физических форматов не могли быть обработаны на ЕС ЭВМ. Для того чтобы данные можно было обрабатывать на ЕС ЭВМ, выполнялся еще этап “предпервичной” обработки, при котором исходные ленты, полученные на ЭВМ “Электроника К-200” и составлявшие так называемый архив нулевого уровня (“АРХИВ 0”), переписывались с перекодировкой и сжатием на ЕС ЭВМ с помощью программы PASCER. Получаемые после этого магнитные ленты и составляли первичный архив данных.

Существование нескольких версий программы PASCER обусловило существование нескольких форматов первичного архива:

1. "ФОРМАТ 1" - солнечные наблюдения и наблюдения источников на третьем облучателе, записанные до 1 июня 1978 года;
2. "ФОРМАТ 2" - солнечные наблюдения и наблюдения источников на третьем облучателе, записанные до конца 1978 года;
3. "ФОРМАТ 3" - солнечные наблюдения и наблюдения источников на третьем и первом облучателях, записанные с 1979 года по 1981 год;
4. "ФОРМАТ 4" - несолнечные наблюдения на первом облучателе.

Большая часть данных первичного архива солнечных наблюдений, накопленного до 1981 года включительно, была изначально записана в формате "ФОРМАТ 3". Количество служебной информации, записываемой при наблюдении вместе с данными, было минимальным: дата, время начала регистрации и минимальная поканальная информация: постоянная времени, признак калибровка/регистрация, признак включения/выключения канала. Всю необходимую для обработки информацию, как аппаратную (длины волн каналов, выносы приемных рупоров приемников для разных длин волн из фокуса, температуры калибровочных ступенек и т.п.), так и астрономическую (склонение Солнца, часовое изменение прямого восхождения, момент прохождения

центра Солнца через диаграмму направленности и т.п.) необходимо вводить дополнительно.

Весь первичный архив, накопленный в этих форматах, был обработан с формированием Архива-2 и на CD не переносился, поэтому в детальном описании формата нет необходимости.

### ***3.2 “ФОРМАТ-5” - формат первичного архива, сформированного системой сбора ИКАР-16, и “ФОРМАТ-6” - формат первичного архива, сформированного системой сбора ИКАР-24***

Серия новых форматов “ФОРМАТ-5”, “ФОРМАТ-6” и “ФОРМАТ-7” существенным образом отличается от серии форматов, описанных в 3.1, поскольку они появились с внедрением в практику солнечных наблюдений принципиально нового автономного наблюдательного комплекса. Носителем данных для этих форматов являлась также, как и для предшествующей серии форматов, магнитная лента, однако в этих системах регистрации данные уже не нуждались в дополнительной "предпервичной" обработке и сразу же могли обрабатываться на ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, ДВК и т.п. Важнейшее отличие наблюдательных комплексов “ИКАР” от предшествующего - управление усилением по низкой частоте в зависимости от принимаемого сигнала. Поэтому при первичной обработке данных добавляется еще один этап: восстановление (сшивка) сканов, разные участки которых записаны с различным усилением. Архив в этих форматах полностью перенесен на CD.

Форматы “ФОРМАТ-5” и “ФОРМАТ-6” практически одинаковы, они различаются только количеством каналов, т.е. размерами массивов с поканальной информацией в служебных зонах и размером порции данных, записываемых при одном цикле опроса. Количество циклов опроса в одном блоке данных одинаково, поэтому размеры блоков различаются. Данные одного наблюдения занимают один файл, который состоит из первой служебной зоны, содержащей аппаратурную и астрономическую информацию, необходимую для обработки этого наблюдения, а также результаты обработки первой калибровки, собственно данных, расположенных в порядке опроса каналов, и второй служебной зоны, которая содержит ту же служебную информацию, что и первая служебная зона, и результаты обработки второй калибровки. Первая и вторая служебные зоны имеют одинаковую структуру. Данные записаны блоками размером 2052 байта для файла формата “ФОРМАТ-5” и размером 3074 байта для файла формата “ФОРМАТ-6”. В каждом блоке размещается по 32 цикла опроса: для формата “ФОРМАТ-5” -  $32 \times (16 \times 4) = 2048$  байт, для формата “ФОРМАТ-6” -  $32 \times (24 \times 4) = 3072$  байта.

Поскольку, как уже было сказано, форматы “ФОРМАТ-5” и “ФОРМАТ-6” различаются незначительно, нет смысла во всех подробностях описывать оба варианта, и мы ограничимся детальным описанием формата “ФОРМАТ-6”, в котором хранится бóльшая часть солнечных наблюдений, полученных на комплексах “ИКАР-16” и “ИКАР-24” в период с 1982 по 1989 год.

На рис.1 приведена структура служебной зоны формата “ФОРМАТ-6”. К этому рисунку следует сделать несколько пояснений. Три слова даты содержат: первое слово - день, второе - месяц, третье - год. Для высоты и склонения источника, высоты антенны четыре слова содержат: первое – градусы (склонение отрицательно, если 12-й бит равен 1), второе - минуты и т.д. Для азимута: первое - сотни градусов, второе - единицы и т.д. Для моментов времени четыре слова содержат: первое - часы, второе - минуты, третье - секунды, четвертое - сотые доли секунд. Под временем наблюдения понимается момент прохождения центра источника (например, центра диска Солнца) через диаграмму направленности радиотелескопа.

Номер слова →	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Поле →	Номер блока		Название источника							
Кодировка →	Д		К							

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Наблюдатель								Дата наблюдения			
К								ДД			

22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Номер наблюдения				Высота антенны				Время наблюдения			
ДД				ДД				ДД			

34	35	36	37	38		39	40
Высота источника				Номер азимута		Положение каретки	
ДД				ДД		ДД	

41	42	43	44	45		46	
Склонение источника				Знак темп. воздуха		Температура воздуха	
ДД				К		ДД	

47		48		49	
Темп. эквивалента		Конфигурация ВУР'ов (крейт 1)		Конф. ВУР'ов (крейт 2)	
ДД		Д		Д	

50		...	73		74	
Начальные усиления ВУР'ов				Фазы ВУР'ов (крейт 1)		
Д				Д		

75		76	77	78	79
Фазы ВУР'ов (крейт 2)		Декр. время наблюдения			
Д		ДД			

80		81		82	83
Время прохождения радиуса Солнца			Радиус Солнца		
Д			Д		

**Рис.1.** Формат служебной зоны “ФОРМАТа-6” (“ИКАР-24”) (начало). Слова - двухбайтовые, для кодировки приняты следующие сокращения: Д - двоичная, ДД - двоично-десятичная, К - КОИ-7.

В 47-ом слове сначала была частота опроса, это постоянное число, равное 10, потом туда стали записывать температуру эквивалента по Цельсию, это числа в диапазоне 15-30 (т.е. не 10). В каждом из полей “конфигурация ВУР'ов” (ВУР - выходное устройство радиометра) используются младшие 12 бит, если бит установлен в 1 - канал включен, 0 - выключен. Даже, если какие-то каналы были выключены, в блоки данных все равно записаны отсчеты по всем каналам, однако по конфигурации ВУР'ов можно определить, где реальные данные наблюдений, а где - "мусор". Крейт 1 объединяет каналы интенсивности, крейт 2 - круговой поляризации. В начальных усилениях ВУР'ов 12-й бит всегда равен 0, 11-й бит - это фаза, 10-й бит всегда равен 1, это - постоянная времени, которая никогда не менялась и фактически равна от 0.1 до 0.2 сек для индивидуальных ВУР'ов.

84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
Часовое изм. пр. восх. ДД			Часовое изм. скл. ДД			Азимут антенны ДД			
94	...	141	142			...	165		
Температуры ГШ Д			Сигнал "модуляция выключена" Д						
166			...	189		190	...	213	
Сигнал "модуляция включена" Д					Сигнал "ГШ включен" Д				
214	...	237		238			239	...	1536
Минимальный к-т усил. Д			Признак калибровки Д			Не используется			

Рис.1. (окончание)



Рис.2. Формат блока данных "ФОРМАТа-6".

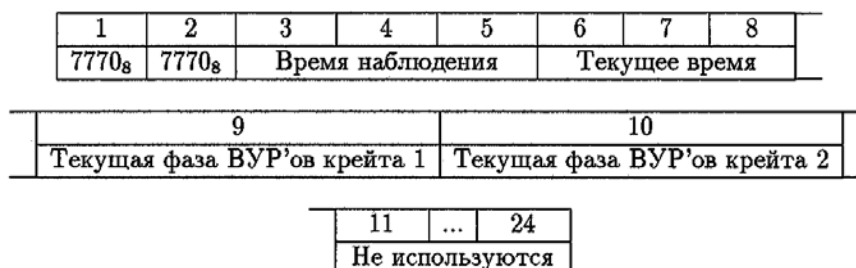


Рис.3. Служебная зона цикла опроса блока данных "ФОРМАТа-6" в случае, когда не было переключений.

1	2	...	24
К-т усил. канала 1	К-т усил. канала 2	...	К-т усил. канала 24

**Рис.4.** Служебная зона цикла опроса блока данных "ФОРМАТа-6" в случае, когда было переключение.

Таким образом, первое восьмиричное слово равно 1 или 3 в зависимости от фазы. Младшие девять бит содержат начальные усиления ВУР'ов. Время прохождения радиуса Солнца дано в секундах звездного времени: первое слово - целые, второе - сотые доли; радиус Солнца дан в угловых секундах, часовое изменение прямого восхождения - в секундах звездного времени: третье слово - сотые доли; часовое изменение склонения - в угловых секундах: третье слово - также сотые доли. Признак калибровки: 1 - ГШ, 0 – "небо".

Формат блока данных представлен на рис.2. Блок данных состоит из 32 порций циклов опроса, каждая из которых включает служебную зону цикла опроса и данные по всем 24 каналам. Служебная зона цикла опроса может быть двух типов. Если в данном цикле опроса не производилось переключение усиления, то служебная зона цикла опроса (рис.3) содержит специальный признак, информирующий о том, что переключений не было (два слова, содержащие 7770<sub>8</sub>), звездное время наблюдения (3 слова - часы, минуты, секунды), текущее звездное время (3 слова - часы, минуты, секунды) и текущие фазы ВУР'ов. Если в данном цикле опроса производилось переключение усиления, то служебная зона (рис.4) содержит новые значения коэффициентов усиления ВУР'ов в том же формате, что и их начальные значения в основной служебной зоне, т.е. младшие 9 бит - это усиление, а 11-й бит - фаза.

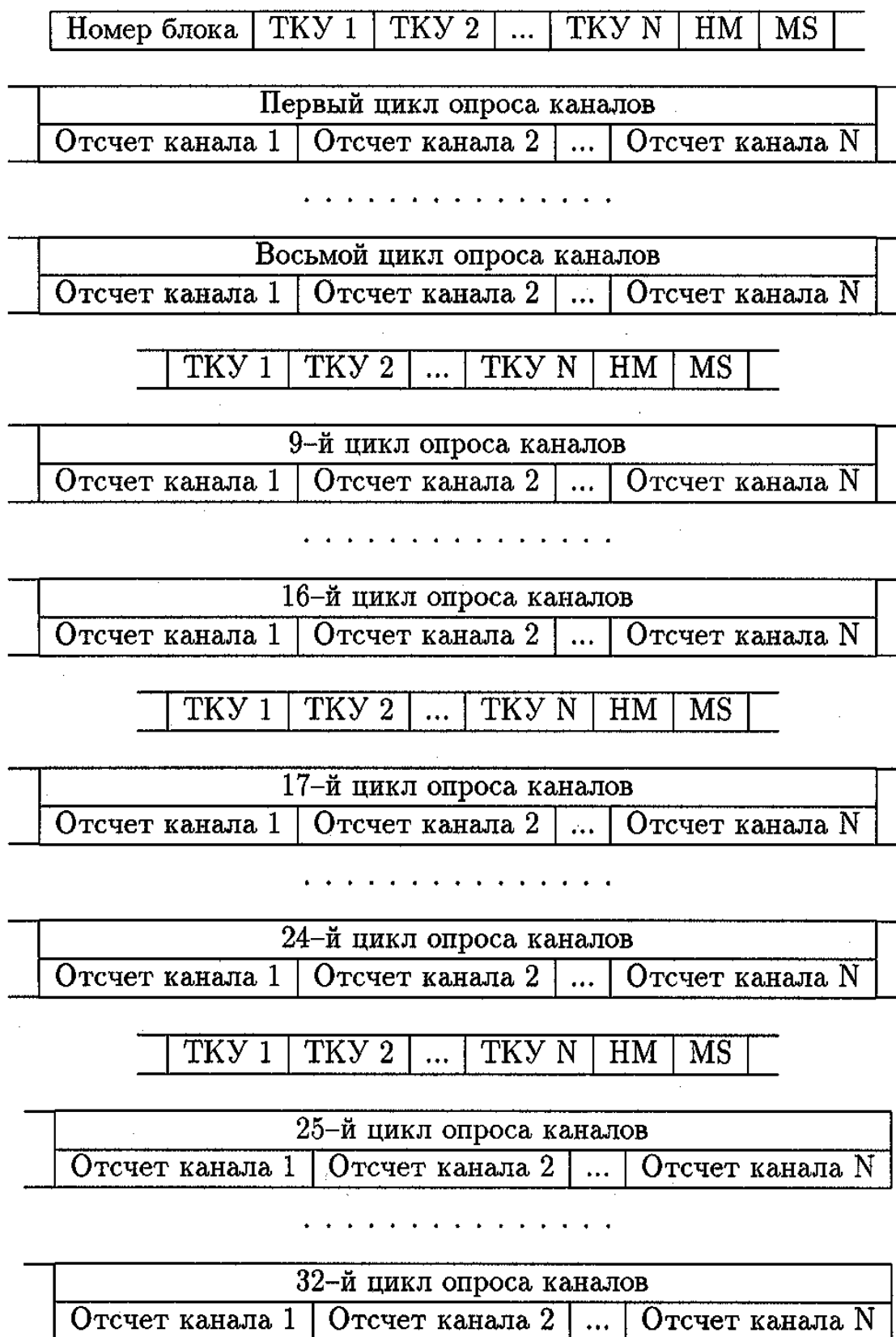
### **3.3. "ФОРМАТ-7" - формат первичного архива, сформированного системой сбора ИКАР-32**

Первичный формат "ФОРМАТ-7", в котором сохраняются данные солнечных наблюдений на РАТАН-600 за период с 1990 по 1991 годы, сохраняет преемственность с форматами "ФОРМАТ-5" и "ФОРМАТ-6" и является дальнейшим их развитием. Формат служебной зоны "ФОРМАТа-7" не сильно отличается от формата служебной зоны "ФОРМАТа-6", поэтому мы не приводим для него отдельный рисунок, аналогичный рис.1.

Наибольшие изменения претерпел формат блока данных. С одной стороны, была устранена заметная избыточность информации, во-первых, за счет ликвидации служебной зоны цикла опроса "ИКАРа-24", в которой, как правило, не содержалось необходимой информации для обработки, из-за чего объем файла оказывался почти вдвое больше, чем количество полезной информации в нем, и, во-вторых, за счет того, что стали записываться только конфигурированные каналы, а не все 24, как было в "ФОРМАТе-6". С другой стороны, был добавлен контрольный участок, содержащий текущие коэффициенты усиления, что повысило устойчивость формата к сбоям. Таким образом, блок данных "ФОРМАТа-7" состоит из 4-х порций, каждая из которых включает текущие коэффициенты усиления, текущее время и данные восьми циклов опроса (рис.5). Длина одного блока зависит от количества заданных каналов N и определяется по формуле

$$\text{Размер блока} = 2 \times (1 + 4 \times (N + 2) + 4 \times (8 \times N)) \text{ байт.}$$





**Рис.5.** Структура блока данных “ФОРМАТa-7”. N - число каналов, заданных в конфигурации. ТКУ N - текущий коэффициент усиления канала N. HM и MS - два двухбайтовых слова, содержащие текущее время, используется 20 бит: 6 бит - часы, по 7 бит - минуты и секунды.

#### 4. Архив второго уровня

В качестве архива второго уровня для хранения наблюдений Солнца на РАТАН-600 в начале 80-х годов в Пулковской группе радиоизлучения Солнца был внедрен формат “АРХИВ-2”, два варианта которого в течение длительного времени использовались в качестве основного формата и в котором записаны данные за многолетний ряд наблюдений.

Основные идеи, лежащие в основе формата “АРХИВ-2” следующие:

- данные одного наблюдения содержатся в одном файле,
- файл содержит данные всех или нескольких отобранных каналов, т.е. формат многоканальный,
- файл состоит из служебной зоны (заголовка, или “шапочки”) и порций данных по каналам,
- порция данных состоит из описателя кривой и массива данных по каналу.

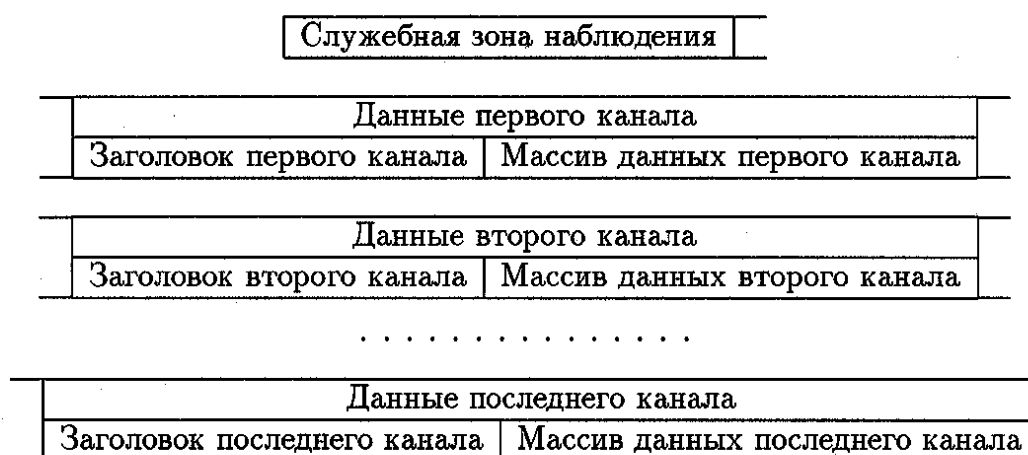


Рис.6. Структура файла “АРХИВа-2”.

Структура файла “АРХИВа-2” показана на рис.6. Следует заметить, что такая структура файла подобна структуре файла FITS-расширения Binary Table, появившегося спустя десятилетие после формата “АРХИВ-2”. Отличие состоит в том, что в FITS-формате заголовок имеет текстовый вид, а в “АРХИВе-2” - двоичный. Фактически “АРХИВ-2” был предшественником FITS-расширения Binary Table.

Существует две версии формата “АРХИВ-2” (“старая” и “новая”), которые имеют два основных различия:

- в первой версии записывался двухбайтовый массив данных, а во второй - четырехбайтовый,
- в первой версии число точек по всем каналам было одинаковым, а во второй число точек можно было задавать независимо по разным каналам.

Поскольку в настоящее время ЭВМ серии ЕС, на которых создавался и поддерживался “АРХИВ-2”, не используются, и обработка данных выполняется на современных компьютерах, а также значительно развились концепции архивизации астрономических данных, то “АРХИВ-2” утратил свое значение как базового. Сейчас он скорее может рассматриваться наравне с форматами “ФОРМАТ-5,6,7” как формат первичного архива, являющегося исходным для построения нового единого базового архива. Помимо формата “АРХИВ-2” получил распространение так называемый “вторичный” формат, внедренный Л.В. Опейкиной. Он не является в полном смысле форматом архива второго уровня, поскольку файлы в этом формате помимо собственно массивов данных со-

держит очень мало информации, необходимой для дальнейшей обработки. Однако, это уже и не первичный формат. Данные в нем приведены к шкале антенных температур и шкале долей оптического радиуса Солнца и пригодны для астрофизической обработки (при условии ввода дополнительной информации). Этот формат являлся базовым для системы обработки PIRAT, разработанной С.В.Цветковым.

Архив во всех вторичных форматах полностью перенесен на CD.

#### 4.1. Формат “АРХИВ-2 старый”

Основным носителем информации “АРХИВа-2” являлись магнитные ленты. На физическом уровне магнитная лента с данными представляет собой многофайловый том без меток. Одно наблюдение занимает один файл. Данные записаны в файл несблокированными записями фиксированного размера по 516 байт. Первые четыре байта каждого блока - служебные, точнее это рудимент, доставшийся от системы ДОС АСВТ, который в основном архиве, поддерживаемом на ЕС ЭВМ не использовался. Поскольку “АРХИВ-2” формировался в основном на ЕС ЭВМ, то числовые поля (включая значения с плавающей точкой) представлены в соответствующем стандарте (IBM 360), а символьные - в кодировке EBCDIC.

Служебная зона (рис.6) занимает первые два блока по 516 байт, затем следуют порции данных каналов, на каждую из которых отводится одинаковое число блоков. Максимально возможное число каналов - 20. Число точек по всем каналам одинаково. Поканальная информация записывается в служебную зону для всех 20 каналов, независимо от фактического наличия данных по все каналам. На каждый канал выделяется целое число блоков, оставшаяся часть последнего блока не используется. Первые 80 байт первого блока каждой порции данных канала - описатель канала, далее следует массив данных, каждая точка занимает два байта.

Ниже приведено описание структур (на языке) C GSOUT, соответствующей служебной зоне “старого” “АРХИВА-2”, и GSOCV, соответствующей описателю данных канала.

```
typedef struct
{
    long nBlock;
    long Nofle; /* Порядковый номер файла */
    long Nobs; /* Номер наблюдения */
    long Year, Month, Day, Hour; /* Дата и час наблюдения */
    long Telescope; /* Телескоп */
    long Cabin; /* Облучатель */
    long AcqSys; /* Система регистрации */
    char Source[4*4];
    char Observer[17*4];
    long CulmHour, CulmMin; /* Звездное время */
    float CulmSec; /* кульминации */
    long DecGrad, DecMin; /* Склонение */
    float DecSec;
    float HSource; /* Высота источника */
    float HAerial; /* Высота антенны */
    long naz; /* Номер азимута */
    float daz; /* Азимут */
    float phi0; /* Рабочий угол сектора */
    long StartHour, StartMin;
    float StartSec; /* Зв. время начала регистрации */
    float rs; /* Радиус Солнца */
}
```

```

float valh; /* Часовое изменение прямого восх. */
float vdelh; /* Часовое изменение склонения */
float dfy; /* Вынос из фокуса по Y */
float wl[20]; /* Длины волн по каналам */
long nch[20]; /* Номера каналов */
char prm[20][4]; /* Параметры по каналам ("I", "V", /*
/* "ДММУ" - канал не используется)*/

float dfx[20]; /* Выносы из фокуса по каналам */
long nBlock2; /* Не используется, происхождение сего */
/* таково: файл на МЛ записывался */
/* блоками по 516 байт, первые 4 байта */
/* каждого блока ритуальные из */
/* ДОС АСВТ, это начало второго блока */
/* Моменты начала записи по каналам */
float tst[20]; /* Температуры калибр. Ступенек */
float tng[20]; /* Постоянные времени */
float tau[20]; /* Ступеньки калибровки */
float clb[20]; /* Число каналов регистрации */
long l; /* Частота опроса */
long nfq; /* Шаг по времени */
float dtcond; /* Число каналов в архиве */
long la2; /* Число точек на канал */
long mim; /* Общее число блоков (по 516 байт)*/
long nbltt; /* Число блоков на один канал */
long nbldh;
char Comment[36*4];
long ip; /* Резерв */
long ws[2];
long nodut;
long noloi;
}
GSOUT;

```

```

typedef struct
{
long nmb; /* номер канала */
long nt; /* число точек */
long n1; /* обычно равно 1 - первая точка */
long n2; /* обычно равно mim - последняя точка */
long nx; /* обычно равно 1 - номер точки */
/* с аргументом x */
float x; /* =ts - время начала регистрации */
float dx; /* =dtcond - шаг */
float yz; /* обычно равно 0 - уровень отсчета */
float sc; /* масштаб */
/* сигнал = отсчет*sc+yz */
float a; /* резерв */
char is[8*4]; /* текстовый описатель */
long nn1; /* резерв */
long nn2; /* резерв */
}
GSOCV;

```

При работе с данными в формате “АРХИВ-2 старый” следует иметь ввиду весьма важную деталь, выяснившуюся спустя значительное время после формирования архива. Как оказалось, частота опроса данных Устройством автоматической регистрации (УАР) была не той, какая предполагалась. Более того, она изменялась изо дня в день, и при обработке необходимо на каждый день ее уточнять, например, исходя из сравнения скана с оптическим радиусом Солнца.

#### **4.2. Формат “АРХИВ-2 новый”**

Формат “АРХИВ-2 новый” возник по двум причинам, связанным с внедрением в практику солнечных наблюдений комплексов ряда “ИКАР”. При наблюдениях с использованием комплексов этого ряда в ходе наблюдения выполнялись переключения усиления в зависимости от входного сигнала. После сшивки для хранения отсчетов диапазона двухбайтовых чисел уже обычно оказывается недостаточно, и поэтому первый вариант “АРХИВа-2” стал неприемлим. Вторая причина связана с увеличением количества каналов и, соответственно, объема информации. Поскольку расширение диапазона в новых наблюдательных комплексах было произведено в основном за счет волн дециметрового диапазона, для которых ширина диаграммы направленности заметно больше, чем у сантиметровых, то объем файла можно было существенно сократить за счет сжатия данных, но для этого была необходима возможность задания различного количества точек по каналам, что не было предусмотрено в первой версии “АРХИВа-2”.

В целом, “АРХИВ-2 новый” аналогичен “старому”, и многое из сказанного в 4.1 справедливо и для этого варианта. Логическая структура файла полностью такая же (рис.6), но длина блоков 512 байт, т.е. отсутствуют рудиментарные первые 4 байта. Максимально допустимое количество каналов также 20, но массивы уже четырехбайтовые и число точек по разным каналам задается отдельно и может быть различным. Есть некоторые отличия в служебной зоне:

- после часа и минут момента прохождения центра источника через диаграмму направленности радиотелескопа (CulmHour, CulmMin структуры GSOUT) следуют секунды момента начала регистрации (StartSec), и наоборот, после часа и минут момента начала регистрации (StartHour, StartMin) следуют секунды момента прохождения центра источника через диаграмму (CulmSec);
- вместо радиуса источника (rs), как в “старом” варианте, записано время прохождения радиуса источника;
- не используются некоторые массивы поканальной информации (wl, tst, clb);
- в массиве dfx записаны не выносы из фокуса в миллиметрах, как в “старом” варианте, а поправки за вынос из фокуса в секундах звездного времени для источника, имеющего склонение  $\delta = 0$ ;
- поля “частота опроса” nfq, “шаг по времени” dtcond, “число точек” mim, “общее число блоков” nbltt, “число блоков на канал” nblch не используются, соответствующая информация находится в описателе кривой.

В описателе кривой имеется одна ошибка: указано число точек на 1 больше фактического.

#### **4.3. “Вторичный” формат**

“Вторичный” (термин разработчика формата) формат был разработан и внедрен Л.В. Опейкиной и являлся базовым форматом для системы обработки солнечных наблюдений PIRAT, созданной С.В. Цветковым. Один файл содержит данные одного канала, таким образом данные одного наблюдения занимают N файлов, где N - число ка-

налов. Каждый файл состоит из заголовка размером 20 байт, содержащего информацию о вертикальной (антенные температуры) и горизонтальной (доли радиуса Солнца) шкалах и массива двухбайтовых отсчетов. Ниже приведено описание структуры HEADER заголовка.

```
typedef struct {
    short nt0;           /* Количество точек в скане */
    short kf1;           /* Коэффициент, на который следует
                        /* домножить отсчеты */
    short idf;           /* Интервал между отсчетами
                        /* (в угл. сек.),
                        /* домноженный на коэффициент kf2 */
    short kf2;           /* Коэффициент, на который нужно
                        /* разделить idf, чтобы получить шаг */
    short ice;           /* Номер точки, соответствующей
                        /* центру */
    short ir1;           /* Оптический радиус Солнца
                        /* (в угл. сек.) */
    short AzGrad;        /* Азимут (градусы) */
    short AzMin;         /* Азимут (минуты) */
    short AzSec;         /* Азимут (секунды) */
    short f;             /* Резерв */
} HEADER;
```

## 5. Формат выходных файлов первой очереди системы сбора ПАС

Регулярные наблюдения Солнца на РАТАН-600 с использованием первой очереди системы сбора ПАС начались в июле 1991 года. Основным недостатком этой системы сбора - отсутствие вывода разряда готовности АЦП на линию аппаратных прерываний IRQ2. Поэтому программное обеспечение работало в режиме "по готовностям", и во временной шкале существуют "дырки", возникшие при записи блоков данных на диск. Кроме того, в формате не предусмотрено сохранение служебной информации, необходимой для обработки данных.

Одно наблюдение Солнца записывалось как группа из нескольких файлов, как правило, из трех: первая калибровка, запись Солнца, вторая калибровка. Все файлы группы имеют одинаковый формат. Данные в файле записаны "порциями" по два блока размером по 512 байт каждый. Первые 8 двухбайтовых слов первого блока каждой "порции" - служебные, первые 8 двухбайтовых слов второго блока "порции" не используются.

Служебные слова содержат следующую информацию: 0-3 - время запуска программы (0 - часы, 1 - минуты, 2 - секунды, 3 - сотые доли секунд), 4 - не используется, 5 - частота модуляции, 6 - старшие два байта четырехбайтового (long) счетчика "тиков" в момент начала регистрации первой "четвертинки" (четвертой части периода модуляции) (мы предполагаем, что читатель знаком с принципами работы ПАС [17,9]) первого отсчета блока (следует понимать, что это значение счетчика не соответствует моменту первого отсчета, который интегрируется по нескольким (до 32) циклам модуляции), 7 - младшие два байта счетчика "тиков". Один "тик" соответствует промежутку времени в половину "четвертинки", нулевое значение счетчика - моменту запуска программы. Цикл опроса выполняется за 8 "тиков" (4 "четвертинки"). Точное время в любой момент и номер точки в массиве зарегистрированных данных можно вычислить по соответствующему значению "тика".

После 8 начальных слов следуют двухбайтовые отсчеты по каналам: в первом блоке "порции" - по одной поляризации ("правой"), во втором - по другой ("левой"). Понятия "правой" и "левой" здесь условны, поскольку в ПАС'е отсутствует аппаратная инициализация, и опрос может начаться с любой из "четвертинок". В блоке размером 512 байт размещается целое число циклов опроса, последние несколько слов не используются.

Существовало и использовалось несколько версий программы сбора, которые различались количеством каналов регистрации (от 8 до 24). К сожалению, пользователи не документировали внесение изменений в программу, поэтому нет информации о том, какие файлы записаны с каким числом каналов.

В этом формате записаны данные наблюдений по 13 июля 1992 года. С 17 июля 1992 года начались наблюдения с использованием программного обеспечения SoftPAS.

## **6. Форматы выходных файлов и методика обработки данных наблюдений, выполненных с помощью программного обеспечения SoftPAS**

### **6.1. Соглашение об именах файлов**

В результате работы программы сбора формируется несколько файлов с данными и вспомогательной информацией, необходимой для обработки данных:

- <основное имя файла>.hdr - заголовочный файл,
- <основное имя файла>.<NN>d - файлы с данными,
- <основное имя файла>.<NN>p - протоколы управляющих воздействий,
- <основное имя файла>.<NN>t - файлы временной привязки,

где <NN> - это двузначный номер группы. Поскольку в течение одного наблюдения регистрация может включаться несколько раз, например, для записи первой калибровки, записи Солнца, записи второй калибровки, то каждый раз при этом записывается группа файлов:

- <основное имя файла>.<NN>d,
- <основное имя файла>.<NN>p,
- <основное имя файла>.<NN>t.

Основное имя файла формируется по дате наблюдения следующим образом:

ГГММДДНН,

где ГГ - год, ММ - месяц, ДД - день, НН - номер наблюдения в этот день. Например, 1 августа 1993 года результаты наблюдения Солнца были записаны в следующую группу файлов:

- 93080100.hdr - заголовочный файл
- 93080100.00d }  
93080100.00p } - файлы с первой калибровкой  
92080100.00t }
- 93080100.01d }  
93080100.01p } - файлы с наблюдением Солнца  
92080100.01t }
- 93080100.02d }  
93080100.02p } - файлы со второй калибровкой  
92080100.02t }

## 6.2. Форматы выходных файлов

### 6.2.1. Формат заголовочного файла

Заголовочный файл \*.hdr содержит служебную информацию о наблюдении, необходимую для обработки: дату, название источника (Солнце, опорные источники), высоту и азимут антенны, конфигурацию каналов регистрации, информацию о режиме регистрации. Для удобства использования все эти данные объединены в одной структуре HEADER:

```
typedef struct
{
    char Version[32];           /* Версия системы регистрации */
    short Year, Month, Day;    /* Дата наблюдения */
    char Source[32];          /* Название источника */
    GRAD AerialAltitude;      /* Высота антенны */
    short nAzimuth;           /* Номер азимута */
    GRAD Azimuth;             /* Азимут */
    char Observer[32];        /* Наблюдатель */
    short Antenna;            /* Конфигурация антенны:
    /* 1 – север */
    /* 2 - юг+перископ */
    short Cabin;              /* Номер облучателя */
    short Carriage;           /* Положение каретки */
    short HornPosition[64];   /* Выносы из фокуса
    /* (мм, < 0 - к западу) */
    short CondTime;           /* Резерв (=0) */
    short CountChannel;       /* Количество каналов */
    unsigned char ChannelOn[64];
    /* Конфигурация каналов */
    /* 1 - канал включен */
    /* 0 - канал выключен */
    short ChannelPAS[64];     /* Номера стволов по каналам */
    double ChFreq[64];        /* Частоты по каналам */
    unsigned Tau[8];          /* Начальная постоянная времени
    /* по стволам */
    unsigned AmpLF[8];        /* Начальные значения усиления НЧ
    /* по стволам */
    unsigned AddrPAS[8];      /* Адреса стволов */
    unsigned AddrCom[8*8];    /* Адреса команд */
    unsigned TableAmpLF[8*8]; /* Таблица значений усиления НЧ
    /* по возрастанию */
    unsigned TableTau[3];     /* Таблица команд для tau */
    unsigned StartModLeft;    /* Включение модулятора "левый" */
    unsigned StartModRight;  /* Включение модулятора "правый" */
    short Frequency;          /* Частота модуляции */
    short CountSum;           /* Количество точек суммирования */
    short CountFilesCalibr;   /* Количество файлов с данными калибровок */
    short CountFilesData;    /* Количество файлов с данными */
    unsigned FlagError;       /* Флаг ошибки */
    short FlagOvf[64];        /* Флаги зашкала по каналам
    }
    HEADER;
```



### 6.2.2. Формат файла данных

Файл с данными \*.<NN>d записан блоками размеров по 4096 байт (рис.7). В начале каждого блока находится префикс размером 16 байт, который в первых четырех

Префикс блока данных															
Байты															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P	A	S	□	Номер блока		Номер первого "тика" блока				Резерв					
Данные каналов "правой" поляризации цикла опроса 0 в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					
Данные каналов "левой" поляризации цикла опроса 0 в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					
Данные каналов "правой" поляризации цикла опроса 1 в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					
Данные каналов "левой" поляризации цикла опроса 1 в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					
...															
Данные каналов "правой" поляризации цикла опроса N в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					
Данные каналов "левой" поляризации цикла опроса N в блоке															
Слова															
0		1		...				NCH-1		NCH					
Отсчет канала 0		Отсчет канала 1		...				Отсчет канала NCH-1		Отсчет канала NCH					

**Рис.7.** Формат блока файла с данными. Файл состоит из последовательности таких блоков. Число точек в блоке – N+1, количество частотных каналов – NCH+1. Слова "правая" и "левая" поляризации взяты в кавычки, потому что здесь эти понятия условны, истинный знак поляризации может быть определен при обработке калибровок.

байтах содержит символы "PAS ", в следующих двух байтах - номер блока, затем в четырех байтах - номер тика, соответствующий моменту начала регистрации блока, последующие байты префикса оставлены в качестве резерва и не используются. Основное назначение префикса данных – создание возможности восстановления данных при аварийном завершении работы программы сбора. Если во время регистрации произойдет выключение питания или "зависание" программы, которое потребует перезагрузки системы, то файлы с данными не будут корректно закрыты, и вся записанная информация окажется расположенной в "утерянных" кластерах (lost clusters). С помощью сервисных программ, например, утилит Нортон, утерянные кластеры можно восстановить, однако возникает задача отождествления, где находятся данные, а где - "мусор". Благодаря наличию идентификатора "PAS" кластеры с данными могут быть выделены, а по номеру блока - упорядочены. Таким образом, наблюдательная информация будет полностью восстановлена.

После идентификатора располагаются отсчеты по каналам, сначала по одной поляризации, затем по другой. В целях экономии места на диске записываются данные только для каналов, которые включены в конфигурацию. Поскольку число записываемых каналов может изменяться от наблюдения к наблюдению, то не было смысла согласовывать размер блока данных с размером порции данных, получаемой при одном цикле опроса, и в конце блока данных, как правило, остается небольшое количество неиспользуемых байт. Число точек в одном блоке можно определить по формуле:

$$\text{Число точек} = (4096 - 8 \times 2) / \text{sizeof}(\text{short}) / \text{Header.CountChannel} / 2.$$

Здесь и в последующих формулах для записи элементов структур использована нотация, принятая в языке программирования Си.

### 6.2.3. Формат файла с протоколом управляющих воздействий

Под управляющими воздействиями понимаются любые команды управления ПАС, генерируемые программным обеспечением, как при автоматическом управлении наблюдением, так и задаваемые вручную наблюдателем с клавиатуры: команды включения и выключения модуляторов, изменения постоянной времени, изменения усиления НЧ.

Байты					
0	1	2	3	4	5
Номер "тика"			Слово управления		

...

Байты					
0	1	2	3	4	5
Номер "тика"			Слово управления		

**Рис.8.** Формат блока файла протокола управляющих воздействий. Файл состоит из последовательности таких блоков. Последние 2 байта каждого блока не используются.

Слово управления															
Биты															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Адрес ствола			Адрес команды			Команда									

**Рис.9.** Формат слова управления ПАС.

Протокол управляющих воздействий записывается в файл \*.<NN>р блоками размером по 512 байт (рис.8). Блок состоит из 6-байтных полей на каждую команду. В первых 4-х байтах поля находится значение счетчика "тиков" в момент генерации команды, по которому можно вычислить соответствующий момент времени и номер точки данных (см. 6.4), в следующих двух байтах - слово управления.

Слово управления ПАС (рис. 9) - это двухбайтовое беззнаковое целое число, несущее информацию об адресе ствола, для которого генерируется команда, адресе команды и самой команде. Следует различать логические и физические адреса стволов и команд, а также логические и физические значения команд. Программа оперирует логическими значениями, а физические подставляются непосредственно при генерации команды соответствующей функцией нижнего уровня по специальным таблицам. При задании конфигурации каналов по стволам речь идет о логических номерах стволов. Физические адреса стволов используются при формировании команд управления и хранятся в переменной AddrPAS структуры HEADER. Логические адреса команд определены константами (управление модуляцией – 0, изменение усиления -1, изменение постоянной времени – 2), а физические находятся в переменной AddrCom. Логические значения постоянной времени определены константами 0, 1, 2 (предусмотрены три значения постоянной времени), а физические - таблицей TableTau. И наконец, логические команды управления модуляторами определены константами 0 и 1, а физические - переменными StartModLeft и StartModRight. Таблица TableAmpLF содержит физические значения команд задания усиления НЧ по стволам по возрастанию. Таким образом, двухбайтовое значение слова управления формируется следующим выражением:

$$\text{Слово управления} = \text{AddrPAS}[\text{PAS}] | (\text{AddrCom}[\text{Addr}] \ll 3) | (\text{Command} \ll 6),$$

где PAS - логический адрес (номер) ствола, Addr - логический адрес команды, Command - физическое значение команды.

#### 6.2.4. Формат файла временной привязки

Файл \*.<NN>t, длиной 8 байт, содержит момент (часы, минуты, секунды, сотые доли секунд - 4 двухбайтовые значения), соответствующий нулевому значению счетчика "тиков".

### 6.3. Восстановление скана Солнца

Задача восстановления скана Солнца связана с необходимостью учесть переключения усиления НЧ во время регистрации, выполняющиеся с целью достижения максимального динамического диапазона. Скан, записанный программой регистрации, состоит из сегментов, зарегистрированных с разным усилением. Следует заметить, что благодаря использованию метода фазового кодирования, усложнившего программное обеспечение регистрации, методика сшивки сканов упростилась в сравнении с методикой для ИКАР. Поскольку результирующий (декодированный) скан представляет собой разность двух сигналов, то формула восстановления тривиальна:

$$A_{\text{восст.}} = A_{\text{рег.}} \times k_i,$$

где  $A_{восст.}$  - восстановленное значение точки скана,  $A_{рез.}$  - исходное значение точки не-шпигованного скана, принадлежащей сегменту, записанному с усилением  $i$  ( $i$  - логическое значение усиления НЧ, может принимать значения от 0 до 7),  $k_i$  - коэффициент сшивки для сегмента, записанного с усилением  $i$ , и задача сводится к вычислению номеров точек, в которых производились изменения усиления, по номерам "тиков", содержащихся в файле протокола управления. Коэффициент сшивки для сегмента вычисляется по формуле

$$k_i = k_{7-6} \times k_{6-5} \times \dots \times k_{i-(i-1)},$$

где  $k_{i-(i-1)}$  - коэффициент отношения сигнала при усилении  $i$  к сигналу при усилении  $i-1$ . Значения коэффициентов  $k_{i-(i-1)}$  как правило близки к 2, но могут варьироваться от 1.5 до 2.5 (иногда даже до 4) для переходов между различными значениями усиления и для разных каналов, а также различаются в разные периоды наблюдений, если производится перенастройка аппаратуры. Эти коэффициенты при обработке необходимо подбирать экспериментально.

#### 6.4. Восстановление временной шкалы

Восстановление временной шкалы производится на основе счетчика "тиков" и момента нулевого "тика", записанного в файле временной привязки. Интервал времени, соответствующий одному "тику" (одна восьмая периода модуляции ПАС)

$$\Delta Tick = 1 / (Header.Frequency \times 2),$$

где  $Header.Frequency$  - частота модуляции, подаваемой от компьютера (она в 4 раза выше частоты модуляции ПАС). Момент времени, соответствующий произвольному значению счетчика "тиков" легко вычисляется. Число "тиков"  $TickPoint$ , за которое интегрируются данные по одному отсчету по всем каналам вычисляется по формуле

$$TickPoint = Header.CountSum \times 8,$$

где 8 - число тиков в полном периоде модуляции,  $Header$  - структура типа HEADER,  $Header.CountSum$  - количество точек суммирования. Количество "тиков" в блоке данных  $DiffTick$  вычисляется по формуле

$$DiffTick =$$

$= Header.CountSum \times 8 \times ((BufSize - HdrSize \times 2) / sizeof(short) / Header.CountChannel / 2),$   
 где  $BufSize=4096$  - размер блока данных,  $HdrSize=8$  - число двухбайтовых слов в префиксе блока данных,  $Header.CountChannel$  - число каналов регистрации. Интервал между точками скана вычисляется по формуле

$$\Delta t = TickPoint / (Header.Frequency \times 2).$$

Номер точки  $Point$  по номеру "тика"  $Tick$  вычисляется по формуле

$$Point = (Tick - StartTick) / TickPoint,$$

где  $StartTick$  - номер "тика" начала записи, т.е. это номер тика, записанный в первом блоке файла данных.

#### Благодарности

Работа частично поддержана грантами РФФИ 02-02-16548, 03-02-17357, 03-02-17528, а также договорами 16КИ и ОФН-18.

#### Литература

1. **Петров З.Е.** Сбор радиоастрономических данных и их оперативная обработка на радиотелескопе РАТАН-600. Кандидатская диссертация, 1986.
2. **Шатилов В.А.** Оперативная обработка наблюдений Солнца на РАТАН-600 и некоторые астрофизические результаты. Кандидатская диссертация, 1992.

3. *Андреанов С.А.* Накопление данных, автоматизация обработки и анализ активности Солнца в радиодиапазоне. Кандидатская диссертация, 1988.
4. *Андреанов С.А., Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Пиотрович В.В.* Комплекс программ обработки солнечных наблюдений МОНИТОР-1. Руководство пользователя. 1981.
5. *Богод В.М., Болдырев С.И., Ипатова И.А., Корольков Д.В., Романцов В.В.* Солнечные данные, №11, 93, 1976.
6. *Фридман П.А., Черков Л.Н.* VII Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Тезисы докладов. Пущино, 1975, стр. 182.
7. *Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Петров З.Е.* Астрофиз. исслед.(Изв.САО), **20**, 102, 1985.
8. *Богод В.М., Петров З.Е., Шатилов В.А.* Радиоастрономическая аппаратура. XVII Всесоюзная конференция. Ереван, 10-12 октября 1985 г. Тезисы докладов, 227, 1985.
9. *Богод В.М., Абрамов-Максимов В.Е., Дикуй В.Н., Ватрушин С.М., Цветков С.В.* Препринт САО, 1993, Санкт-Петербург, №84Л.
10. *Плотников В.М.* Препринт САО АН СССР №68, Нижний Архыз, 1991.
11. *Andrianov S.A., Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Boldyrev S.I., Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Zueva V.A., Korzhavin A.N., Petrov Z.E., Plotnikov V.M., Plotnikova G.B., Chekh S.A.* Materials of the World Data Center B. Solar Radio Observations with the RATAN-600 Radiotelescope in the Wavelength Range of 2-4 cm during the Period of the Solar Maximum Year, December 15, 1979 - April 3, 1980. Moscow, 1990.
12. *Andrianov S.A., Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Boldyrev S.I., Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Zueva V.A., Korzhavin A.N., Petrov Z.E., Plotnikov V.M., Plotnikova G.B., Chekh S.A.* Materials of the World Data Center B. Solar Radio Observations with the RATAN-600 Radiotelescope in the Wavelength Range of 2-4 cm during the Period of the Solar Maximum Year, September 13, 1980 - January 28, 1981. Moscow, 1990.
13. *Bogod V.M., Boldyrev S.I., Zueva V.A., Korzhavin A.N., Petrov Z.E., Plotnikov V.M., Shatilov V.A.* Materials of the World Data Center B. Solar Radio Observations with the RATAN-600 Radiotelescope in the Wavelength Range of 0.8-31.6 cm during the Year 1984. Moscow, 1992.
14. *Абрамов-Максимов В.Е.* Информационное обеспечение радиоастрономических наблюдений Солнца на РАТАН-600 и БПР и его применение для исследования структуры магнитных полей в короне Солнца. Кандидатская диссертация, 1997.
15. *Wells D.C., Greisen E.W. and Harten R.H.* A&A Suppl., v.44, p.363, 1981.
16. *Гараимов В.И.* Препринт САО РАН №127Т, Нижний Архыз, 1997.
17. *Богод В.М., Комар Н.П.* Препринт САО, №85, Нижний Архыз, 1992.

## FORMATS OF PRIMARY ARCHIVE OF SOLAR RADIO OBSERVATIONS USING RATAN-600

**Abramov-Maximov V.E.**

### *Summary*

*We describe all basic formats of primary archive of solar radio observations using RATAN-600. That archive covers a period from 1975 till now. However, all these data were stored on different data medium (magnetic tapes, diskettes, streamer's cartridges, CD) and in different formats, because the observations were being carried out using of different systems of registration based on computers of different types. Moreover, there is no documentation with description of formats. In fact, this paper is the first attempt to combine all information about all formats.*

## СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ $\alpha$ CET

Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.

*Проведено исследование распределений энергии в спектре звезды  $\alpha$  Cet (BS 911), полученных в пяти сезонах наблюдений в течение 18 лет. Показано, что вариации излучения звезды в 1971-1973 годах были связаны с пульсациями звезды, которые сопровождалась изменением радиуса слоя, излучающего в континууме, на  $\sim 7\%$  и температуры на  $\sim 100\text{K}$ .*

### Введение

В последние годы нами был проведён анализ стабильности звёздного излучения по результатам наблюдений, имеющимся в Пулковской базе спектрофотометрических данных [1-6]. В результате анализа были отмечены звёзды, показавшие переменность квазимонохроматических освещённостей. Одной из таких звёзд являлась звезда  $\alpha$  Cet (BS 911) спектрального класса  $M1.5 IIIa$ .

Из фотометрии известно, что величина  $V$  звезды  $\alpha$  Cet меняется в пределах:  $2.45\text{--}2.54^m$  [7]. Характер этой переменности точно не установлен. О спектрофотометрической переменности данных нет. Имеются данные о наличии заметного потока излучения в ИК-области и эмиссии Fe II в ультрафиолете. Предположительно звезда относится к типу LB, объединяющему неправильные медленно меняющиеся переменные гиганты поздних спектральных классов.

Настоящая работа посвящена исследованию переменности спектроэнергетических кривых этой звезды.

### 1. Результаты наблюдений

Как неоднократно отмечалось, результаты наблюдений, находящиеся в базе спектрофотометрических данных, сгруппированы в сезонные каталоги, относящиеся к разным периодам наблюдений. В сезонном каталоге для звезды даны квазимонохроматические величины,  $m_\lambda$ , и их среднеквадратичные (стандартные) ошибки,  $S_\lambda$ , во всех длинах волн спектрального диапазона (с шагом  $2.5\text{нм}$ ). Величина  $m_\lambda$  в длине волны  $\lambda$  определена из соотношения:  $m_\lambda = -2.5 \lg E_\lambda$ , где  $E_\lambda$  – усреднённое за сезон значение квазимонохроматической освещённости от звезды на внешней границе земной атмосферы, выраженное в  $\text{эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{сек}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ .

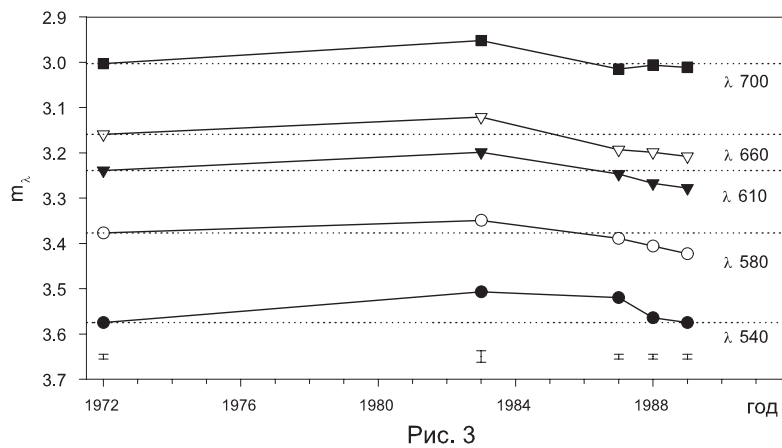
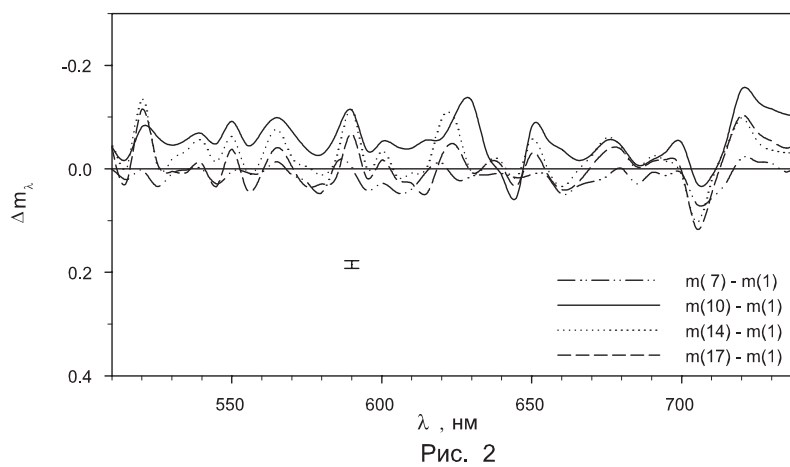
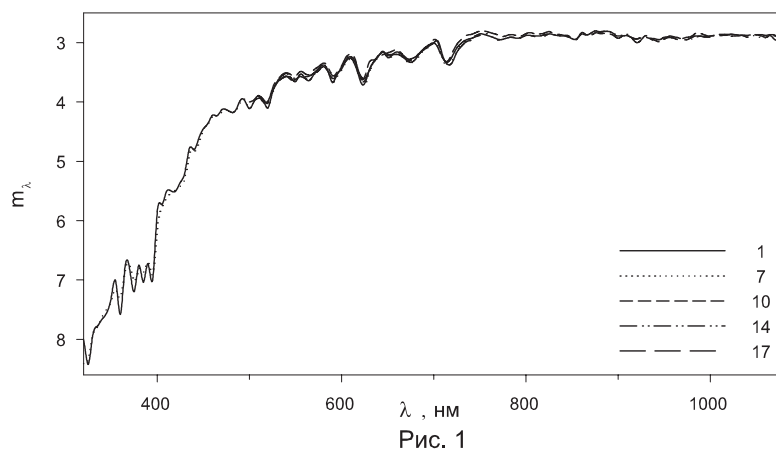
Исследуемая звезда представлена в базе данных в пяти сезонных каталогах, включающих результаты 40 наблюдений [1]. Распределение наблюдений по сезонам показано в таблице 1. В ней даны годы, в течение которых проводились наблюдения, название телескопа, спектральный диапазон,  $\lambda\lambda$  (в нм), количество наблюдений,  $N$ , и обозначение сезона (каталога),  $k$ , в соответствии с [1]. Длительность сезона определялась периодом постоянства инструментальной системы телескоп-спектрофотометр и составляла от нескольких недель до нескольких месяцев. Возможная переменность потока излучения от звезды в течение сезона не учитывалась, и результаты усреднялись по всем наблюдениям звезды за сезон. В течение одного сезона звезда, как правило, наблюдалась несколько ночей вблизи кульминации.

На рисунке 1 представлены усреднённые распределения энергии в спектре  $\alpha$  Cet, полученные в указанных сезонах. Ошибки средних (сезонных) значений квазимоно-

хроматических освещённостей в масштабе рисунка меньше величины расхождения кривых, поэтому они на рисунке не приводятся.

**Таблица 1.** Данные о сезонах наблюдений.

Годы	Телескоп	$\lambda\lambda$	N	k
1971-1973	АЗТ-7	320-740	9	1
1983	ЦЕЙСС-600	510-1080	12	10
1986-1987	“	470-1080	6	14
1988	“	510-1080	7	17
1989	АЗТ-7	320-740	6	7



Из-за малости масштаба построения графика различие кривых на рисунке 1 практически незаметно. Однако дисперсионный анализ показал, что оно имеется и значительно превосходит случайное различие средних величин в визуальной части спектра, особенно в области пересечения диапазонов, 510-740 нм [6]. В коротковолновой и длинноволновой частях спектра значимого различия кривых дисперсионный анализ не показал. Это связано, скорее всего, с тем, что при уменьшении количества используемого материала (уменьшение количества каталогов) малые изменения светового потока становятся неразличимыми на фоне большого случайного разброса.

Рассмотрим область пересечения диапазонов. Иллюстрацией различия данных разных сезонных каталогов в этой области является рисунок 2. На нём нанесены те же усреднённые результаты, что и на рисунке 1, но построенные относительно данных каталога 1: линии проведены через точки  $\Delta m_\lambda = (m_k - m_1)_\lambda$ , где  $m_k$  и  $m_1$  - квазимонохроматические величины, полученные в  $k$ -ом и 1-ом сезонах соответственно. На отрезках отложена ошибка вычисления  $\Delta m_\lambda$ , полученная из сравнения результатов 1-го каталога с данными наиболее грубого каталога 10 [8]. Видно, что, в среднем, наибольшие квазимонохроматические освещённости от звезды были получены в 10-ом сезоне.

Из-за отсутствия длинного ряда наблюдений, построить кривую блеска звезды по нашим данным не представляется возможным. Но можно провести сравнение результатов наблюдений разных лет. Для этого в наблюденных распределениях энергии мы выбрали длины волн вне полос поглощения (см. рис.1) и на рисунке 3 нанесли соответствующие им значения  $m_\lambda$ , полученные в разные годы. Здесь же на отрезках отложили ошибки результатов разных каталогов [8]. Рассматривая рисунок, можно заключить, в подтверждение выводов, сделанных выше, что в 1983 году (в 10-ом сезоне) освещённость от звезды во всех длинах волн имела наибольшее из зарегистрированных нами значений.

Определим далее, какие изменения основных физических параметров звезды – радиуса и температуры – могли вызвать наблюдаемое изменение потока.

## 2. Спектрофотометрическая температура

Рассмотрим сначала параметр, определяющий распределение энергии в спектре звезды, – спектрофотометрическую температуру.

Определение спектрофотометрической температуры звезды класса  $M$  чрезвычайно трудно. Эти трудности подробно описаны в наших предыдущих статьях [9,10]. Здесь мы на них останавливаться не будем. Напомним только, что известный метод определения спектрофотометрической температуры основан на сравнении наблюдаемого распределения энергии в непрерывном спектре звезды с распределением энергии в спектре абсолютно чёрного тела. Однако найти в наблюдаемом спектре “холодной” звезды области, или даже отдельные длины волн, в которых континуум не искажён линиями и полосами поглощения, практически невозможно. Всегда присутствует некоторый произвол в его нахождении и приходится пользоваться разными нормировками, использовать абсолютный и дифференциальный способы сравнения, чтобы, по возможности, уменьшить влияние этого произвола.

Прежде, чем сравнивать наблюдаемые и теоретические кривые энергии, отметим, что исследуемая звезда имеет небольшое покраснение:  $E_{B-V} = 0.05^m$  [7]. Если предположить, что покраснение произошло в межзвёздной среде на пути света от звезды до Земли, то, зная закон покраснения, наблюденные данные можно “отбелить”. Для “отбеливания” результатов наблюдений мы использовали единый закон межзвёздного ослабления света, приведённый в [11] и полученный в результате усреднения законов, относящихся к различным областям Галактики. Возможно, имеются некоторые вариации



закона в направлении на данную звезду, но при небольшом покраснении использование среднего (а не конкретного) закона не сильно влияет на результат.

Исправленное, таким образом, за влияние межзвёздной среды распределение энергии в спектре звезды можно сравнить с распределением энергии в спектре абсолютно чёрного тела. На рисунке 4а представлены те же результаты, что и на рисунке 1, но “отбеленные” и нормированные к потоку в  $\lambda 540$  нм. (Для нормировки здесь и в дальнейшем мы выбирали длины волн вне полос поглощения.) Ошибки меньше расхождения кривых, поэтому не приведены. Здесь же нанесён “веер” кривых энергии для абсолютно чёрного тела разной температуры.

На рисунке видно, что всю кривую энергии звезды невозможно аппроксимировать одной теоретической кривой, т.е. описать одной спектрофотометрической температурой: температура в инфракрасной части спектра, согласно рисунку, получается выше  $3300K$ , а в голубой – ниже  $3300K$ . Сильное падение интенсивности в длинах волн короче  $450$  нм может быть связано с повышением непрозрачности протяжённой атмосферы.

Быстрое падение интенсивности излучения в сторону коротких волн, начиная с  $\sim \lambda 500$  нм, присуще всем звёздам-гигантам класса  $M$ . Мы нанесли на этом же рисунке среднее распределение энергии в спектрах звёзд близкого подкласса  $M2 III$  [12] (средней кривой для подкласса  $M1.5 III$  мы не нашли). На отрезке отложена ошибка определения средней величины в самой крайней ультрафиолетовой точке спектра,  $\lambda 320$  нм. Только в этой длине волны в коротковолновой области приведены для данного подкласса реальные измерения потока звёздного излучения. Далее до  $\lambda 580$  нм, в соответствии с [12], на рисунке даны в качестве характерной кривой для подкласса расчётные величины синтетического спектра, затем (в длинноволновую область) - усреднённые результаты реальных наблюдений, которые почти полностью легли на наши кривые. Ошибки средних величин малы, поэтому не приведены. Несмотря на большую неопределённость результатов наблюдений в коротких волнах, дефицит излучения в спектре нашей звезды очевиден и даже превосходит аналогичный дефицит в спектрах звёзд более позднего класса.

Как видно на рисунке, большинство “звёздных” точек слились, образовав сплошную полосу. Но в коротковолновой и длинноволновой областях расхождения кривых разных лет статистически незначимы [6], поэтому мы их рассматривать не будем. Остановимся лишь на области пересечения диапазонов.

На рисунке 4б представлены в этой области наблюдаемые кривые энергии и кривые абсолютно чёрного тела разной температуры. Нормировка в  $\lambda 700$  нм. На отрезке приведена средняя величина ошибки. Согласно рисунку, спектрофотометрическая температура в разные годы наблюдений составляла  $3200-3400K$ . Согласно же рисунку 4а, она была  $3300K-3400K$ . Разница в  $100K$  могла возникнуть из-за различий в нормировке данных. Она является ошибкой определения температуры и связана, скорее всего, с загрязнённостью континуума в используемых для нормировки длинах волн. С такой ошибкой мы не можем утверждать о реальном различии температур в  $100K$ . Тем не менее, заметим, что в любой нормировке спектрофотометрическая температура звезды во все годы была не менее чем на  $300K$  ниже её эффективной температуры,  $3780K$  [10], и средней температуры звёзд гигантов подклассов  $M1 III - M2 III$ ,  $3780K \div 3710K$  [12]. Отметим также, что спектрофотометрическая температура звезд ниже их эффективных температур для всех звёзд подкласса  $M2 III$  (см. рис.4а). Это, вероятно, является следствием протяжённости атмосферы. В этом случае излучение фотосферы полностью поглощается нижними слоями атмосферы, ионизуя их. Дальнейшее излучение в результате рекомбинаций и многократного рассеяния выходит затем из более высоких, а, зна-

чит, и более холодных по сравнению с фотосферой, слоёв. Слой, излучающий в непрерывном спектре, находится, таким образом, выше классической фотосферы.

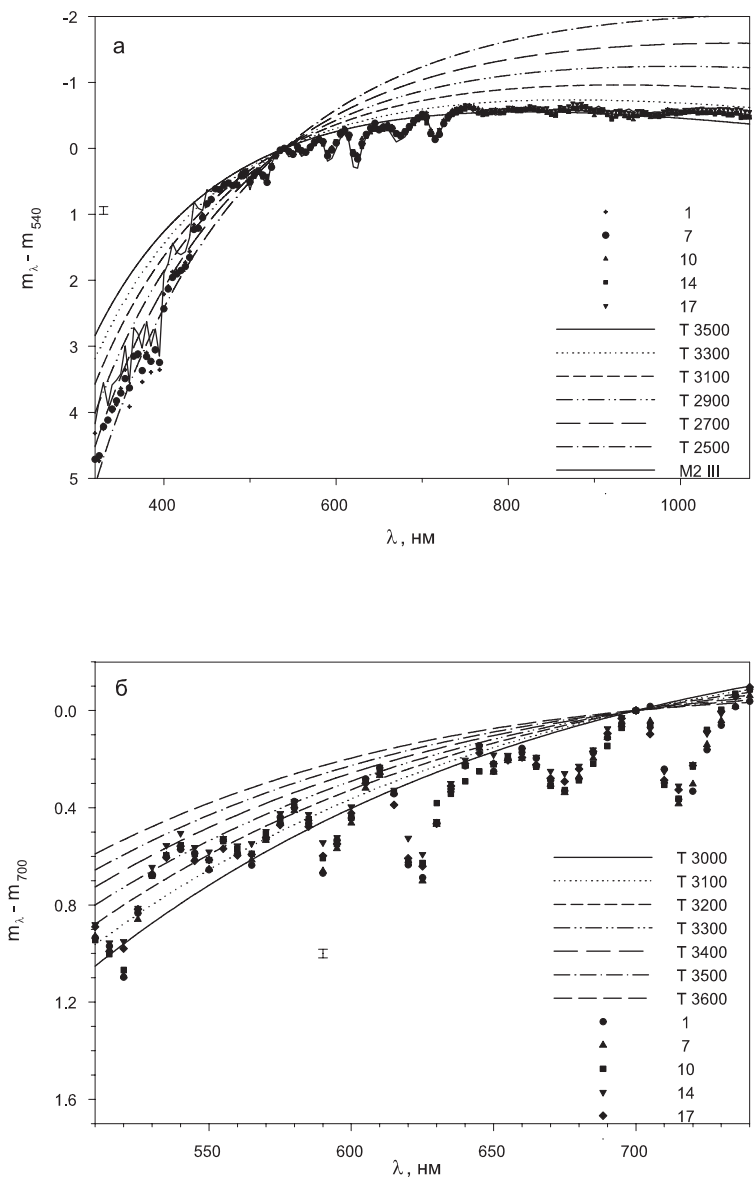


Рис. 4

Попробуем определить дифференциальным методом различие температур сильно расходящихся данных каталогов 1 и 10 (см. рис.2). На рисунке 5 построена зависимость  $\Delta m_\lambda = (m_{10} - m_1)_\lambda$  от  $\lambda$ . Нормировка в  $\lambda 540 \text{ нм}$ . На отрезке приведена средняя ошибка вычисления  $\Delta m_\lambda$ . Здесь же нанесён “веер” кривых, представляющих собой зависимости от длины волны разностей монохроматических величин,  $\Delta m_\lambda$ , абсолютно чёрных тел, температуры которых различаются на  $\pm 100, 200$  и  $300 \text{ K}$ . Сравнивая кривые, можно видеть, что различие температур в рассматриваемые сезоны не превышает  $100 \text{ K}$ , что совпадает с результатом, полученным из абсолютного метода (см. рис.4). Однако это различие температур сравнимо с ошибкой, поэтому мы не можем принять его с уверенностью, а можем лишь утверждать, что в разные годы изменений температуры излучающего слоя более чем на  $100 \text{ K}$  не было.

Рассмотрим разброс результатов наблюдений в течение одного сезона. Статистический анализ показал, что в 1-ом сезоне разброс результатов наблюдений исследуемой звезды не является случайным и отражает реальные вариации излучения звезды [5]. Очевидно, что для переменной звезды дисперсия результатов наблюдений,  $S_{n\lambda}^2$ , складывается из дисперсии случайного разброса наблюденных величин,  $S_{0\lambda}^2$ , и дисперсии, обусловленной переменностью светового сигнала,  $S_{V\lambda}^2$ . Поскольку для исследуемой звезды оказалось, что  $S_{V\lambda} \gg S_{0\lambda}$ , то  $S_{n\lambda}^2 \approx S_{V\lambda}^2$ . Используя каталожные данные,  $S_{\lambda}$ , можно определить  $S_{n\lambda}^2 = n \cdot S_{\lambda}^2$ , где  $n$  – количество наблюдений звезды в данном сезоне. Откуда  $S_{V\lambda}^2 \approx n \cdot S_{\lambda}^2$ .

На рисунке ба нанесены величины  $S_{V\lambda}$  для разных длин волн (точки), а пунктирной линией обозначен уровень случайной ошибки  $S_{0\lambda}$  результата единичного наблюдения в 1-ом сезоне. Из рисунка можно сделать очевидный вывод, что в разбросе результатов наблюдений данной звезды преобладает фактор переменности над фактором случайности.

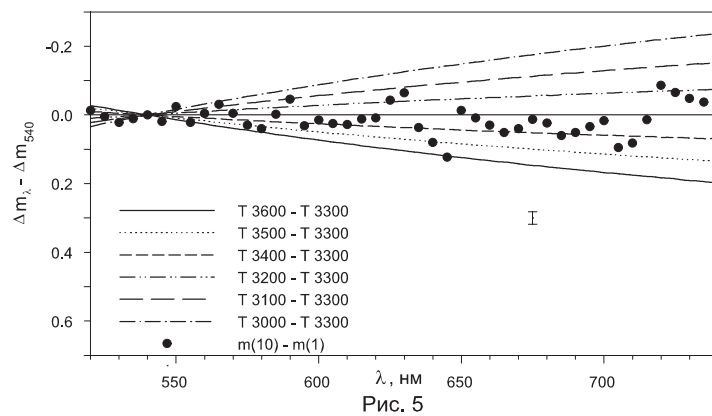


Рис. 5

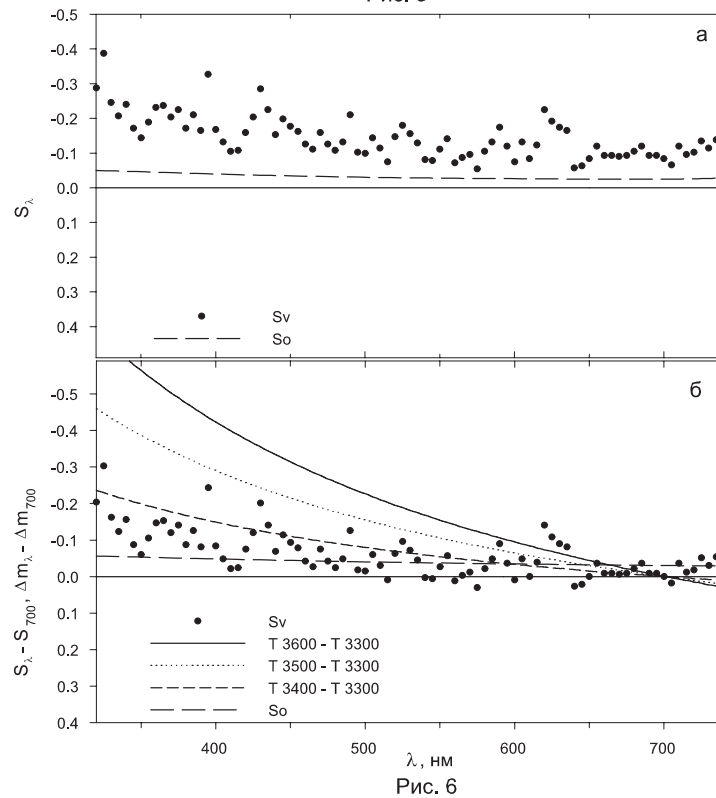


Рис. 6

На рисунке 6б мы сравнили зависимость  $S_{V\lambda}$  от длины волны с соответствующей зависимостью изменения излучения абсолютно чёрного тела,  $\Delta m_\lambda$ , при изменении его температуры на  $100K$ ,  $200K$  и  $300K$ . Нормировка в  $\lambda 700$  нм. Пунктирной линией обозначен уровень случайных ошибок,  $S_{0\lambda}$ , нормированных данных. Видно, что с уменьшением длины волны  $S_{V\lambda}$  возрастает практически так же, как и  $\Delta m_\lambda$ , при изменении температуры тела на  $100K$ .

Таким образом, по данным наших наблюдений спектрофотометрическая температура исследуемой звезды в 1-ом сезоне менялась в пределах  $100K$ . Изменений температуры в  $100K$  между сезонами мы установить не смогли, поскольку из-за увеличения ошибки такие изменения находились на пределе нашей точности.

### 3. Радиус

Наибольшее различие квазимонохроматических величин,  $m_{10}-m_1$ , было получено в 1-ом и 10-ом сезонах (см. рис.2). Различие наблюдаемых величин в длине волны  $\lambda$  связано с изменением радиуса излучающего слоя известным соотношением:

$$Lg(R_{10} / R_1) = 1.56(1/T_{10} - 1/T_1) / 5\lambda - (m_{10} - m_1) / 5, \quad (1)$$

где  $T_{10}$  и  $T_1$  – температуры слоёв в 10-ом и 1-ом сезоне соответственно. Поскольку  $T_{10} \approx T_1$ , то изменение наблюдаемых величин определялось только изменением радиуса, которое теперь можно вычислить по простой формуле:

$$Lg(R_{10} / R_1) = -(m_{10} - m_1) / 5. \quad (2)$$

Результаты вычислений по этой формуле для пяти длин волн, приведённых на рисунке 3, дали следующую величину отношения:  $R_{10}/R_1 = 1.022 \pm 0.005$ . Следовательно, в 1983 г. (10-ом сезоне) наблюдалось расширение излучающего слоя звезды на 2%.

По формуле (1) можно вычислить изменение радиуса слоя по результатам наблюдений в 1-ом сезоне, принимая  $T_+ = 3400K$  (при увеличении потока,  $m_+$ ) и  $T_- = 3300K$  (при уменьшении потока,  $m_-$ ). Результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Изменение радиуса излучающего слоя по данным наблюдений 1-го сезона.

$\lambda$	$m_+ - m_-$	$R_+ / R_-$
370	-0.21	0.926
460	-0.13	0.924
540	-0.08	0.922
580	-0.11	0.942
610	-0.08	0.934
660	-0.09	0.946
700	-0.08	0.947
ср.		$0.930 \pm 0.010$

Таким образом, вариации излучения звезды в 1971-1973 годах произошли в результате её пульсации, в момент которых повышение температуры слоя на  $\sim 100K$  сопровождалось уменьшением его радиуса на 7%.

### 4. Заключение

Проведенное исследование распределения энергии в спектре звезды  $\alpha$  *Cet* по данным спектрофотометрических наблюдений показало, что температура слоя, излучающего в непрерывном спектре, ниже эффективной температуры звезды более чем на  $300K$ .

В результате анализа результатов наблюдений звезды, полученных в разные годы, сделан вывод, что вариации излучения звезды в 1971-1973 годах (в 1-ом сезоне) были связаны с пульсациями, сопровождаемыми изменением на  $\sim 7\%$  радиуса слоя, излучающего в континууме, и на  $\sim 100K$  температуры этого слоя. Пульсации происходили, по-видимому, и в 1983 году, что отразилось в небольшом увеличении блеска звезды, связанным с увеличением на  $2\%$  радиуса слоя по сравнению с радиусом в остальные годы.

### Литература

1. *Архаров А.А., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Неопределённость спектрофотометрических величин. I. Переменные звёзды некоторых типов, 1998, Изв.ГАО, N 212, с.247-260.
2. *Архаров А.А., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Неопределённость спектрофотометрических величин. II. Переменные звёзды не установленных типов, 1998, Изв.ГАО, N 212, с.261-276.
3. *Архаров А.А., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Неопределённость спектрофотометрических величин. III. Нормальные звёзды, 1998, Изв.ГАО, N 212, с.277-288.
4. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Рубан Е.В.* Вариации излучения нормальных звёзд, 2000, Изв. ГАО, N 215, с.5-20.
5. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Рубан Е.В.* Анализ данных спектрофотометрических наблюдений переменных звёзд, 2000, Изв. ГАО, N 215, с.21-34.
6. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Результаты статистического исследования данных спектрофотометрических наблюдений звёзд в разные периоды, 2004, в печати.
7. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Галкин В.Д., Нечитайлов Ю.В., Полякова Г.Д., Попов В.С., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В., Соколов Н.А.* Каталог спектральных, фотометрических, пространственных и физических характеристик 693 ярких звёзд, 1997, деп. в ВИНТИ, №2327 – В97, 171 с.
8. *Гаген-Торн Е.И.* Статистический анализ однородности Пулковской спектрофотометрической базы данных, 1998, Изв.ГАО, N 212, с.289-308.
9. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Спектрофотометрическая переменность звезды  $\mu$  Cep, 2002, N216, 496-504.
10. *Архаров А.А., Гаген-Торн Е.И., Пузакова Т.Ю., Рубан Е.В.* Спектрофотометрическая переменность Миры, 2004, в печати.
11. *Scheffler H.*, 1982, *Astron. and Astrophys*, vol.2.
12. *Fluks M.A., Plez B., The P.S. De Winter D. Westerlund B.E., Steenman H.C.* M giants spectra and photometry. 1994, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 105, 311, J/A+AS/105/311.

### SPECTROPHOTOMETRIC VARIABILITY OF STAR $\alpha$ CET

Arkharov A.A., Hagen-Thorn E.I., Puzakova T.U., Ruban E.V.

#### Summary

*Spectral energy distribution of  $\alpha$  Cet (BS 911) was investigated in five observational sets during the time interval of 18 years Spectrophotometric variability found in 1971-1973 is explained by the pulsations of the star, accompanied by a change in the radius of continuum radiating layer to  $\sim 7\%$  and temperature to  $\sim 100$  K.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ЗВЕЗД ПУЛКОВСКОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ**

**Архаров А.А., Гаген–Торн Е.И., Рубан Е.В.**

*Объединены результаты статистического исследования переменности излучения звезд Пулковской спектродофотометрической базы, которому посвящен ряд предыдущих работ. Проведено сопоставление выявленных фактов переменности с данными каталога Hipparcos.*

### **Введение**

Пулковская спектродофотометрическая база данных является результатом многолетних наблюдений в различные периоды времени и на различных территориях. Она содержит распределения энергии в спектрах 693 ярких звезд в видимом и ближнем ИК диапазонах (320–1080 нм), выраженные в абсолютных единицах. На основе этой базы был создан сводный Пулковский спектродофотометрический каталог (ПСК) [1,2], в который вошло 608 звезд.

Исследованию спектральной переменности излучения представленных в базе звезд был посвящен ряд работ [3-5]. Настоящая работа объединяет полученные результаты.

### **Поиск переменности звезд Пулковской спектродофотометрической базы**

Наша спектродофотометрическая база состоит из отдельных сезонных каталогов (всего 21), определяемых местом и временем наблюдений, а также применяемой аппаратурой и спектральным диапазоном (визуальным, 320 – 737.5нм, или инфракрасным, 500 – 1080нм.). Результаты наблюдений для каждого сезонного каталога обрабатывались отдельно методом абсолютной спектродофотометрии и усреднялись по числу наблюдений за сезон.

Данные сезонных каталогов представлялись в виде:  $m(\lambda) = -2.5 \lg E(\lambda)$ ;  $S(\lambda)$ , где  $E(\lambda)$  – значения квазимонохроматических освещенностей от звезды на границе земной атмосферы, в эрг см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>, а  $S(\lambda)$ , – их среднеквадратичные (стандартные) ошибки.

Обширность и однородность наблюдательного материала, охватывающего значительный период времени, а также его достаточно высокая точность [6,7] позволили применить статистические методы, дающие возможность выявить реальные изменения световых сигналов от звезд на фоне случайного разброса (в том числе и малоамплитудные).

Поскольку переменность излучения звезд зависит от их природы, все звезды были разделены на три группы: зарегистрированные переменные (V), заподозренные в переменности (VN) и звезды, до сих пор считающиеся постоянными – «нормальные» (N). Данные о переменности звезд взяты из каталога [8]. Исследования проводились отдельно для каждой из этих групп звезд. Поскольку статистический анализ возможен только при достаточном количестве наблюдений, им оказались охвачены не все звезды нашей базы. Было отобрано 172 звезды группы (N), 176 звезд группы (VN) и 134 звезды группы (V).

Для упрощения исследования проводились в нескольких отдельных интервалах длин волн. Данные всех имеющихся сезонных каталогов были усреднены по 5-ти ха-

рактерным интервалам длин волн: 320-370, 410-507.5, 510-737.5, 740-900, 902.5-1080 нм (область бальмеровского скачка была исключена из рассмотрения) [9-11]. Эти интервалы были обозначены по округленным значениям средних длин волн: 345, 459, 624, 820, 991 нм соответственно. Анализ данных проводился в каждом спектральном интервале независимо.

Структура материала предоставляла возможность установить переменность двумя способами: сравнением между собой средних за период наблюдения данных сезонных каталогов или анализом разброса результатов внутри соответствующего сезона наблюдений. Все статистические оценки проводились с доверительной вероятностью 95%.

Выявление изменений блеска звезд в течение отдельных сезонов наблюдений и оценка их значимости проводились методом дисперсионного анализа данных сезонных каталогов. Результаты этого анализа представлены в работах [3,4], где приведены сведения об обнаруженной переменности звезд для каждого наблюдательного сезона.

Исследованию долговременных изменений потоков излучения звезд на протяжении нескольких сезонов наблюдений посвящена работа [5]. В ней проведен анализ расхождений данных сезонных каталогов и оценена их значимость с помощью различных статистических критериев.

В настоящей работе объединены результаты этих исследований с целью получения более полной картины выявленной переменности. Здесь отобраны звезды, показавшие значимые на фоне случайного разброса изменения блеска либо внутри отдельного сезона наблюдений, либо между сезонами (хотя бы в одном из рассматриваемых спектральных интервалов).

Обнаруженные факты переменности сопоставлены с данными каталога Hipparcos [12].

### Результаты исследования

Результаты проведенного поиска переменности представлены в таблицах 1, 2, 3 соответственно для звезд групп N, VN, V. Для каждого рассматриваемого спектрального интервала даны величины внутрисезонных вариаций,  $S_v$ , и межсезонных изменений,  $\Delta m$ . Значения  $S_v$  являются максимальными из найденных в различные сезоны наблюдений данной звезды, а значения  $\Delta m$  соответствуют максимальным расхождениям средних величин, полученных в различные сезоны. Звезды в таблицах 1 и 2 сгруппированы по близким спектральным подклассам, а в таблице 3 – по типам переменности.

В первом столбце таблиц содержится номер звезды по каталогу **BS**. Номера звезд, для которых имеются сведения о переменности в каталоге Hipparcos, отмечены знаком “\*”. Далее приводятся значения визуальной величины,  $V^m$ , для таблицы 1 или диапазон ее изменения,  $\Delta V^m$ , для таблиц 2 и 3 из [8]. Затем в столбце **Db** указан признак двойственности (D) или спектральной двойственности (SB) звезды. Далее следуют количество сезонов наблюдений,  $k$ , и полное число наблюдений за все сезоны,  $n$ . В следующих столбцах даны значения величин  $S_v$  и  $\Delta m$ , соответствующие указанному спектральному интервалу. Прочерк в столбце означает, что переменность не зарегистрирована или  $S_v$  не определялась. Пробел указывает на то, что наблюдения в данном участке спектра отсутствовали, для величины  $\Delta m$  это может также означать наличие только одного сезонного каталога для данного спектрального интервала.

Таблица 1. Изменения блеска для группы нормальных (N) звезд.

BS	$V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
<b>O – B0.5</b>														
1931*	3.81	D	3	13	–	–	–	.05	–	.07	–	–	–	–
3165*	2.25	–	2	71	.07	–	.05	–	.06	–	.06	–	–	–
<b>B2–B2.5</b>														
2618*	1.50	D	3	16	–	–	–	–	.02	.04	.03	.05	–	–
5190*	3.41	SB	1	4	.05	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
5571*	2.68	–	1	9	.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5708*	3.37	D	1	4	.07	–	.10	–	.06	–	–	–	–	–
6743*	3.66	–	1	125	.05	–	.04	–	.05	–	–	–	–	–
7121*	2.02	D	14	179	.05	.08	.05	.04	.06	.16	.05	.12	.07	.10
<b>B5–B9.5</b>														
4467*	3.13	D	1	4	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
6396*	3.17	–	5	31	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
6879	1.85	D	2	226	.05	–	.04	–	.03	–	–	–	–	–
7337	4.01	D	1	3	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
7710	3.23	D	2	23	–	–	–	–	–	–	.05	–	.12	–
8353	3.01	–	1	7	.05	–	.07	–	.07	–	–	–	–	–
<b>A0–A4</b>														
804	3.47	D	5	146	.11	–	.11	–	.10	–	–	–	–	.08
3485*	1.96	D	2	10	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
4033	3.45	–	3	10	–	–	–	–	–	–	.04	–	–	–
4802	3.86	–	1	5	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5107	3.37	–	1	8	.10	–	.05	–	.03	–	–	–	–	–
6378*	2.43	D	4	27	–	–	–	–	.05	.05	.04	.04	.07	–
6629	3.75	–	4	23	–	.05	–	.03	–	.06	–	.04	–	.06
8641	4.79	–	5	15	–	–	–	–	–	–	–	.37	–	.67
8728	1.16	D	14	449	.05	.08	.06	.03	.05	.07	.04	–	.05	.05
<b>A5–A7</b>														
5264	4.26	D	1	21	.05	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
8264	4.69	D	3	10	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	.11
<b>F1–F4</b>														
5487	3.88	SB	1	4	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7469	4.48	D	4	32	–	–	–	–	–	.03	–	–	–	–
8848	3.99	–	1	4	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>F5–F8</b>														
5235*	2.68	D	6	97	.05	–	.04	–	.05	.10	.03	.06	.03	.05
7882*	3.63	D	2	11	–	.06	–	.05	–	–	–	–	–	–
<b>G0–G7</b>														
2296	3.85	SB	1	4	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
8232*	2.91	D	3	39	.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
8414	2.96	D	6	58	.04	–	–	–	–	.08	–	–	–	–



Таблица 1. Продолжение

BS	$V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
<b>G8–G9</b>														
<b>509</b>	3.50	D	4	20	.05	–	–	–	–	–	–	.11	–	.16
<b>5787</b>	3.91	D	1	8	.09	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>6566</b>	5.05	D	2	7	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
<b>7304</b>	4.96	D	2	7	–	–	–	–	.06	–	–	–	–	–
<b>7754</b>	3.57	D	4	21	.11	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
<b>K0</b>														
<b>99</b>	2.39	D	2	18	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>402</b>	3.60	D	4	16	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
<b>1136</b>	3.54	–	1	4	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
<b>5288</b>	2.06	D	1	4	–	–	.07	–	–	–	–	–	–	–
<b>6746</b>	2.99	–	2	17	.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>7310</b>	3.07	D	5	44	–	–	–	–	–	–	.07	–	–	.05
<b>7949*</b>	2.46	D	2	24	.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>8254</b>	3.76	D	1	9	.14	–	.05	–	.05	–	–	–	–	–
<b>K1</b>														
<b>1326</b>	3.86	–	1	4	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
<b>4335</b>	3.01	–	5	28	–	–	–	–	.17	.12	.15	.10	.17	.12
<b>5460*</b>	1.33	D	1	2	–	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
<b>7986</b>	3.65	D	1	6	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
<b>K2</b>														
<b>285</b>	4.25	–	4	24	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	.08
<b>4232</b>	3.11	–	5	25	.07	.25	.06	.09	–	.06	–	–	–	–
<b>6603</b>	2.77	D	2	15	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
<b>6630</b>	3.21	D	2	11	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
<b>K3</b>														
<b>165</b>	3.27	D	4	27	–	–	.07	–	.06	–	–	–	–	–
<b>6461*</b>	2.85	D	2	14	–	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
<b>6859</b>	2.70	D	2	15	.19	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>K4–K5</b>														
<b>2878*</b>	3.25	D	2	20	–	–	–	–	.03	.07	–	–	–	–
<b>4094*</b>	3.81	–	1	4	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
<b>5705*</b>	3.56	D	2	23	–	–	.04	–	–	.02	–	–	–	–
<b>5714</b>	5.02	–	2	10	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
<b>6229*</b>	3.76	D	2	16	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
<b>M</b>														
<b>1208*</b>	3.24	–	2	12	–	–	.06	–	.04	.07	–	–	–	–

Таблица 2. Изменения блеска для группы заподозренных в переменности (VN) звезд.

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
<b>O5 – O9.5</b>														
19489*	0.07	D	6	17	–	–	–	–	–	.11	–	–	–	–
8469*	0.07	–	3	18	–	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
<b>B0-B4</b>														
1203*	0.13	D	5	28	.19	.18	.19	.11	.20	–	–	.17	–	.03
1220*	0.06	D	4	14	.10	–	.03	–	–	–	–	.08	–	.20
1790*	0.05	D	8	39	–	–	.04	.10	–	.09	–	.05	–	.08
2004*	0.08	–	6	21	.05	.41	.04	.16	.03	.14	–	.09	–	–
5191*	0.06	–	15	297	–	.04	.04	.03	.04	.06	.04	.03	.04	.06
7446*	0.04	–	1	10	–	–	.06	–	.06	–	–	–	–	–
7565*	15y <sup>2</sup>	SB	4	12	–	.07	–	–	–	–	–	–	–	–
7790*	0.03	D	2	7	.05	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
<b>B5-B9.5</b>														
1088	622d <sup>2</sup>	SB	2	13	.04	–	–	–	.04	.04	–	–	–	–
1347*	0.51d <sup>3</sup>	D	1	11	.05	–	.07	–	.07	–	–	–	–	–
1713*	0.27	D	6	34	.05	–	.06	–	.06	.11	.10	.07	.08	.14
3982	0.07	D	16	295	.05	.07	.04	.04	.04	.06	.02	.04	–	.05
4662*	0.04	–	5	359	.11	.04	.06	–	.05	–	–	–	–	–
7528*	0.04	D	3	11	–	–	.03	–	–	.06	–	–	–	–
8001*	0.08	SB	3	8	–	–	–	–	–	–	–	.09	–	.22
8781	0.05	–	17	511	.11	.07	.08	.03	.16	.08	.12	.10	.10	.10
<b>A0 – A4</b>														
685*	0.10	D	2	11	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
1666	0.08	D	5	27	.08	.09	.03	–	–	–	–	–	–	–
3685*	0.02d <sup>3</sup>	–	2	8	.05	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
4295	0.05	–	6	28	–	–	–	.03	–	–	–	–	–	–
4554*	0.04	–	6	33	–	–	–	–	.09	–	.06	–	–	–
5511	0.05	–	3	48	.12	–	.08	–	.16	–	–	–	–	–
5531	0.03	D	5	15	.04	.05	.26	.06	.12	.11	–	–	–	–
7590	0.04	–	1	4	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
8675	0.06	–	1	7	.08	–	.07	–	.07	–	–	–	–	–
8695*	0.05	D	1	4	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
8709	0.04	–	3	178	.09	–	.09	–	.09	–	.03	–	–	–
<b>A5 – A9–</b>														
553	0.14	SB	8	45	–	–	.03	–	–	–	.04	–	.07	–
6556	0.11	D	9	141	.12	–	.09	–	.08	–	.05	–	.05	–
<b>F0 – F4</b>														
1865*	0.06	D	3	15	–	–	–	–	–	–	.03	–	.04	–
4825/6*	0.06	D	4	12	–	.12	–	–	–	–	–	–	–	–
6553*	0.04	–	2	8	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>F5 – F9</b>														
1017*	0.14	D	5	50	–	–	–	–	.03	.03	.02	.04	–	–

Таблица 2. Продолжение

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
2693*	0.08	–	2	9	–	–	–	–	–	–	.04	–	.07	–
2943	0.07	D	6	35	–	–	–	–	.07	.08	–	.09	–	.07
6596	5.28d <sup>3</sup>	D	2	9	–	–	–	–	–	.04	–	–	.04	–
7796*	0.11	D	2	20	.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>G0 – G4</b>														
98	0.06	–	2	9	.05	–	–	–	.05	–	.05	–	–	–
3873	0.09	–	5	19	–	.19	–	.19	–	.31	–	–	–	–
5727/8*	0.08	D	1	13	.06	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
8650	0.04	D	4	22	–	–	–	–	–	–	–	.06	–	.06
<b>G5 – G9.5</b>														
1030	0.05	SB	2	19	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
1708*	0.13	D	6	127	–	–	–	–	–	.07	.05	.04	.06	.08
4786	0.06	–	2	17	.06	–	–	–	–	–	.04	–	.06	–
4932*	0.19	D	4	16	–	–	.06	.04	.05	.04	–	–	–	–
5020	0.08	D	3	17	.05	–	–	–	–	.03	–	–	–	–
5681	0.06	D	2	11	–	–	–	–	–	.06	–	–	–	–
6148*	0.05	D	3	24	.05	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
7217	0.13K <sup>2</sup>	D	1	4	.08	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7582*	0.07	D	4	13	–	–	–	–	–	–	–	.06	–	–
7602	0.06	D	2	20	–	–	–	–	–	.03	.04	–	–	–
7665	0.13	–	1	4	.11	–	.09	–	.07	–	–	–	–	–
<b>K0 – K4</b>														
74*	0.10	D	4	16	–	.14	.05	–	.05	–	–	–	–	–
188*	0.15	–	5	22	.07	.11	.05	.04	.05	.04	–	–	–	–
617	0.06	–	2	17	.13	–	.12	–	.10	.05	–	–	–	–
874	0.09	–	4	12	–	–	.04	–	.21	.15	.18	.09	.17	.06
1373	0.05	D	1	5	.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1577	0.15	–	4	28	–	–	–	–	.03	–	–	.03	–	.04
2990*	0.07	D	9	128	–	–	–	–	.06	.07	.07	–	.07	.03
3249	0.08	D	7	25	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
3748*	0.08	D	4	8	.06	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
3845	0.04	–	3	9	–	–	–	–	–	.10	.05	.10	.07	.12
4057/8*	0.30	D	4	18	–	–	–	–	–	–	–	.03	–	–
4257	0.05	D	1	4	–	–	.04	–	–	–	–	–	–	–
4301*	0.03	D	4	28	–	–	.03	–	.04	.06	–	–	–	–
4630	0.08	–	3	14	.10	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
5340*	0.10	–	4	69	–	–	–	–	.02	.02	–	.03	.02	.04
5563*	0.06	D	2	15	.34	–	.07	–	–	–	–	–	–	–
5744	0.09	D	4	16	–	–	–	–	–	–	–	–	.04	–
6241	0.11	–	2	15	.10	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
6271	0.06	–	1	7	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
6869	0.06	D	1	6	.09	–	.06	–	.04	–	–	–	–	–
6973	0.06	–	1	6	–	–	.06	–	.05	–	–	–	–	–
8079*	0.23	SB	4	22	–	–	–	–	–	.06	–	.04	–	.03
8089*	0.05	D	3	7	–	.78	–	.09	–	–	–	–	–	–
8465*	0.21	SB	5	30	–	–	–	–	.04	.04	–	.03	–	.04

Таблица 2. Продолжение

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
8974	0.06	–	3	11	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
9008	0.60	–	2	12	.25	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
<b>K5 – K9</b>														
3705*	0.05	–	7	22	–	–	–	–	–	.05	–	–	–	–
6705*	0.16	D	3	37	–	–	.04	–	.03	.02	–	–	–	–
7417*	0.07	D	2	15	–	–	–	–	–	.12	–	–	–	–
<b>M</b>														
337*	0.09	D	9	434	–	–	.05	–	–	.04	–	.07	–	.08
4763*	0.07	D	2	12	–	–	–	–	.03	.05	–	–	–	–
4910*	0.08	D	3	9	–	–	.14	–	.11	.10	–	–	–	–
6056	0.03	D	2	16	–	–	.03	–	–	.03	–	–	–	–
7635*	0.09	–	3	16	–	–	.17	.11	.15	.11	–	–	–	–
8621*	0.18	D	2	12	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–

<sup>1</sup> – дан период изменения одного из параметров, в сутках, d, или в годах, y;

<sup>2</sup> – изменения блеска относятся к указанной фотометрической полосе;

Таблица 3. Изменения блеска для группы переменных (V) звёзд

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
<b>BCEP</b>														
2282*	–	D	4	333	.09	–	.09	–	.10	.02	.04	.03	.04	.04
2294*	0.07	D	6	22	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
3117	0.03	–	1	4	.05	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3454	0.06	–	1	6	.07	–	.06	–	.06	–	–	–	–	–
5695*	0.04	–	1	8	.08	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
6084*	0.08	D	1	7	.03	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<b>LB, LC</b>														
429*	0.10	SB	2	10	–	–	–	–	–	.07	–	–	–	–
911*	0.09	–	5	40	.24	–	.16	.03	.11	.07	–	–	–	–
1003*	0.15	D	5	22	–	.43	.03	.06	.05	.06	–	–	–	–
1231*	0.08	D	7	42	–	–	.04	–	.03	.13	.05	.06	.07	.07
1457*	0.20	D	1	21	.07	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2286*	0.27	D	6	24	–	–	.05	–	.04	.06	–	.06	–	.09
2646*	0.08	D	2	9	–	–	–	–	–	–	–	–	.05	–
3634*	0.16	D	2	11	.19	–	–	–	–	.09	–	–	–	–
4050*	0.08	D	2	17	–	–	–	–	–	.06	–	–	–	–
4765*	0.09	–	3	16	–	–	–	–	.05	.13	–	–	–	–
6832*	0.07	D	2	21	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
7536*	0.08	D	3	11	–	–	–	–	–	–	–	–	.03	–
7645*	0.30	D	2	12	–	–	.06	–	.06	–	–	–	–	–
8308*	2.80	D	2	17	.33	–	.11	–	.09	–	–	–	.04	–
8560*	0.21	D	1	16	–	–	–	–	.05	–	–	–	–	–
8636*	0.30	–	2	21	.15	–	.10	–	.09	.06	–	–	–	–
8698*	0.10	–	3	18	.91	–	–	.20	.05	.14	.04	–	.04	–

Таблица 3. Продолжение

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
<b>DSCT, DSCTC</b>														
21*	0.06	D	4	27	–	–	–	–	–	.06	–	.07	–	–
114*	0.04	D	2	11	–	–	.04	–	–	.03	–	–	–	–
4534	–	D	5	21	–	.08	.04	–	–	–	–	–	–	–
5168	0.04	SB	1	4	–	–	.05	–	.06	–	–	–	–	–
5735	0.10	–	5	112	.03	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
7340*	0.04	D	4	21	.06	–	–	–	.04	–	.04	–	.06	–
8162	0.06	D	4	41	–	–	–	–	–	.05	–	.11	–	.18
8494*	0.06	D	3	18	.08	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
<b>SR, SRA, SRB, SRC, SRD</b>														
2216*	0.75	D	4	16	–	.24	.05	.09	.06	.10	–	.08	–	.06
2748*	3.60	D	1	18	–	–	–	–	.47	–	.33	–	.17	–
5192*	0.10	–	1	14	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
5603	0.26	–	6	27	–	–	.04	.15	.09	.17	.05	.12	.09	.14
8316*	1.67	D	6	47	–	–	.09	.31	.12	.23	–	.11	–	.10
<b>ACYG</b>														
1903*	0.10	D	6	24	–	–	–	–	–	.12	–	.12	–	.08
7924*	0.08	D	4	31	–	–	–	–	–	.03	–	.02	–	–
<b>M</b>														
681*	8.10	D	5	10	.62	–	.51	–	.51	1.72	–	1.14	–	.72
3882*	6.90	–	1	2	–	–	–	–	–	–	.05	–	–	–
<b>DCEP, DCEPS</b>														
424*	0.27	D	2	6	.06	–	.04	–	–	.03	–	–	–	–
8571*	0.89	D	2	11	.54	–	.46	–	.27	.15	.15	–	.12	–
<b>GCAS</b>														
264*	1.40	D	6	52	.09	–	.03	–	.06	.04	–	–	.03	–
1122*	0.05	D	4	20	–	–	.05	–	–	–	.03	.06	.05	.10
2538*	0.19	–	1	4	–	–	–	–	.04	–	–	–	–	–
2749*	0.58	SB	1	6	–	–	.03	–	.06	–	–	–	–	–
2845*	0.08	–	5	22	.05	–	.05	–	–	–	–	–	–	–
3498*	0.11	–	5	22	.05	–	.05	–	.06	–	–	–	–	–
5193*	0.55	D	1	8	.04	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5440*	0.11	D	1	9	.08	–	.02	–	–	–	–	–	–	–
8402*	0.21	–	3	9	.21	–	.21	–	.22	.19	–	–	–	.15
<b>I, RS, WR</b>														
3207*	0.06	D	1	9	–	–	.04	–	.04	–	–	–	–	–
4700	0.60	–	2	13	–	–	–	–	–	.06	–	–	–	–
<b>ACV, SXARI</b>														
15*	0.04	D	5	65	–	–	–	.03	–	–	–	–	–	–
234*	0.04	–	1	55	–	–	.03	–	–	–	–	–	–	–
2095*	0.08	D	7	29	.04	.09	.03	–	–	–	–	.04	–	.06
4905*	0.03	SB	4	26	.08	–	.04	–	.05	.15	–	.08	–	–
5153*	0.02	–	1	34	–	–	.05	–	.09	–	–	–	–	–

Таблица 3. Продолжение

BS	$\Delta V^m$	Db.	k	n	345		459		624		820		991	
					$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$	$S_v^m$	$\Delta m$
5313*	0.15	D	1	50	.08		.04		–					
5378*	0.05	SB	1	5	.04		.04		.04					
5747*	0.07	D	5	13	–		–		–	–	.06	–	.15	.10
<b>ELL</b>														
3442*	0.10	D	1	4	.08		.10		.09					
3467*	0.07	D	1	3	.05		–		–					
5056*	0.07	D	4	18	.05		.05		.07	.10	.06	.12	.08	.15
<b>E, EA, EB, EW</b>														
403	0.08	D	1	4	–	–	–	–	.04	–	.03	–	–	–
1788*	0.29	D	3	20	.13	.08	.13	.03	.13	–	–	–	–	–
1852*	0.12	D	4	18	–	–	.06	–	.07	–	–	–	–	–
2088*	0.09	D	3	13	–	–	–	–	–	.06	–	–	–	–
2944*	0.06	D	1	3	.05		.04		–					
4069*	0.04	SB	3	12	–	–	–	–	–	.04	–	–	–	–
5793*	0.11B <sup>1</sup>	SB	5	14					–	.17	–	.10	–	.09
6485/4*	–	D	3	6	–		–		–	–	–	.07	–	.11
6812*	0.08	D	1	6	.07		.05		.05					
8322*	0.24	D	5	19	.04	–	.05	–	.05	.20	–	.15	–	.15

### Заключение

Таким образом, проведенное нами исследование выявило факты переменности излучения хотя бы в одном из пяти спектральных диапазонов для 226 из рассмотренных 482 звезд Пулковской спектрофотометрической базы (47%). Эта переменность представляет собой как изменение блеска в течение одного сезона наблюдений, так и между сезонами. 137 (61%) из обнаруженных фактов переменности подтверждаются данными каталога Hipparcos [12].

Особенно интересно проявление переменности для «нормальных» (N) звезд. Для них обнаружено 63 (31%) случая изменения блеска хотя бы в одном интервале длин волн; 36% из них совпадают с данными [12].

Среди переменных звезд изменения блеска были отмечены для 89 (51%) заподозренных (VN) звезд и для 74 (55%) зарегистрированных (V). Совпадение с данными [12] в этом случае составляет 55% и 88% соответственно.

Следует отметить, что данные о переменности звезд обычно относятся к визуальной величине,  $V$  [8], и поэтому деление звезд на группы достаточно условно для спектральной переменности.

К сожалению, нерегулярность наблюдений и их скважность во времени затрудняют поиск переменности. Кроме того, выделение малых изменений светового потока на фоне случайного разброса возможно только при значительном числе наблюдений.

Требования методов статистического анализа к достаточному количеству наблюдений не позволили подвергнуть исследованию все звезды нашей базы и 211 (30%) из них остались за его пределами.

Подробный анализ выявленных изменений блеска, а также их спектральные зависимости можно найти в статьях [3,4] для отдельных сезонов наблюдений и в [5] для переменности между сезонами.

### Литература

1. *G.A. Alekseeva, A.A. Arkharov, V.D. Galkin at al.*, Baltic Astronomy, **5**, 603, (1996).
2. *G.A. Alekseeva, A.A. Arkharov, V.D. Galkin at al.*, Baltic Astronomy, **6**, 481, (1997).
3. *А.А. Архаров, Е.И. Гаген-Торн, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **215**, 5, (2000).
4. *А.А. Архаров, Е.И. Гаген-Торн, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **215**, 21, (2000).
5. *А.А. Архаров, Е.И. Гаген-Торн, Т.Ю. Пузакова, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **216**, 483, (2002).
6. *Е.И. Гаген-Торн*, Изв. ГАО, **211**, 26, (1996).
7. *Е.И. Гаген-Торн*, Изв. ГАО, **212**, 289, (1998).
8. *Общий каталог переменных звёзд*, под ред. П.Н. Холопова, (Наука, М. 1985).
9. *А.А. Архаров, Т.Ю. Пузакова, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **212**, 247, (1998).
10. *А.А. Архаров, Т.Ю. Пузакова, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **212**, 261, (1998).
11. *А.А. Архаров, Т.Ю. Пузакова, Е.В. Рубан*, Изв. ГАО, **212**, 277, (1998).
12. *The Hipparcos Catalogue*, ESA SP-1200, ESA, (1997).

### THE INVESTIGATION OF VARIABILITY OF STARS FROM PULKOVO SPECTROPHOTOMETRIC DATA BASE

Arkharov A.A., Hagen-Torn E.I., Ruban E.V.

#### *Summary*

*The results are pooled of some earlier papers devoted to the statistical investigation of flux variability of stars from Pulkovo spectrophotometric data base. The revealed facts of variability are confronted with the data of Hipparcos Catalogue.*

## **ОБ ИССЛЕДОВАНИИ БЫСТРОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КОМПАКТНЫХ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ РСДБ НАБЛЮДЕНИЯМ**

**Байкова А.Т.**

*Работа посвящена проблеме исследования эволюции структуры компактных внегалактических радиоисточников, входящих в опорную систему координат, по рядам геодезических/астрометрических РСДБ наблюдений, выполненных на антенных решетках различной конфигурации. На примере источника 0059+581 показано, что изменение соотношения по потоку между компактным ядром и слабым джетом, следующее из результатов картографирования за различные даты, сильно коррелирует с системной функцией, зависящей только от числа РСДБ-станций и количества измерений функции видности, что необходимо учитывать с целью корректного выявления собственно переменности структуры источника.*

### **Введение**

Регулярные (в среднем несколько раз в месяц) геодезические РСДБ наблюдения компактных внегалактических источников, входящих в опорную систему координат, дают уникальный материал для исследования возможных короткопериодических вариаций их структуры [1]. К таким объектам относится, например, источник 0059+581, к сожалению, до сих пор не отождествленный. Уникальность этого источника заключается в том, что он наблюдается гораздо чаще других опорных источников (программа “NEOS”) и, кроме того, он обнаруживает сильную переменность по потоку, по крайней мере, на интервале времени с июня 1994 г. по 1997 г., что может дать основание для предположения и о переменности его структуры [2].

Изучение этого источника было начато в работе [1] в связи с вычислениями структурных членов задержки и продолжено более фундаментально в работе [2], где на основании картографирования источника по данным за разные даты представлен ряд результатов по эволюции структуры: компактного ядра и многокомпонентного слабого джета.

Одним из недостатков принятой в [2] методики исследования эволюции структуры источника является то обстоятельство, что данные за разные даты, как правило, получены на разных РСДБ решетках, отличающихся числом наблюдательных станций и продолжительностью наблюдений. В результате, для разных дат мы имеем разное заполнение  $UV$ -плоскости и разное число уравнений замыкания фаз и амплитуд, участвующих в процедуре самокалибровки, что при условии сравнительно небольшого числа наблюдений, неизбежно приводит к разным ошибкам восстановления изображений. Таким образом, возникает проблема разделения переменности, связанной с собственно эволюцией источника с переменностью, связанной с изменениями условий эксперимента. Очевидно (и это подтверждается в данной работе моделированием), при различном числе РСДБ станций и различном заполнении  $UV$ -плоскости результаты картографирования могут отличаться, если даже сам источник неизменен.

Целью данной работы является построение карт источника 0059+581 за 15 дат в интервале с июня 1994 г. по ноябрь 1997 г. на частоте наблюдений 8.2 ГГц (длина волны 3.5 см) с использованием, для большей убедительности, различных процедур деконволюции в цикле самокалибровки (CLEAN и обобщенного метода максимальной эн-



тропии (ОММЭ) [3]) и определение степени корреляции характеристик полученных карт с условиями эксперимента. Но прежде приведем результаты моделирования процесса картографирования для источника с неизменной структурой, состоящего из нескольких гауссовых компонент, для разных заполнений  $UV$ -плоскости.

## 1. Моделирование

Целью данного раздела является демонстрация влияния условий эксперимента (в данном случае заполнения  $UV$ -плоскости) на качество восстановления при использовании как CLEAN, так и ОММЭ в случае источника с компактным ядром и слабыми, достаточно протяженными компонентами на миллисекундной шкале угловых расстояний.

В качестве оригинала был выбран 4-х компонентный гауссовый источник, моделирующий источник 0059+581 на дату 6.03.95 [2] с ярким ядром. Модельный источник изображен на рис.1. (Отметим, что на всех рисунках данной работы контурные линии имеют следующие значения уровней в % от пикового значения на карте: -1, 1, 2, 4, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 99, по осям всех карт отложены единицы угловых расстояний в миллисекундах дуги: мсд.)

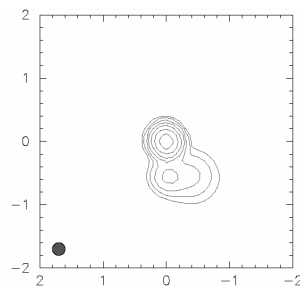


Рис.1.

Было проведено восемь экспериментов. Соответствующие заполнения  $UV$ -плоскости приведены на рис.2. Для восстановления изображений использовался метод самокалибровки. В качестве операции деконволюции использовались, как уже отмечалось, CLEAN и ОММЭ.

Результаты восстановления с использованием CLEAN и ОММЭ представлены на рис.3 и 4 соответственно. Все представленные на рисунке 4 изображения получены сверткой соответствующих решений с одной и той же диаграммой (чтобы легче было сравнивать карты между собой) шириной 0.2 мсд (миллисекунд дуги), которая является минимально достаточной для интерполяции отсчетов, отстоящих друг от друга на 0.1 мсд (основания эллипсов показаны в левом нижнем углу каждой карты). На рис.3 изображения по CLEAN получены сверткой решения с “чистой” диаграммой, соответствующей полуширине главного лепестка синтезированной диаграммы (такая методика была принята нами еще в работе [4]). Параметры экспериментов и полученных карт приведены в табл.1.

Сравнение полученных карт с неискаженным изображением источника (рис.1) показывает, что качество картографирования заметно зависит от заполнения  $UV$ -плоскости: количества точек и плотности их распределения, размера “дыр”, степени заполненности области нижних частот, а также от использованного метода деконволюции.

Анализ полученных изображений по CLEAN и ОММЭ, а также табл.1 позволяет сделать вывод о том, что в случае гладких распределений ОММЭ дает решения, более близкие к оригиналу, чем CLEAN, поскольку ОММЭ ищет решение в классе гладких функций, а CLEAN – в классе разрывных  $\delta$ -функций. В силу последнего, процедуре

CLEAN свойственно порождение точечных артефактов, особенно в случае источников с протяженными компонентами. Изображения же по ОММЭ получаются более сглаженными. Действительно, пиковые значения потока на CLEAN-картах в 1.7, а на ОММЭ-картах всего в 1.056 раза выше, чем у оригинала. Полные же потоки отличаются несущественно.

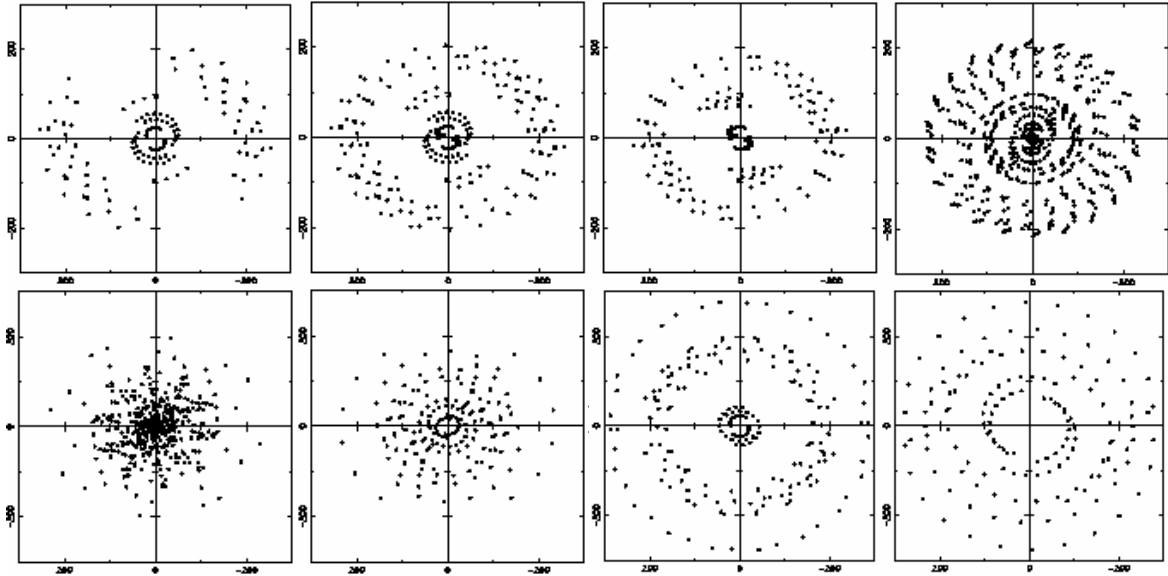


Рис.2.

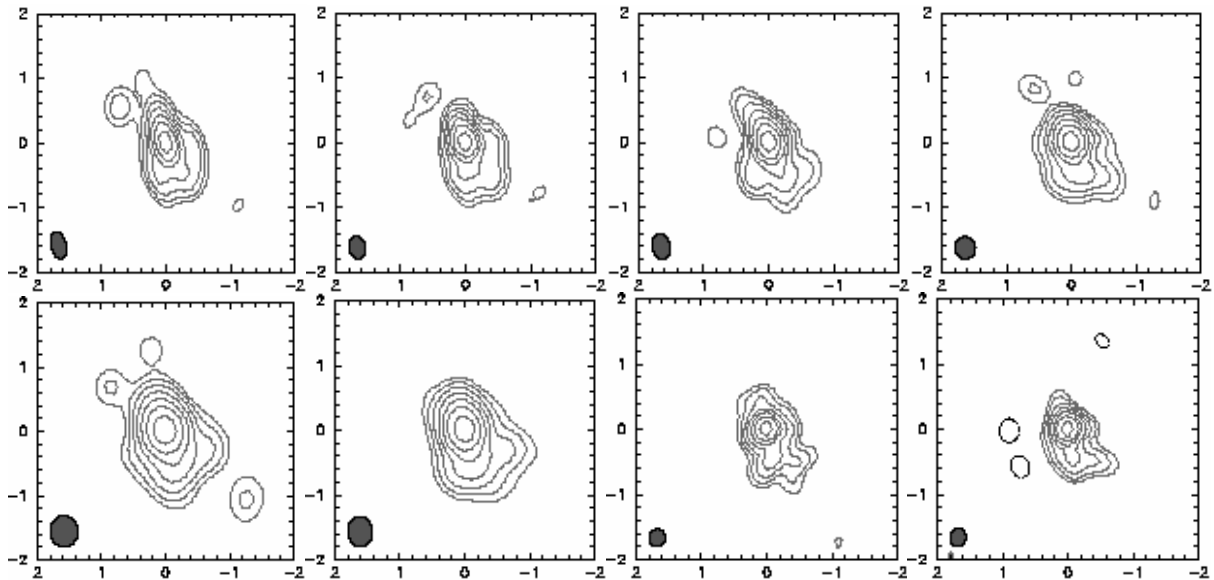


Рис.3

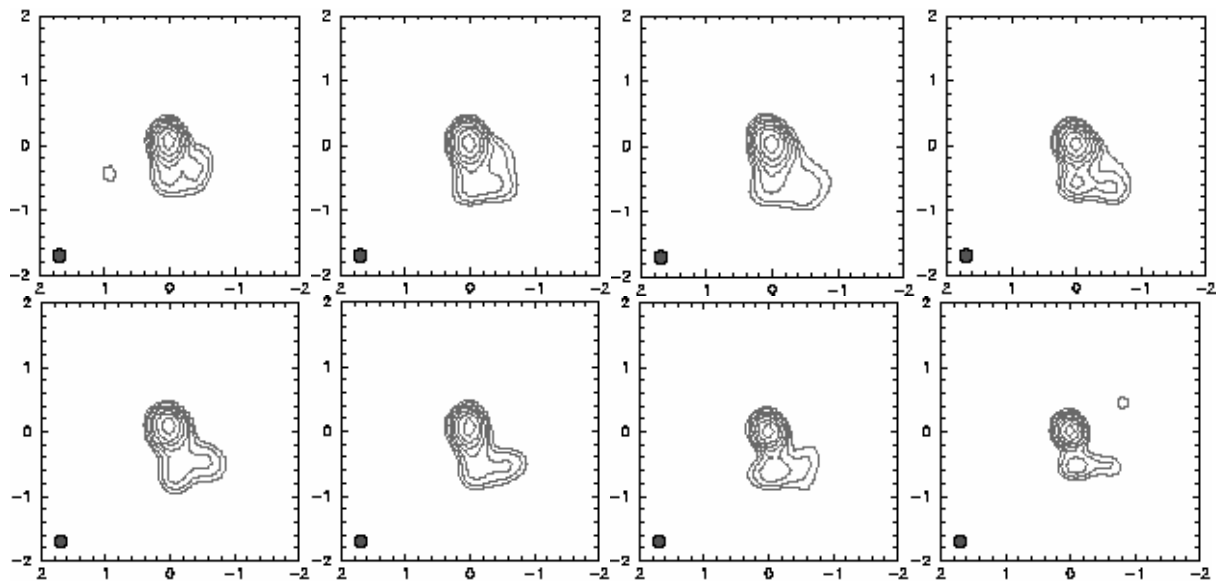


Рис.4.

Таблица 1. Параметры модельных экспериментов.

Номер эксперимента	Количество РСДБ станций	Количество измерений	CLEAN полный поток (Ян)	CLEAN пиковый поток (Ян/луч)	ОММЭ полный поток (Ян)	ОММЭ пиковый поток (Ян/луч)
1	5	67	1.96	1.208	1.77	0.692
2	6	108	1.97	1.150	1.92	0.644
3	6	82	1.89	1.210	1.90	0.595
4	8	299	2.05	1.150	1.89	0.722
5	10	217	2.07	1.240	1.94	0.685
6	5	87	1.99	1.239	1.84	0.691
7	5	97	1.80	1.109	1.82	0.841
8	5	73	1.56	1.139	1.63	1.005
Оригинал	-	-	2.04	0.694	2.04	0.694

Поскольку ОММЭ-изображения получились более точными, то анализ влияния заполнения  $UV$ -плоскости целесообразно провести по этим изображениям. Как видно из рисунков, при более полных заполнениях  $UV$ -плоскости более точно восстанавливаются протяженные детали источника (лучшее изображение соответствует наиболее полному заполнению, четвертый эксперимент). “Дыра” в области нижних частот (восьмой эксперимент) приводит к самому плохому восстановлению протяженных слабых компонент.

Важно отметить, что вариации в заполнении  $UV$ -плоскости влияют не только на соотношение потоков компонент, но и, что наиболее опасно при исследовании эволюции источников по реальным данным, на вариации угловой ориентации и протяженности компонент, а также порождение точечных артефактов в случае использования CLEAN, что может привести к ложной интерпретации результатов картографирования. Рассмотренные, а также другие многочисленные результаты моделирования приводят к убеждению, что изучение таких тонких эффектов, как вариации структуры компактных источников со слабыми протяженными компонентами на коротких интервалах времени

имеет смысл только при одинаковых условиях эксперимента, обеспечивающих одинаковое заполнения  $UV$ -плоскости для всех карт. Если же это не представляется возможным, необходимо научиться исключать ошибки, связанные с неравными условиями наблюдений.

## 2. Картографирование радиисточника 0059+581

Заполнения  $UV$ -плоскости за избранные 15 дат представлены на рис.5. Для исследования структуры источника были использованы также две методики, основанные на CLEAN и ОММЭ. CLEAN- и ОММЭ-карты приводятся на рис.6 и 7 соответственно. Все приведенные на рисунках карты снабжены порядковыми номерами от 1 до 15. Параметры карт, полученных обоими методами, приведены в табл.2. Для наглядности на рис.8 приведены значения полного, а на рис.9 – пикового потока источника в зависимости от эпохи наблюдений (цифры 1 и 2 относятся к CLEAN- и ОММЭ-картам соответственно). Как видно из рисунков, полные потоки CLEAN- и ОММЭ-карт отличаются незначительно (в 1.014 раза). Пиковые потоки ОММЭ-карт по сравнению с CLEAN-картами, ниже, в среднем, в 1.66 раза, поскольку изображения получаются более сглаженными. На рис.10 приведено отношение полного потока, вычисленного по карте, к пиковому потоку ( $S_{полн}/S_{пик}$ ) в зависимости от номера эксперимента (1,...,15). Это отношение характеризует степень концентрации потока внутри ядра источника. Верхняя кривая, обозначенная цифрой 3, соответствует ОММЭ-, средняя (цифра 2) – CLEAN-картам, а нижняя (цифра 1) – системной функции, зависящей только от характеристик антенной решетки и степени заполнения  $UV$ -плоскости:

$$F(N_{st}, N_{uv}) \propto \sqrt[4]{N_{st} N_{uv}},$$

где  $N_{st}$  – число РСДБ станций,  $N_{uv}$  – число измерений функции видности (число точек на  $UV$ -плоскости).

Таблица 2. Параметры построенных карт источника 0059+581.

Номер эксперимента	Дата наблюдений	Количество РСДБ-станций	Количество измерений	CLEAN полный поток (Ян)	CLEAN пиковый поток (Ян/луч)	ОММЭ полный поток (Ян)	ОММЭ пиковый поток (Ян/луч)
1	25.06.94	5	168	3.18	3.115	3.03	1.756
2	25.08.94	7	214	3.01	1.946	3.00	1.155
3	04.10.94	6	122	2.87	1.920	2.59	1.164
4	10.01.95	5	94	1.45	1.112	1.69	0.711
5	06.03.95	8	277	3.01	1.871	2.23	0.673
6	07.03.95	5	102	1.27	1.142	1.55	0.754
7	21.03.95	5	141	1.25	1.042	1.53	0.711
8	04.04.95	5	106	1.01	0.886	0.98	0.578
9	27.06.95	5	148	1.74	1.269	1.63	0.824
10	17.10.95	8	233	1.28	1.796	1.13	0.511
11	12.12.95	6	130	0.80	0.653	0.92	0.492
12	26.12.95	5	106	0.83	0.746	0.92	0.552
13	09.01.96	7	131	0.58	0.474	0.63	0.314
14	10.12.96	6	109	2.34	1.976	2.17	1.364
15	11.11.97	5	79	1.89	1.745	2.14	0.880

**Таблица 3.** Отношение  $\frac{S_{\text{ядро}}}{S_{\text{полн}}}$  для источника 0059+581.

Номер эксперимента	CLEAN $\frac{S_{\text{ядро}}}{S_{\text{полн}}}$	ОММЭ $\frac{S_{\text{ядро}}}{S_{\text{полн}}}$	Номер эксперимента	CLEAN $\frac{S_{\text{ядро}}}{S_{\text{полн}}}$	ОММЭ $\frac{S_{\text{ядро}}}{S_{\text{полн}}}$
1	0.901	0.937	9	0.919	0.881
2	0.850	0.782	10	0.785	0.798
3	0.932	0.923	11	0.834	0.848
4	0.908	0.900	12	0.926	0.932
5	0.842	0.726	13	0.829	0.876
6	0.898	0.872	14	0.992	1.000
7	0.893	0.873	15	0.988	0.977
8	0.938	0.906	—	—	—

Эта функция, как мера изменения качества восстановления в зависимости от условий РСДБ наблюдений, была определена эмпирически. Она является монотонно возрастающей функцией двух аргументов:  $N_{st}$  и  $N_{uv}$ , которые определяют качество данных через их количество. От первого аргумента  $N_{st}$  зависит количество уравнений замыкания фаз и амплитуд, решаемых в процессе самокалибровки. Чем больше станций, тем больше уравнений, тем меньше степень неопределенности при нахождении фаз и амплитуд недостающих отсчетов функции видности. Второй аргумент является адекватной характеристикой степени заполнения  $UV$ -плоскости (степени полноты функции видности) в случае компактных радиоисточников, которым соответствуют почти плоские пространственные спектры, при более или менее равномерном распределении точек на  $UV$ -плоскости. Из рис.10 прослеживается очевидная корреляция между функцией  $(S_{\text{полн}}/S_{\text{лик}})$  с функцией  $F(N_{st}, N_{uv})$ . Она составляет 0.568 и 0.797 для ОММЭ- и CLEAN-карт соответственно.

В табл.3 приведено отношение потока ядра к полному потоку источника, полученное по CLEAN- и ОММЭ-картам. На рис.11 графически представлено это отношение в зависимости от номера эксперимента. Приведенные кривые очень важны, поскольку представляют собой интегральную характеристику изменения структуры (соотношения потоков ядра и джета) источника. И как видно, эти кривые также сильно коррелируют с функцией  $F(N_{st}, N_{uv})$  (цифра 1 на графике). Коэффициенты корреляции составляют 0.749 и 0.833 для CLEAN (цифра 1) и ОММЭ (цифра 3) изображений соответственно.

Теперь интересно посмотреть, изменяется ли существенно структура источника 0059+581, при выполнении почти равных условий наблюдений. Обратимся к рис.5, где изображены покрытия  $UV$ -плоскости. Из 15 экспериментов выделим те, которые имеют близкие параметры. Очевидно, к таким относятся эксперименты с номерами 4, 6, 7, 8, 9, 12. Во всех перечисленных наблюдениях использовалось одинаковое число станций (5). Покрытия  $UV$ -плоскости за эти даты отличаются несущественно. Общей характеристикой их является довольно большой пробел данных в области низких пространственных частот. Как показывает анализ карт (рис.6 и 7), изображения источника за эти даты также отличаются несущественно. Небольшие вариации в распределениях яркости могут быть объяснены ошибками картографирования, вызванными небольшими отличиями в заполнении  $UV$ -плоскости и ошибками в данных.

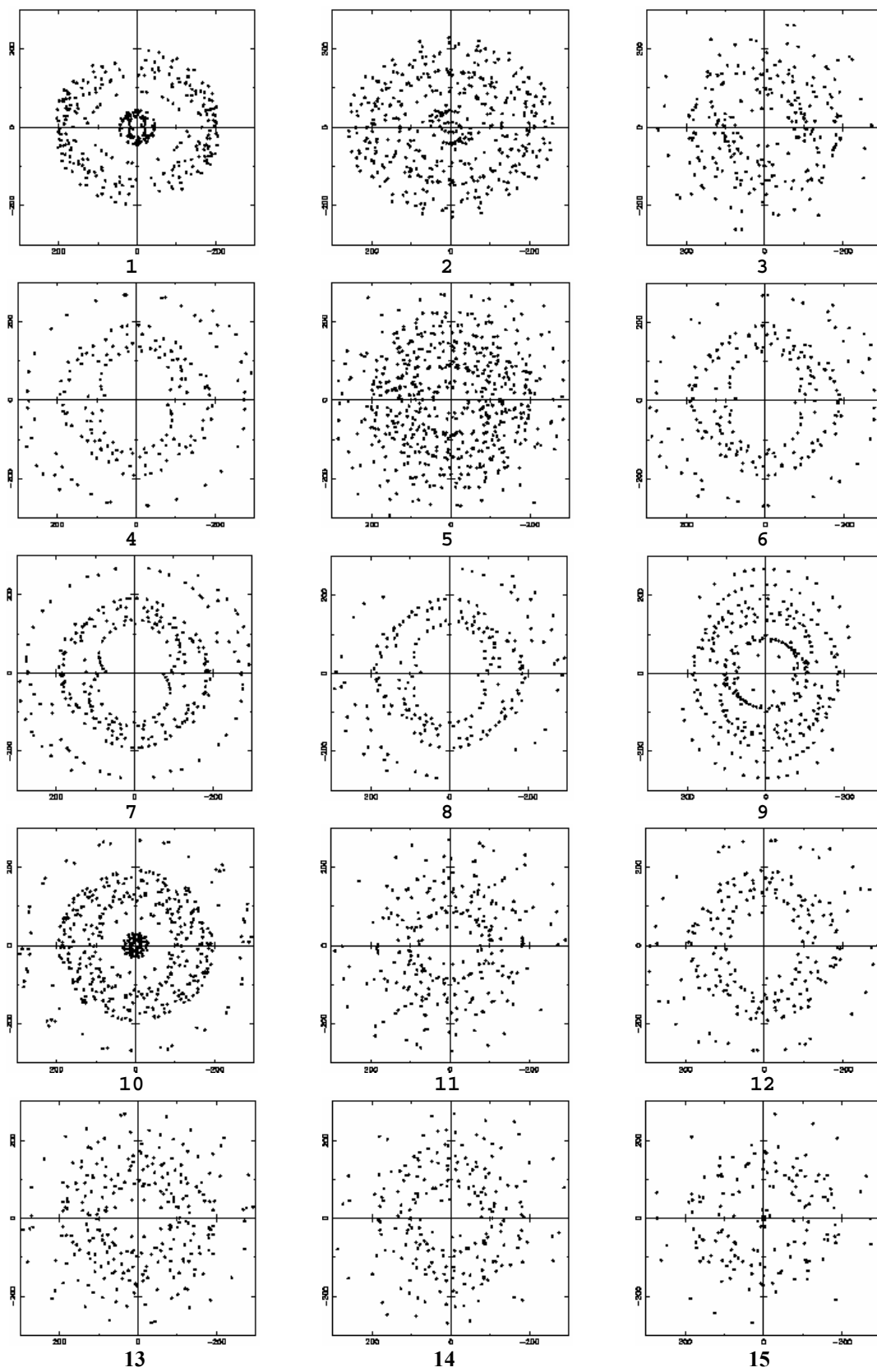


Рис.5.

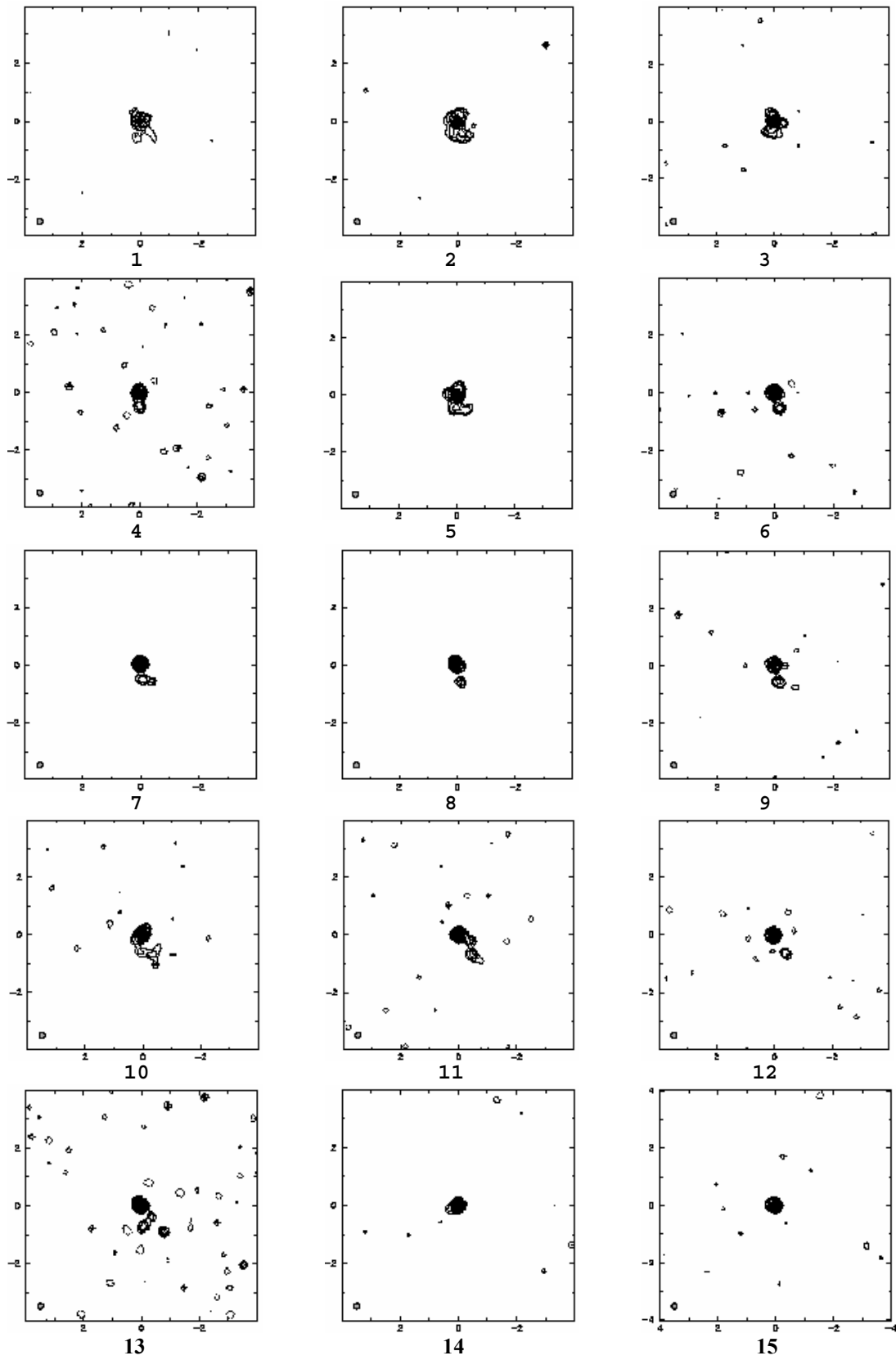


Рис.6.

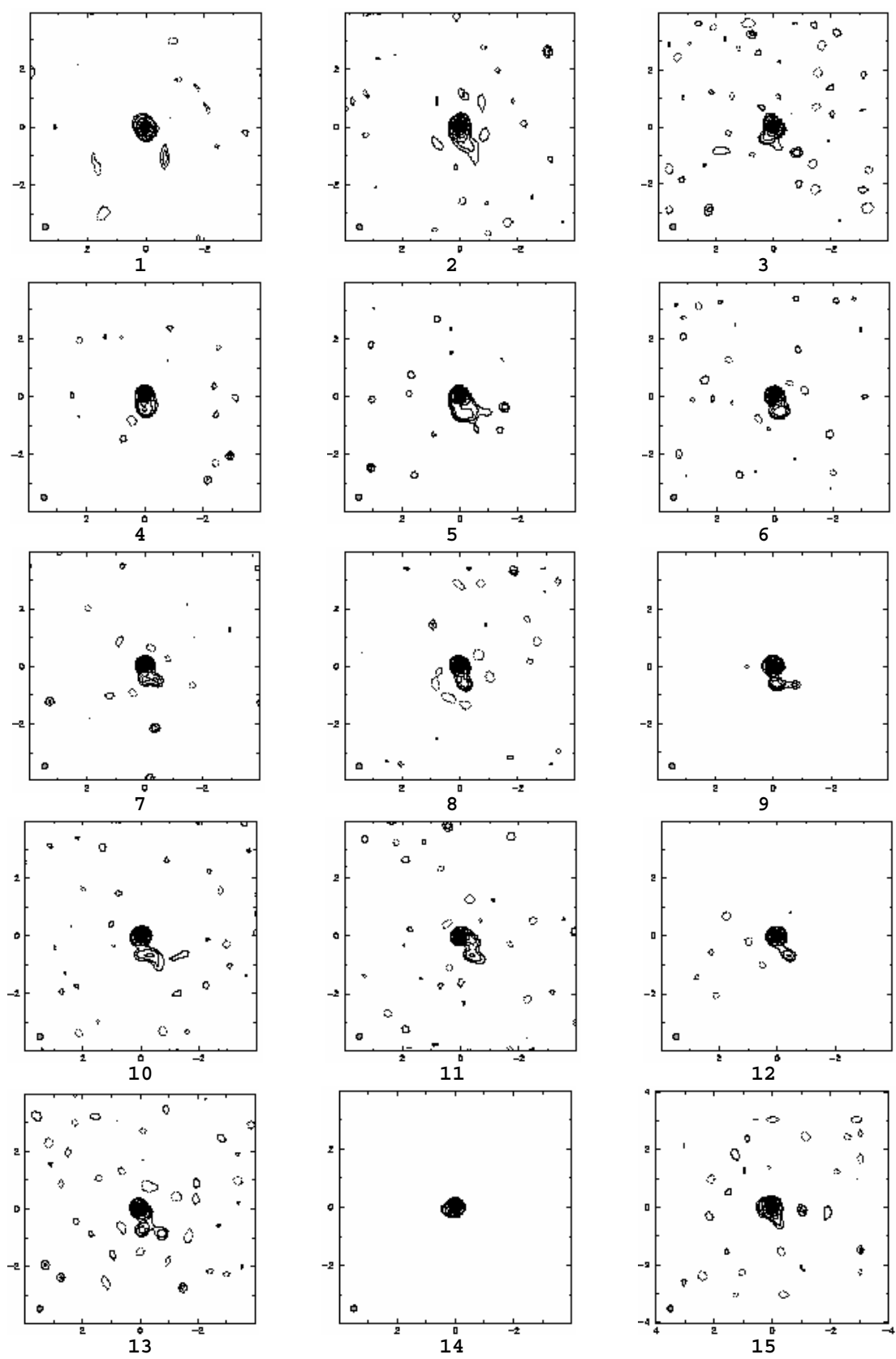
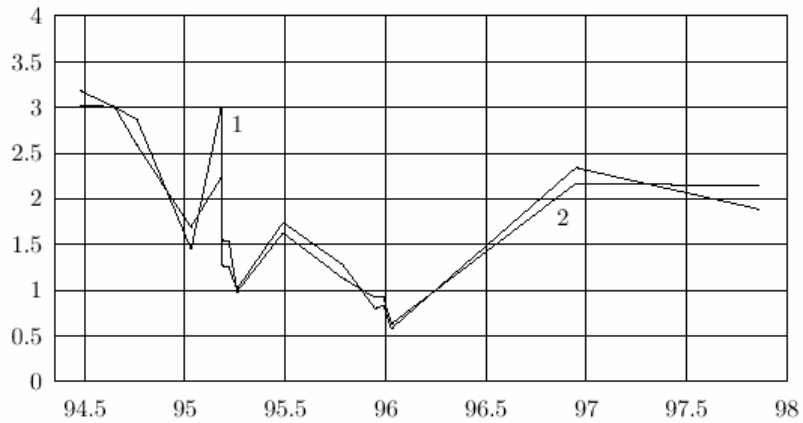
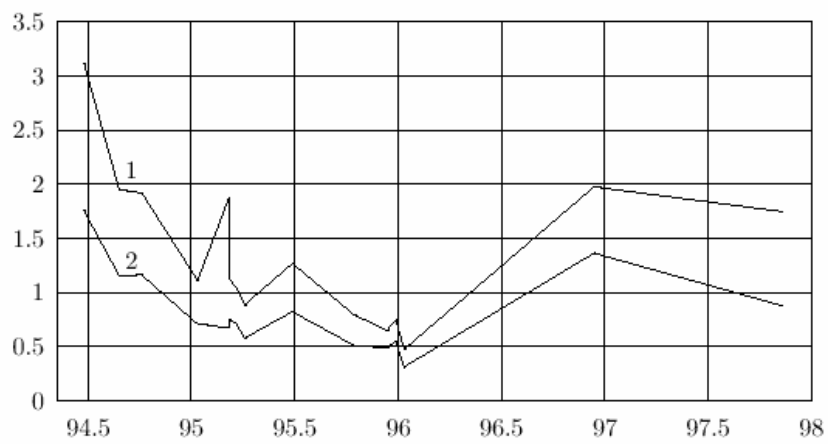


Рис.7.



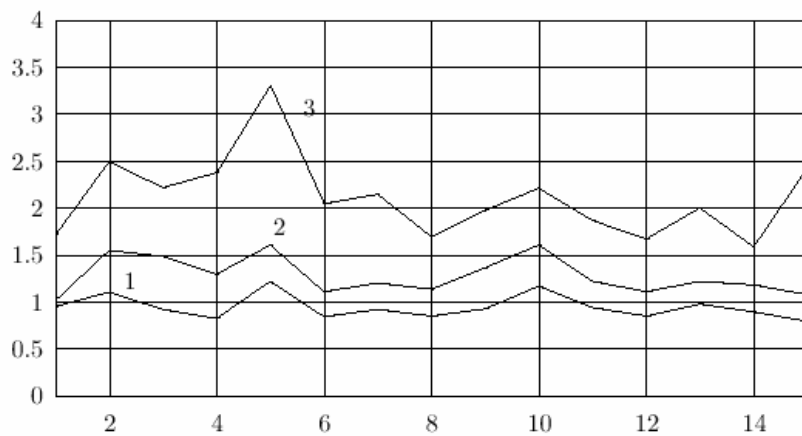


**Рис.8.**



**Рис.9.**

Таким образом, для корректного изучения тонких вариаций структур быстро-ременных компактных источников необходимы ряды наблюдений, выполненных при равных или почти равных условиях, важнейшими из которых являются число РСДБ станций и заполнение  $UV$ -плоскости.



**Рис.10.**

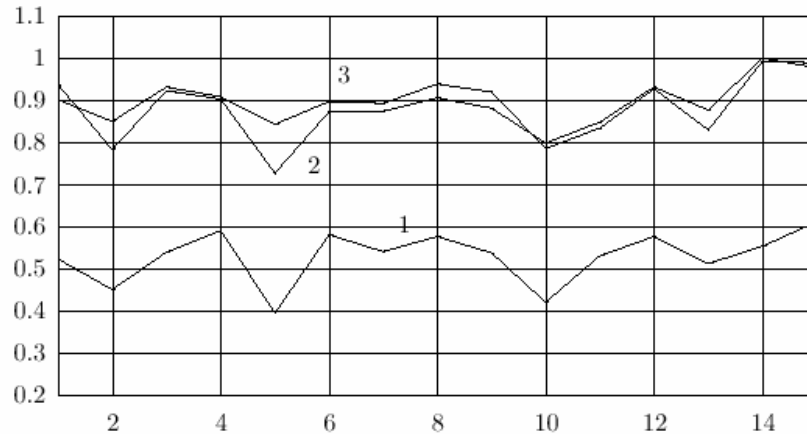


Рис.11.

### Заключение

Таким образом, на примере компактного радиоисточника 0059+581 показано, что характеристики изображений, полученные по РСДБ наблюдениям за разные даты, могут сильно коррелировать с системной функцией, зависящей только от таких параметров, как число РСДБ станций и число измерений функции видности. Так что из характера переменности построенных изображений, отягощенных различными ошибками картографирования, еще не следует вывод о характере переменности структуры источника. Очевидно, для корректного выявления и исследования собственно переменности структуры желательно использовать, вопреки сложившейся практике [2], ряды РСДБ наблюдений, выполненные при равных или почти равных условиях, к важнейшим из которых относятся число РСДБ станций и заполнение  $UV$ -плоскости. И чем более тонкие структурные эффекты подлежат исследованию, тем более жестким должно быть это требование.

### Литература

1. *Пятунина Т.Б., Байкова А.Т., Финкельштейн А.М., Труды ИПА РАН*, вып. 1, СПб: ИПА РАН, 1997, с. 64-79.
2. *Пятунина Т.Б., Финкельштейн А.М., Суркис И.Ф., Аллер Х.Д., Аллер М.Ф., Труды ИПА РАН*, вып. 3, СПб: ИПА РАН, 1998, с. 259-286.
3. *Байкова А.Т., Труды ИПА РАН*, вып. 1, СПб: ИПА РАН, 1997, с. 287-310.
4. *Байкова А.Т., Пятунина Т.Б., Финкельштейн А.М., Труды ИПА РАН*, вып. 1, СПб: ИПА РАН, 1997, с. 22-63.

### ON INVESTIGATION OF COMPACT EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES STRUCTURE FAST VARIATIONS USING GEODETIC VLBI OBSERVATIONS

Vajkova A.T.

### Summary

*The paper is devoted to the problem of compact radio source structure evolution investigation using sets of geodetic/astrometric VLBI observations. The problem is connected with the lack of observations which are usually made with different VLBI arrays leading to different  $UV$  coverage. On the example of the high variable source 0059+581 it is shown that the proportion between compact core and week jet fluxes, obtained from maps corresponding to observations on different dates, strongly correlates with a function of number of VLBI stations and number of visibility function samples, what should be taken into account for correct revealing source structure variability.*

## **ПЕРИОДИЧНОСТЬ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И ВСПЫШЕЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА**

**Гольдварг Т.Б.<sup>1</sup>, Наговицын Ю.А.<sup>2</sup>, Соловьев А.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Калмыцкий государственный университет, Элиста*

<sup>2</sup> *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

*В работе исследуются периодические режимы энерговыделения на Солнце, а именно рекуррентность появления солнечных вспышек в активных областях по данным из журнала «Solar Geophysical Data» о вспышках в линии  $H_{\alpha}$  за промежуток времени с 1979 по 1981 гг., соответствующий максимуму 21 цикла солнечной активности. С помощью корреляционного периодограммного анализа, подходов функции автоподобия и вейвлет-анализа получены следующие ряды периодов в проявлении вспышечной активности: ~ 1, 2, 3 часа, а также ~ 0.4, 1, 2, 5 суток.*

*Для интерпретации найденной последовательности периодов усиления вспышечной активности предложена диффузионная модель квазипериодического выноса тороидальных магнитных полей из-под фотосферы. Оценены характерные пространственные масштабы изменения магнитных полей в конвективной зоне Солнца: ~ 10 и 15 тыс. км.*

### **Введение**

В предыдущей нашей статье (Гольдварг и др., 2002) было начато изучение периодических режимов энерговыделения в активных областях (АО) Солнца: приведен обзор имеющихся данных о квазипериодических процессах в АО, получены первые результаты о рекуррентности проявления вспышечных явлений и дана их физическая интерпретация. В этой работе мы продолжим изучение этого вопроса как со статистической, так и с теоретической точки зрения.

Совокупность периодов колебаний различных процессов в атмосфере Солнца, полученная в различных исследованиях, отражает их физическую природу и взаимосвязь при центральной роли магнитного поля АО. Поэтому определение значений характерных периодов является неотъемлемой и важной частью проблемы поиска общих механизмов возникновения таких осцилляций.

В настоящей работе при исследовании частоты появления вспышек в избранных активных областях Солнца нами будут использованы корреляционный периодограммный анализ – КПГА (Копецкий, Куклин, 1971), подходы функции автоподобия (Наговицын, 1992) и вейвлет-анализ (Гросман, Морле, 1984). Применение целого ряда методов обработки временных рядов обусловлено нетривиальной динамикой процесса, с одной стороны не являющегося строго периодическим, а с другой – представленным достаточно разреженными данными. Для обобщения характеристик колебаний производится сопоставление результатов, полученных с помощью различных подходов. Все это будет изложено в первом разделе работы. Во втором разделе предлагается новая уточненная диффузионная модель выноса магнитной энергии из-под фотосферных слоев Солнца, позволяющая описать полученные дискретные ряды периодов. В заключении изложены основные результаты работы.

### Периодичность вспышек в АО со статистической точки зрения (1979-1981 гг.)

Для нахождения значений периодов появления вспышек в активных областях мы воспользовались данными журнала «Solar Geophysical Data» за 1979–1981 годы о солнечных вспышках в линии  $H_{\alpha}$ . Данный отрезок времени приходится на максимум активности 21-го солнечного цикла. Были выбраны те области, в которых количество зарегистрированных вспышек и субвспышек было больше 50, что обеспечило статистически значимые результаты исследования. Заметим, что отобранные таким образом 114 областей отличались тем, что время между первой и последней зафиксированными вспышками в каждой из них составляло  $\Delta T \sim 9 \div 15$  суток, что позволило достоверно определить длинные (суточные) периоды. Анализ периодичности вспышечного процесса проводился на основе данных о времени регистрации вспышек, за которое принимался момент наибольшей их яркости: исследовались выборки  $f(t_i)$ , представляющие собой ряды данных, о количестве вспышек на выбранной сетке равноотстоящих моментов  $t_i, i = 1, \dots, m$ , где  $m = \Delta T / (t_2 - t_1)$ . Обработка  $f(t_i)$  проводилась как с помощью гармонического анализа – КПГА (Кравчук, Касинский, 1992), так и негармоническими методами.

В методе КПГА временной процесс, заданный своими экспериментальными значениями  $f(t_i)$ , аппроксимируется для некоторого набора пробных периодов  $T_i$  функцией вида:

$$s(t_i) = A \cos(2\pi t_i / T) + B \sin(2\pi t_i / T) + C, \quad (1)$$

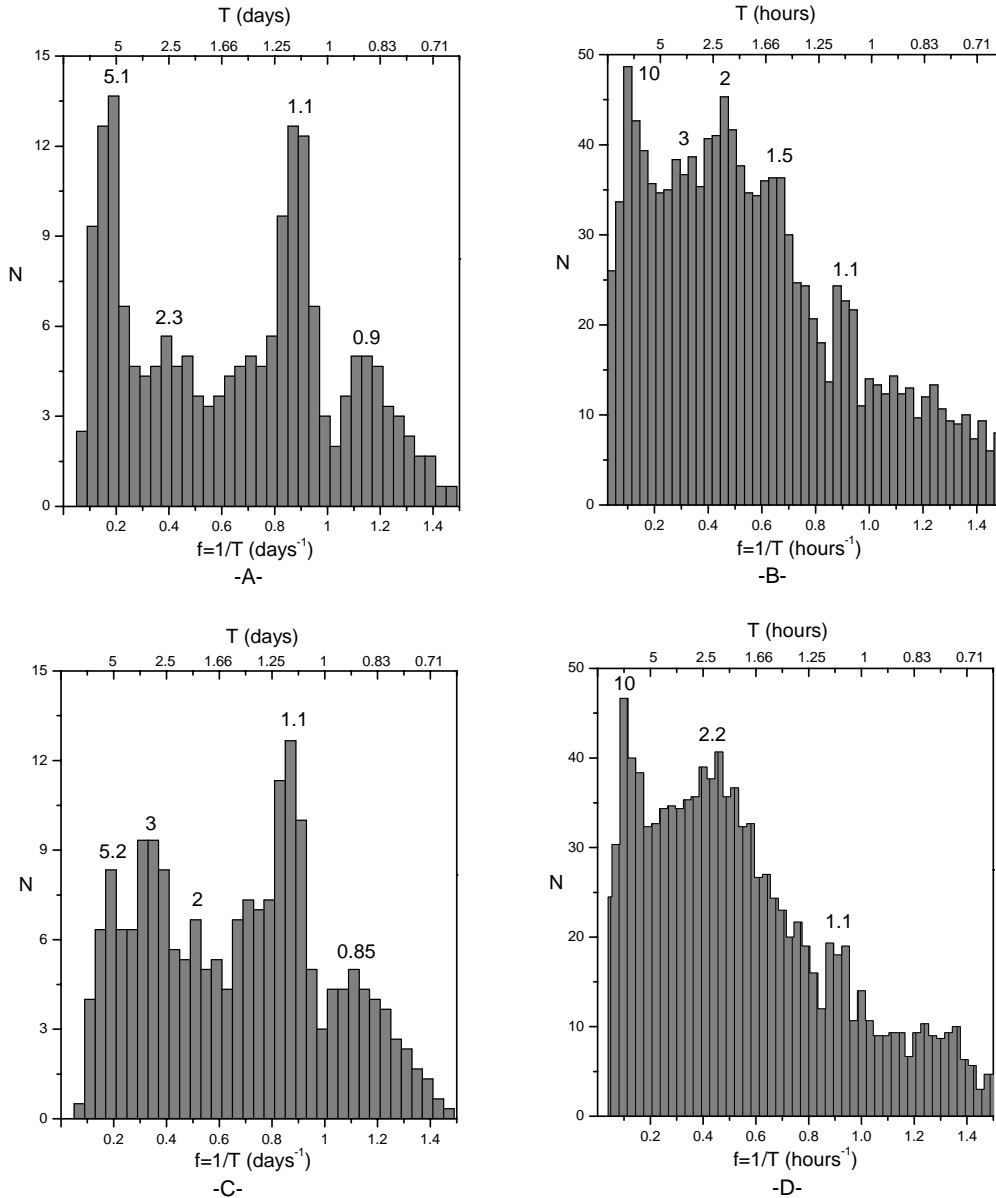
здесь  $A, B, C$  – константы, определяемые методом наименьших квадратов. Для каждого значения  $T$  находится коэффициент корреляции  $R(T)$  между исходным временным рядом  $f(t_i)$  и рядом  $s(t_i)$ . Достоверность гармоники  $P(T)$  с периодом  $T$  определяется соотношением (Копецкий, Куклин, 1971)

$$P(T) = 1 - (1 - R^2(T))^{m/2-1}. \quad (2)$$

Здесь выбирались значения  $T$ , соответствующие локальным максимумам функции  $R(T)$ , составленной из коэффициентов  $R(T_i)$  с достоверностью  $P(T) \geq 0.9$ .

На рис.1А и 1В представлены гистограммы встречаемости суточных и часовых периодов для выбранных активных областей. Как видно, максимумы распределения приходятся на периоды 1, 1.5, 2, 3, 10 часов и 1, 2, 5 суток.

Заметим, что изучаемый процесс представлен сильно разряженными наблюдательными данными. Практически, если нас интересует колебания с периодами не менее десятков минут, вспышечная активность описывается бинарным рядом, состоящим из единиц (вспышка зарегистрирована) и нулей (вспышка не зарегистрирована). Поэтому мы использовали также подход функции автоподобия, примененный ранее для изучения такого рода последовательностей событий (Наговицын, 1992). Согласно этому подходу, на основе ряда  $f(t_i)$ , конструируется функция автоподобия – аналог автокорреляционной функции, выражающая собой среднее подобие  $f(t_i)$  по отношению к самой себе при сдвиге на интервал времени  $T$ . В качестве меры сходства используется коэффициент подобия Гауэра:  $g_{ij} = S_{ij} / W_{ij}$  (Ким Дж.-О и др, 1989) для элементов рядов  $f(t_i)$  и  $f(t_j) = f(t_i + T)$ . Здесь  $S_{ij}$  в применении к бинарным данным задается в виде:  $S_{ij} = 1, f(t_i) = f(t_j); S_{ij} = 0, f(t_i) \neq f(t_j)$ .



**Рис.1.** Гистограммы встречаемости квазипериодов, полученных с помощью метода КПГА (рис.1А и 1В) и с использованием функции автоподобия (рис.1С и 1D).

Система информационных весов  $W_{ij}$ , выражающая в работе умеренное доверие к информации, выбирается из следующих критериев: если  $f(t_i) = f(t_j) = 0$  считается, что вспышка могла быть и не зафиксирована в данный момент, поэтому  $W_{ij} = 0$ ; если  $f(t_i) = f(t_j) = 1$ , то  $W_{ij} = 2$ ; при  $f(t_i) \neq f(t_j)$  полагаем, что событие значимо и  $W_{ij} = 1$ . Затем вычисляется функция автоподобия:

$$G(T) = \frac{1}{t_m - T - 1} \sum_{i=0}^{t_m - T} g_{i, i+T},$$

и окончательный поиск периодичностей может быть осуществлен применением к ней гармонических методов (мы использовали метод КПГА).

Результаты проводимой процедуры показаны на гистограммах (рис.1С и 1D), аналогичных представленным на рис.1А и 1В. Мы видим, что определяются следующие

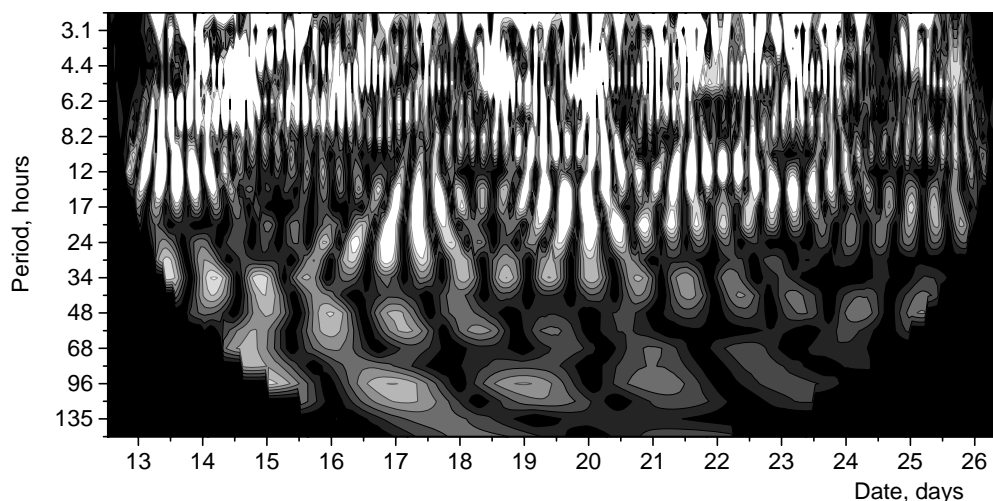
характерные периоды: 1, 2, 10 часов, а также 1, 2, 3 и 5 суток, что находится в хорошем соответствии с результатами применения прямого гармонического анализа

### Вейвлет-анализ

Следует заметить, что в примененных выше методах изначально предполагается стационарный характер исследуемых колебаний, что может не соответствовать действительности. В настоящее время для анализа временных последовательностей, с отклонениями от строгой периодичности широко используется вейвлет-анализ (Астафьева, 1996), приспособленный для изучения таких нестационарных процессов, поскольку базис формируется из вейвлетов – хорошо локализованных и по частоте, и по времени функций, а это позволяет успешно выявлять текущие особенности сигнала. Для анализа исследуемых рядов были выбраны вещественный МНАТ-вейвлет  $\psi(t) = (1 - t^2) \exp(-t^2 / 2)$ , и комплексный вейвлет Морле  $\psi(t) = \exp(i\omega_0 t - t^2 / 2)$ , где  $\omega_0$  – число экстремумов базового вейвлета. Заметим, что Морле-вейвлет отличает хорошая частотная локализация сигнала, в то время как МНАТ-вейвлет лучше приспособлен к описанию сложных сигналов и не сильно ограничен длиной исследуемого ряда. На основе базисного вейвлета строится интегральное вейвлет-преобразование исследуемой последовательности  $f(t_i)$ :

$$W_\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3)$$

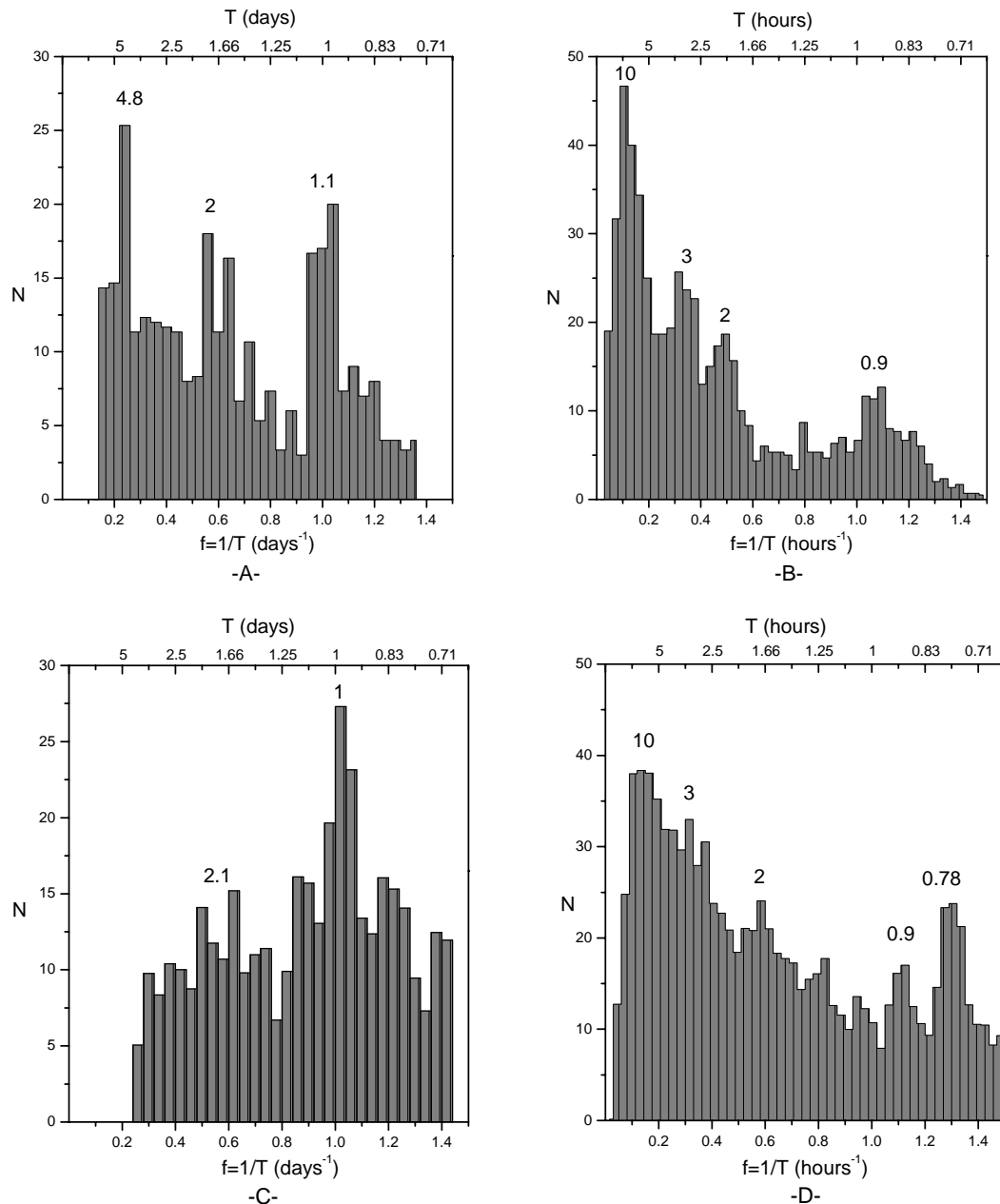
где  $\psi^*$  – комплексно сопряженная с  $\psi$  функция,  $a = 2^q$ ,  $q = 1, \dots, p$  – масштабный коэффициент, определяющий растяжение базового вейвлета,  $p$  выбирается так, чтобы величина  $2^p$  не превышала число элементов  $m$  исходной выборки. С помощью параметра сдвига  $b$  осуществляется перенос вейвлета  $\psi(t)$  по длине реализации, то есть  $b = 1, \dots, m$ . Выполняя вейвлет-преобразования (3) находится корреляция между анализируемым рядом  $f(t_i)$  и выбранным вейвлетом  $\psi(t)$  при растяжениях и сдвигах последнего по длине реализации. В результате образуется двумерный массив коэффициентов  $W_\psi(a, b)$ .



**Рис.2.** Изменение модуля коэффициентов вещественной части вейвлет – преобразования, полученное при анализе колебаний появления вспышек в области NOAA № 16224 (использован вейвлет Морле).

На рис. 2 представлен пример проекции изображения поверхности  $|W_{\psi}(a,b)|$ , полученной с помощью вещественной части вейвлета Морле на плоскость  $ab$  для активной области NOAA № 16224, проходившей по диску Солнца с 13 по 25 августа 1979 года.

Для получения общей картины распределения периодов построены гистограммы встречаемости периодов появления вспышек во всех рассматриваемых активных областях, с применением вейвлетов МНАТ (рис. 3А, 3В) и Морле (рис. 3С, 3D). Как видно из рисунков, повышена встречаемость периодических компонент на уровне 1, 2, 3 часов, а также одних и двух суток.



**Рис.3.** Гистограммы встречаемости квазипериодов, полученных с помощью метода вейвлет-анализа (для построения рис.1А и 1В – использован МНАТ–вейвлет, для рис.1С и 1D – вейвлет Морле).

Отметим, что с помощью вещественного МНАТ-вейвлета (рис.3А) обнаруживается период  $\sim 5$  суток, выявленный также и методом КПГА (рис.1А, 1С). Однако, гистограмма, основой которой служил комплексный вейвлет Морле (рис.3С), наличие данного периода не показала, в связи с ограниченностью рассматриваемого вейвлета длительностью выборки. В то же время, максимум на гистограмме (рис.3D), соответствующий 47 минутам оказался слишком мал для того, чтобы его можно было бы определить другими методами.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в проявлении вспышечной активности на Солнце наблюдается периодичность, выраженная в виде двух дискретных рядов: часового  $\sim 1, 2, 3, 10$  часов, а также суточного  $\sim 1, 2, 5$  суток. Период в 10 часов далеко отстоит от других периодов часовой последовательности, занимая некоторое промежуточное положение, поэтому его можно относить как к первому, так и ко второму, суточному ряду.

Найденные значения часового ряда близки к периодам колебаний фрагментов солнечных пятен (Наговицына, Наговицын, 2002), интенсивности пятенных источников радиоизлучения (Гельфрейх и др., 2000), широтно-долготных колебаний положения пятен (Ихсанов, Наговицына, 1990), структуры пятен (Наговицына, 1990), а также колебаний напряженности пятенного магнитного поля (Наговицын, Вяльшин, 1990; Борцов и др., 1986). Значения суточного ряда периодов согласуются с результатами работ Гопасюка, 1981 и Наговицына, Наговицыной, 1989.

Так как предварительной классификации вспышек по морфологическим, спектральным или каким-то иным признакам нами не производилось, то обнаруженные ряды периодов следует связывать лишь с неравномерностью протекания общего энерговыделения в солнечных вспышках. Ниже предлагается модель, основанная на частном решении уравнения диффузии магнитного поля, неравномерно распределенного в пространстве в начальный момент времени, способная объяснить найденную периодичность.

### **Диффузионный вынос магнитного поля в атмосферу Солнца**

Не вызывает сомнения, что солнечные вспышки имеют магнитную природу. Их появление связано с выходом достаточно сильных магнитных полей на поверхность Солнца, поэтому найденная выше периодичность в частоте появления солнечных вспышек различных масштабов и мощностей должна быть обусловлена некоторым физическим процессом неравномерного квазипериодического поступления магнитной энергии из-под фотосферы в верхние слои Солнца. Одним из возможных механизмов такого выхода магнитного потока является диффузия магнитного поля, изначально неравномерно распределенного в среде с конечной эффективной проводимостью. Вынос магнитного поля на поверхность Солнца обычно связывают с процессом всплывания силовых трубок из-под фотосферных слоев вследствие магнитной плавучести (Паркер, 1982). Этот процесс играет важную роль в доставке магнитной энергии на поверхность Солнца, но всплытие отдельных магнитных петель является локальным эффектом и не приводит к высвобождению магнитного потока всей силовой трубки – подавляющая часть ее длины остается погруженной в фотосферу и конвективную зону. Выход всей магнитной трубки в атмосферу Солнца может обеспечить только диффузия магнитного поля относительно вещества.

Рассмотрим осесимметричное магнитное поле в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ :  $\mathbf{B} = (B_\theta(r, \theta, t), B_\varphi(r, \theta, t), B_r(r, \theta, t))$ , где  $r$  – расстояние от центра Солнца. Характерные времена процессов, рассматриваемых в данной задаче, заметно больше, чем время установления механического равновесия между плазмой и магнитным полем. Поэтому процесс диффузии поля можно считать квазистатическим: система проходит



непрерывную последовательность равновесий, так что в любой момент времени магнитная сила  $\frac{1}{4\pi}[\text{rot } \mathbf{B}, \mathbf{B}]$  уравнивается градиентом газового давления  $\nabla P$  и силой тяжести  $\rho \nabla U$ . Для описания такого квазистатического процесса из всей системы уравнений МГД достаточно использовать только уравнение индукции

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot} [\mathbf{V}\mathbf{B}] + \nu_m \Delta \mathbf{B} \quad (4)$$

и уравнения соленоидальности для магнитного поля и течений несжимаемой жидкости:  $\text{div } \mathbf{B} = 0$ ,  $\text{div } \mathbf{V} = 0$ . В конвективной зоне плазма находится в состоянии турбулентного перемешивания, поэтому в уравнении (4) под  $\nu_m$  следует понимать коэффициент турбулентной диффузии:  $\nu_m \approx (V_T \times l)/3$ , где  $V_T$  и  $l$  – характерные скорость и масштаб перемешивания плазмы соответственно (Прист, 1985). Если в приведенной формуле использовать параметры солнечной грануляции, то  $\nu_m \approx 3 \times 10^{12} \text{ см}^2 / \text{с}$ . Это значение магнитной вязкости мы и будем использовать ниже для численных оценок. Поскольку нас в данном случае интересуют относительно короткие интервалы времени, положим скорость регулярных течений в (4) равной нулю,  $\mathbf{V} = 0$ , пренебрегая, в частности, эффектами, связанными с дифференциальным вращением. Уравнение (4) в этом случае сведется к уравнению диффузии, которое в покомпонентной записи имеет вид:

$$\frac{\partial B_\theta}{\partial t} = \frac{\nu_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} r B_\theta - \frac{\partial}{\partial \theta} B_r \right); \quad \frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\nu_m}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sin \theta}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} r B_\theta - \frac{\partial}{\partial \theta} B_r \right) \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial t} = \frac{\nu_m}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r B_\varphi) + \frac{\nu_m}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta B_\varphi \right). \quad (6)$$

Вспышечное энерговыделение обычно связывают с появлением в солнечной атмосфере сильных тороидальных магнитных полей. Как видно из системы уравнений (5) – (6), диффузия поля  $B_\varphi$  происходит независимо от других компонент вектора  $\mathbf{B}$ , поэтому нам достаточно рассмотреть случай  $B_\theta = B_r = 0$ . Используем безразмерные переменные  $\tilde{r} = r/r_0$  и  $\tilde{t} = t/t_d$ , где  $r_0$  – характерный пространственный масштаб изменения поля,  $t_d = r_0^2 / \nu_m$  – скин-время в этом масштабе. Для уравнения (6) имеется решение вида:

$$B_\varphi(\tilde{r}, \tilde{t}) = B_0 \frac{\sin \theta}{\tilde{r}} \sum_k M_k(\tilde{r}, \tilde{t}) P'_k(\cos \theta), \quad (7)$$

где  $B_0 = \text{const}$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ .  $P'_k(\cos \theta)$  – производная от многочлена Лежандра по его аргументу  $\cos \theta$ , а функция  $M_k(\tilde{r}, \tilde{t})$  удовлетворяет скалярному уравнению диффузии:

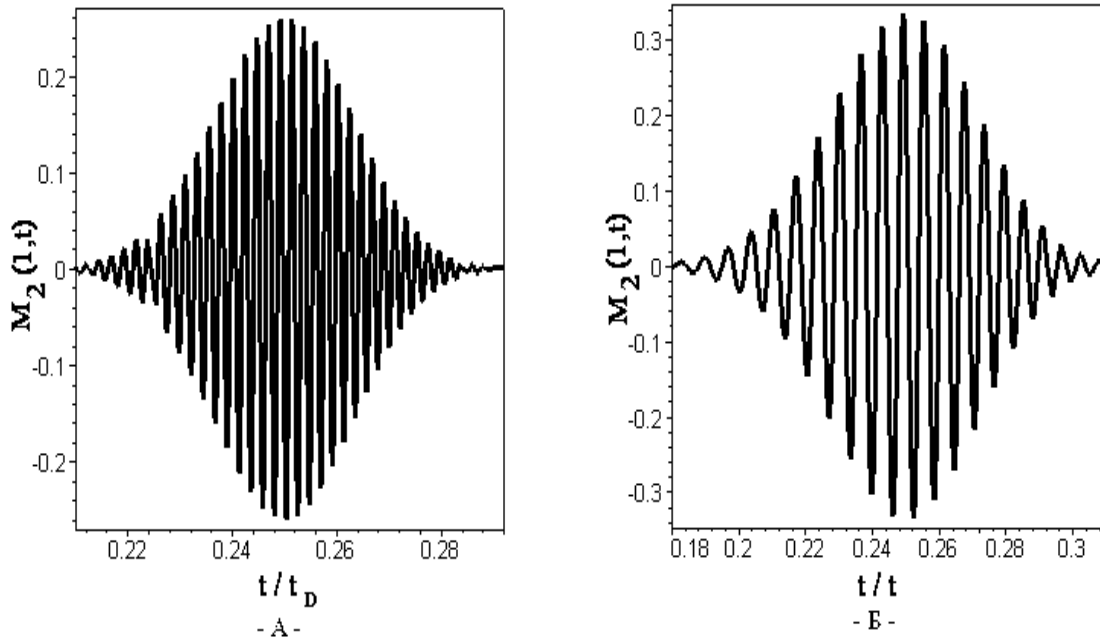
$$\frac{\partial M_k}{\partial \tilde{t}} = \frac{\partial^2 M_k}{\partial \tilde{r}^2} - k(k+1) \frac{M_k}{\tilde{r}^2}. \quad (8)$$

Согласно, правилу Хэйла, тороидальные поля, ответственные за образование активных областей на Солнце, меняют знак на экваторе, имея в каждом цикле разные направления в северном и южном полушариях. Это условие выполняется для четных гармоник ряда (8). Положим  $k = 2, 4, 6, \dots$ . Уравнение (8) имеет решение вида (Соловьев, Киричек. 2004).

$$M_k(\tilde{r}, \tilde{t}) = C_k \frac{\sqrt{\tilde{r}} \exp\left(\frac{-(\tilde{t} - \tilde{t}_{0,k}) \tilde{r}^2}{\mu_k^2 + (\tilde{t} - \tilde{t}_{0,k})^2}\right)}{\sqrt{\mu_k^2 + (\tilde{t} - \tilde{t}_{0,k})^2}} J_{\left(\frac{k+1}{2}\right)}\left(\frac{\mu_k \tilde{r}^2}{\mu_k^2 + (\tilde{t} - \tilde{t}_{0,k})^2}\right). \quad (9)$$

Здесь  $J_{\frac{k+1}{2}}$  - функция Бесселя первого рода;  $C_k$  - произвольные амплитуды,  $\mu_k$  и  $\tilde{t}_{0,k}$  - безразмерные свободные параметры (константы). Решение (9), справедливость которого легко проверяется прямой подстановкой его в (8), описывает колебательный режим диффузии, поскольку время входит (квадратичным образом!) в аргумент знакопеременной функции Бесселя. Решение (9) описывает, таким образом, солитоноподобный волновой пакет. На рис. 4. А, Б представлен графически вид основной гармонике тороидального поля ( $k = 2$ ) на поверхности Солнца ( $r = R$ ) при значениях  $r_0 = 10000$  км и  $r_0 = 15000$  км (характерный размер мезогрануляции),  $\mu_2 = 0.5$ ,  $t_0 = 1$ .

Для амплитудного коэффициента в (9) принято значение  $C_2 = \exp\left(-\frac{R^2}{4r_0^2}\right)$ .



**Рис. 4.** А - Вид второй гармоники ряда (9) на поверхности Солнца ( $r = R$ ) при  $r_0 = 10000$  км и  $\mu_2 = 0.5$ . Б - Та же функция при  $r_0 = 15000$  км,  $\mu_2 = 0.5$ .

В первом случае величина квазипериода  $\Delta T$  составляет около  $0.0025t_D \approx 12$  мин, а во втором -  $\Delta T \approx 0.007t_D \approx 90$  мин. Таким образом, наблюдаемый диапазон периодичностей появления вспышек «укладывается» в очень узкий интервал характерных масштабов изменения поля, от 10 до 15 тысяч км, что примерно соответствует масштабам мезогрануляции.

Для того чтобы получить квазипериод диффузионного импульса в 24 дня, найденный в работе Теммера и др. (2002), в приведенном решении (9) следует положить  $r_0 \approx 70000$  км - масштаб кластера из 2-3 ячеек супергрануляции.

## Заключение

При изучении периодичности возникновения вспышек в активной области различными методами (КПГА, функции автоподобия и вейвлет-анализ) получены достаточно хорошо согласующиеся между собой результаты, что свидетельствует в пользу достоверности найденных значений. Обнаружены две серии квазипериодов: часовая (около одного, двух и трех часов) и суточная (примерно полсутки, сутки, двое и пять суток). Кроме того, с помощью вейвлета Морле выявлен максимум встречаемости 47-минутного периода в появлении вспышек.

Для объяснения найденных периодов предложено новое решение уравнения диффузии магнитного поля, которое позволяет промоделировать дискретный выход энергии тороидального магнитного поля из конвективной зоны в фотосферу в виде чередующихся магнитных слоев с характерными масштабами  $\sim$  от 10000 до 15000 км. Значения вычисленных в рамках данной модели характерных масштабов соответствуют размерам мезогрануляции в фотосфере Солнца и, по всей видимости, отражают особенности генерации магнитного поля в конвективной зоне.

Авторы благодарны Касинскому В.В. и Копыловой Ю.Г. за обсуждение результатов.

Работа поддержана грантами ФНТЦП «Астрономия» Минпромнауки (тема 1105), программы Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии», программы ОФН РАН «Солнечный ветер: генерация и взаимодействие с Землей и другими планетами», ИНТАС 00-00543, 00-0752 и 01-00550 (частично).

## Литература

- Астафьева Н.М.* // Успехи физ. наук, 1996, т. 166, с. 11.
- Борцов и др.* (Borzov V.V., Vyal'shin G.F., Nagovitsyn Yu.A.) // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 1986, v. 16, p. 75.
- Гельфрейх и др.* (Gelfreikh G.B., Nagovitsyn Yu.A., Shibasaki K.) // JENAM-2000 (Abstracts), (GEOS M., 2000), p. 119.
- Гольдварг Т.Б., Наговицын Ю.А., Соловьев А.А.* // Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля солнца (сборник трудов), ГАО РАН, 2002, с.149.
- Гопасюк С.И.* // Изв. КрАО, 1981, т. 54, с.108.
- Гросманн, Морле* (A.Grosmann and J. Morlet) // SIAM J., Math. Anal., 1984, v.15, p.723.
- Ихсанов Р.Н., Наговицына Е.Ю. // Солнечные данные, 1990, т. 4, с.77.
- Ким Дж.-О., Мюллер Ч.У., Клекк У.Р., Олдендерфер М.С., Блешфилд Р.К.* // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989.
- Копецкий М., Кушлин Г.В.* // Исследования по геомагнетизму, аэродинамике и физике Солнца, 1971, т. 2, с. 167.
- Кравчук П.Ф., Касинский В.В.* // Исследования по геомагнетизму и аэрономии, 1992, т. 99, с. 80.
- Наговицын Ю.А., Вяльшин Г.Ф.* // Солнечные данные, 1990, №. 9, с. 91.
- Наговицын Ю.А.* // Пространственно-временные аспекты солнечной активности (сборник научных трудов). СПб: Физ.-тех. институт им. Иоффе РАН, 1992, с. 197.
- Наговицына Е.Ю.* // Солнечные данные, 1990, №. 5, с. 79.
- Наговицына Е.Ю., Наговицын Ю.А.* // Письма в Астрон. Журн., 2002, т. 2, с. 140.
- Наговицына Е.Ю., Наговицын Ю.А.* // Солнечные данные, 1989, т.6, с. 93.
- Паркер Е.Н.* // Космические магнитные поля. ч.1. М.: Мир, 1982, с. 608.
- Соловьев А.А., Киричек Е.А.* // Диффузионная теория солнечного магнитного цикла, Калмыцкий ГУ, 2004, - 181 с.
- Теммер и др.* (Temmer M., Veronig A., Rybak J. Brajsa R., Hanslmeier A.) // Solar Phys. 2004. V. 221. P. 325.

# THE PERIODICITY OF ENERGY RELEASE AND FLASH PROCESSES IN ACTIVE REGIONS OF THE SUN

Goldvarg T.B.<sup>1</sup>, Nagovitsin Yu.A.<sup>2</sup>, Solov'ev A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kalmyk state university, Elista

<sup>2</sup> Central (Pulkovo) astronomical observatory of RAS, St.-Petersburg

## Summary

*In the present paper the periodicity of energy release on the Sun is investigated. It was revealed the recurrence of solar flares appearance in active areas basing on the  $H_{\alpha}$  – flare data taken from “Solar Geophysical Data” Journal, 1979 to 1981. This period corresponds to the maximum of the 21st cycle of SA. Using the number of methods (correlation periodogramme analysis (CPGA), function auto-similarity and wavelet-analysis), the following series of periods in the flare activity development were derived: ~ 1, 2, 3 hours; also ~ 0.4, 1, 2, 5 days.*

*We offer the description of the retrieved sequence of periods of flare activity strengthening, basing on the new diffuse model of toroidal magnetic field transfer from the subphotospheric levels. The typical spatial scales of the solar magnetic fields in convective zone (~ 10 and 15 thousand km) were found.*

## **МОЩНЫЕ ВСПЫШЕЧНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ В СОЛНЕЧНЫХ АО: ВЗАИМОСВЯЗЬ МАГНИТНОЙ ТОПОЛОГИИ И НАБЛЮДАЕМЫХ СВОЙСТВ ДЕЛЬТА-СТРУКТУР**

**Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.**

*На основе двух формальных методологий — динамической классификации вспышечных магнитных конфигураций (ВМКФ) и модели взаимодействующих магнитных комплексов (ВМК) — рассматривается тесная взаимосвязь топологии магнитного поля и целого ряда наблюдаемых свойств сложных АО, обладающих высоким вспышечным потенциалом. В статье изложены и обобщены основные положения модели ВМК и классификации ВМКФ, а также критически проанализирована группа принципиально наблюдаемых эффектов, сопровождающих развитие типичной сложной АО. Обсуждение, в основном, затрагивает те АО, где развитие фотосферной ситуации отмечено образованием феномена  $\delta$ -структуры [37], относящегося к классу важнейших эмпирических предикторов высокой вспышечной активности. Без использования дополнительных предположений и альтернативных гипотез анализируются вероятные физические причины и условия, способные приводить к формированию в таких АО трех качественно различных классов  $\delta$ -структур.*

### **Введение**

Магнитографическими наблюдениями надежно установлено (см., например: [42]), что солнечные вспышки сопровождаются существенной перестройкой структуры магнитного поля АО. Одной из возможных причин такой перестройки существующая теория считает (см., например: [35,49,58,59,61,62]) процесс выхода из-под фотосферы нового магнитного потока, с необходимостью изменяющего ранее сложившуюся топологию поля — магнитную конфигурацию АО.

По этой причине важным этапом на пути к пониманию механизма солнечной вспышки следует считать (i) детальное изучение структуры магнитного поля в группах пятен и (ii) поиск закономерностей в образовании наиболее типичных конфигураций магнитного поля АО. При этом, главный интерес, безусловно, представляют магнитные конфигурации, сопутствующие развитию вспышечного процесса и, в особенности — те из них, которые обладают эмпирически известным уровнем вспышечной продуктивности.

В частности, к числу ключевых направлений в прогнозировании вспышек в гелиофизике традиционно относят морфологический анализ тех отличительных особенностей строения групп пятен, которые обнаруживают свойства предикторов высокой вспышечной активности. Образование феномена  $\delta$ -конфигурации в сложных группах пятен является одним из наиболее важных классических предикторов подобного рода, что позволяет считать исследование  $\delta$ -структур безусловно актуальной научной задачей.

В работе 1960 года Кюнцелем [37] впервые было отмечено, что мощные вспышки имеют явную тенденцию к возникновению в сложных группах пятен, имеющих характерную морфологическую особенность, которую он назвал  $\delta$ -конфигурацией. Особенность заключалась в том, что во всех таких группах пятна противоположной полярности располагались в пределах одной общей полутени. Последующие работы показали, что образование феномена  $\delta$ -структуры в той или иной группе само по себе еще не гарантирует обязательного повышения ее вспышечного потенциала. Иначе говоря, не ка-

ждая  $\delta$ -конфигурация вспышечно-эффективна [38]. Длительное время феномен  $\delta$ -структуры, часто наблюдаемый в сложных группах пятен, оставался объектом почти чистого эмпирико-статистического анализа.

Вместе с тем, многочисленные свидетельства электромагнитной природы физических процессов в АО, впервые надежно полученные в 60-е годы, привели к пониманию того, что даже чисто морфологические феномены во вспышечно-продуктивных группах пятен могут и должны рассматриваться и интерпретироваться одновременно с анализом свойств магнитных полей (см., например: [13,54]).

Результаты нашей попытки именно такого анализа применительно к феномену  $\delta$ -структуры основаны на другом качественном подходе, а именно — на топологической модели взаимодействующих магнитных комплексов (ВМК) [18] и так называемой динамической классификации вспышечных магнитных конфигураций (ВМКФ) [17].

## 1. Модель ВМК и динамическая классификация ВМКФ

Прежде всего, следует отметить, что проблеме всплытия нового магнитного потока и изучения соответствующих структур магнитного поля в гелиофизике традиционно уделяется большое внимание, и к настоящему моменту по этой проблеме опубликован ряд обзоров (см., например: [39]). Мы кратко остановимся здесь на ключевых моментах в истории исследований этого вопроса.

### 1.1. Всплытие нового магнитного потока и солнечные вспышки

Исходной точкой исследований в 1955 году явилась работа *Паркера* [48], где было теоретически показано, что магнитный поток может всплывать на поверхность Солнца в результате действия на силовую трубку с полем механизма так называемой “магнитной плавучести”.

Далее, в 1964-1966 годах на обширном наблюдательном материале *Витинскому* и *Ихсанову* [3] удалось показать, что расходящееся движение солнечных пятен в биполярных группах можно объяснить подъемом из-под фотосферы со скоростью порядка  $115 \pm 30$  м/с магнитной трубки-полутороида, которая, как правило, не уходит обратно под фотосферу, а диссипирует в атмосфере Солнца [4]. Тогда же было найдено, что размер трубки, время подъема и мощность поднимающегося магнитного комплекса (площади ведущей и хвостовой частей главных пятен) напрямую связаны между собой. Тем самым, теоретическая возможность всплытия магнитного потока (пятен, факелов) из-под фотосферы, далее приводящая к распространению взаимодействующих структур поля в более высокие слои атмосферы Солнца, получила (в дополнение к теоретическому обоснованию) независимое экспериментальное подтверждение. В дальнейшем, подъем магнитного поля неоднократно подтверждался различными методами и в настоящее время принимается как установленный факт.

В серии работ, выполненных в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР (КрАО) в начале 60-х годов под руководством *Северного*, было впервые обнаружено, что вспышки группируются вблизи нейтральной линии  $H_{\parallel} = 0$  магнитного поля [45,51,52], причем в группах с протонными вспышками ЛРП часто расположена вдоль направления  $E-W$  [11], либо имеет зигзагообразный вид. Был также надежно установлен факт увеличения градиента продольной составляющей магнитного поля  $H_{\parallel}$  перед вспышкой и отмечено, что для мощных вспышек величина  $H_{\parallel}$  превышает  $10^{-1}$  Гс/км [1,2,5,6,11], а магнитная энергия достигает значения  $10^{32}$  эрг, что способно объяснить феномен таких вспышек [11].

Одновременно с этим, в 1965 году *Огирь* и *Шапошниковой* [46] было установлено, что перед вспышкой в группах часто наблюдается возникновение новых пятен и пор, другие авторы отмечали образование сателлитов [33]. Данные о продольной и поперечной компоненте поля, независимо полученные *Ихсановым* [16] и *Растом* [50] из магни-

тографических измерений, также подтвердили факт появления за некоторое время до вспышки нового магнитного поля вблизи или внутри старого потока, причем первое чаще имело противоположную полярность.

### **1.2. Взаимодействие всплывающих магнитных потоков: магнитные комплексы и конфигурации**

Следующим этапом стала работа [16], в которой было отмечено, что мощная вспышка в группе пятен возникла при весьма необычной ситуации. Специфика заключалась в том, что трубки нового и старого магнитных потоков были “перехлестнуты” таким образом, что всплытие нового потока произошло непосредственно *под* старым, при этом магнитные оси обеих систем оказались *повернуты* относительно друг друга на значительный угол. При подъеме из-под фотосферы трубки приближаются друг к другу в области вершин и при наблюдении поперечной составляющей магнитного поля  $H_{\perp}$  представляются в виде перекрестия (*бифуркации*) силовых линий, либо их поворота с изменением высоты или времени. Явление вращения и бифуркации линий магнитного поля по магнитографическим данным впервые наблюдалось *Северным* [11,53].

Необходимо отметить, что уже в 60-70-е годы явление всплытия из-под фотосферы нового магнитного потока в районе уже существующей группы пятен или отдельного пятна в виде новых пятен (“сателлитов”) с возникновением вспышек наблюдалось и отмечалось неоднократно многими авторами (см., например: [33]). Проводились также теоретические исследования видов магнитных конфигураций [32,60]. Однако, принципиально важное утверждение о том, что вспышка может быть связана с *конкретной конфигурацией* всплывающего потока, а именно — с “*перехлестом*” двух последовательно (или одновременно) возникающих магнитных жгутов, по-видимому, впервые сформулировано в работе [16]. Там же впервые было отмечено, что характерной особенностью АО с мощными вспышками является взаимодействие, *по крайней мере, двух* всплывающих потоков, каждый из которых представляет собой отдельную систему магнитных жгутов соответствующей биполярной структуры и с этой точки зрения может рассматриваться как самостоятельная структурная единица — т.н. “*магнитный комплекс*”. Анализ совокупности двух и более взаимодействующих магнитных комплексов (вместе с индивидуальными особенностями их строения и взаимного расположения) позволил говорить об образовании т.н. “*магнитной конфигурации*”.

### **1.3. Классификация вспышечных магнитных конфигураций (ВМКФ)**

В качестве следующего этапа исследований *Ихсановым* [17] была предпринята попытка детального анализа реальных магнитных конфигураций конкретных вспышечных АО. Для этой цели была использована представительная выборка данных о магнитных полях таких АО по материалам *Приложения к бюллетеню “Солнечные данные”* за 1965-1974 годы [41] и “*Каталога магнитных полей солнечных пятен за время МГТ (1957-1958 годы)*” [55]. Данные о солнечных вспышках были заимствованы из источников [9,10], а также из изданий “*Catalog of Solar Particle Events 1955-1969*” [34] и “*Quarterly Bulletin of Solar Activity*” за 1968-1969 годы [36].

В результате, из всего многообразия наблюдаемых структур магнитного поля в сложных АО с сильными вспышками был выделен в качестве наиболее типичных ряд сравнительно простых магнитных конфигураций, возникающих в ходе развития таких АО. На этом основании *Ихсановым* был формально введен термин “*вспышечная магнитная конфигурация*” (ВМКФ) и впервые предложена *классификация ВМКФ*, позволявшая различать последние по типу пространственного взаимодействия двух и более всплывающих из-под фотосферы магнитных комплексов с существующими старыми. В основу классификации ВМКФ была положена модель, основанная на схематическом

представлении магнитного поля чисто биполярной группы пятен как единственной дуги — магнитной трубки с пятнами противоположной полярности в местах ее пересечения с фотосферой. Согласно результатам исследований тонкой структуры пятен [14,15], в действительности магнитные жгуты состоят из совокупности элементарных жгутов — трубок диаметром примерно  $10^3$  км, которые объединены в ту или иную иерархическую систему масштабов. Устойчивость их обеспечивается наличием скрученности и натяжения [16]. Совокупность нескольких таких жгутов, объединенных общим происхождением и приводящих к простой биполярной структуре магнитного поля, была названа “комплексом магнитных жгутов” или “магнитным комплексом”. В пересечении с фотосферой такой комплекс жгутов дает соответствующий ей биполярный комплекс пятен. При этом даже если при возникновении группы наблюдается только одно пятно (или несколько пятен одной полярности), в рамках рассматриваемой модели считается, что существует и другое пересечение фотосферы этим магнитным жгутом, но без образования пятен [4].

Таким образом, на основе имеющихся данных можно рассматривать развитие группы пятен как подъем из-под фотосферных слоев ряда магнитных жгутов в виде одного или нескольких комплексов магнитного поля — “магнитных комплексов”. При этом, положение нового комплекса магнитных жгутов в группе пятен относительно старых является определяющим фактором при образовании вспышечной конфигурации магнитного поля. Кроме того, магнитные комплексы могут существенно различаться своей мощностью, а, следовательно, и размерами магнитных арок.

Если абстрагироваться от количества ранее поднявшихся магнитных комплексов, то есть принять их все за один, то при подъеме нового комплекса чаще всего наблюдаются (не считая биполярного случая) 5 классов ВМКФ (см. рис. 1 и §1 в [17]).

#### 1.4. Обсуждение классификации ВМКФ

Из всех многочисленных выводов работы [17], наиболее важным, по-видимому, является следующий. Оказалось, что принадлежность структуры магнитных полей вспышечно-продуктивной группы к конфигурациям того или иного класса самым тесным образом связана с особенностями вспышечной активности.

**Таблица 1.** Наблюдаемая частота вспышек (%)  
в зависимости от балла события в линии  $H_{\alpha}$  и класса ВМК

Балл события	Протонные вспышки (%)				Непротонные вспышки (%)			
	I+II	II	III-V	B	I+II	II	II-V	B
3F—3B	62	26	12	0	24	34	40	02
2F—2B	64	14	22	0	26	20	43	11

Конкретно, на базе обширного наблюдательного материала было показано, что регистрируемая в группах вспышечная активность при прочих равных условиях зависит, прежде всего, от (i) взаимного расположения и (ii) распределения полярностей старых и новых магнитных комплексов, т.е. в первом приближении определяется классом магнитной конфигурации. Следующими по значимости факторами, существенно влияющими на вспышечный потенциал конфигураций в пределах конкретного класса, оказались (iii) абсолютная и относительная мощность взаимодействующих комплексов (соотношение диаметров магнитных трубок или площадей главных пятен, на которые они опираются), а также (iv) расстояние между источниками поля (пятнами) противоположного знака.



Действительно, если не принимать во внимание слишком сложных неклассифицированных случаев, анализ [17] зависимости мощности возникающих в группе вспышек от класса магнитной конфигурации, позволил сделать ряд важных статистических выводов. В данной работе эти выводы для удобства суммированы в *Табл. 1*, построенной в результате обобщения статистики 1982 года (см. *Табл. 1* и *Табл. 2* в [17]).

Таким образом, наиболее эффективными во вспышечном отношении являются конфигурации класса *I*, *II* и *III*, и на этом основании далее мы будем иногда называть их конфигурациями “*сильного*” типа. Показательно, что при независимом рассмотрении структур поля, соответствующих по системе [17] классам *I* и *II*, к совершенно аналогичному выводу позже пришел *Зурин* в работе [13]. Необходимо также особо отметить тот принципиально важный факт, что даже в сложных “комбинированных” случаях максимальный балл вспышечных событий, как правило, определяется *основным* классом конфигурации.

Физическая причина явного тяготения наиболее сильных вспышек к структурам класса *I—III* косвенно может быть связана с тем, что конфигурации *именно этих трех* классов в большей степени, чем остальные, отвечают найденным в [17] эмпирическим критериям, повышающим вспышечный потенциал системы. А именно — в отличие от “*слабых*”, в каждой из “*сильных*” конфигураций новый магнитный комплекс-биполь (*i*) совершает подъем именно внутри, либо в непосредственной близости от уже существующего комплекса и (*ii*) в силу линейных размеров и самой геометрии конфигурации обладает возможностью максимально эффективного взаимодействия со старым комплексом. В конфигурациях же класса *IV* и *V* целый ряд подобных условий (в частности, примерный паритет геометрических размеров комплексов и близость источников поля противоположного знака) может быть выполнен лишь частично.

Сложная система взаимодействующих магнитных комплексов образуется, безусловно, уже в подфотосферных слоях Солнца. Однако, накопленная в них магнитная энергия реализуется в виде вспышки и выбросов массы во внешних слоях солнечной атмосферы, где для этого существуют благоприятные физические условия. Именно в этом контексте факт тяготения мощных и, особенно, протонных вспышек к ВМКФ класса *I* и *II* наиболее интересен. В самом деле, более позднее исследование белых вспышек показало [23], что последние возникают чаще в конфигурациях типа *II* и *III*, чем структурах типа *I*.

### **1.5. Основные положения модели ВМК**

На основании динамической классификации ВМКФ *Ихсановым* [18] была предложена топологическая *модель взаимодействующих магнитных комплексов* (модель ВМК). Методика исследования вспышечно-продуктивных групп пятен на основе модели ВМК и классификации ВМКФ [17] впервые была успешно применена в [18], а затем использовалась в целом ряде исследований, например [19-29,44] для построения феноменологической схемы ВМКФ конкретных сложных АО.

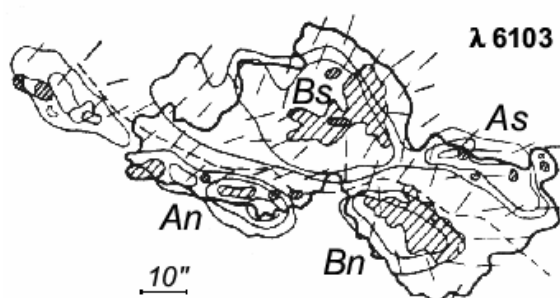
В основе модели ВМК лежат следующие наблюдательно обоснованные утверждения:

1. Развитие магнитного поля АО происходит в результате последовательного или одновременного подъема из подфотосферных слоев двух или более биполярных жгутов магнитного поля — магнитных комплексов, которые затем проявляют себя как новые комплексы пятен внутри или вблизи уже существующей группы. Топология взаимодействия магнитных комплексов определяет общую структуру магнитного поля вспышечно-продуктивной АО — вспышечную магнитную конфигурацию (ВМКФ).

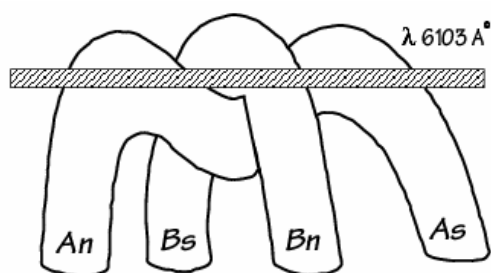
2. В большинстве случаев каждой вспышке с оптическим баллом не ниже 2 соответствует всплытие из-под фотосферы нового (ранее не отмеченного) магнитного пото-

ка, причем *принципиальной* особенностью АО с мощными вспышками является взаимодействие *по крайней мере двух* таких потоков. Появление нового магнитного комплекса на уровне фотосферы сопровождается дискретной серией вспышек, из которых событие максимальной мощности определяется основной ВМКФ. Выявление нового магнитного комплекса в группе, как правило, удается провести непосредственно в день, либо за сутки до вспышки.

3. Формализм динамической классификации ВМКФ позволяет существенно упростить задачу описания магнитных конфигураций, наиболее часто наблюдаемых во вспышечных АО. Мощные вспышки (в особенности — протонные) показывают явную группировку к ВМКФ классов *I—II*. С уменьшением балла вспышек максимум частоты их регистрации смещается к ВМКФ классов *III—V*. При фиксированном классе ВМКФ мощность возникающих вспышек зависит от абсолютной и относительно мощности старых и новых магнитных комплексов, а также от расстояния между ними.



**Рис.1.** Типичное фотосферное расположение холмов магнитного поля  $H_{||}$  по магнитограмме в линии  $\lambda 6103\text{Å}$  на примере АО *McMath 8362/СД 093*. Тонкие замкнутые кривые — изогауссы компоненты  $H_{||}$ , длинные штрихи — компонента  $H_{\perp}$ , штриховка — тень пятен, жирная кривая — граница общей полутени, пунктир — линия  $H_{||}=0$ . Наблюдается явление *бифуркации* (скрещивания) направлений поперечного поля  $H_{\perp}$ .



**Рис.2.** Схема *3D*-взаимодействия двух магнитных комплексов ( $A_N-C_S$ ) и ( $B_N-B_S$ ) в топологии типа “*перехлест*” [16,17]. Модель качественно объясняет эффект *бифуркации* направлений компоненты  $H_{\perp}$  и характерное расположение квадраты холмов поля  $H_{||}$ . Зона образования магниточувствительной линии  $\lambda 6103\text{Å}$  показана штриховкой. Центр симметрии “*седловины*” соответствует центру АО на рис.1.

4. Физический прецедент для развития вспышечной ситуации в верхних слоях солнечной атмосферы создается путем усложнения структуры магнитного поля АО на уровне фотосферы в результате нетривиального взаимодействия двух или более магнитных комплексов. Принципиальной особенностью этого процесса является его протекание в условиях вполне конкретной конфигурации поля, определяемой классом ВМКФ.

5. Взаимодействие магнитных комплексов является необходимым условием для формирования ВМКФ, а эффекты избыточного натяжения силовых линий в особенностях ВМКФ — одним из возможных условий для накопления избыточной магнитной энергии с ее последующей реализацией в форме вспышки.

6. Уменьшение или полное исчезновение сил взаимодействия магнитных комплексов (возможно, в результате пересоединения части силовых линий или иных причин релаксации поля) приводит к упрощению общей структуры ВМКФ, а конкретная топология ВМКФ определяет наблюдаемую специфику целого ряда вторичных эффектов, сопутствующих развитию вспышки.

## 2. Модель ВМК: интерпретация основных эффектов

В общем случае, данные, необходимые для корректной реконструкции ВМКФ конкретной АО, должны включать в себя целый ряд важных составляющих. Среди них, прежде всего — достоверная информация об очередности всплытия магнитных потоков

из-под фотосферы, сведения о распределении полярностей источников на фотосфере, схема замыкания магнитных трубок на конкретные источники, а также обоснованная картина объединения трубок во взаимодействующие системы (магнитные комплексы).

Рассмотрим  *типовые* схемы качественных рассуждений в рамках модели ВМК и покажем, что топологический формализм ВМКФ того или иного класса открывает возможность разумной интерпретации целого ряда явлений, наблюдаемых в таких АО — как явных закономерностей, так и эволюционных эффектов. Так, например, нередко оказывается возможным дать объяснение не только особенностям движения структурных компонент группы и фактам неравномерного развития пятен (см., например: [24]), но также эффектам, связанным с нерегулярным изменением продольной и поперечной компоненты магнитного поля (см., например: [18]), аномальным соотношениям между величинами тени и полутени [25-27] и, в частности, причинам образования  $\delta$ -конфигураций [28,29]. Под “аномальными” мы понимаем факты существования избытка или дефицита последних тени и полутени по сравнению со значениями, следующими из моделей магнитного поля пятна (см., например: [14,15]).

Рассмотрение  *типовых* схем можно провести на наиболее ярком примере ВМКФ класса *I*, образование которой сопутствует наиболее мощным вспышкам согласно статистике [17]. Очевидно, что для ВМКФ других классов предлагаемые общие схемы останутся справедливыми с точностью до деталей, связанных с конкретной магнитной конфигурацией, главным образом — с направлением взаимодействия магнитных комплексов. Поэтому, в качестве типовой иллюстрации рассмотрим АО *McMath 8362/СД 093* 1966 года [11,18,20,56], которая соответствует ВМКФ класса *I* и, следовательно, основные эффекты на уровне фотосферы качественно можно объяснить явлением “перехлеста” двух магнитных комплексов ( $A_N—C_S$ ) и ( $B_N—B_S$ ) в процессе их подъема из подфотосферных слоев (*рис.2*).

### **2.1. Специфика расположения холмов магнитного поля**

Согласно модели ВМК, верхний (возникший ранее) комплекс образует в пересечении с фотосферой холмы магнитного поля  $B_N$  и  $B_S$ , а нижний (возникший позже) — холмы  $A_N$  и  $C_S$  и соответствующие им ядра главных пятен (*рис.1*). В области пересечения магнитных жгутов этих двух комплексов на картах  $H_{\perp}$  наблюдается эффект перекрещивания силовых линий [11], столь же характерна картина волокон полутени пятен [56]. Таким образом, модель предполагает, что наблюдаемая бифуркация магнитного поля является естественным результатом пространственного наложения двух различных систем магнитных жгутов.

Прежде всего, в рамках модели ВМК легко понять (*рис.2*) причину, по которой данные магнитографов позволяют наблюдать *оба* жгута (т.е. все четыре холма) *одновременно*, тогда как они находятся один *под* другим, а магниточувствительная линия, в которой изучается структура поля, образуется в *тонком* слое с глубиной всего порядка *100 км*. Действительно, линии нижнего магнитного комплекса ( $A_N—C_S$ ) находятся в ситуации ограниченной свободы развития. Поэтому, стремясь продолжить подъем в верхние слои атмосферы Солнца, они по необходимости искривляются по краям верхнего комплекса ( $B_N—B_S$ ), где процесс всплытия возможен, и в центре образуют “*седловину*”. В результате, в зоне образования магниточувствительной линии одновременно присутствуют *все четыре* холма магнитного поля, что создает характерную картину при магнитографических наблюдениях  $H_{\parallel}$ . Очевидно, однако, что для обеспечения эффективного сжатия одного магнитного поля другим необходимы ограничения, которые должны быть наложены на магнитную конфигурацию, ими образуемую. Роль таковых могла бы играть характерная магнитная “ловушка”, позволяющая сжать поле до определенных пределов и, тем самым, создать определенный градиент величины  $H_{\parallel}$ . В свя-

зи с этим, следует отметить, что простейший тип магнитной конфигурации класса  $I$  (“перехлест”) в различных его модификациях, по-видимому, можно считать одним из наиболее распространенных видов подобной “ловушки”, приводящей к наиболее мощным вспышкам, согласно статистике [17].

Итак, ВМКФ класса  $I$  (“перехлест”) необходимо влечет типичное наблюдаемое расположение холмов магнитного поля и характерную картину в виде двух цепочек пятен различной полярности, противостоящих друг другу. Естественное объяснение получает также общее положение нейтральной линии  $H_{\parallel} = 0$  с ее заметным наклоном к направлению  $N-S$ , равно как и ее форма на краях группы, определяющая характерную  $S$ -образную форму вспышечного свечения в линии  $H_{\alpha}$ .

## 2.2. Эффекты вариации величин $H_{\parallel}$ и $H_{\perp}$ по магнитографическим данным

Магнитографические наблюдения часто показывают (см., например: [1,2,5,6,11]), что перед вспышкой наблюдается увеличение величины градиента  $H_{\parallel}$  с последующим ее спадом до нормального значения. Но принадлежность магнитных комплексов сложной АО к ВМКФ того или иного класса неизбежно должна приводить к вполне определенным изменениям напряженности магнитного поля. Так, например, легко показать, что для рассматриваемой ВМКФ класса  $I$  (“перехлест”) должен наблюдаться эффект увеличения вертикальной составляющей  $H_{\parallel}$  в области пятен комплекса ( $B_N-B_S$ ) и, напротив, ее уменьшения над пятнами комплекса ( $A_N-C_S$ ) с одновременным ростом величины поперечной составляющей  $H_{\perp}$ .

Согласно модели ВМК, градиент  $H_{\parallel}$ , пропорциональный величине  $\Delta H_{\parallel}/\Delta r$ , необходимо должен увеличиться для магнитных холмов верхнего комплекса ( $B_N-B_S$ ), так как именно они должны испытывать натяжение вверх, в результате чего их силовые линии приобретают более вертикальное направление. Напротив, для холмов поля нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ) увеличение градиента  $H_{\parallel}$ , должно быть существенно меньше. Действительно, измерение градиента продольного поля для АО *McMath 8362/CD 093* [11] дает рост величины  $H_{\parallel}$  между холмами комплекса ( $B_N-B_S$ ) и гораздо меньший рост, либо полное отсутствие такового для холмов нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ). Более того — измерение градиента для АО *McMath 8362/CD 093*  $H_{\parallel}$  на двух уровнях, соответствующих высотам образования магниточувствительных линий  $\lambda 5250$  и  $\lambda 6103$ , показывает [11], что на верхнем уровне величина  $H_{\parallel}$  изменяется более плавно, чем на нижнем, а ее значения вдвое меньше. Согласно модели ВМК это объясняется тем, что магнитное поле сильнее “прижато” в более глубоких слоях, что и подтверждает гипотезу о наличии давления снизу.

Необходимо особо отметить, на соотношение наблюдаемых величин  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$  в рамках модели ВМК должна оказывать влияние относительная мощность взаимодействующих комплексов. Действительно, когда мощность нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ) существенно превышает таковую для верхнего комплекса ( $B_N-B_S$ ), обеспечено эффективное “выдавливание” вверх обоих магнитных жгутов, что с необходимостью приведет к большему наблюдаемому увеличению величины  $H_{\parallel}$  по сравнению с величиной  $H_{\perp}$ . В обратной ситуации, когда более мощным является верхний комплекс ( $B_N-B_S$ ), такое “выдавливание” будет незначительным, и силовые линии нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ) окажутся сильнее “прижаты” к фотосфере, что немедленно создаст наблюдаемое увеличение  $H_{\perp}$  по сравнению с величиной  $H_{\parallel}$ . В рамках модели ВМК подобные различия в силе взаимодействия магнитных комплексов должны приводить к столь же различной мощности вспышек. Отметим, что именно этот эффект чрезвычайно характерен для сложных АО по данным обширной статистики, полученной в 1982 году [17].

### 2.3. Эффекты дефицита, избытка и асимметрии тени и полутени, образование $\delta$ -конфигураций

Рассмотренные вариации величин  $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$  должны проявлять себя не только в магнитографических данных, но также и в наблюдаемой картине (положении и величине) тени и полутени соответствующих пятен. Действительно, дефицит внутренней (внешней) полутени у главных пятен верхнего ( $B_N—B_S$ ) или нижнего комплекса ( $A_N—C_S$ ), равно как и частый эффект полного исчезновения полутени отдельных пятен после мощных вспышек в рамках модели ВМК легко объясним. Наиболее естественно связать его со стремлением оснований магнитных арок к более (или менее) вертикальному положению в результате уменьшения (увеличения) “прижатия” сверху со стороны старых арочных систем, либо — полного исчезновения такого “прижатия” и интенсивного подъема поля в корону вследствие окончательного разрыва области контакта магнитных жгутов, ставшего причиной вспышки.

Так, например, по данным *Стещенко* [56], в северо-западной (*NW*) части АО *McMath 8362/СД 093* пятнообразование шло необычным путем, а именно — сначала (5—6 июля) появилась полутень, и лишь затем (7 июля) возникла полноценная тень, причем одновременно в группе наблюдалась мощная  $\delta$ -конфигурация. Но согласно модели ВМК, рассматриваемая область группы относится к нижнему ( $A_N—C_S$ ) комплексу, магнитные жгуты которого “выдавливают” вверх комплекс ( $B_N—B_S$ ) и в результате противодействия со стороны сил натяжения его магнитных линий не могут свободно развиваться. Тем самым, на начальном этапе эволюции АО у пятен комплекса ( $A_N—C_S$ ) образуется лишь полутень, поскольку его силовые линии оказываются наклоненными (“прижатыми”) к поверхности фотосферы на угол больший, чем это необходимо для нормального формирования тени. Весьма характерно, что в дальнейшем, по мере подъема нижнего комплекса ( $A_N—C_S$ ), силовые линии последнего становились все более вертикальными и компактными, что повлекло 7 июля образование тени у главных пятен, лежащих в его основании. Окончательное же формирование пятен и их отделение от общей полутени  $\delta$ -структуры произошло лишь после того, как магнитное поле нижнего комплекса ( $A_N—C_S$ ) пространственно обособилось в результате упрощения магнитной конфигурации.

Очевидно, что в условиях “ловушки” для такого обособления совершенно необходима перестройка магнитного поля. Выполненные в *КрАО* наблюдения *Стещенко* показывают (см. *рис. 4* в [56]), что такая перестройка имела место в период с 6 по 7 июля, то есть одновременно с регистрацией протонной вспышки. Кроме того, о перестройке поля свидетельствуют магнитограммы *КрАО* за 5—7 июля (см. *рис. 4—6* в [11]). Действительно, если 5 и 6 июля карты поперечной компоненты поля  $H_{\perp}$  показывали эффект *скрещивания* (бифуркации) силовых линий в области “перехлеста” магнитных жгутов комплексов ( $A_N—C_S$ ) и ( $B_N—B_S$ ), то уже 7 июля эти линии явно имеют ход, характерный для жгутов только *нижнего* комплекса, то есть в направлении от области  $A_N$  к области  $C_S$ . В рамках модели ВМК, этот эффект означает, что на уровне образования магниточувствительной линии произошло “вытеснение” поля верхнего комплекса ( $B_N—B_S$ ) полем нижнего комплекса ( $A_N—C_S$ ). К совершенно аналогичному выводу приводит анализ направлений волокон полутени за 5—7 июля.

Итак, можно видеть, что взаимодействие магнитных комплексов в форме “прижатия” с высокой вероятностью способно приводить к ситуации, когда два или более ядра противоположной полярности оказываются расположены в пределах обширной общей полутени, образуя  $\delta$ -конфигурацию той или иной мощности в зависимости от силы “прижатия”. При этом последняя физически формируется в результате избыточного наклона к плоскости фотосферы силовых линий того комплекса, который находится в условиях ограниченной свободы развития. По этой причине можно утверждать, что на-

блюдение в сложной группе феномена  $\delta$ -конфигурации (как типичного примера аномальной картины полутеней разнополярных пятен) является прямым свидетельством того, что магнитные поля двух или более комплексов находятся в стадии интенсивного предвспышечного взаимодействия, а силы натяжения магнитных линий вспышечной конфигурации продолжают оставаться значительными.

Действительно, наблюдения [11,56] показывают, что для полноценного формирования пятен нижней системы магнитных жгутов ( $A_N-C_S$ ) и фрагментации общей полутени, приведшей к упрощению  $\delta$ -конфигурации, потребовалась мощная вспышка и перестройка силовых линий на уровне фотосферы. Очевидно, что такая перестройка была бы возможна только в случае исчезновения “прижатия” со стороны магнитного поля комплекса ( $B_N-B_S$ ) — например, в результате его “ухода” в верхние слои атмосферы с перезамыканием части силовых линий. Поэтому, вспышку в данном случае логично считать следствием всплытия и взаимодействия двух или более магнитных комплексов. В результате развития этого процесса произошло снятие возникшего в конфигурации напряжения (возможно, вследствие перезамыкания части силовых линий) и упрощение магнитного поля группы.

Близким по смыслу явлением, также хорошо объяснимым в рамках модели ВМК, является широко известный морфологический эффект полутеневого асимметрии — факт существования ядер, имеющих аномально малую полутень с одной из сторон пятна, либо не имеющих таковой вовсе.

#### 2.4. Вариации величин магнитных потоков $F_N$ и $F_S$

Наблюдения часто показывают [11] рост величины суммарного потока ( $F_N+F_S$ ) перед вспышкой и ее последующее падение до прежних значений. Нередко отмечается известный эффект разбаланса потоков, то есть временное изменение наблюдаемой величины ( $F_S-F_N$ ). В рамках модели ВМК первому эффекту соответствует увеличение общего вертикального поля АО вследствие механизма “сжатия” поля верхнего комплекса ( $B_N-B_S$ ) всплывающими магнитными структурами нижней системы ( $A_N-C_S$ ). Второй эффект (разбаланс) может быть, например, естественным результатом большего увеличения потока одной из полярностей по сравнению с другой — явления, неизбежно возникающего при подъеме нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ) в условиях его асимметричного “прижатия” магнитными структурами верхней системы ( $B_N-B_S$ ), которое и имеет место в большинстве реальных случаев.

#### 2.5. Вариации величин магнитной энергии $|W|$ , $W_{||}$ и $W_{\perp}$

Наряду с данными об изменениях величин  $H_{||}$  и  $H_{\perp}$ , важную информацию о взаимодействии магнитных комплексов способна дать раздельная оценка магнитной энергии продольной  $W_{||}$  и поперечной  $W_{\perp}$  составляющих поля в объеме АО, а также их соотношения с полной энергией  $|W|$  (равной  $|H|^2 \cdot V/8\pi$ ), соответствующей величине полного вектора напряженности. Так, например, согласно наблюдениям *KpAO* [11], энергия продольного поля ( $H_{||}^2 V/8\pi$ ) перед протонной вспышкой 7 июля возросла от  $(1-2) \cdot 10^{32}$  эрг до  $9 \cdot 10^{32}$  эрг за время от 4.3 до 6.2 июля, а затем упала до прежнего значения, причем та же картина была отмечена для полной энергии  $|W|$ . Интерпретировать это явление простым выходом нового магнитного потока из-под фотосферы (как предложено в [11]), очевидно, нельзя, поскольку имеет место именно абсолютное увеличение энергии  $|W|$  в объеме АО, а не только ее перераспределение в пользу энергии продольного  $W_{||}$  поля за счет энергии поля поперечного  $W_{\perp}$ .

Однако, в рамках модели ВМК простое объяснение этого эффекта вполне возможно, если полагать, что наряду со всплытием нового нижнего комплекса ( $A_N-C_S$ ) происходит его дополнительное “прижатие” сверху со стороны старого комплекса

$(B_N-B_S)$ . Отмеченное же уменьшение энергии в объеме АО после вспышки может указывать либо на “уход” части магнитного поля вниз (как предполагается в [11]), либо — в соответствии с моделью ВМК — на “прорыв” комплекса  $(A_N-C_S)$  в верхние слои атмосферы Солнца в результате перезамыкания части силовых линий общей магнитной конфигурации  $(A_N-C_S)+(B_N-B_S)$  в процессе вспышки. В качестве аргументов в пользу второго предположения можно привести, например, два следующих наблюдательных факта: (i) вертикальная составляющая магнитного поля  $H_{||}$  в области пятен нижнего комплекса  $(A_N-C_S)$  со временем увеличивается, тогда как пятна верхнего комплекса  $(B_N-B_S)$  дробятся; (ii) расстояние между пятнами противоположной полярности в обоих комплексах увеличивается, что также указывает на дальнейшее всплывание магнитных жгутов.

## 2.6. Морфология хромосферного свечения в линии $H_{\alpha}$

Для рассмотрения структуры магнитного поля в областях, пространственно более близких к месту развития вспышки, необходимо качественно проанализировать ряд хромосферных эффектов, наблюдаемых в линии  $H_{\alpha}$ . Действительно, многими авторами показано (см., например: [12,43,63]), что структура хромосферы в линии  $H_{\alpha}$  содержит важную информацию о структуре хромосферного магнитного поля, непосредственные наблюдения которого затруднены. Так, например, яркие площадки в линии  $H_{\alpha}$  соответствуют областям с преобладанием вертикального поля  $H_{||}$ , тогда как светлые и темные волокна указывают на доминирование поперечной компоненты  $H_{\perp}$ .

Детальные  $H_{\alpha}$ -данные о развитии протонной вспышки в АО *McMath 8362/СД 093*, к сожалению, отсутствуют, так как 7 июля группа находилась уже вблизи западного края лимба. Однако, данные о более слабой вспышке балла 1, зарегистрированной в *KpAO* 6 июля, уверенно показывают [11], что вспышечное возгорание в линии  $H_{\alpha}$  наблюдалось вдоль внутренней стороны холмов магнитного поля, соответствующих верхнему комплексу  $(B_N-B_S)$ . Более того, согласно [11],  $H_{\alpha}$ -свечение протонной вспышки 7 июля в области S-полярности также было расположено с внутренней стороны магнитного холма  $B_S$ . Суммируя указанные данные, возможно предположить, что вспышечное свечение в линии  $H_{\alpha}$  происходит в областях, где верхний  $(B_N-B_S)$  и нижний  $(A_N-C_S)$  магнитные комплексы *соприкасаются*.

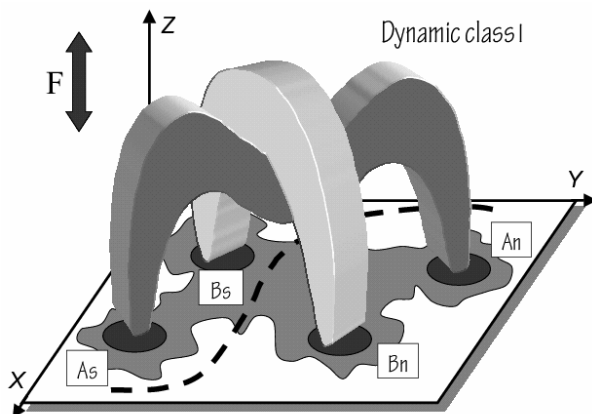
Кроме того, хорошо известно, что вспышечное возгорание в линии  $H_{\alpha}$  обычно происходит в тех областях АО, где перед вспышкой уже были отмечены площадки повышенной яркости — то есть, прежде всего там, где величина продольной компоненты  $H_{||}$  магнитного вектора достаточно высока. В условиях же сильного вертикального поля (и высокой проводимости вспышечной плазмы), реальность движения светящегося вещества *в стороны* от ЛРП в *горизонтальной* плоскости на уровне хромосферы (т.е. *поперек* силовых линий ВМКФ) представляется сомнительной. Соотнесение этого факта с представлениями о геометрии типичной магнитной арки неизбежно приводит к выводу, что явление  $H_{\alpha}$ -возгорания, напротив, отражает картину распространения возбуждающего процесса в плоскости *вертикальной*, конкретно: от места соприкосновения вершин комплексов  $(A_N-C_S)$  и  $(B_N-B_S)$ , вдоль образующих магнитных арок — к областям, лежащим над пятнами в хромосфере. Тогда наблюдаемая экспансия вспышечных лент представляет собой обычную ортогональную проекцию траектории возбуждающего агента на картинную плоскость, лежащую в атмосфере Солнца на высоте образования линии  $H_{\alpha}$ . Таким образом, логично предполагать, что наблюдаемая скорость экспансии вспышечных лент в стороны от ЛРП есть отражение скорости проникновения вспышечного агента в толщу магнитных комплексов  $(A_N-C_S)$  и  $(B_N-B_S)$ . Наконец, отметим, что именно такой способ интерпретации наблюдаемой картины  $H_{\alpha}$ -свечения позволяет легко объяснить широко известный эффект захвата вспышкой ядер главных пятен АО.

## 2.7. Фрагментация пятен и особенности горизонтального поля скоростей $v_{\perp}$

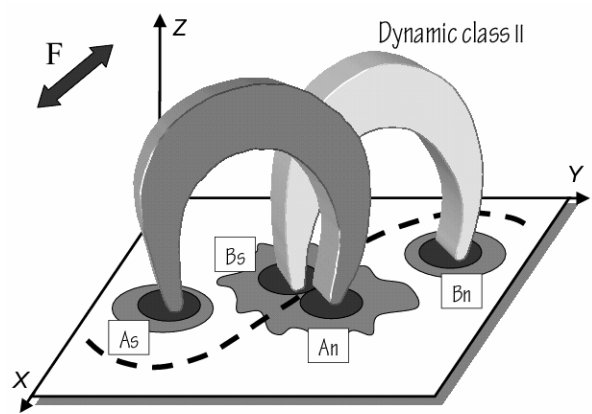
Хорошо известно (см., например: [6]), что в группах пятен часто имеет место эффект дробления крупных ядер на более мелкие (т.е. фрагментация и диссипация магнитного потока АО), который часто обнаруживает тесную связь со вспышечной активностью, а локальные максимумы площадей и полного числа пятен хорошо коррелируют с моментами сильных вспышек. В рамках модели ВМК данную корреляцию естественно связать с ускорением распада группы в результате частичного снятия локальных напряжений в магнитных структурах над пятнами, вызванного вспышкой. Известные эффекты замедления и ускорения пятен в пред- и поствспышечные периоды также хорошо укладываются в рамки модели ВМК. Их можно объяснить следствием того, что одним из результатов вспышки должно являться упрощение ВМКФ, вызываемое частичным снятием деформаций, накопленных в системе магнитных жгутов. В результате быстрого исчезновения ряда сторонних сил, в частности, сил натяжения магнитных линий, образующих жгуты, последние приобретают дополнительное количество степеней свободы, следствием чего и является наблюдаемое увеличение скоростей пятен, лежащих в их основаниях. Предвспышечное же замедление в рамках такой интерпретации, напротив, соответствует периоду активного накопления напряжений и роста влияния сторонних сил.

### 3. Три класса $\delta$ – конфигураций и феномен вспышки

Основные положения модели ВМК представляют особый интерес с точки зрения (i) выяснения причин и механизмов образования  $\delta$ -конфигураций в сложных группах пятен и (ii) проблемы интерпретации высокого вспышечного потенциала таких групп. Совокупность эмпирической зависимости “ $\delta$ -конфигурация — мощные вспышки” и закономерности “мощные вспышки — наличие ВМКФ классов I—III” позволяет говорить о существовании очевидной *генетической связи* феномена  $\delta$ -структуры на уровне фотосферы и магнитных структур над фотосферой, соответствующих ВМКФ “сильных” классов.



**Рис.3.** Преимущественное направление силы  $F$  для пары магнитных комплексов  $(A_N-A_S)+(B_N-B_S)$  в рамках конфигурации класса I ("вершинное столкновение"). Арки комплексов вовлечены в вертикально ориентированное взаимодействие по схеме "вершина к вершине". Ситуация создает топологическое ограничение *первого* типа, приводящее к взаимному сжатию магнитных трубок в направлении фотосферной нормали (вдоль оси  $OZ$ ). Пространственный "перехлест" магнитных линий  $H_{\perp}$  ("бифуркация") и мощная общая полутьнь — два наиболее ярких эффекта, создаваемых взаимодействием данного *первого* типа. Рассмотренную ситуацию определим термином " $\delta$ -конфигурация класса I".



**Рис.4.** Преимущественное направление силы  $F$  для пары магнитных комплексов  $(A_N-A_S)+(B_N-B_S)$  в рамках конфигурации класса II ("боковое столкновение"). Арки участвуют в горизонтально ориентированном взаимодействии по схеме "боковина к боковине". Ситуация порождает топологическое ограничение *второго* типа, провоцирующее взаимное сжатие магнитных трубок в направлении  $S-N$  (вдоль оси  $OX$ ). Данная конфигурация соответствует *второму* эволюционному пути, приводящему к формированию  $\delta$ -структуры. Обозначим ситуацию термином " $\delta$ -конфигурация класса II".

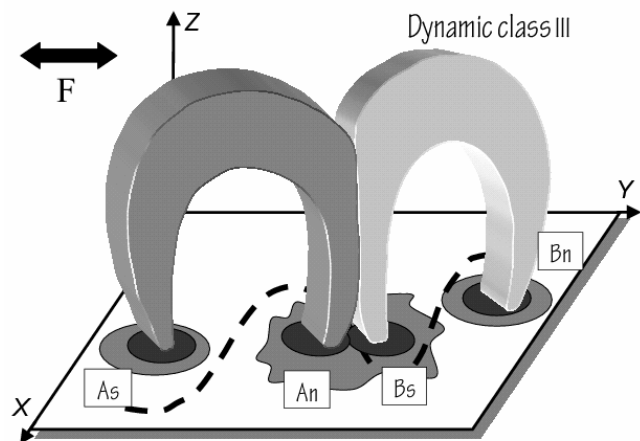


Итак, с одной стороны, возможно говорить о том, что процессы формирования в группе ВМКФ классов  $I—III$  (рис. 3-5) соответствуют трем различным эволюционным путям, теоретически в равной степени способным приводить к образованию феномена  $\delta$ -конфигурации. При этом, эффекты формирования общей полутени удачно интерпретируются моделью ВМК в терминах магнитных полей, испытывающих вполне определенные виды деформаций при взаимодействии старых и новых магнитных комплексов.

С другой стороны, наблюдения уверенно показывают, что мощные вспышки действительно явно тяготеют именно к группам с ВМКФ классов  $I—III$ . Топологическая модель ВМК качественно объясняет то, почему это происходит. Если последовательно придерживаться гипотезы [17] о том, что вспышки имеют причиной (либо — по крайней мере — одной из многих причин) именно взаимодействие магнитных комплексов, то при анализе возможной топологии этих комплексов следует признать, что именно в магнитных конфигурациях классов  $I—III$  (“перехлест”, “боковое давление” и т.д.) это взаимодействие имеет максимальные шансы оказаться наиболее сильными. Можно предположить, что *характер 3D-взаимодействия* комплексов определяет механизмы образования трех различных типов  $\delta$ -структур в магнитных конфигурациях классов  $I—III$ , а его *интенсивность*  $F$  оказывает влияние на мощность вспышек и влечет наблюдаемую специфику ряда вторичных эффектов в фотосфере, хромосфере и короне.

Совокупность последних обстоятельств, по всей видимости, позволяет утверждать, что (i) рассмотренные выше механизмы образования  $\delta$ -конфигураций являются не только наиболее естественными с теоретической точки зрения, но и на практике действительно реализуются в сложных АО с мощными вспышками и (ii) известная эмпирическая связь высокой вспышечной активности групп, содержащих  $\delta$ -конфигурации (ранее не развитая дальше простой констатации), получает в рамках модели ВМК достаточно простую (качественную), но вполне физичную (эффекты объясняются действием конкретных сил) и непротиворечивую интерпретацию — большинство построенных на ней рассуждений согласуется с наблюдениями.

Рассматривая модель ВМК, не трудно заметить, что большинство ее утверждений построено на анализе целого комплекса феноменов, сопутствующих подготовке и развитию вспышечного процесса с пространственно-временной точки зрения. Важно отметить, что при высоких интерпретационных возможностях, рассуждения на основе модели ВМК никак не затрагивают тонкостей конкретных физических механизмов, инициирующих предвспышечную перестройку поля и, следовательно, не вступают в конфликт со строгими современными теориями, предлагающим в качестве таковых различные плазменные неустойчивости, которые (при определенных условиях) должны развиваться в замагниченной объеме, приводя к диссипации запасенной в нем энергии и началу вспышки.



**Рис.5** Преимущественное направление силы  $F$  для пары магнитных комплексов  $(A_N—A_S)+(B_N—B_S)$  в рамках конфигурации класса III (“фронтальное столкновение”). Взаимодействие арок остается горизонтальным, но организовано по схеме “основание к основанию”. Ситуация порождает топологическое ограничение *третьего* типа, провоцирующее взаимное сжатие магнитных трубок в направлении  $E—W$  (вдоль оси  $OY$ ). Данная конфигурация соответствует *третьему* эволюционному пути, приводящему к формированию  $\delta$ -структуры. Обозначим ситуацию термином “ $\delta$ -конфигурация класса III”.

Применительно к изложенным в работе рассуждениям, областью исключительно интереса представляется вопрос о том, в какой степени указанное различие *условий* может означать также и различие в *физике* конкретных механизмов вспышек в зависимости от *класса* магнитной конфигурации (или же *всегда* существует некий *преимущественный* механизм-инвариант). Иначе говоря, на материале большого числа сложных вспышечных АО, имевших место в реальности, представляется крайне важным анализ того, в какой мере конкретная топология поля (класс ВМКФ) может определять пути реализации конкретного теоретического “сценария” — из числа механизмов, предлагаемых современной теорией вспышек в рамках стандартных (в том числе, *не* являющихся токовыми) моделей.

Теоретические “сценарии”, следующие из ряда “популярных” моделей, с формальной точки зрения являются вполне равноправными. Однако, вопрос о практической осуществимости тех или иных из них в конкретных вспышечных АО требует проверки и в настоящее время остается открытым. Очевидно, что решение подобной задачи должно включать в себя рассмотрение вероятной роли ВМКФ различных классов в подготовке и развитии вспышечной ситуации по диктуемым этими моделями сценариям, а также возможные ограничения, накладываемые на структуру ВМКФ конкретными моделями вспышек.

В частности, значительный интерес представляет проверка на новом материале вопроса о том, как энергетические феномены, сопровождающие вспышки (например,  $H\alpha$ -свечение) пространственно соотносятся с системами вертикальных электрических токов  $J_z$  в АО (см., например: [30,31,40]), а также вопроса о роли нулевых точек магнитного поля (см., например: [8,32,57]) или выводов, следующих из топологической модели вихревых фотосферных течений [7].

#### Литература

1. *Avignon Y., Martres M.J., Pick M.* — *Ann. d'Astrophys.*, 1964, **27**, p.23.
2. *Avignon Y., Martres M.J., Pick M.* — *Ann. d'Astrophys.*, 1966, **29**, p.33.
3. *Витинский Ю.И., Ихсанов Р.Н.* — *Солнечные данные*, 1964, **10**, с.57.
4. *Витинский Ю.И., Ихсанов Р.Н.* — *Известия ГАО*, 1966, **180**, с.20.
5. *Годовников Н.В., Огирь М.Б., Шапошникова Е.Ф.* — *Известия КрАО*, 1964, **31**, с.216.
6. *Гонасюк С.И., Огирь М.Б., Северный А.Б. и др.* — *Известия КрАО*, 1963, **29**, с.15.
7. *Gorbachev V.S., Somov V.V.* — *Solar Phys.*, 1988, **117**, p.77.
8. *Dütoulin P., Henoux J.C., Mandrini C.H.* — *Astron. Astrophys.*, 1994, **285**, p.1023.
9. *Dodson H.W., Hedeman E.R.* — *JGY Solar Activity, Report Series*, 1960, **12**.
10. *Dodson H.W., Hedeman E.R.* — *Report UAG-2*, 1968; *UAG-19*, 1972; *UAG-52*, 1975.
11. *Зверева А.М., Северный А.Б.* — *Известия КрАО*, 1970, **41-42**, с.97.
12. *Zirin H., Lackner D.R.* — *Solar Phys.*, 1969, **6**, p.86.
13. *Zirin H., Liggett M.A.* — *Solar. Phys.*, 1987, **113**, p.267.
14. *Ихсанов Р.Н.* — *Солнечные данные*, 1972, **11**, с.81.
15. *Ихсанов Р.Н.* — *Солнечные данные*, 1973, **10**, с.94.
16. *Ихсанов Р.Н.* — *Солнечные данные*, 1974, **12**, с.81.
17. *Ихсанов Р.Н.* — *Известия ГАО*, 1982, **200**, с.15.
18. *Ихсанов Р.Н.* — *Известия ГАО*, 1985, **201**, с.84.
19. *Ихсанов Р.Н., Щеголева Г.П.* — *Солнечные данные*, 1980, **9**, с.96.
20. *Ихсанов Р.Н., Щеголева Г.П.* — *Известия ГАО*, 1980, **198**, с.39.
21. *Ихсанов Р.Н., Щеголева Г.П.* — *Известия ГАО*, 1982, **200**, с.22.
22. *Ихсанов Р.Н., Щеголева Г.П.* — *Известия ГАО*, 1984, **201**, с.96.

23. *Ихсанов Р.Н., Перегуд Н.Л.* — *Солнечные данные*, 1988, **2**, с.67.
24. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* — *Известия ГАО*, 1996, **211**, с.103.
25. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* — *Известия ГАО*, 1996, **211**, с.115.
26. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* — *Известия ГАО*, 1998, **212**, с.81.
27. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* — *Известия ГАО*, 1998, **212**, с.91.
28. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* // В сб.: *Труды междунар. конф. С.-Петербург*, 24-29 июня 1998, с.253.
29. *Ихсанов Р.Н., Марушин Ю.В.* // В сб.: *Труды междунар. конф. Иркутск*, 25-29 сентября 2000, с.27.
30. *Canfield R.C et al.* // In: *Lecture Notes in Physics*, 1991, **387**, p.96.
31. *Canfield R.C., J.-F.de La Beaujardiere, Y.Fan et al.* — *Astrophys. J.*, 1993, **411**, p.362.
32. *Каплан С.А., Пикельнер С.Б., Цытович В.Н.* — *Физика плазмы солнечной атмосферы*. М., 1977.
33. *Касинский В.В.* // В сб.: *Труды VIII консульта. совещания АН соц. стран*. М., 1976, с.138.
34. *Catalog of Solar Particle Events 1955-1969*. Ed. Z.Svestka, P.Simon. Dordrecht, 1975.
35. *Křivský L.* // In: “*Structure and development of solar active regions*”. Dordrecht, Reidel, 1968, p.465.
36. *Quart. Bull. Solar Activity*, 1968, **161-164**; 1969, **165-168**.
37. *Künzel H.* — *Astron. Nachr.*, 1960, **285**, p. 271.
38. *Künzel H., Mattig W., Schröter E.H.* — *Die Sterne*, 1961, **9-10**, p. 198.
39. *Kurokawa H.* // In: *Lecture Notes in Physics*, 1991, **387**, p. 39.
40. *Leka K.D., Canfield R.C., McClymont A.N. et al.* — *Astrophys. J.*, 1993, **411**, p.370.
41. *Магнитные поля солнечных пятен*. (Прил. к бюлл. “Солнечные данные”)1965—1974.
42. *Martin S.F., Ramsey H.E.* // In: *Solar active observation and prediction*. MIT-Press, 1972, p.371.
43. *McIntosh P.S.* // In: *Solar activity observation and prediction*. Ed. P.S.McIntosh. 1972, **30**, p.65.
44. *Марушин Ю.В.* — *Известия ГАО*, 1998, **212**, с.100.
45. *Moreton G.E., Severny A.B.* — *Solar Phys.*, 1968, **3**, p.282.
46. *Огурь М.Б., Шапошникова Е.Ф.* — *Известия КрАО*, 1965, **35**, с.272.
47. *Паламарчук Л.Э.* — *Солнечные данные*, 1973, **3**, с.73.
48. *Parker E.N.* — *Astrophys. J.*, 1955, **121**, p.491.
49. *Priest E.R.* — *Solar Phys.*, 1976, **47**, p.41.
50. *Rust D.M.* — *Solar Phys.*, 1976, **47**, p.1.
51. *Северный А.Б.* — *Известия КрАО*, 1958, **20**, с.22.
52. *Северный А.Б.* — *Известия КрАО*, 1960, **22**, с.12.
53. *Северный А.Б.* — *Известия КрАО*, 1964, **31**, с.159.
54. *Smith S.F., Howard R.* — *IAU Symp. № 35*, 1968, p.33.
55. *Stepanov V.E., Shaposhnikova E.F., Petrova N.N.* — *Ann. JGY*, 1963, **23**.
56. *Стешенко Н.В.* — *Известия КрАО*, 1969, **39**, с.245.
57. *Сыроватский С.И.* — *Известия АН СССР, Сер. физ.*, 1979, **43**, № 4, с.695.
58. *Томозов В.М.* // In: *Contrib. of the Slov. Acad. Sci.*, 1976, **6**, p.85.
59. *Томозов В.М.* // В сб.: “Солнечные вспышки”. М., Наука, 1982, с.91.
60. *Heuvaerts J., Priest E.R., Rust D.M.* — *American Sci. And Engineering*, 1976, ASE-4025.
61. *Heuvaerts J., Priest E.R., Rust D.M.* — *Astrophys. J.*, 1977, **216**, p.213.
62. *Heuvaerts J., Kuperus M.* — *Astron. Astrophys.*, 1978, **64**, p.219.
63. *Цан Т.Т.* — *Известия КрАО*, 1964, **31**, с.200.

**POWERFUL FLARING CONFIGURATIONS IN SOLAR ACTIVE REGIONS:  
MAGNETIC TOPOLOGY VIA SPECIAL FEATURES  
OF DELTA-STRUCTURE PHENOMENON**

**Ikhsanov R.N., Marushin Yu.V.**

***Summary***

*The close interrelation of magnetic field structure on the one hand and observable features of complex ARs with high flare efficiency on the other one is considered in frames of two formal concepts: dynamic classification of flaring magnetic configurations (FMC) and topological model of interacting magnetic complexes (IMC). The primary objective of the paper is to expose general statements of the specified model and classification, the secondary one assumes the critical analysis and logical generalization of several important regularities being frequently found out in evolution stages of a typical complex AR with powerful flares. Those cases are basically examined where the development of photospheric situation is marked by the formation of  $\delta$ -structure phenomenon [37] having its membership in a class of the most impressive precursors of high flare activity. Without trying to use any additional assumptions and alternative hypotheses, the qualitative analysis of physical reasons and formative conditions of three different  $\delta$ -configuration classes in solar ARs is carried out.*

## **ПРИРОДА ОСЦИЛЛЯЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД И ДИАГНОСТИКА КОРОНАЛЬНЫХ АРОК**

**Копылова Ю.Г., Куприянова Е.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т.**

*На основе аналогии между звездными и солнечными вспышками проведен анализ десяти-секундных осцилляций, обнаруженных в полосах  $U$  и  $V$  на звезде  $EV Lac$ . Пульсации излучения мы связываем с быстрыми магнитозвуковыми (БМЗ) колебаниями корональных арок. Исходя из методики, предложенной в [12], получены оценки магнитного поля  $B \approx 320$  Гс, температуры  $T \approx 3.7 \times 10^7$  К и концентрации плазмы  $n \approx 1.6 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup> в области энерговыделения. Приведены аргументы в пользу локализации источника оптического излучения в основаниях арок.*

### **Введение**

По некоторым оценкам от 40 до 90 % всех звезд нашей Галактики составляют холодные карликовые звезды с нерегулярной переменностью (звезды типа UV Cet) [1]. Наблюдения показывают, что во время вспышки визуальная светимость звезды может возрасти на несколько порядков. При этом максимум излучения зачастую приходится на оптический диапазон. Несмотря на эти особенности, в настоящее время существует достаточного много указаний, свидетельствующих в пользу единой природы вспышечного энерговыделения на Солнце и звездах [1].

Основным структурным элементом корон Солнца и красных карликов являются магнитные арки (петли). В подавляющем большинстве современных моделей вспышечного энерговыделения арочным структурам отводится особая роль. Согласно общепринятому сценарию солнечных вспышек, в ходе энерговыделения в корональных петлях накапливаются ускоренные частицы, которые вследствие рассеяния «высыпаются» в их основаниях. Нагретая частицами плотная плазма нижней атмосферы излучает в балмеровских линиях, а также в оптическом континууме, тогда как наиболее горячая ее часть с температурой  $T = 10^6 - 10^8$  К, «испаряясь», заполняет арочные структуры и высвечивается в ультрафиолетовом и в мягком рентгеновском диапазоне.

Для красных карликов правомерность такого сценария следует, прежде всего, из особенностей поведения профилей спектральных потоков. Так, во время вспышки на AD Leo, Холи и др. [2] обнаружили совпадение поведения проинтегрированного по времени профиля излучения в полосе  $U$  с профилем, наблюдаемым в ультрафиолетовом диапазоне, т.е. было показано, что эффект Нойперта [3], являющийся одним из наиболее веских аргументов в пользу описанного выше сценария, характерен не только для Солнца, но и для вспыхивающих звезд.

Для диагностики звездных петель обычно привлекают косвенные методики, включающие большое количество неизвестных параметров [4]. Поэтому результаты, полученные разными авторами, существенно расходятся. Например, в зависимости от принятых ограничений характерные значения длин корональных петель  $L$  варьируются от нескольких звездных радиусов  $R_*$  до  $L < 0.1R_*$  [4], а значения концентрации вспышечной плазмы — от  $10^7$  см<sup>-3</sup> до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> [5, 6]. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего развития методов диагностики параметров корональных петель вспыхивающих звезд. По нашему мнению, значительный прогресс в данном направлении может быть достигнут благодаря исследованию тонкой временной структуры излучения звездных вспышек.

Как следует из наблюдений, в некоторых случаях на плавную кривую блеска вспыхивающих звезд накладываются квазипериодические пульсации с периодами от нескольких секунд [7] до нескольких минут [6]. Впервые они были зарегистрированы Родоно [8] при проведении наблюдений звезды  $\text{H II } 2411$  (dM4e). Во время вспышки 28.11.72 были обнаружены осцилляции со средним периодом  $P \approx 13$  с и глубиной модуляции около 15%. Эндрюсу [7] также удалось выделить квазипериоды порядка 13 и 8 с оптических колебаний, наблюдавшихся в полосе  $U$  через 10–15 минут после максимума вспышки на  $\text{AT Mic}$  (dM4.5e). Тем не менее, ввиду возможных атмосферных и инструментальных эффектов вопрос о звездном происхождении данных пульсаций оставался открытым.

Сравнительно недавно благодаря проведению синхронных наблюдений трех вспышек на  $\text{EV Lac}$  с помощью телескопов, установленных на пике Терскол (Северный Кавказ), в обсерватории Стефанион (Греция), в Крымской обсерватории и Белоградчике (Болгария), одновременно на всех инструментах [9] были обнаружены синфазные квазипериодические осцилляции в полосах  $U$  и  $B$  с периодом  $P = 10 - 30$  с. Причем их относительная амплитуда в полосах  $U$  и  $B$  составляла 10–15 % и 2.5 %, соответственно. Таким образом, было убедительно показано, что колебания вспышечного излучения звезд реально существуют.

Маллен [5] предложил связать квазипериодические осцилляции, обнаруженные Родоно [8], с распространением волнового пакета свистов в дипольном магнитном поле звезды. Позднее на основе солнечно–звездной аналогии он развил теорию Йонсона [10] о взаимодействии конвективных движений с корональными магнитными петлями активных областей [11]. Однако в рамках данной гипотезы трудно понять, почему квазипериодические пульсации излучения вспышек наблюдаются далеко не во всех событиях. На наш взгляд, более привлекательным выглядит подход, предложенный Зайцевым и Степановым [12], согласно которому, наблюдаемые пульсации вызваны вспышечным энерговыделением или «испарением» хромосферной плазмы, что приводит к резкому росту газового давления внутри петель и возбуждению собственных магнитогидродинамических (МГД) колебаний. Подобная модель привлекалась для интерпретации минутных осцилляций, наблюдаемых на вспыхивающих звездах в работах Маллена и др. [13], а также Матиодиакиса и др. [6]. Между тем модуляция излучения определялась так называемыми изгибными модами, что в свете предполагаемого механизма возбуждения представляется довольно проблематичным (см. следующую главу).

В представленной работе рассматриваются десятисекундные осцилляции оптического излучения, обнаруженные Жилиевым и др. [9] в ходе вспышечного энерговыделения на  $\text{EV Lac}$ . С помощью методики, основанной на представлениях о радиальных быстрых магнитозвуковых (БМЗ) колебаниях корональных петель, оцениваются параметры вспышечной плазмы, а также обсуждается проблема локализации источника оптического излучения звездных вспышек.

### Собственные моды корональных петель

В пренебрежении силой тяжести из линеаризованной системы уравнений идеальной МГД [14] следует, что в корональной петле могут возбуждаться четыре основные моды: винтовая, изгибная, медленная (ММЗ) и радиальная БМЗ [15, 16, 17, 18, 19]. Такое разделение становится возможным благодаря анизотропным особенностям действия сил магнитной природы. Рассмотрим наиболее важные свойства собственных мод, ограничившись анализом первых гармоник (число полуволн, укладываемых вдоль петли  $q = 1$ ), полагая, что они должны возбуждаться наиболее эффективно.

Для винтовых и изгибных мод периоды колебаний соответственно равны

$$P_{\text{tor}} = 2L/V_{\text{Ai}},$$

$$P_{kink} \approx 2L/V_f, \quad V_f^2 = \frac{\rho_i V_{Ai}^2 + \rho_e V_{Ae}^2}{\rho_i + \rho_e},$$

где  $V_{Ai}$  и  $V_{Ae}$  — альфвеновские скорости внутри (i) и снаружи (e) петли,  $\rho_i$  и  $\rho_e$  — соответствующие плотности.

Сразу отметим, что винтовые моды не сжимают плазму, тогда как изгибные — лишь во втором порядке приближения (см. Приложение). Откуда следует вывод, что данные моды не могут быть ответственны за пульсации большой амплитуды, наблюдаемые на EV Lac. Действительно, если возникновение винтовых мод обусловлено ростом газового давления внутри петли, вызванного вспышечным энерговыделением, то это должно привести к изменению напряженности продольной компоненты магнитного поля  $B_z$ . Для изгибных мод  $\delta B_z \ll \delta B_r, \delta B_\phi$  (см. 20П). Поэтому, принимая, например,  $\delta B_z/B_z \sim 0.1$ , получим  $\delta B_r, \delta B_\phi \sim 1$ . Большие амплитуды соответствующих компонент магнитного поля предполагают большие значения плазменного  $\beta \sim 1$ . В условиях короны  $\beta \approx c_s^2/V_A^2 \ll 1$ , где  $c_s$  — скорость звука. Поэтому эти моды едва ли могут быть ответственны за наблюдаемые десятисекундные осцилляции вспышечного излучения.

ММЗ-моды слабо возмущают магнитное поле, а их период [17]

$$P_{sound} \approx 2L/c_{Ti}, \quad c_{Ti}^2 = \frac{c_{si}^2 V_{Ai}^2}{c_{si}^2 + V_{Ai}^2}. \quad (1)$$

Следовательно, согласно (1), длина корональной петли  $L$  равна

$$L \approx c_{si} P_{sound} / 2 = 5.86 P \sqrt{T}.$$

Полагая в последней формуле температуру  $T = 10^7 - 10^8$  К,  $P = 10$  с, получим  $L = (2 - 6) \times 10^8$  см. Радиус EV Lac  $R_* = 0.39 R_\odot$  [1], а значит,  $L/R_* = (0.7 - 2) \times 10^{-2}$ , что ввиду мощной энергетики звездных вспышек представляется маловероятным.

Радиальные колебания петель (sausage modes) в зависимости от того, генерируют ли они бегущие МГД-волны в окружающей короне, могут быть излучательными или безызлучательными (см., например, [20]). Выбор между этими модами определяется параметрами петли. В частности, при малых значениях плазменного  $\beta \ll 1$  критическое значение продольного волнового числа [20, 21]

$$k_c = \left( \frac{j_0}{a} \right) \sqrt{\frac{1}{(V_{Ae}/V_{Ai})^2 - 1}}, \quad (2)$$

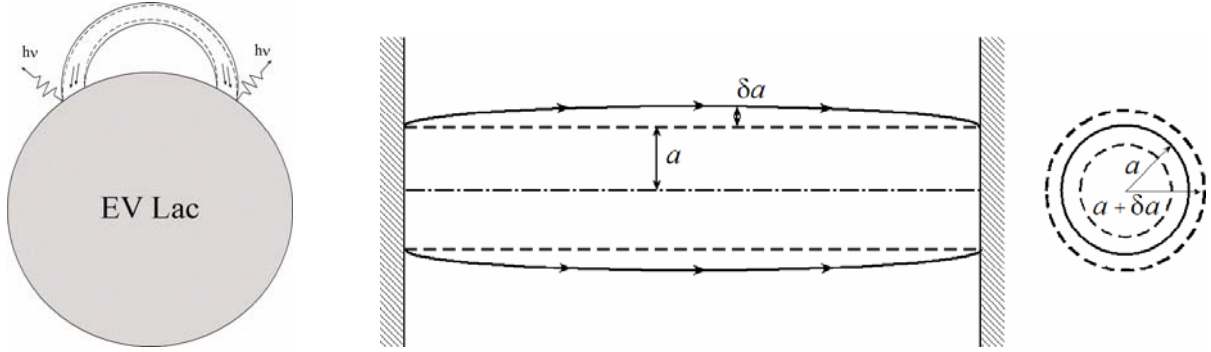
где  $j_0 \approx 2.4$  — первый ноль функции Бесселя  $J_0$ ,  $a$  — радиус поперечного сечения петли. Если  $k > k_c$ , возбуждаются безызлучательные моды, а при  $k < k_c$  — излучательные. Например, когда  $V_{Ae}/V_{Ai} = 3$ , положив  $k_c = \pi/L_c$ , из выражения (2) получим  $a/L_c \approx 0.3$ . Это предполагает, что в случае возбуждения безызлучательных мод звездные петли должны достаточно толстыми. В то же время наблюдения TRACE показывают [22], что солнечные корональные петли отличаются малым соотношением  $a/L \ll 0.1$ . Поэтому, на наш взгляд, за наблюдаемые осцилляции скорее ответственны излучательные моды, период которых [20]

$$P_{saus} = 2\pi a / (j_0 V_r), \quad V_r^2 = V_{Ai}^2 + c_{si}^2. \quad (3)$$

### Диагностика вспышечной плазмы

Пусть в корональной арке, которую можно представить в виде магнитной ловушки (коронального пробкотрона), вспышечное энерговыделение приводит к возбуждению БМЗ-колебаний корональных петель. Как показано выше, наиболее вероятно возбуждение глобальной излучательной моды радиальных колебаний, когда на длине петли

укладывается половина длины волны возмущения [21], а период определяется формулой (3) (см. рис.1).



**Рис.1.** Схематическое изображение модели пульсаций тормозного излучения на EV Lac (слева), глобальная мода радиальных колебаний корональной петли и связанные с ней осесимметричные вариации поперечных размеров петли (справа).

Поскольку в условиях корон Солнца и звезд плазменный параметр  $\beta = 8\pi p / B^2 \ll 1$ , то, следуя Зайцеву и Степанову [12], для амплитуды возмущения магнитного поля  $\delta B$ , обусловленного ростом газового давления  $p$  внутри петли, имеем

$$p + \frac{B\delta B}{4\pi} = 0, \quad (4)$$

где мы приняли  $B_z = B$ . Записывая уравнение (4) в виде

$$\beta = |2\delta B / B|, \quad (5)$$

приходим к важному выводу, что в рамках принятой модели относительная амплитуда возмущения  $\delta B / B$  определяется величиной параметра  $\beta$ .

Согласно [23], основной вклад в затухание БМЗ-колебаний корональных петель вносят ионная вязкость ( $\nu$ ) и электронная теплопроводность ( $c$ ), причем суммарный декремент затухания равен

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\nu} + \gamma_c = \frac{1}{12\sqrt{2}} \sqrt{\frac{M}{m}} \frac{\omega^2}{\nu_{ei}} \beta \sin^2 \theta \left( 1 + \sqrt{\frac{32M}{m}} \beta \cos^2 \theta \right). \quad (6)$$

Здесь  $M$  и  $m$  — массы иона и электрона,  $\theta = \arctg(k_{\perp} / k_{\parallel})$  — угол между направлением магнитного поля  $\mathbf{B}$  и волновым вектором  $\mathbf{k}$ , где продольное волновое число  $k_{\parallel} \approx \pi / L$ , в то время как поперечное  $k_{\perp} \approx j_0 / a$ . Эффективная частота столкновений электронов с ионами в (6) определяется следующим образом [12]

$$\nu_{ei} = \frac{5.5n}{T^{3/2}} \ln \left( 10^4 \frac{T^{2/3}}{n^{1/3}} \right) \approx 60 \frac{n}{T^{3/2}} \text{ c}^{-1}.$$

С учетом того, что добротность колебаний  $Q = \omega / \gamma_{\Sigma}$ , из соотношений (2) и (6) получим формулы для определения параметров вспышечной плазмы (температуры  $T$ , концентрации частиц  $n$  и магнитного поля  $B$ ) по периоду  $P = P_{saus}$  и добротности  $Q$ , а также плазменному параметру  $\beta$

$$T \approx 1.2 \times 10^{-8} \frac{\tilde{r}^2 \beta}{P^2 \chi}, \quad (7)$$

$$n \approx 3.49 \times 10^{-13} \frac{\tilde{r}^3 \kappa \beta^{5/2} Q \sin^2 \theta}{P^4 \chi^{3/2}}, \quad (8)$$



$$B \approx 3.81 \times 10^{-18} \frac{Q^{1/2} \tilde{r}^{5/2} \kappa^{1/2} \beta^{5/4} \sin \theta}{P^3 \chi^{5/4}}, \quad (9)$$

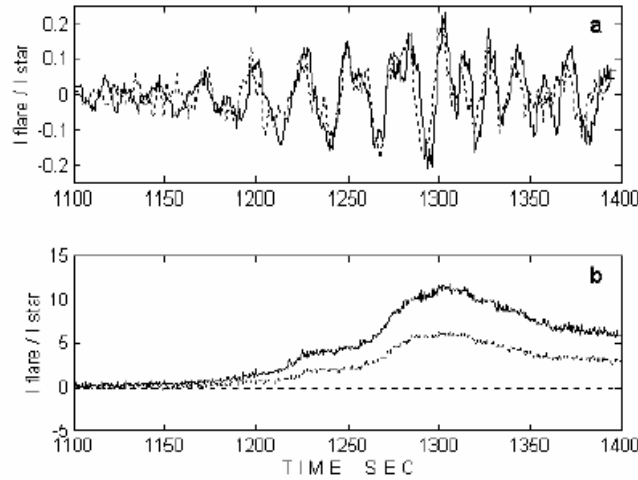
где  $\tilde{r} = 2\pi a / j_0$ ,  $\kappa = 243\beta \cos^2 \theta + 1$ .

Для того чтобы найти зависимость между глубиной модуляции оптического излучения, обусловленного потоком ускоренных электронов, «высыпающихся» в основаниях вспышечной петли

$$\Delta = (F_{\max} - F_{\min}) / F = 2\delta F / F, \quad (10)$$

где  $F_{\max} = F + \delta F$  и  $F_{\min} = F - \delta F$  — максимальный и минимальный потоки модулированного излучения, соответственно, и плазменным параметром  $\beta$ , будем исходить из модели коронального пробкотрона [24]. В рамках данного подхода вариации оптического излучения из оснований петли должны определяться изменением потока пролетных частиц  $S$ . При этом следует ожидать, что в случае достаточно мощных вспышек реализуется режим так называемой умеренной диффузии захваченных частиц в конус потерь [24, 25]. Согласно [25], поток пролетных электронов в режиме умеренной диффузии  $S \approx NV_a / (\sigma L)$ , где  $V_a$  — скорость ускоренных частиц,  $N$  — число захваченных частиц. Поскольку пробочное соотношение  $\sigma = B_{\max} / B$ , то  $S \approx \text{const} \sigma^{-1} \propto B$ . Откуда следует, что вариации потока пролетных электронов  $\delta S$  определяются изменениями магнитного поля корональной части петли и  $\delta S \propto \delta B$ , и значит  $\delta F / F \approx \delta S / S \approx \delta B / B$ . Откуда, согласно (5) и (10), для глубины модуляции  $\Delta$  получим

$$\Delta \approx \beta. \quad (11)$$



**Рис.2.** Верхний рисунок: колебания излучения EV Lac в полосе  $U$  (непрерывная линия) и  $B$  (точки) с периодом  $P \approx 13$  с, вспышка 11 сентября 1998 г. Нижний рисунок: кривая блеска в полосах  $U$  и  $B$ . Амплитуда в полосе  $B$  на обоих рисунках увеличена в 5 раз. Рисунок взят из работы Жилияева и др. [5].

Как следует из результатов наблюдений Жилияева и др. [9] для события 11.09.98 (рис.2)  $P \approx 13$  с,  $Q \approx 50$ ,  $\Delta \approx 0.2$ . Тогда, задавая  $a/L = 0.1$ , определяем  $\theta \approx \arctg(j_0 L / \pi a) \approx 76^\circ$ . С учетом этого, полагая  $\tilde{r} = 2.62a \approx 2.62 \times 10^9$  см, из (7)–(11) находим температуру плазмы  $T = 3.7 \times 10^7$  К, концентрацию частиц  $n = 1.6 \times 10^{11}$  см $^{-3}$ , магнитное поле  $B = 320$  Гс.

Особо подчеркнем, что в соответствии с принятой нами моделью характерная длина вспышечных петель на EV Lac  $L \approx 0.4R_*$ , тогда как на Солнце  $L \approx 0.01 R_\odot$ . Кроме того, если задать радиус петли  $a$  равным  $10^8$  или  $10^{10}$  см, из (7)–(11) получим либо

слишком заниженные ( $1.6 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ ), либо слишком завышенные ( $1.6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) значения концентрации  $n$ .

### Об источнике оптического излучения

Маллен и др. [13] предположили, что оптическое излучение вспышек может определяться тормозным излучением горячей плазмы корональной части петли. Между тем в рамках общепринятого сценария вспышек, источник оптического излучения должен быть локализован в области оснований петель. В связи с этим сделаем некоторые оценки.

Потоки тормозного излучения для оптически тонкого и оптически толстого источника соответственно можно представить в виде [14]

$$F_1 \propto \frac{n^2}{\sqrt{T}} V; \quad F_2 \propto TV, \quad (12)$$

где  $V \approx \pi a^2 L$  — объем излучающей области. Принимая во внимание уравнение адиабаты  $n^{3/2}/T = \text{const}$ , вместо (12) получим

$$F_1 \propto n^{5/4} V; \quad F_2 \propto n^{3/2} V. \quad (13)$$

Возбуждение БМЗ-колебаний приводит к изменению объема излучающей области вследствие вариаций радиуса петли  $a$ , поэтому

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{2\delta a}{a}. \quad (14)$$

В свою очередь, из условия сохранения продольного магнитного потока:  $Ba^2 = \text{const}$ , следует

$$\frac{\delta B}{B} = -\frac{2\delta a}{a}. \quad (15)$$

С учетом (15) уравнение (14) преобразуем к виду

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{\delta B}{B}. \quad (16)$$

Для БМЗ-мод имеет место следующая зависимость [26]

$$\frac{\delta n}{n} = \frac{\delta B}{B} \sin \theta, \quad (17)$$

и из (13), (16) и (17) получим

$$\frac{\delta F_1}{F_1} = (1.25 \sin \theta - 1) \frac{\delta B}{B}, \quad \frac{\delta F_2}{F_2} = (1.5 \sin \theta - 1) \frac{\delta B}{B}. \quad (18)$$

Таким образом, согласно (5) и (18), имеем

$$\Delta_1 \approx (1.25 \sin \theta - 1)\beta, \quad \Delta_2 \approx (1.5 \sin \theta - 1)\beta. \quad (19)$$

Подставляя в (7)–(9) те же значения параметров, что и в предыдущем случае, с помощью (19) находим: для оптически тонкого источника —  $T \approx 9 \times 10^7 \text{ К}$ ,  $n \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $B \approx 2000 \text{ Гс}$ , для оптически толстого —  $T \approx 6 \times 10^7$ ,  $n \approx 1.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $B \approx 850 \text{ Гс}$ , откуда находим значение плазменного параметра:  $\beta_1 \approx 0.9$ ,  $\beta_2 \approx 0.45$ .

Корональные петли с  $\beta \sim 1$  крайне неустойчивы по отношению к желобковым возмущениям [27]. Поэтому гипотеза Маллена и др. [13] о возможности локализации источника оптического излучения в корональной части петли представляется маловероятной.

### Обсуждение результатов и выводы

В представленной работе наблюдаемые десятисекундные квазипериодические осцилляции оптического излучения, обнаруженные в ходе вспышечного энерговыделения на EV Lac, мы связали с радиальными БМЗ-колебаниями корональных петель. Это дало нам возможность оценить основные параметры корональных петель по наблюдаемому периоду  $P$ , глубине модуляции  $\Delta$  и добротности  $Q$  пульсаций излучения. В рамках предложенной нами модели было показано, что гипотеза Маллена и др. [13], в соответствии с которой оптическое излучение звезд определяется горячей вспышечной плазмой самой петли, сталкивается с трудностями.

При проведении расчетов, основанных на аналогии между звездными и солнечными вспышками, мы положили отношение  $a/L \approx 0.1$ . В пользу правомерности такого подхода свидетельствуют результаты наблюдений мягкого рентгеновского излучения корон вспыхивающих звезд в двойных системах. Так, Шмитту и Фавате [28] благодаря наблюдательным данным, полученным на итальянской орбитальной станции ВерроSAX, удалось обнаружить в двойной системе Algol затмение вспышечной корональной плазмы компонента В компонентом А. Это позволило оценить характерные высоты  $h$  корональных петель. Оказалось, что  $h \leq 0.6R_*$ , что достаточно хорошо согласуется с нашими оценками длин петель на EV Lac ( $L \approx 0.4R_*$ ).

Согласно наблюдениям Жилиева и др. [9], глубина модуляции излучения в полосе  $U$  может в несколько раз превышать глубину модуляции в полосе  $B$ . По нашему мнению, это объясняется трансформацией энергии ускоренных частиц в тепловую, главным образом, в верхних слоях нижней атмосферы звезд. Это в свою очередь должно привести к увеличению роли сглаженных тепловых потоков в нагреве более глубоких и холодных нижних слоев.

Маллен и др. [13] для интерпретации наблюдаемых на красных карликах минутных осцилляций также исходили из модели, предложенной Зайцевым и Степановым [12]. Однако при этом считалось, что за модуляцию ответственны изгибные моды, возбуждение которых вследствие роста газового давления в петле выглядит довольно проблематичным. Также особо подчеркнем, что при анализе модели Маллена и др. [13] мы пренебрегли влиянием испаряющейся плазмы. Это объясняется тем, что характерное время заполнения петли горячей плазмой  $\tau$  значительно превышает период колебаний  $P$ . Действительно, принимая период  $P = 10 - 30$  с, длину петли  $L = 10^{10}$  см, а также считая скорость испаряющейся плазмы сравнимой со скоростью звука ( $V_e = (1 - 3) \times 10^7$  см/с), получим  $\tau \approx L/(2V_e) = 3 - 8$  мин, т.е.  $\tau \gg P$ .

В заключение хотелось бы отметить, что на наш взгляд, наблюдаемые в некоторых случаях минутные осцилляции оптического излучения вспыхивающих звезд с глубиной модуляции, не превышающей нескольких процентов, все же могут быть вызваны изгибными колебаниями петель. Например, их возбуждение можно связать с центробежной силой, возникающей в результате движения высокоскоростных потоков испаряющегося хромосферного вещества вдоль искривленных магнитных силовых линий. Более детально данный вопрос мы надеемся рассмотреть в следующей работе.

Работа поддержана РФФИ (грант 03-02-17218 и частично 03-02-17357), ГФЕН-РФФИ (грант 04-02-39029ГФЕН2004\_a), ГНТП «Астрономия», Программой Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии» и Программами ОФН-16, ОФН-18. Ю.Г. Копылова благодарит Администрацию Санкт-Петербурга за финансовую поддержку (грант PD04-1.9-35).

## Литература

1. *Гершберг П.Е.* Активность солнечного типа звезд Главной Последовательности, Одесса: Астропринт, 2002
2. *Hawley S.L., Fisher G.H., Simon T. et al.* *Astrophys. J.*, 1995, vol.453, p.464
3. *Neupert W.M.* *Astrophys. J.*, 1968, vol.153, p.59L
4. *Reale F.* Stellar Coronae in the Chandra and XMM–Newton Era, ASP Conference Series, Eds. Favata F., Drake J.J., San-Francisco, 2002, vol.277, p.103
5. *Mullan D.J.* *Astrophys. J.*, 1976, vol.204, p.530
6. *Mathioudakis M. et al.* *Astron. Astrophys.*, 2003, vol.403, p.1101
7. *Andrews A.D.* *Astron. Astrophys.*, 1990, vol.227, p.456
8. *Rodono M.* *Astron. Astrophys.*, 1974, vol.32, p.337
9. *Zhilyaev B.E., Romanyuk Ya.O., Verlyuk I.A. et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, vol.364, p.641
10. *Ionson J.* *Astrophys. J.*, 1984, vol.276, p.357
11. *Mullan D.J.*, *Astrophys. J.*, 1984, vol.282, p.603
12. *Зайцев В.В., Степанов А.В.*, Письма в Астрон. Журн., 1982, №8, с.248
13. *Mullan D.J., Herr R.B., Bhattacharyya S.* *Astrophys. J.*, 1992, vol.391
14. *Прухт Э.Р.* Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985
15. *Roberts B., Edwin P.M., Benz A.O.* *Astrophys. J.*, 1984, vol.279, p.857
16. *Hollweg J.V.* *Astrophys. J.*, 1984, vol.277, p.392
17. *Aschwanden M.J.* NATO Advanced Research Workshops. Eds. von Fay Siebenburgen R., Petrovy K., Roberts B., Aschwanden M.J., 2003, p.22
18. *Goossens M., De Groof A., Andries J.*, Proc. SOLMAG: Magnetic coupling of the solar atmosphere Euroconference and IAU Colloquium 188, ESA SP-505, 2002, p.137
19. *Roberts B.* Proc. of SOHO13 Waves, oscillations and small-scale transient events in the solar atmosphere: a joint view from SOHO and TRACE, ESA SP-547, 2004
20. *Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цан Ю.Т.* Письма в Астрон. Журн., 2002, т.28, с.870
21. *Nakariakov V.M., Melnikov V.F., Reznikova V.E.* *Astron. Astrophys.*, 2003, vol.412, L7
22. *Aschwanden M.J., Fletcher L., Schrijver C.J., and Alexander D.* *Astrophys. J.* 1999. vol.520. p.880
23. *Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цан Ю.Т. и др.* Письма в Астрон. Журн., 2004. т.30, с.530
24. *Stepanov A.V., Tsap Y.T.* *Solar Phys.*, 2002, vol.211, p.135
25. *Степанов А.В., Цан Ю.Т.* Астрон. Журн. 1999, т.76, с.949.
26. *Брагинский С.И.*, Вопросы теории плазмы, 1963, вып.1, с.183
27. *Shibasaki K.* *Astrophys. J.*, 2001, vol.557, p.326
28. *Schmitt J.H.M.M., Favata F.* *Nature*, 1999, vol.401, p.44
29. *Hain K., Lüst R.* *Z. Naturforsch.*, 1958, vol.13a, p.936
30. *Цан Ю.Т., Копылова Ю.Г.* Письма в Астрон. Журн., 2001, т.27, с.859

## Приложение

Для проведения анализа сжимаемости плазмы, вызванной изгибными модами, мы будем моделировать корональную петлю в виде осесимметричной магнитной трубки с  $\mathbf{B}_0 = (0, 0, B_z(r))$ . Предположим, что под действием некоторой внешней силы система была выведена из состояния равновесия, т.е.  $\mathbf{v} = \mathbf{v}'$ ,  $\rho = \rho_0 + \rho'$ ,  $p = p_0 + p'$ ,  $\mathbf{B} = B_z \mathbf{e}_z + \mathbf{B}'$ , где использованы стандартные обозначения, а нижний индекс и штрих обозначают соответственно равновесные и возмущенные величины, причем, последние

пропорциональны  $\delta f(r) \exp(-i\omega t + in\varphi + ikz)$ . Тогда, линеаризованная система уравнений идеальной МГД сводится к виду

$$-i\omega\rho_0\delta v_r = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\delta p + \frac{\delta B_z B_z}{4\pi}\right) + \frac{ikB_z}{4\pi}\delta B_r, \quad (1\Pi)$$

$$-i\omega\rho_0\delta v_\varphi = -\frac{in}{r}\left(\delta p + \frac{\delta B_z B_z}{4\pi}\right) + \frac{ikB_z}{4\pi}\delta B_\varphi, \quad (2\Pi)$$

$$\omega\rho_0\delta v_z = k\delta p, \quad (3\Pi)$$

$$\delta B_r = -\frac{kB_z}{\omega}\delta v_r, \quad (4\Pi)$$

$$\delta B_\varphi = -\frac{kB_z}{\omega}\delta v_\varphi, \quad (5\Pi)$$

$$-i\omega\delta B_z = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}rB_z\delta v_r - \frac{inB_z}{r}\delta v_\varphi, \quad (6\Pi)$$

$$-i\omega\delta p = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\rho_0\delta v_r + \frac{in}{r}\rho_0\delta v_\varphi + ik\rho_0\delta v_z, \quad (7\Pi)$$

$$\delta p = c_s^2\delta\rho, \quad (8\Pi)$$

где  $c_s^2 = \gamma p_0 / \rho_0$  — скорость звука. В частности, когда  $s_r = s_z = 0$ , амплитуда возмущения полного давления  $\delta P = \delta p + \delta B_z B_z / (4\pi)$ , и из (1\Pi)–(8\Pi) легко вывести дисперсионное уравнение для винтовых мод  $\omega = kV_A$ .

В общем случае из уравнений (1\Pi)–(8\Pi) следует система уравнений, впервые полученная Хайном и Люстом [29]

$$-i\rho_0(\omega^2 - k^2V_A^2)\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\delta v_r) = \omega\left(\mu^2 - \frac{n^2}{r^2}\right)\delta P, \quad (9\Pi)$$

$$\omega\frac{\partial\delta P}{\partial r} = i\rho_0(\omega^2 - k^2V_A^2)\delta V_r, \quad (10\Pi)$$

где  $V_A = \sqrt{B_z^2 / (4\pi\rho_0)}$  — альфвеновская скорость,

$$\mu^2 = \frac{(k^2c_s^2 - \omega^2)(\omega^2 - k^2V_A^2)}{(V_A^2 + c_s^2)(k^2c_T^2 - \omega^2)}, \quad c_T^2 = \frac{V_A^2}{V_A^2 + c_s^2}. \quad (11\Pi)$$

Согласно (2\Pi) и (5\Pi), имеем

$$\delta v_\varphi = \frac{n\omega\delta P}{r\rho_0(k^2V_A^2 - \omega^2)}. \quad (12\Pi)$$

Как следует из (3\Pi) и (8\Pi)

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \frac{\omega}{kc_s} \frac{\delta v_z}{c_s}. \quad (13\Pi)$$

Тогда, используя (7\Pi), (9\Pi), (12\Pi) и (13\Pi), находим

$$\delta v_z = \frac{kc_s^2\omega}{\rho_0} \frac{\delta P}{(V_A^2 + c_s^2)(k^2c_T^2 - \omega^2)}. \quad (14\Pi)$$

С учетом (9\Pi) и (14\Pi), из (13\Pi) получим

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = ir \frac{\omega(\omega^2 - k^2V_A^2)\delta P}{(V_A^2 + c_s^2)(k^2c_T^2 - \omega^2)(\mu^2 r^2 - n^2)} \frac{\partial}{\partial r}(r\delta v_r). \quad (15\Pi)$$

Дисперсионное уравнение для изгибных мод ( $n = 1$ ) имеет вид [30]

$$\omega^2 = k^2 \frac{\rho_i V_{Ai}^2 + \rho_e V_{Ae}^2}{\rho_i + \rho_e}. \quad (16\Pi)$$

Поскольку в условиях солнечной короны плазменное  $\beta \approx c_s^2 / V_A^2 \ll 1$ ,  $\rho_i \gg \rho_e$ , и, кроме того, внутри петли  $v_{ri} \propto r$  [30], согласно (15\Pi) и (16\Pi), находим

$$\left| \frac{\delta\rho_i}{\rho_i} \right| \approx (kr) \frac{\delta v_r}{V_f}, \quad (17\Pi)$$

где  $V_f \approx \omega/k \approx V_{Ai}$ . Для изгибных мод  $ka \ll 1$ , поэтому, согласно (17\Pi), амплитуда плотности внутри петли  $\delta\rho$  будет иметь второй порядок малости относительно невозмущенной плотности  $\rho_i$ .

С помощью (3\Pi) и (6\Pi)–(8\Pi) нетрудно получить следующее равенство

$$\frac{\delta B_z}{B_z} = \frac{\omega^2 - k^2 c_s^2}{\omega k c_s^2} \delta v_z. \quad (18\Pi)$$

Тогда, согласно (4\Pi), (10\Pi), (14\Pi) и (18\Pi), имеем

$$\frac{\delta B_z}{\delta B_r} = \frac{\omega^2 - k^2 V_A^2}{k V_A^2} \frac{\delta P}{\delta P'}, \quad (19\Pi)$$

где  $\delta P' = \partial \delta P / \partial r$ . Так как  $\delta P / \delta P' \approx r$  [30], из (16\Pi) и (19\Pi) получим

$$\frac{\delta B_z}{\delta B_r} \approx kr. \quad (20\Pi)$$

Рассуждая аналогичным образом, нетрудно показать, что  $\delta B_\phi / \delta B_r \sim 1$ . Следовательно, для внутренней части петли ( $r \leq a$ ) из (20\Pi) получим:  $\delta B_z \ll \delta B_r, \delta B_\phi$ .

## ON THE NATURE OF OSCILLATIONS OF RADIATION OF FLARE STARS AND CORONAL LOOPS DIAGNOSTICS

**Kopylova Yu.G., Kupriyanova E.G., Stepanov A.V., and Tsap Yu.T.**

### *Summary*

*On the basis of the analogy between solar and stellar flares, the oscillations with periods of tens of seconds observed on the EV Lac in the U and B bands were analyzed. We associated the pulsations of radiations with the fast magnetoacoustic oscillations of coronal arcs. In terms of the diagnostic tool proposed in [12] the magnetic field  $B \approx 320$  G, temperature  $T \approx 3.7 \times 10^7$  K, and number density  $n \approx 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  in the region of the flare energy release were estimated. Arguments in favor of localization of the source of optical radiation at loop footpoints were obtained.*

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ КОЛЕБАНИЙ КОРОНАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ АРКИ

**Копылова Ю.Г., Мельников А.В.**

*Проведено исследование дисперсии и акустического затухания быстрых магнитозвуковых колебаний магнитных трубок в условиях солнечной короны. Решение дисперсионного уравнения, содержащего цилиндрические функции комплексного аргумента, проводилось численно. Полученные результаты обобщают имеющиеся представления о модах колебаний однородных петель: выделены области возбуждения мод с излучением и без излучения МГД волн, сделаны оценки значений периодов и добротностей колебаний.*

### Введение

Колебательные и волновые процессы — неотъемлемый атрибут динамики солнечной атмосферы. Наблюдения Солнца в различных волновых диапазонах довольно часто обнаруживают пульсации излучения различных временных масштабов. В последнее время после запусков космических аппаратов SOHO, TRACE, RHESSI появилось достаточно много указаний на то, что за пульсации излучения ответственны магнитогидродинамические (МГД) колебания корональных арок [1,2].

Наиболее эффективно модулируют излучение радиальные быстрые магнитозвуковые (БМЗ) колебания (мода типа перетяжек), характерный период которых составляет несколько секунд. Согласно наблюдениям добротность секундных пульсаций излучения может сильно различаться: иногда наблюдается всего лишь несколько пульсаций [3,4], но иногда секундные пульсации в микроволновом излучении продолжаются минуты и даже часы [5,6]. Запущенные космические аппараты дали возможность исследовать верхние слои солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением. Это позволило обнаружить низкодобротные квазипериодические смещения солнечных корональных арок (петель), отождествленные в [1] с изгибной БМЗ модой. Амплитуда наблюдавшихся на TRACE изгибных колебаний уменьшалась более чем на 50% в течение всего нескольких периодов [1]. Не исключено, что сильное затухание колебаний корональных петель с плазменным параметром  $\beta < 0.1$  вызвано потерями энергии колеблющейся трубки на излучение МГД волн в окружающую среду (акустический механизм затухания) [7–9]. Поэтому важной задачей является определение условий, при которых радиальные и изгибные колебания обладают высокой или низкой добротностью.

Решение дисперсионного уравнения колебаний магнитной трубки получено численно Эдвином и Робертсом [10] лишь для мод без излучения. Такой подход приводит к наложению дополнительных условий на параметры корональных петель, в которых способна возбудиться глобальная мода типа перетяжек. А именно, либо радиус поперечного сечения петли  $a$  должен быть сравним с длиной петли  $L$  («толстая» петля), либо плотность плазмы внутри арки  $\rho_i$  должна более чем на два порядка превосходить плотность плазмы  $\rho_e$  снаружи [11]. В то же время наблюдения TRACE показывают [1,11], что корональные петли обычно отличаются малым соотношением  $a/L \leq 0.1$ . Нельзя исключить и возможность того, что «толстые» петли состоят из множества тонких плазменных жгутов. Отношения плотностей для петель активных областей  $\rho_i / \rho_e \leq 10^2$  и только в случае мощных вспышек может превышать это значение.

Кэлли [12] провел более полный, чем Эдвин и Робертс [10], анализ дисперсионного уравнения: численно были рассмотрены как излучательные, так и безызлучательные

моды однородной трубки и проведена их классификация. Однако дисперсионные кривые для корональных петель приведены лишь для изгибных мод, а сопоставления с кривыми, полученными Эдвином и Робертсом [10], не было проведено. Кроме того, результаты [12] представлены в виде, малоприспособленном для интерпретации наблюдений. Позднее Диаз и др. [13] численно рассмотрели колебания однородной магнитной трубки с концами, закрепленными в нижней хромосфере, но анализ ограничивался одной ветвью радиальных и изгибных мод, в то время как по классификации Кэлли [12] в трубке могут возбуждаться семь различных типов изгибных колебаний. Стенуит и др. [14] рассмотрели колебания трубки с неоднородным распределением плазмы по сечению трубки и показали, что вид дисперсионных кривых по сравнению со случаем однородной трубки заметно не меняется. Для объяснения затухания колебаний в работе [15] на основе результатов, полученных в работе Эдвина и Робертса [10], построена двухсоставная модель магнитной трубки, состоящей из плотного шнура и разреженной оболочки.

Несмотря на результаты, полученные в перечисленных выше работах [10–14], излучательные моды колебаний корональных арок до сих пор зачастую исключают из рассмотрения. Так, например, принимая во внимание лишь моды без излучения, Ашванден и др. [11] пришли к выводу, что большинство наблюдений короткопериодических пульсаций излучения, ранее отождествленных с радиальными колебаниями корональных арок, не связаны с ними, либо модуляцию вызывают радиальные колебания малого участка петли. В работе [11] подвергнута также сомнению точность оценки периода радиальных колебаний по формуле, полученной Зайцевым и Степановым [3,7], в которой значения периода определяется поперечными размерами петли.

Цель данной работы — провести исследование дисперсионного уравнения малых радиальных и изгибных колебаний магнитной трубки и численно получить его общее решение, тем самым выявить отличия в поведении излучательных мод от мод не подверженных акустическому затуханию. Необходимо также определить с какой точностью и при каких условиях можно применять для оценки периода радиальных колебаний выражение, полученное в работах [3,7].

На основе анализа спектра колебаний однородной плотной магнитной трубки будет показано, что такая простая модель дает качественное объяснение сильного затухания наблюдаемых TRACE изгибных колебаний корональных петель.

В работе будут построены зависимости добротности  $Q$  и периода  $P$  радиальных и изгибных колебаний для различных мод от параметра  $ka \approx \pi a / L$ , где  $k$  — продольное волновое число. Так как  $Q$  и  $P$  достаточно легко определяются из наблюдений, полученные нами результаты позволят определить моду колебаний магнитной трубки и провести диагностику плазмы.

### Дисперсионное уравнение

Рассмотрим в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  колеблющуюся осесимметричную магнитную трубку с магнитным полем  $\mathbf{B} = (0, 0, B(r))$ , плотностью плазмы  $\rho(r)$  и газовым давлением  $p(r)$ . Возмущения равновесных величин представим в виде:  $\delta\zeta(r)\exp(-i\omega t + im\varphi + ikz)$ . После линеаризации система уравнений идеальной магнитной гидродинамики в приближении тонкой магнитной трубки сводится к уравнению Бесселя относительно возмущения полного давления  $\delta P = \delta p + \frac{\delta B B}{4\pi}$  [3,9,10,16]



$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \delta P}{\partial r} \right) - \left( \frac{m^2}{r^2} - \mu^2 \right) \delta P = 0, \quad (1)$$

где

$$\mu^2 = \frac{(k^2 c_s^2 - \omega^2)(\omega^2 - k^2 V_A^2)}{(V_A^2 + c_s^2)(k^2 c_T^2 - \omega^2)}, \quad c_T^2 = \frac{V_A^2}{V_A^2 + c_s^2}, \quad (2)$$

$V_A = B / \sqrt{4\pi\rho}$  — альфвеновская скорость,  $c_s \approx \sqrt{5\rho/3\rho}$  — скорость звука. Полагая продольное волновое число  $k$  вещественным, частоту  $\omega$  будем считать комплексной величиной [17].

Решения уравнения (1) для внутренней ( $i$ ) и внешней ( $e$ ) части трубки имеют вид [7,9]

$$\delta P_i = A_1 J_m(\mu_i r), \quad \delta P_e = A_2 H_m^{(1)}(\mu_e r), \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — произвольные константы,  $J_m(\mu_i r)$  и  $H_m^{(1)}(\mu_e r)$  — функции Бесселя и Ханкеля 1-го рода порядка  $m$ , соответственно. Следует отметить, что функции Ханкеля даже от действительного аргумента имеют мнимую часть, так как  $H_m^{(1)}(x) = J_m(x) + iY_m(x)$ , где  $Y_m(x)$  — функция Неймана.

Из условий непрерывности возмущений полного давления и радиальной скорости на границе трубки ( $r = a$ ) следует дисперсионное соотношение для мод колебаний магнитной трубки [10,16]

$$\rho_e (\omega^2 - k^2 V_{Ae}^2) \mu_i \frac{J'_m(\mu_i a)}{J_m(\mu_i a)} - \rho_i (\omega^2 - k^2 V_{Ai}^2) \mu_e \frac{H'_m(\mu_e a)}{H_m(\mu_e a)} = 0. \quad (4)$$

В общем случае аргумент цилиндрических функций в (4) — комплексный, из-за входящей в выражение (2), для определения  $\mu^2$ , комплексной частоты  $\omega = \omega_0 - i\gamma$ . Вещественная часть частоты  $\omega_0$  определяет дисперсию фазовой скорости и период колебаний, а ее мнимая часть  $\gamma$  — затухание колебаний, связанное с излучением МГД волн в окружающее магнитную трубку пространство ( $\gamma \ll \omega_0$ ). Заметим, что выбор в качестве решения уравнения Бесселя (1) во внешней области функций Ханкеля обусловлен тем, что они единственные из цилиндрических функций стремятся к нулю при стремлении их комплексного аргумента к бесконечности. Поэтому решение уравнения (4) должно выявить наличие как излучательных, так и безызлучательных мод.

Ввиду невозможности получения точного аналитического решения трансцендентного дисперсионного уравнения (4), при его анализе обычно прибегают к приближениям: разложениям в ряд при малом аргументе или используют асимптотическое поведение цилиндрических функций при стремлении аргумента к бесконечности, что может приводить к некорректным выводам. Так авторы работы [9] ограничились первым членом разложения цилиндрических функций в ряд и сделали вывод об отсутствии затухания изгибных колебаний. Однако этот результат справедлив лишь в рамках принятых в [9] ограничений:  $|\mu a| \ll 1$ . Общее решение дисперсионного уравнения может быть получено только численными методами.

Эдвин и Робертс [10] численно решили дисперсионное уравнение колебаний магнитной трубки в условиях солнечной короны, но в ходе рассмотрения они полагали  $\mu_e^2 < 0$ , считая тем самым аргументы цилиндрических функций мнимыми величинами. В этом случае решение уравнения Бесселя (1) для внешней области трубки выражается через функцию Макдональда  $K_m(\mu_e a)$ , поведение которой в отличие от функции Ханкеля  $H_m^{(1)}(\mu_e a)$  носит не осциллирующий, а монотонный характер. Соответствующие

решения (4) описывают колебания магнитной трубки, не приводящие к излучению волн. Фазовая скорость таких мод не должна превышать альфвеновскую скорость снаружи трубки, иначе условие мнимости аргумента  $\mu_e a$  будет нарушено.

Так как  $K_m(z) = \frac{\pi}{2} i^{m+1} H_m^{(1)}(iz)$ , то, очевидно, решение уравнения (4) включает в себя описанные в работе Эдвина и Робертса [10] безызлучательные моды, как частный случай при мнимом аргументе  $\mu_e a$ . Поэтому для обобщения полученных ранее результатов необходимо получить численное решение дисперсионного уравнения (4) с комплексными аргументами функций Бесселя и Ханкеля.

## Моды колебаний корональной трубки

### Радиальные колебания

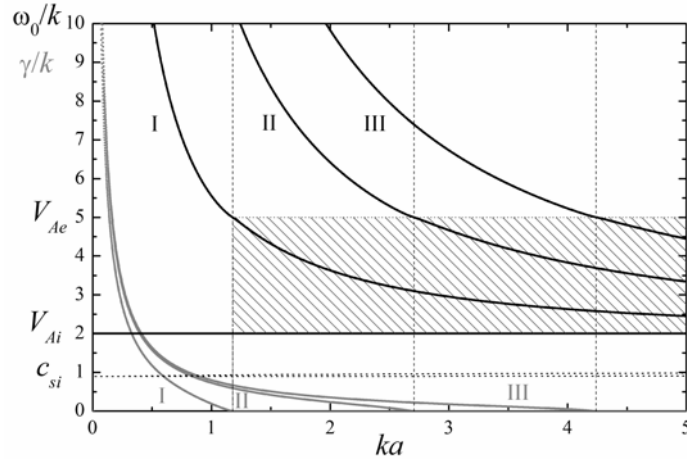
Симметричным радиальным колебаниям магнитной трубки (sausage modes) соответствует  $m = 0$  в уравнении (4). Представим частоту радиальных колебаний в виде  $\omega = \omega_0 - i\gamma$ , где  $\gamma$  — декремент затухания из-за излучения МГД волн в окружающее пространство. При таком представлении частоты аргументы функций Бесселя и Ханкеля, как следует из (2), также становятся комплексными величинами. Приравнявая действительные и мнимые части уравнения (4) к нулю, получим систему двух вещественных уравнений относительно неизвестных  $\omega_0/k$  и  $\gamma/k$ . Полученная система уравнений решалась нами численно с помощью программы, написанной на языке FORTRAN с использованием библиотеки подпрограмм IMSL. Величина шага по  $ka$  была положена равной 0.001, локальная точность решения системы уравнений равной  $10^{-7}$ .

Для того чтобы сопоставить наши результаты с существующим численными решениями, полученными Эдвином и Робертсом [10] для мод без излучения, были взяты те же соотношения между характерными значениями скоростей в солнечной короне:  $c_{se} = 0.5c_{si}$ ,  $V_{Ai} = 2c_{si}$ ,  $V_{Ae} = 5c_{si}$ , что предполагает  $\rho_i / \rho_e \approx 5$  при  $B_i \approx B_e$ .

Полученные нами решения уравнения (4) представлены на рис.1, где построены зависимости  $\omega_0/k$  и  $\gamma/k$  от параметра  $ka$  для трех первых гармоник радиальных БМЗ мод. На рис.1 также нанесены: альфвеновская мода, для которой  $\omega_0/k = V_{Ai}$ ,  $\gamma/k = 0$ , и две медленные магнитозвуковые моды (как отмечено в работе Эдвина и Робертса [10], этих мод бесконечно много).

Подобным образом решение (4) было проведено Кэлли [12], но дисперсионные кривые были построены лишь для изгибных мод колебаний корональных петель (см. рис.3 в [12]). В отличие от работы Кэлли [12] наш анализ не ограничен нахождением и классификацией колебательных мод, далее нами будут получены оценки значений периодов и добротностей колебаний — наиболее легко определяемых из наблюдений параметров.

Дисперсионные кривые радиальных БМЗ волн в области  $V_{Ai} < \omega_0/k < V_{Ae}$ , полностью совпадают с кривыми, построенными Эдвином и Робертсом [10] для мод без излучения. Как и следовало ожидать, акустическое затухание в этой области отсутствует ( $\gamma = 0$ ).



**Рис.1.** Дисперсионные кривые для радиальной моды. Сплошные линии соответствуют БМЗ волнам (показаны первые три гармоники). Прямая  $\omega_0/k = V_{Ai}$  представляет собой альфвеновскую волну. Штриховой линией обозначены две медленные магнитозвуковые волны (их бесконечно много [10]). Заштрихованная область соответствует решениям без излучения, полученным ранее Эдвином и Робертсом (см. рис.4 в [10]).

Критическое значение продольного волнового числа, отделяющего излучательные моды от безизлучательных, определяется условием:  $k_c = \omega_0/V_{Ae}$ . Для мод без излучения  $\omega = \omega_0$ , тогда из (2) имеем  $\mu_e = 0$ . Существование решения (4) предполагает  $J_0(\mu_i a)|_{k=k_c} = 0$ , откуда следует выражение для определения  $k_c$  [4,10,16,18]

$$k_c = \left[ \frac{(c_{si}^2 + V_{Ai}^2)(V_{Ae}^2 - c_T^2)}{(V_{Ae}^2 - V_{Ai}^2)(V_{Ae}^2 - c_{si}^2)} \right]^{1/2} \left( \frac{\eta_n}{a} \right), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

где  $\eta_n$  представляет собой  $n$ -ый нуль функции Бесселя  $J_0(\eta)$ . Если  $k \geq k_c$ , то возбуждаются моды без излучения, при  $k < k_c$  — излучательные моды.

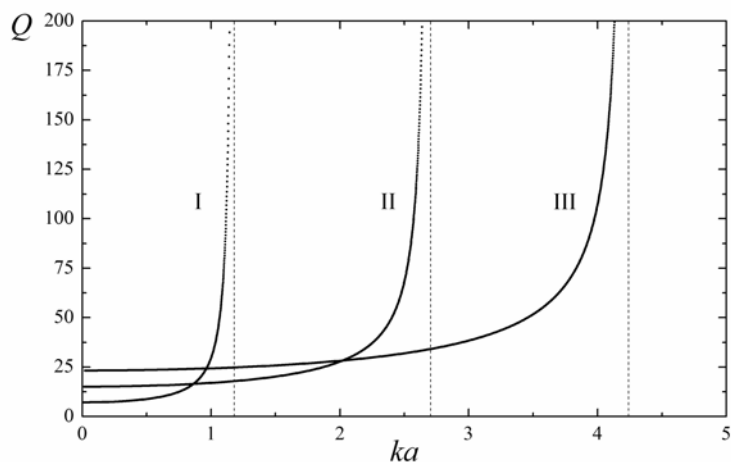
В случае возбуждения в трубке стоячей МГД волны, продольное волновое число  $k \approx \pi N/L$ , где  $N$  — число длин полуволн. Когда  $N = 1$ , то в колебательном процессе участвует вся петля, а все ее участки колеблются синфазно (глобальная мода). Если же число узлов велико и  $N \gg 1$ , модулируемое излучение будет «замываться». Поэтому объяснить наблюдаемые осцилляции излучения, глубина модуляции которых иногда превышает 50%, возбуждением таких колебаний проблематично.

Недавние наблюдения на радиогелиографе NoRH вспышки 12.01.2000 [18] показали синхронность пульсаций излучения на частоте 34 ГГц с периодом порядка 10 с, идущего из разных ног петли и из ее вершины. Это является важным свидетельством возможности возбуждения глобальных колебаний петли.

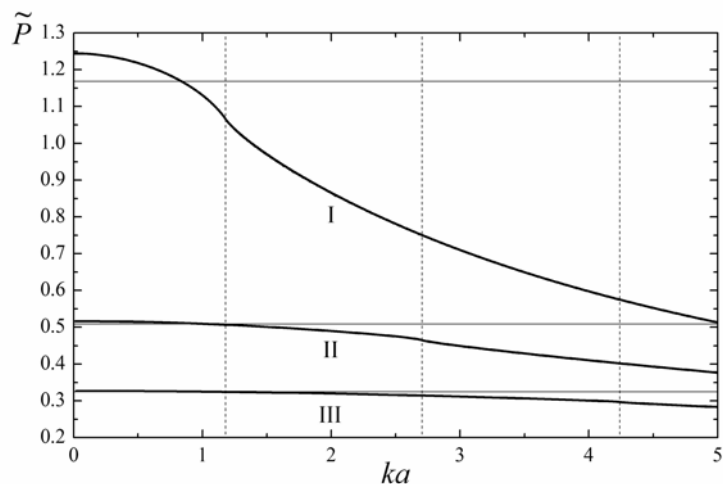
Считая плазменный параметр  $\beta \ll 1$  и  $k \approx \pi/L$ , и исключив из рассмотрения возможность возбуждения излучательных мод — полагая  $k \geq k_c$ , Ашванден и др. [11] пришли к выводу, что первая гармоника глобальной моды радиальных колебаний петли может возникнуть лишь в тех петлях, где  $L/a < 0.65(\rho_i/\rho_e)^{1/2}$ . Высокая добротность пульсаций в событии 12.01.2000, большие значения плотности плазмы во вспышечной петле  $\rho_i \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  и отношения  $a/L \approx 1/8$ , свидетельствуют о том, что радиальные безизлучательные моды вызвали модуляцию излучения. Но за большинство секундных пульсаций, рассмотренных Ашванденом и др. [11] (см. Табл.1 в их работе), отличавшихся  $\rho_i/\rho_e \leq 10$ , по нашему мнению, могут быть ответственны излучательные радиальные моды.

Полученные нами зависимости добротности радиальных БМЗ колебаний  $Q = \omega_0 / \gamma$  и их относительного периода  $\tilde{P}$ , связанного с периодом соотношением  $P = \tilde{P}a / c_{si}$ , от параметра  $ka$  приведены на рис.2 и рис.3, соответственно.

Добротность колебаний является параметром, который наряду со значением периода и глубины модуляции можно сравнительно легко оценить из наблюдений:  $Q \approx \pi s$ , где  $s$  — число пульсаций излучения.



**Рис.2.** Добротность радиальных БМЗ колебаний. Вертикальные штриховые линии соответствуют величине  $k = k_c$ , определяемой по формуле (5) для  $n = 1, 2, 3$ .



**Рис.3.** Относительный период радиальных БМЗ колебаний  $\tilde{P} = Pc_{si}/a$ . Прямые горизонтальные линии соответствуют оценкам периода, сделанным по формуле (6). Вертикальные штриховые линии соответствуют величине  $k = k_c$ , определяемой по формуле (5) для  $n = 1, 2, 3$ .

Для оценки периода радиальных колебаний с излучением МГД волн, Зайцевым и Степановым [3,7] получено выражение

$$P = \frac{2\pi a}{\eta_n \sqrt{c_{si}^2 + V_{Ai}^2}}, \quad (6)$$

где значения  $\eta_n$  соответствуют нулям функции Бесселя  $J_0(\eta)$ . На Рис.3 мы нанесли значения периода, посчитанные по формуле (6), для первых трех гармоник радиальных БМЗ мод ( $\eta_n \approx 2.40, 5.52, 8.65$ ).

Из рисунка видно, что для излучательных мод выражение (6) является достаточно хорошей аппроксимацией построенных кривых. Для гармоник более высоких, чем первая, формулой (6) можно пользоваться и для расчета периода мод без излучения. Выражение (6) может привести к некорректным выводам лишь для основной гармоники безызлучательной глобальной моды, когда  $\omega_0 < kV_{Ae}$ .

Последние наблюдения TRACE в ультрафиолетовом диапазоне [1,11] показывают, что диаметр корональной петли на один–два порядка меньше ее длины  $a/L < 0.1$ . Согласно (5), это означает, что наиболее вероятно возбуждение радиальной моды с излучением МГД волн, поэтому применение (6) в большинстве случаев оправдано.

Если плазменный параметр  $\beta \leq 0.1$ , что характерно для большинства корональных петель за исключением вспыхивающих, то добротность радиальных колебаний петлей определяется скорее акустическим механизмом, нежели другими диссипативными процессами [8]. Поэтому, определив добротность и период пульсаций по временному профилю излучения, с помощью рис.2 и 3 мы можем выяснить, какая именно мода и гармоника радиальных колебаний вызвала модуляцию.

### **Изгибные колебания**

В корональных магнитных петлях помимо радиальных колебаний возбуждаются и другие моды, в частности изгибные (kink modes), которым соответствует  $m = 1$  в уравнении (4). Изгибные моды практически не сжимают плазму [19], поэтому они менее подвержены акустическому затуханию и их вклад в модуляцию излучения менее значителен. Надежным подтверждением возбуждения изгибных колебаний являются прямые наблюдения квазипериодических смещений петель, обнаруженные с помощью спутника TRACE [1,11]. Основной особенностью изгибных колебаний является их низкая добротность, причина которой дискутируется в литературе.

Опираясь на результаты работы Эдвина и Робертса [10], авторы работ [15,20] пришли к выводу, что однородная петля не является источником излучения МГД волн в окружающую среду. Для того чтобы объяснить сильное затухание наблюдаемых на TRACE колебаний, в [15,20] построена двухсоставная модель корональной петли с плотным и горячим ядром, окруженным разреженной оболочкой с плотностью меньшей корональной. В то же время, как было показано выше, решение, полученное в [10], является частным случаем решения дисперсионного уравнения (4). Поэтому необходимо выяснить, может ли более простая модель однородной трубки дать ответ о причине низкой добротности изгибных колебаний.

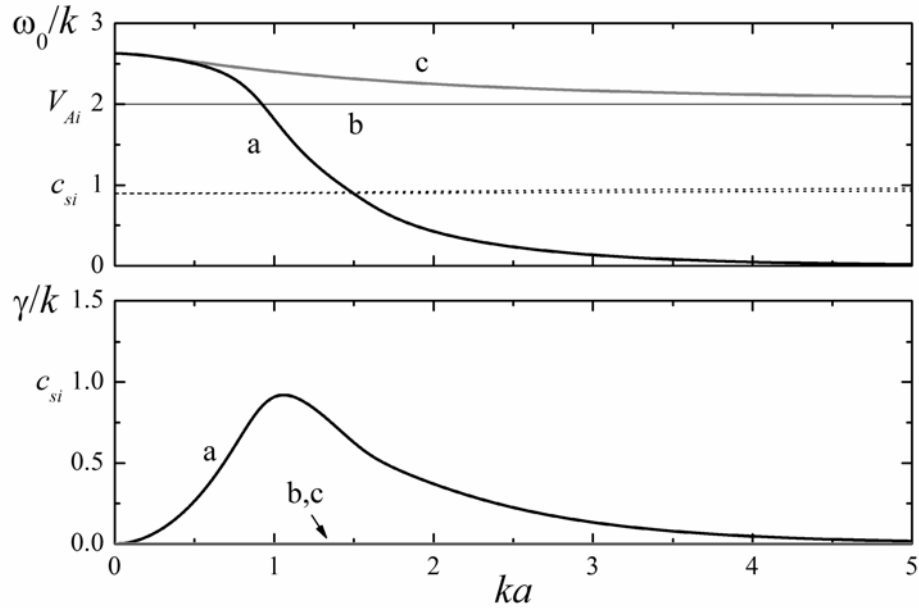
Численное решение уравнения (4) проведем аналогично случаю возбуждения радиальных колебаний и выберем те же соотношения для характерных скоростей  $c_{si}$ ,  $c_{se}$ ,  $V_{Ai}$ ,  $V_{Ae}$ . Ввиду того, что изгибных мод больше чем радиальных, результаты расчёта дисперсионных кривых мы представили на двух рисунках, разделяя ветви колебаний по их частоте.

На рис.4 представлены три моды изгибных колебаний, как видим только мода «а» является излучательной. Полученная нами зависимость декремента затухания моды «а» от параметра  $ka$  подобна полученной в работе [15] для изгибной моды двойной трубки. Акустическое затухание альфвеновской моды «b» отсутствует, так как она не сжимает плазму и потому не может излучать МГД волны. Мода «с» также незатухающая. Она была обнаружена Эдвином и Робертсом [10] при исследовании безызлучательных мод (см. рис.4 в их работе). На рис.4 нанесены также две медленные магнитозвуковые моды.

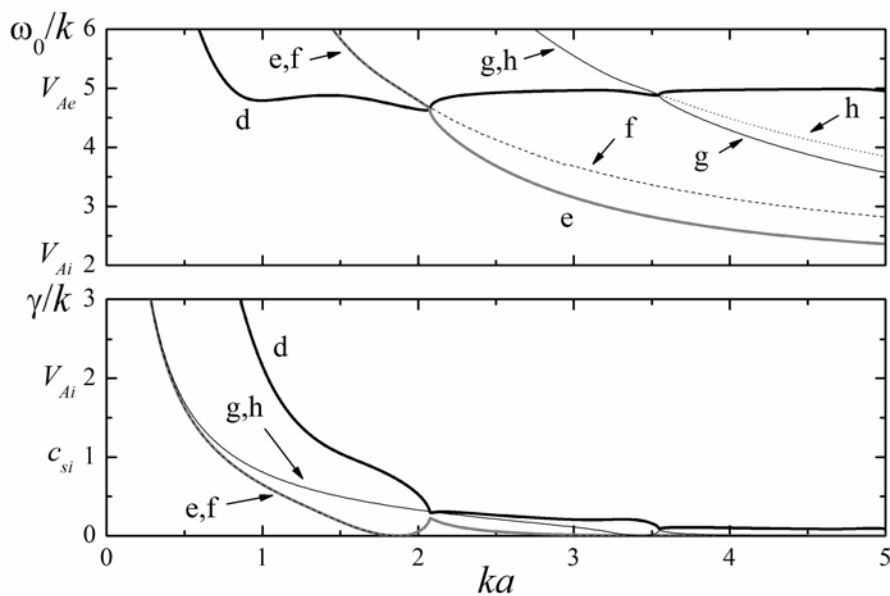
Рассмотрим поведение мод «а» и «с» при  $ka \rightarrow 0$ . Для  $\omega_0^2/k^2 > V_{Ai}^2$  (кривые на рис.4, лежащие выше альфвеновской моды «б») имеем  $|\mu_i a| \approx \omega_0 a / V_{Ai} \ll 1$ , при этом дисперсионное соотношение (4) для изгибных мод сводится к виду [9,10,16]

$$\frac{\omega_0^2}{k^2} = \frac{\rho_i V_{Ai}^2 + \rho_e V_{Ae}^2}{\rho_i + \rho_e}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) параметры  $V_{Ai} = 2c_{si}$ ,  $V_{Ae} = 5c_{si}$ , использовавшиеся нами для построения дисперсионных кривых, находим  $\omega_0/k \approx 2.62c_{si}$ , что соответствует поведению мод «а» и «с» при  $ka \rightarrow 0$ , изображенному на рис.4.



**Рис.4.** Дисперсионные кривые для низкочастотных БМЗ изгибных колебаний (непрерывные линии). Штриховой линией обозначены две медленные магнитозвуковые моды (их бесконечно много [10]).



**Рис.5.** Дисперсионные кривые для высокочастотных БМЗ изгибных колебаний.

На рис.5 приведены еще 5 ветвей изгибных колебаний (при дальнейшем увеличении  $ka$  появляются новые гармоники колебаний, типа мод «e», «g» и «f», «h»). При больших значениях  $ka$ , когда  $\omega_0/k < V_{Ae}$ , мода «f» и её гармоника «h» являются незатухающими, а при возбуждении моды «e» и её гармоники «g» петля излучает МГД волны, хотя при этом декремент затухания невелик. С уменьшением  $ka$  при  $\omega_0/k \approx V_{Ae}$  моды «e» и «f» («g» и «h») объединяются в точке бифуркации в одну излучательную моду (это явление было обнаружено и подробно изучено Кэлли [12]). Мода «d» при больших  $ka$  имеет фазовую скорость  $\omega_0/k \approx V_{Ae}$  и малое затухание, т.е. похожа на обычную альфвеновскую волну.

Полученные нами зависимости относительного периода  $\tilde{P}$  и добротности  $Q$  изгибных колебаний от  $ka$  изображены на рис.6 и 7, соответственно.

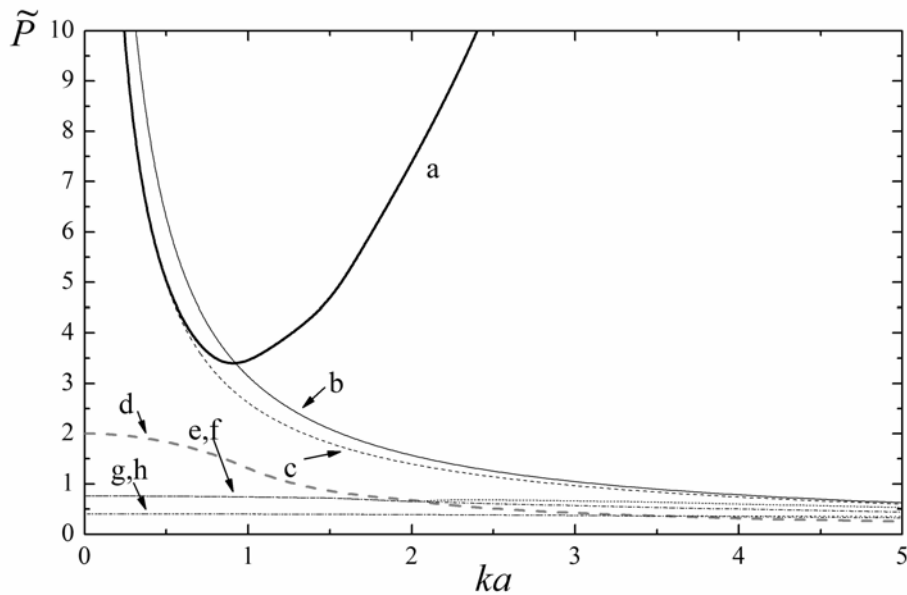


Рис.6. Относительный период БМЗ изгибных колебаний  $\tilde{P} = Pc_{si}/a$ .

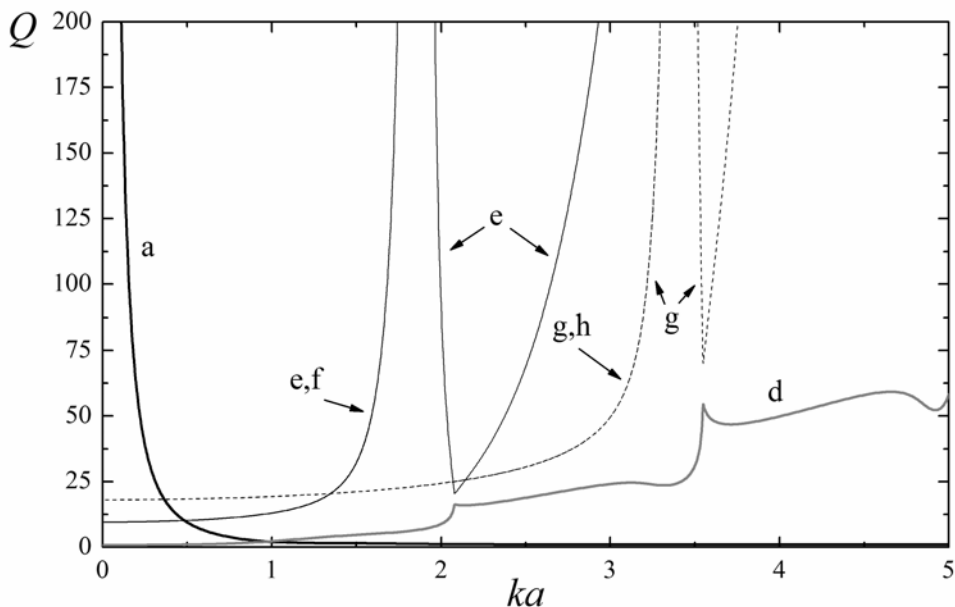


Рис.7. Добротность БМЗ изгибных колебаний.

Для глобальной изгибной моды  $ka \approx \pi a / L$ . Согласно наблюдениям TRACE [1,11]  $ka \approx 0.2$ ,  $P \approx 300$  с, поэтому из всех ветвей изгибных колебаний только моды «а», «b» и «с» соответствуют наблюдаемым значениям периода. Так как только мода «а» является среди них излучательной, можно предположить, что именно она возбуждалась в корональных петлях. Как следует из рис.7 добротность для моды «а» при  $ka \approx 0.2$  составляет  $Q \approx 60$ , т.е. петля совершит  $s \approx Q/\pi \approx 20$  колебаний. Это значение выше наблюдаемого на TRACE числа колебаний  $s = 4 - 5$ , но математический аппарат, привлекаемый при рассмотрении линейных МГД колебаний, изначально предполагает, что диссипативные явления описываются как эффекты второго порядка малости (см. также [15,20]). Отметим, что добротность изгибных колебаний в модели двойной трубки составляет величину [15,20]  $Q \approx 40$ , что близко к значению, полученному нами в более простой модели однородной трубки.

### Заключение

В настоящей работе в рамках однородной модели рассмотрены МГД колебания корональной магнитной арки. Решение дисперсионного уравнения проводилось численно без использования приближений, что позволило построить полный спектр радиальных и изгибных колебаний, включающий как моды с излучением МГД волн, так и безызлучательные моды.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что наблюдаемые короткопериодические пульсации излучения с периодом  $P = 1 - 20$  с можно связать с возбуждением глобальной моды радиальных колебаний корональных петель. Излучательный или безызлучательный характер осцилляций определяется параметрами петли. В тонких протяженных петлях активных областей, где  $\rho_i / \rho_e \ll 10^2$ , возбуждаются излучательные моды, т.е. имеет место акустическое затухание колебаний. Лишь в некоторых случаях (например, событие 12.01.2000 [18]), когда мощная вспышка происходит в арке с отношением характерных размеров  $L/a \leq 10$  и отношением плотностей  $\rho_i / \rho_e > 10^2$ , могут возбуждаться колебания, не приводящие к излучению МГД волн в окружающую среду.

Показано, что выражение (6), предложенное в работах [3,7] для оценки периода радиальных колебаний, является достаточно хорошим приближением, что не согласуется с выводами [11,18] об его абсолютной некорректности. Лишь для безызлучательных мод первой пространственной гармоники использование формулы (6) может привести к существенным погрешностям.

Сделан вывод, что излучение колеблющейся трубкой МГД волн малой амплитуды вносит существенный вклад в затухание радиальных и изгибных колебаний.

Авторы благодарят А.В. Степанова, Ю.Т. Цапа и В.В. Зайцева за полезные замечания и обсуждения.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты 03-02-17218 и 03-02-17357), ГФЕН–РФФИ (грант 04-02-39029ГФЕН2004\_a), ГНТП «Астрономия», Программой Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии» и Программой ОФН-18.

Ю.Г. Копылова благодарит Администрацию Санкт-Петербурга за оказанную финансовую поддержку (грант PD04-1.9-35).

А.В. Мельников благодарит Фонд содействия отечественной науке за оказанную финансовую поддержку.



## Литература

1. *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.880–894.
2. *Williams D.R., Phillips K.J.H., Rudawy P. et al.* High-frequency oscillations in a solar active region coronal loop // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2001. V.326. № 2. P.428–436.
3. *Зайцев В.В., Степанов А.В.* О происхождении пульсаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // *Письма в АЖ.* 1982. Т.8. № 4. С.248–252.
4. *Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цан Ю.Т. и др.* Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // *Письма в АЖ.* 2004. Т.30. № 7. С.530–539.
5. *Qin Z., Li C., Fu Q., and Gao Z.* Dual pulsations in solar radio bursts at short centimeter wavelengths // *Solar Physics.* 1996. V.163. P.383–396.
6. *Zodi A.M., Kaufmann P., and Zirin H.* Persistent 1.5 s oscillations superimposed to a solar burst observed at two mm-wavelengths // *Solar Physics.* 1984. V.92. P.283–298.
7. *Зайцев В.В., Степанов А.В.* О природе пульсаций солнечного радиоизлучения IV типа: колебания плазменного цилиндра // В кн.: *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.* М.: Наука. 1975. Вып.37. С.3–10.
8. *Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цан Ю.Т.* Радиальные колебания корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // *Письма в АЖ.* 2002. Т.28. №11. С.870–879.
9. *Цан Ю.Т., Копылова Ю.Г.* Механизм акустического затухания быстрых изгибных колебаний корональных петель // *Письма в АЖ.* 2001. Т.27. № 11. С.859–866.
10. *Edwin P.M. and Roberts B.* Wave propagation in a magnetic cylinder // *Solar Physics.* 1983. V.88. P.179–191.
11. *Aschwanden M.J., Nakariakov V.M., and Melnikov V.F.* Magnetohydrodynamic sausage-mode oscillations in coronal loops // *Astrophys. J.* 2004. V.600. P.458–463.
12. *Cally P.S.* Leaky and non-leaky oscillations in magnetic flux tubes // *Solar Physics.* 1986. V.103. P.277–298.
13. *Díaz A.J., Oliver R., Ballester J.L., and Roberts B.* Fast MHD oscillations in line-tied homogeneous coronal loops // *Astron. Astrophys.* 2004. V.424. P.1055–1064.
14. *Stenuit H., Keppens R., and Goossens M.* Eigenfrequencies and optimal driving frequencies of 1D non-uniform magnetic flux tubes // *Astron. Astrophys.* 1998. V.331. P.392–404.
15. *Михаляев Б.Б., Соловьев А.А.* МГД-волны в корональных петлях с оболочкой // *Письма в АЖ.* 2004. Т.30. № 4. С.307–314.
16. *Roberts B., Edwin P.M., and Benz A.O.* On coronal oscillations // *Astrophys. J.* 1984. V.279. P.857–865.
17. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы. 1960. 552 с.
18. *Nakariakov V.M., Melnikov V.F., and Reznikova V.E.* Global sausage modes of coronal loops // *Astron. Astrophys.* 2003. V.412. P.L7–L10.
19. *Копылова Ю.Г., Куприянова Е.Г., Степанов А.В., Цан Ю.Т.* Природа осцилляций излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных арок // *Известия ГАО.* 2004. № 217 (настоящий сборник).
20. *Киричек Е.А.* МГД-моделирование активных солнечных образований // *Автореферат дисс. на соиск. уч. степени к.ф.-м.н.* СПб: ГАО РАН. 2004. 22 с.

## LEAKY MODES OF OSCILLATIONS OF A CORONAL MAGNETIC LOOP

Kopylova Yu.G., Melnikov A.V.

### *Summary*

*Dispersion and acoustic damping of the fast magnetoacoustic oscillation of the magnetic flux tubes under solar coronal conditions are investigated. The dispersion equation which contains the Bessel functions of complex variables was solved numerically. Our results generalized the existing view on the modes of the oscillations of homogeneous loops: the excitation regions both for leaky and non-leaky modes were found, values of the periods and  $Q$ -factor of oscillations were estimated.*

## ИНДЕКСЫ ФОНОВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОЛЯРНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Макаров В.И., Тлатов А.Г.

*Индексы чисел Вольфа, площадей пятен и радио-потока на волне 10.7 см, так или иначе, связаны с 11-летним циклом пятен и ограничены широтой +/- 40°. Но они не учитывают полярную активность Солнца и динамику крупномасштабного магнитного поля на всем Солнце.*

*Индексы активности крупномасштабного фонового магнитного поля  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$ ,  $R(t)$  и  $S_K(t)$  получены на основе **Ha** синоптических магнитных карт за период 1905–2003, K-CaII спектрогелиограмм полного диска Солнца с 1907 по 1995 год и наблюдений Солнца на Кисловодской Горной станции ГАО в период 1950–2004. Индекс  $A(t)$  представляет сумму квадратов дипольного и октупольного магнитных моментов, характеризующих широтно-временное распределение фонового магнитного поля. Индекс  $L(t)$  определяет полную длину нейтральных линий на **Ha** синоптической карте и характеризует общую топологию магнитного поля. Индекс  $K(t)$  характеризует сложность топологии магнитного поля Солнца и определяется обратным числом пересечений нейтральных линий с 10° меридианной сеткой на **Ha** карте. Индекс  $R(t)$  определяет величину корреляции полярности крупномасштабного фонового магнитного поля в зоне +/- 40°. Показано, что 11-летние циклы  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$  на 5-6 лет опережают циклы чисел Вольфа,  $W(t)$ .*

*Обработаны K-CaII спектрогелиограммы полного диска Солнца обсерватории Кодайканал с 1907 по 1995 год. Показано, что 11-летние циклы площадей K-CaII ярких точек на высоких широтах,  $S_K$ , на 5-6 лет опережают 11-летние циклы низкоширотной активности Солнца,  $W(t)$ . Это значит, что циклы полярной активности предшествуют 11-летним циклам пятен. Ранее для циклов 20–22 было показано, что временные вариации числа полярных факелов  $N_{PF}$  опережают вариации в цикле площадей пятен  $S_{SP}$  на  $(T_{SP} - T_{PF}) = 5.7 \pm 0.3$  лет. Полярный цикл 23 чисел полярных факелов  $N_{PF}$  опережает цикл 23 площадей пятен  $S_{SP}$  на 7.6 лет.*

*Новый индекс солнечной активности  $A_{PZ}$  был введен для определения площади полярных зон Солнца, занятых магнитным полем одной полярности в минимуме активности. Индекс  $A_{PZ}$  связан с геомагнитным индексом  $\langle aa \rangle$  и  $W(t)$  и дает возможность определить температуру в Минимуме Маундера.*

*Индекс вращения секторной структуры магнитного поля  $SSPM(t)$  определяется суммой спектральной плотности мощности секторной структуры. Параметр  $SSPM(t)$  показывает наличие или отсутствие различных типов секторной структуры магнитного поля. Показано, что 11-летние циклы секторной структуры магнитного поля  $SSPM(t)$  смещены на 5–6 лет и предшествуют по амплитуде и фазе 11-летним циклам пятне  $W(t)$  в период 1904–2000.*

### Введение

Солнечная активность, которую обычно связывают с пятнами, определяется количеством и размерами активных областей на широтах +/- 40°. Для ее характеристики используются индексы чисел Вольфа, площади солнечных пятен, индекс K-CaII флоккулов в зоне пятен и радио поток на волне 10.7 см. Все эти индексы, так или иначе, связаны с солнечными пятнами, имеют практически одну и ту же временную зависимость и показывают 11-летнюю цикличность. Но активность пятен ограничена широтой +/- 40°, не учитывает полярную активность Солнца, а тем более структуру и динамику крупномасштабного фонового магнитного поля на всем Солнце.

В последние два десятка лет стало ясно, что солнечная активность представлена на всех широтах и имеет глобальную природу (Макаров, 1988) [1]. На уровне фотосферы

она проявляется “бабочками” пятен и полярных факелов. Третья компонента глобального цикла связана с широтно-временным распределением униполярных областей фонового магнитного поля, (Makarov and Sivaraman, 1990) [2], (Callebaut and Makarov, 1992) [3]. В настоящее время “бабочки” пятен и полярных факелов разделены широтой  $38^\circ$ , (Makarov and Makarova, 1999) [4]. Эта широта отделяет полярную зону, где  $\partial_r \omega < 0$ , от экваториальной зоны, где  $\partial_r \omega > 0$ , и эта величина почти совпадает широтой  $\sim 37^\circ$ , где  $\partial_r \omega = 0$ ,  $\omega(r, \theta)$  - угловая скорость солнечного вращения (Kosovichev et al., 1997) [5]. Эти зоны угловой скорости соответствуют областям полярных факелов и пятен.

## 1. Наблюдательные данные

В настоящее время авторы располагают длинными рядами оптических наблюдений на всех широтах Солнца в линиях Na и K-CaII, а также в белом свете. Используя ежедневные Na наблюдения в обсерватории Кодайканал и итальянские данные, были построены Na синоптические магнитные карты за период 1885-2004, которые описывают реальные структуры крупномасштабных фоновых магнитных полей на Солнце с их топологическими свойствами, (Makarov and Sivaraman, 1989) [6]. Наблюдения в линии K-CaII в период 1907-1995 дают возможность не только подтвердить выводы, полученные из Na карт, но и исследовать тонкую структуру крупномасштабного фонового магнитного поля, (Makarov et al., 2004) [7]. Более подробно наблюдательные данные описаны в [8–10]. Для сравнения этих данных с циклом пятен был использован ряд чисел Вольфа за это же время, (Hoyt and Schatten, 1998) [11]; (Солнечные Данные, 1978-1999), [12]).

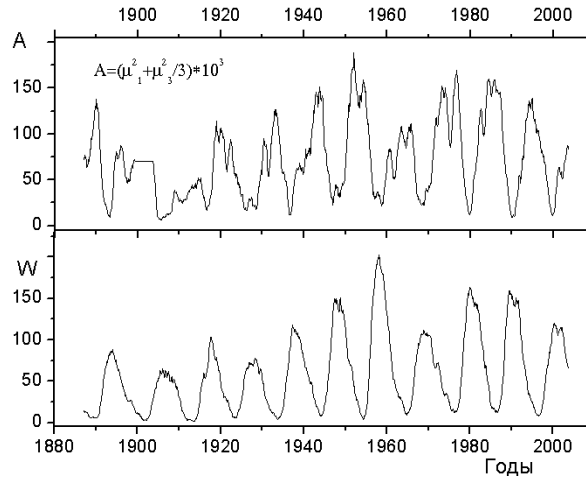
## 2. Результаты

### 2.1. Индекс активности фонового магнитного поля Солнца - $A(t)$

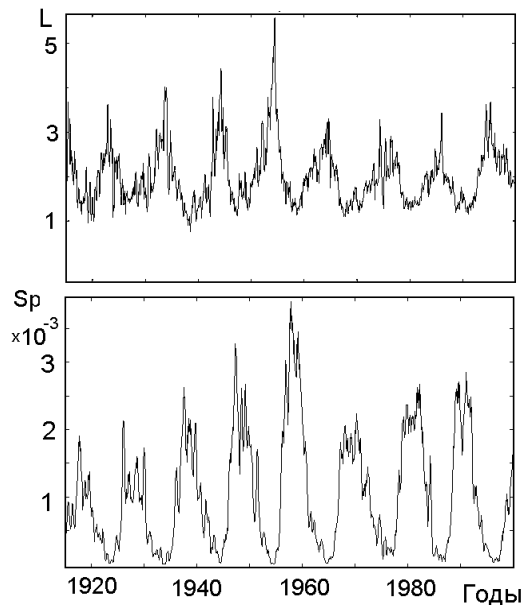
Индекс активности крупномасштабного фонового магнитного поля  $A(t)$  вычислен на основе данных Na синоптических карт, используя только полярность магнитного поля, которая принималась равной + 1 G или - 1 G. Индекс  $A(t)$  представляет собой сумму квадратов дипольного и октупольного магнитных моментов,

$$A(t) = (\mu_1^2 + \mu_3^2 / 3)$$

Временная зависимость  $A(t) \times 10^3$  показана на рис.1. Индекс  $A(t)$  демонстрирует хорошо выраженные 11-летние циклы активности. По отношению к кривой чисел Вольфа  $W(t)$  наблюдается фазовое смещение в среднем на 5-6 лет. При этом, как видно из рис.1., индекс  $A(t)$  опережает индекс  $W(t)$ , [4]. Следует заметить, что параметр  $A(t)$  включает в себя только дипольную и октупольную составляющую крупномасштабного фонового магнитного поля, т.е.  $L = 1$  и  $3$ . Четные моды  $L = 2$  и  $4$  имеют столь малые интенсивности, что их вклад существенен только при анализе квази-двухлетнего цикла. Это значит, что за 5-6 лет можно прогнозировать величину  $W(t)$  солнечной активности. Например, для текущего цикла 23 индекс  $A(t)$  был равен в максимуме 128, и это соответствовало  $W(23)$  в максимуме  $130 \pm 10$ . Эта величина соответствует наблюдениям. Кривая следующего 11-летнего цикла фонового магнитного поля  $A(24)$  в настоящее время еще не прошла максимума, поэтому прогноз  $W(24)$  является пока не корректным.



**Рис.1.** Вверху: 11-летние циклы фонового магнитного поля Солнца за 1885-2003, выраженные индексом  $A(t) \times 10^3$ . Внизу: 11-летние циклы чисел Вольфа с 1885 по 2003.



**Рис. 2.** Вверху: Циклические изменения индекса  $L(t) = \Gamma^1(t) - \langle \Gamma^1(t) \rangle$  согласно  $H\alpha$  картам в период 1915-1999. Внизу: Цикл площади солнечных пятен,  $S_{SP} \times 10^{-3}$ . Имеется связь между максимумом площади пятен и максимумом индекса  $L(t)$ . Максимальная корреляция между  $L(t)$  и  $S(t)$  наблюдалась при временном сдвиге около 5.5 лет.

## 2.2. Длина нейтральных линий, $L(t)$ , как индекс активности Солнца

Имеется несколько морфологических характеристик для описания топологии магнитного поля Солнца. Одной из них является суммарная длина магнитных нейтральных линий  $l(t)$  на  $H\alpha$  синоптической карте, которая была вычислена для периода 1915-1999. Было показано, что  $l(t)$  изменяется с 11-летним циклом активности. Величина  $l(t)$  имела тренд на протяжении 9 циклов, который увеличил ее в 1.3 раза с 1915 по 1999, [13].

В дальнейшем была вычислена северо-южная асимметрия  $\Delta l(t) = l_N(t) - l_S(t)$ , которая показала 55-летний квази-период [14] и доминирующую роль активности северного полушария в это время. Для устранения тренда была введена новая величина или индекс активности фонового магнитного поля в виде

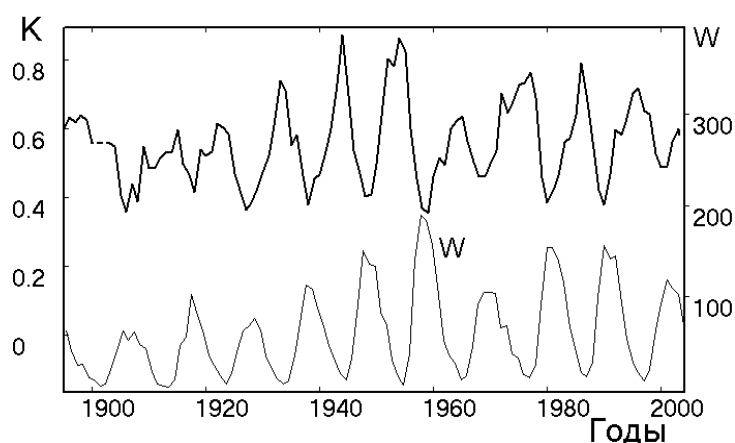
$$L(t) = l^1(t) - \langle l^1(t) \rangle,$$

который отражает 11-летнюю топологию магнитного поля Солнца, рис.2. Сравнение с кривой площади пятен  $S_{SP}$  за этот период показало, что индекс  $L(t)$  изменяется в противофазе с  $S_{SP}(t)$  и опережает 11-летние циклы  $S_{SP}(t)$  в среднем на 5.5 лет. Новый индекс  $L(t)$  может быть использован для низких циклов активности пятен, так как наиболее глубокий минимум  $L(t)$  наблюдается перед наиболее высоким циклом пятен.

### 2.3. Топологический индекс степени сложности $H_\alpha$ магнитных карт

Одна из характеристик топологической структурности  $H_\alpha$  синоптических карт может быть число пересечений магнитных нейтральных линий с гелиографической долготой. При анализе  $H_\alpha$  карт часто используют ряды, в которых даны координаты пересечений меридианов с нейтральными линиями магнитного поля. Ряды состоят из координат, взятых через  $10^\circ$  долготный интервал для каждого кэррингтоновского оборота. Число пересечений  $N_{CRS}$  представляет сложность топологической картины фонового магнитного поля Солнца, характерные размеры образований поля и общую длину нейтральных линий. Введем параметр, равный обратный числу пересечений  $K = 1/N_{CRS}$ . В периоды минимума активности общая длина нейтральных линий и степень сложности синоптических карт, а значит и фонового магнитного поля меньше, чем в периоды максимума активности. Поэтому индекс  $K = 1/N_{CRS}$  в минимуме солнечного цикла, который зависит от числа пересечений нейтральных линий с меридианной сеткой, достигает локального максимума. Следует заметить, что индекс  $K = 1/N_{CRS}$  связан непосредственно с изменением кэррингтоновской долготы или временным интервалом  $\Delta t = 0.03666^\circ/\text{сек}$ . На рис.3 (верхняя кривая) показано поведение индекса  $K(t) = 1/N_{CRS}(t)$  в период 1895-2003. Этот индекс сравнивается с временным ходом среднегодовых чисел Вольфа (нижняя кривая).

Рис.3 показывает, что топологический индекс  $K(t) = 1/N_{CRS}(t)$  имеет максимум в эпоху минимума солнечной активности. Перед высокими циклами чисел Вольфа  $W(t)$  этот индекс также больше, чем перед циклами с меньшей интенсивностью. Согласно рис.3 видно, что  $K(t) = 1/N_{CRS}(t)$  опережает  $W(t)$  примерно на 5.5 лет. Поэтому, также как и другие индексы, характеризующие топологию крупномасштабного магнитного поля, индекс  $K(t) = 1/N_{CRS}(t)$  может применяться в прогностических целях.

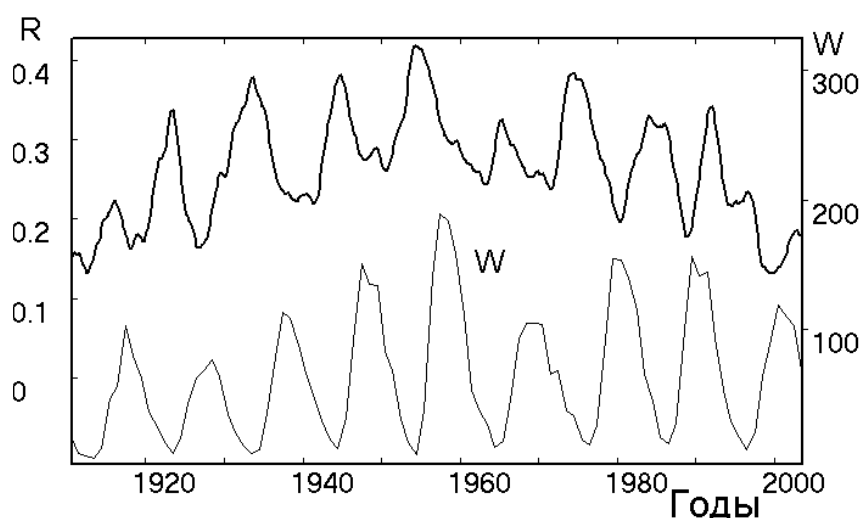


**Рис.3.** Вверху: Топологический индекс  $K(t) = 1/N_{CRS}(t)$  или обратное число пересечений магнитных нейтральных линий на  $H_\alpha$  синоптической карте с  $10^\circ$  меридианной сеткой для кэррингтоновских оборотов. Внизу: Среднегодовые числа Вольфа,  $W(t)$ .

#### 2.4. Индекс корреляции полярности фонового магнитного поля, $R(t)$ , в северном и южном полушариях Солнца

Синоптические На карты несут информацию о знаке крупномасштабного фонового магнитного поля. Полярные области, как правило, имеют знак крупномасштабного поля, соответствующий полярности глобального дипольного магнитного поля Солнца. В среднеширотной области встречаются поля различного знака. Но при этом в области одинаковых долгот крупномасштабное фоновое поле обоих полушарий Солнца имеет одинаковую или противоположную полярности. Можно ввести величину средней полярности магнитного поля,  $P(t)$ , усредненную в широтном в пределах  $\pm 40^\circ$  и в  $10^\circ$  долготном интервале меридианной сетки. Положение центрального меридиана кэррингтоновских координат однозначно связано со временем оборота Солнца. Поэтому полученные ряды для обоих полушарий являются функцией времени,  $P_N(t)$ ,  $P_S(t)$ .

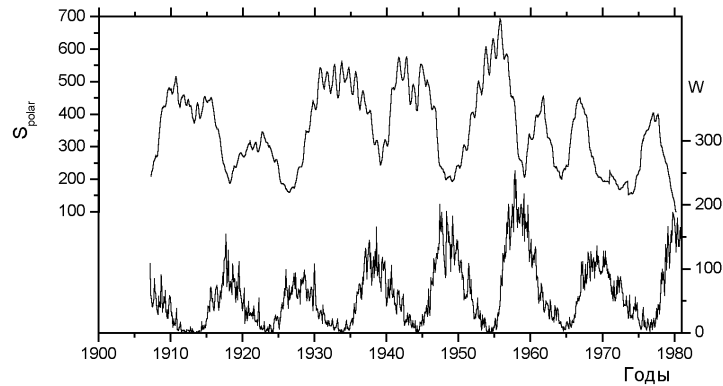
Для этих временных рядов был проведен корреляционный анализ в период 1905-2003. При этом индекс корреляция  $R(t)$  вычислялся в спектральном окне шириной около года. Затем окно смещалось вдоль ряда, и вычисления корреляции повторялись. Оказалось, что в целом индекс корреляции  $R(t)$  имеет положительную величину. Это означает, что полярности крупномасштабных магнитных полей в среднеширотной зоне  $\pm 40^\circ$  северного и южного полушарий имеют преимущественно одинаковые полярности. Наибольшее значение корреляции отмечается в периоды минимума активности. На рис.4 показано поведение индекса корреляции полярностей крупномасштабного фонового магнитного поля северного и южного полушарий в период 1905-2003. В эпоху минимума перед солнечными циклами пятен большой мощности, индекс корреляции  $R(t)$  достигал наибольших значений. Это отчетливо проявляется и на вековом цикле. Максимум индекса  $R(t)$  наблюдается в эпоху перед наиболее интенсивным 19-м циклом активности Солнца. На рис. 4 видна часть  $R(t)$  следующего цикла 24, который по интенсивности находится в настоящее время на уровне 14-го цикла пятен или даже меньше. Из этого можно сделать заключение, что следующий цикл активности пятен 24 будет сравнительно не высоким и составлять примерно уровень  $W_{MAX} \approx 70 \pm 10$ . Однако эта величина должна быть вычислена более точно на основе дополнительных данных о фоновом поле Солнца в период 2005–2006.



**Рис.4.** Вверху: Поведение индекса корреляции  $R(t)$  полярности крупномасштабных фоновых магнитных полей северного и южного полушарий, рассчитанных в среднеширотной зоне  $\pm 40^\circ$ , взятых через  $10^\circ$  интервал по долготе в период 1905-2003. Внизу: 11-летние циклы чисел Вольфа,  $W(t)$ .

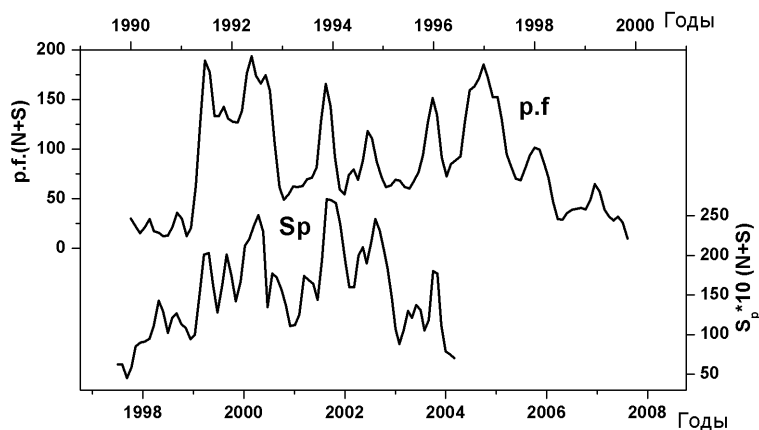
## 2.5. 11-летние циклы площадей К-СаII ярких точек на высоких широтах, $S_K$ , и 11-летние циклы чисел Вольфа

Мы обработали ежедневные К-СаII спектрогелиограммы полного диска Солнца, используя фотографический архив обсерватории Кодайканал (Индия) в период 1907-1995.



**Рис.5.** Вверху: Циклы площадей К-СаII ярких точек на широтах выше  $70^\circ$  северного полушария. Внизу: Циклы чисел Вольфа,  $W(t)$  в течение 1907-1980.

Показано, что 11-летние циклы К-СаII индекса на низких широтах, или площадей флоккул, совпадают с циклами чисел Вольфа и радио-потока на волне 10.7 см., (Makarov et al., 2004), [8]. С другой стороны, К-СаII яркие точки на высоких широтах образуют полярные циклы между эпохами смены знака магнитного поля. Эта полярная активность проявляет как 11-летний, так и 22-летний цикл [15]. Результаты обработки показаны на рис.5. Мы нашли, что полярные циклы площадей К-СаII ярких точек на высоких широтах,  $S_K$ , предшествуют в среднем на 5-6 лет 11-летним циклам чисел Вольфа, [15]. Смена знака полярного магнитного поля происходит через  $5.8 \pm 0.6$  лет после минимума активности в линии К-СаII. Таким образом, глобальная активность Солнца длительностью 16-17 лет, которая развивается в двух широтных зонах, разделенных широтой около  $40^\circ$ , начинается на высоких широтах и затем дрейфует в экваториальную зону. Важно отметить, что при таком широтном смещении активности все особенности, которые были на 11-летней кривой полярной активности, повторяются в той или иной степени на 11-летней кривой цикла пятен.



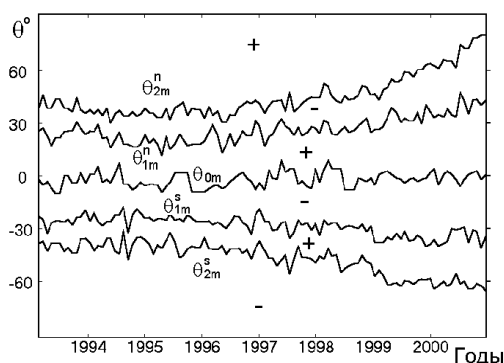
**Рис.6.** Среднемесячное число полярных факелов (верхняя кривая -  $p.f.$ ) в полярном цикле 23 в течение 1990-2000. (Нижняя кривая) Цикл 23 среднемесячных площадей солнечных пятен,  $S_p$ , в течение 1997-2004 с временным сдвигом 7.6 лет относительно полярного цикла.



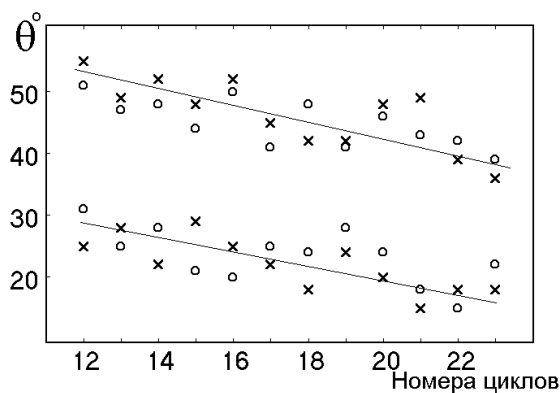
По наблюдениям полярных факелов в белом свете на уровне фотосферы найден новый индекс для определения сильных флуктуаций в цикле площадей пятен,  $T_{SP} - T_{PF}$  с заблаговременностью 5–7 лет. Так, ранее для циклов 20–22 было показано, что вариации в 11-летних циклах числа полярных факелов,  $N_{PF}$ , опережают вариации в 11-летних циклах площадей пятен,  $S_{SP}$ , на  $T_{SP} - T_{PF} = 5.7 \pm 0.3$  лет, (Makarov and Makarova, 1996), [16]. Рис. 6 показывает пример связи 11-летнего полярного цикла и цикла пятен 23. Видно, что сильные флуктуации полярного цикла опережают сильные флуктуации в цикле пятен при временном смещении  $T_{SP} - T_{PF}$ , определяемом коэффициентом корреляции, который был вычислен при сдвиге на  $\pm 10$  лет. Максимальная корреляция при сдвиге  $T_{SP} - T_{PF} = 5.7 \pm 0.3$  лет была для циклов 20-22, но полярный цикл чисел полярных факелов 23,  $N_{PF}$ , опережает цикл площадей пятен,  $S_{SP}$ , на 7.6 лет. Этот индекс  $T_{SP} - T_{PF}$ , дает возможность определять сильные флуктуации в 11-летних циклах площадей пятен  $S_{SP}$  за 5-7 лет.

## 2.6. Индекс площади полярных зон Солнца $A_{PZ}$ , занятой магнитным полем одной полярности в минимуме активности

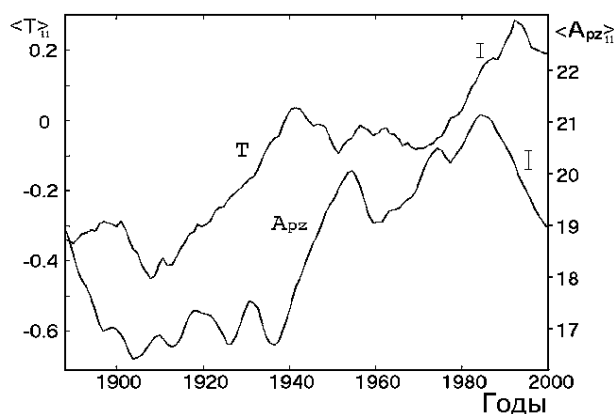
Мы вычислили площадь полярных зон Солнца,  $A_{PZ}$ , занятой магнитным полем одной полярности в минимуме активности на  $H\alpha$  синоптических магнитных картах с 1878 по 2001. Мы нашли постепенное уменьшение средней за год минимальной широты высокоширотной зональной границы,  $\Theta_{2m}$ , глобального магнитного поля Солнца в минимуме активности от  $53^\circ$  в 1878 до  $38^\circ$  в 1996, получая среднее уменьшение около  $1.2^\circ$  за цикл, [5].



**Рис.7.** Пример миграционных траекторий магнитных нейтральных линий (или зональных границ), разделяющих противоположные +/- или +/- полярности крупномасштабного фонового магнитного поля на  $H\alpha$  синоптических картах в северном ( $\Theta_{1m}^n, \Theta_{2m}^n$ ) и южном ( $\Theta_{1m}^s, \Theta_{2m}^s$ ) полушариях Солнца в период 1993-2001. Широта  $\Theta_{0m}$  - экваториальная граница.



**Рис.8.** Изменение среднегодовой широты высокоширотной ( $\Theta_{2m}$ ) (верхняя часть рисунка) и низкоширотной ( $\Theta_{1m}$ ) (нижняя часть) зональной границы крупномасштабного магнитного поля Солнца (x-N и o-S полушеры) в минимуме активности 11-летних циклов с 12 по 23 согласно  $H\alpha$  синоптическим картам с 1878 по 1996.



**Рис.9.** Сравнение площади полярных зон Солнца, занятых магнитным полем одной полярности,  $\langle A_{PZ} \rangle_{11}$ , и изменение глобальной поверхностной температуры Земли  $\langle T \rangle_{11}$  за последние 120 лет с 1880 по 2000. Мы получили оценку температурного дефицита в течение Маундера Минимума ( $-1^\circ$ ) относительно настоящего времени ( $\sim 0^\circ$ ), получая увеличение температуры на  $+1.0^\circ$ .

Мы сравнили  $\langle A_{PZ} \rangle$  с геомагнитным индексом  $\langle aa \rangle$  и числом Вольфа  $\langle W \rangle$ .

$$\langle A_{PZ} \rangle_{11} = 0.16 \langle W \rangle_{11} + 9.3 \quad (r=0.82)$$

$$\langle A_{PZ} \rangle_{11} = 0.84 \langle aa \rangle_{11} + 22.5 \quad (r=0.82)$$

Была использована корреляция между геомагнитным индексом  $\langle aa \rangle_{11}$  и площадью полярной зоны Солнца, занятой магнитным полем одной полярности  $\langle A_{PZ} \rangle_{11}$ , чтобы получить широту границы высокоширотной зоны ( $\Theta_{2m}$ ) в Минимуме Маундера. Используя “11-летние” средние индексов  $\langle aa \rangle_{11}$  и  $\langle A_{PZ} \rangle_{11}$ , мы получим:

$$\langle aa \rangle_{11} = 1.2 \langle A_{PZ} \rangle_{11} - 3.0$$

$$\sin \Theta_{2m} = -0.014 \langle aa \rangle_{11} + 0.96$$

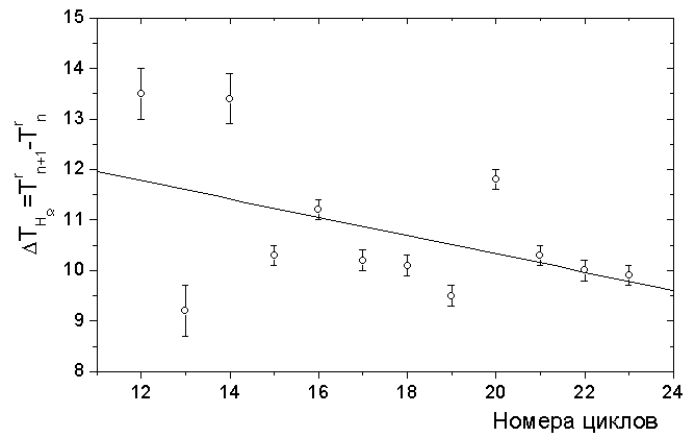
Используя эти оценки, можно показать, что площадь полярной зоны Солнца, которая занята магнитным полем одной полярности в минимуме активности,  $\langle A_{PZ} \rangle_{11}$ , соответствует широте  $\Theta_{2m} \sim 60^\circ$  в Минимуме Маундера.

С другой стороны, можно получили оценку температурного дефицита в течение Маундера Минимума ( $-1^\circ$ ) относительно настоящего времени ( $\sim 0^\circ$ ), получая увеличение температуры на  $+1.0^\circ$ .

## 2.7. Продолжительность полярного цикла активности Солнца, $T_{PF}$

Мы определяем продолжительность полярного цикла активности,  $T_{PF}$ , как промежуток времени в годах между двумя соседними сменами знака полярного магнитного поля. Для этого мы использовали полярный дрейф поясов волокон в период 1872–2001 (11-летние циклы с 12 по 23), [6,17]. Было показано, что чем короче полярный цикл, тем более интенсивный следующий цикл пятен. Так, продолжительность четного полярного 11-летнего цикла всегда больше, чем нечетного. Мы нашли среднюю длительность четного полярного цикла 11.7 года, и нечетного около 9.9 лет на протяжении 130 лет с 1872 по 2001. Это значит, что четный полярный цикл, идущий перед четным циклом пятен, менее интенсивный по сравнению с нечетным. Это соотношение определяет максимум

следующего 11-летнего цикла пятен. Так максимальное число Вольфа, как правило, больше в нечетном, чем в четном цикле.



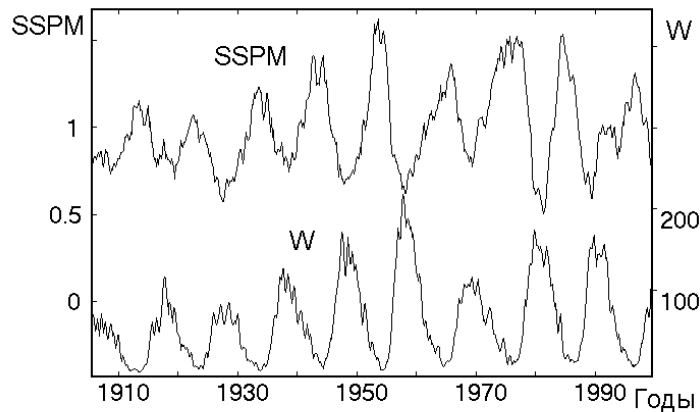
**Рис.10.** Временной интервал между двумя соседними переполюсовками полярного магнитного поля  $T_{n+1}^r - T_n^r$  для солнечных циклов с 12 по 23, (1872-2001). Длина полярного цикла  $T_{PF}$  уменьшилась в  $\sim 1.2$  раза в течение последних 130 лет. Длина полярных циклов  $T_{PF} = T_{n+1}^r - T_n^r$  больше в четных, чем в нечетных циклах.

Другое свойство полярной активности связано с вековым уменьшением времени между двумя соседними переполюсовками. Этот эффект приводит к уменьшению продолжительности полярного цикла,  $T_{PF}$ , в 1.2 раза в период с 1872 по 2001., рис.10. Это уменьшение, возможно, связано с увеличением магнитного потока от полярных зон Солнца, (Makarov et al.,) [9]. Ранее в [16] отмечалось, что чем короче полярный цикл, тем больше полярный магнитный поток. Физическая причина этого соотношения пока не ясна.

В практике часто используют длину цикла пятен как индекс солнечно-земных связей, [18]. Очевидно, что полярная активность Солнца, в основном связанная с корональными дырами, играет доминирующую роль в формировании структуры межпланетного магнитного поля. Из этого становится ясно, что предпочтительнее использовать в качестве индекса длину полярного цикла,  $T_{PF}$ , вместо длины цикла пятен.

### 2.8. Индекс вращения секторной структуры магнитного поля и активность Солнца.

Ранее был введен индекс вращения Солнца,  $SSPM(t)$ , который определяется суммой спектральной плотности мощности секторной структуры магнитного поля [20]. Индекс  $SSPM = \sum(a^* a + v^* v)$  есть суммарная мощность всех пиков или их огибающих на спектре выбранного интервала периодов и, который, очевидно, отражает наличие или отсутствие различных типов секторной структуры магнитного поля. На рис.11 показаны 11-летние циклы этого параметра. Сравнение индекса  $SSPM(t)$  с индексом чисел Вольфа  $W(t)$  с 1904 по 2000 год показало, что 11-летние циклы активности секторной структуры магнитного поля  $SSPM(t)$  смещены на 5-6 лет и предшествуют по амплитуде и по фазе 11-летним циклам чисел Вольфа. Аналогичная зависимость между максимальным числом Вольфа и скоростью вращения двухсекторной структуры межпланетного магнитного поля была ранее получена в работе [19]. Это значит, что секторная структура магнитного поля Солнца активно участвует в генерации магнитного поля и, следовательно, является одним из основных типов движений.



**Рис.11.** Верхняя кривая: 11-летние циклы индекса вращения Солнца SSPM(t) или суммы спектральной плотности мощности вращения секторной структуры. Нижняя кривая: 11-летние циклы чисел Вольфа W(t) в период 1904 - 2000. Видно, что 11-летние циклы индекса вращения SSPM(t) предшествует 11-летним циклам чисел Вольфа W(t) примерно на 5.5 лет.

Если индексы  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$  описывают топологию глобального магнитного поля Солнца в короне, то новый индекс вращения Солнца  $SSPM(t)$  отражает поле скорости внутри Солнца и тем самым принципиально отличается от  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$ . Но так как 11-летний цикл индекса  $SSPM(t)$  также предшествует циклу чисел Вольфа на 5.5 лет, то, очевидно, он имеет одну и ту же природу, что и индексы  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$ , [20].

### 3. Заключение

Для понимания причин солнечной активности и ее цикличности необходимо находить и изучать новые индексы, отражающие не только 11-летние циклы пятен, связанные с активностью на широтах  $\pm 40^\circ$ , но и активность Солнца на высоких широтах, структуру и динамику крупномасштабного магнитного поля на всем Солнце. На основе  $H\alpha$  синоптических магнитных карт с 1885 по 2003 получены новые индексы активности крупномасштабного магнитного поля для всего Солнца,  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$ .

Индекс  $A(t)$  представляет собой сумму квадратов дипольного и октупольного магнитных моментов, а индекс  $L(t)$  характеризует общую длину магнитных нейтральных линий на  $H\alpha$  синоптической карте. Индексы активности  $K(t)$  и  $R(t)$  характеризуют топологические особенности фонового магнитного поля Солнца.

Показано, что 11-летние циклы всех рассмотренных индексов примерно на 5-6 лет опережают 11-летние циклы чисел Вольфа,  $W(t)$ . Так как в настоящее время методика построения  $H\alpha$  синоптических магнитных карт на каждый оборот Солнца достаточно хорошо отработана, прогностический аспект этого результата очевиден. С другой стороны, мы вынуждены признать, что крупномасштабное фоновое магнитное поле на Солнце не есть результат распада и диффузии магнитных полей активных областей. Этот фундаментальный результат противоречит исходному положению современной теории солнечной цикличности.

Результаты обработки K-CaII спектрогелиограмм полного диска Солнца в обсерватории Кодаяканал с 1907 по 1995 год подтверждают данные, полученные из  $H\alpha$  карт. Это принципиально важно, так как яркость в линии K-CaII в некоторых пределах пропорциональна величине магнитного поля. Введенный индекс площадей K-CaII ярких точек на высоких широтах,  $S_K$ , показывает такое же смещение на 5-6 лет и для полярных 11-

летних циклов по отношению к 11-летним циклам чисел Вольфа,  $W(t)$ . Это значит, что циклы полярной активности предшествуют 11-летним циклам пятен.

Это свойство активности Солнца наиболее отчетливо проявляется по наблюдениям полярных факелов на уровне фотосферы. Для циклов 20-23 найден новый индекс для определения времени сильных флуктуаций в цикле площадей пятен,  $T_{SP} - T_{PF}$ . Рис.6. показывает пример соотношения 11-летнего цикла полярных факелов и площадей пятен в цикле 23, из которого видно, что сильные флуктуации в цикле числа полярных факелов опережают сильные флуктуации в цикле площадей пятен при временном смещении  $T_{SP} - T_{PF}$ , определяемом коэффициентом корреляции, который вычислялся при сдвиге на  $\pm 10$  лет. Максимальная корреляция для циклов 20-22 была вычислена при сдвиге  $T_{SP} - T_{PF} = 5.7 \pm 0.3$  лет, [16], но полярный цикл 23 опережает цикл пятен на 7.6 года, рис.6. Это значит, что все особенности в циклах полярной активности повторяются через 5-7 лет в циклах пятен.

Мы определили длительность полярного цикла активности  $T_{PF}$  как промежуток времени между двумя соседними сменами знака полярного магнитного поля. Было показано, что чем короче полярный цикл, тем более интенсивный следующий цикл пятен. Была найдена средняя длительность четного полярного цикла 11.7 года, и нечетного около 9.9 лет на протяжении 130 лет с 1872 по 2001. Это согласуется с тем, что мы имеем для 11-летнего цикла пятен, в котором максимальное число Вольфа, как правило, больше в нечетном, чем в четном цикле.

Было найдено вековое уменьшение промежутка времени между двумя соседними переполусовками. Этот эффект приводит к уменьшению продолжительности полярного цикла,  $T_{PF}$ , в 1.2 раза в период с 1872 по 2001, рис.10. Это уменьшение, возможно, связано с увеличением магнитного потока от полярных зон Солнца, [9]. Ранее было отмечено, что чем короче полярный цикл, тем больше полярный магнитный поток, [16].

Очевидно, что полярная активность Солнца играет доминирующую роль в формировании структуры и поведении межпланетного магнитного поля. Из этого становится ясно, что предпочтительнее использовать в качестве индекса солнечно-земных связей длину полярного цикла,  $T_{PF}$ , вместо длины цикла пятен.

Площадь полярных зон Солнца,  $A_{PZ}$ , занятая магнитным полем одной полярности в минимуме активности, была вычислена на  $H_\alpha$  синоптических картах с 1878 по 2001 в качестве нового индекса. Мы нашли постепенное уменьшение, средней за год минимальной широты высокоширотной зональной границы,  $\Theta_{2m}$ , магнитного поля Солнца в минимуме активности от  $53^\circ$  в 1878 до  $38^\circ$  в 1996, получая среднее уменьшение около  $1.2^\circ$  за цикл, [9]. Сравнение  $\langle A_{PZ} \rangle$  с геомагнитным индексом  $\langle aa \rangle$  и числом Вольфа  $\langle W \rangle$  дает оценку температурного дефицита в период Маундера Минимума ( $-1^\circ$ ) относительно настоящего времени ( $\sim 0^\circ$ ), получая увеличение температуры на  $+1.0^\circ$ .

Ранее введен индекс вращения Солнца  $SSPM(t)$ , который определяется суммой спектральной плотности мощности секторной структуры магнитного поля. Рис.11 показывает 11-летние циклы индекса  $SSPM(t)$  и чисел Вольфа  $W(t)$  с 1904 по 2000 год. Видно, что 11-летние циклы секторной структуры магнитного поля  $SSPM(t)$  смещены и предшествуют по амплитуде и по фазе примерно на 5.5 лет 11-летним циклам чисел Вольфа. Аналогичная зависимость между максимальным числом Вольфа и скоростью вращения двухсекторной структуры межпланетного магнитного поля была ранее получена в работе [19].

Следует отметить, что если индексы  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$  описывают топологию глобального магнитного поля Солнца в короне, то индекс вращения Солнца  $SSPM(t)$  отражает поле скорости внутри Солнца [20] и тем самым принципиально отличается от  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$ . Но так как 11-летний цикл индекса  $SSPM(t)$  также предшествует

циклу чисел Вольфа на 5-6 лет, то, очевидно, он имеет одну и ту же природу, что и индексы  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  и  $R(t)$ .

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты 02-02-16035, 03-02-16091.

### Литература

1. *Makarov V.I.* // Солнечная активность как глобальный процесс // Докторская диссертация. Пулковое. 1988. 406 с.
2. *Makarov, V.I. and Sivaraman K.R.* // in J. O. Stenflo (ed.), Solar Photosphere: Structure, Convection and Magnetic fields, *IAU Symp.* 1989, v.138, p.281.
3. *Callebaut, D.K. and Makarov, V.I.* // Solar Phys., 1992, v. 141, p.381.
4. *Makarov, V.I. and Makarova, V.V.* // in A. P. Wilson (ed.), Proc. 9th European Meeting on Solar Physics, ESA SP – 448, 1999, p.121.
5. *Kosovichev, A.G., Schou, J., Scherrer, P.H., and 31 co-authors* // Solar Phys., 1997, v.170, p.43.
6. *Makarov, V.I. and Sivaraman K.R.* // Solar Phys., 1989, v.119, p.35.
7. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G. and Sivaraman K.R.* // Solar Phys., 2001, v.202, p.11.
8. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G., Gupta S.S., Singh J. and Sivaraman K.R.* // Solar Phys., 2004 (in press).
9. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G., Callebaut, D.K. and Obridko, V.N.* // Solar Phys., 2002, v.206, p.383.
10. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G., Callebaut, D.K. Obridko, V.N. and Shelting, B.D.* // Solar Phys., 2001, v.198, p.409.
11. *Hoyt, D.V. and Schatten, K.H.* // Solar Phys., 1998, v.157, p.340.
12. *Солнечные Данные.* // 1978-2001, Nos. 1-12.
13. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G.* // in A.P. Wilson (ed.), Proc. SOHO 10/GONG 2000, Workshop, 2000, p.111.
14. *Kitchatinov, L.L., Pipin, V.V., Makarov, V.I., and Tlatov, A.G.* // Solar Phys., 1999, v.189, p.227.
15. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G., Callebaut, D.K.* // in Proc. IAU 223, St. Petersburg, 2004, (in press).
16. *Makarov, V.I. and Makarova, V.V.* // Solar Phys., 1996, v.163, p.267.
17. *Makarov, V.I., Tlatov, A.G. and Sivaraman K.R.* // Solar Phys., 2003, v.214, p.41.
18. *Balogh, A., Smith, E.J., Tsurutani, B.T., Southwood, D.J., and Horburg, T.S.* // Science, 1995, v.268, p.1007-1010.
19. *Makarov V.I., Tavastsherna K.S., Petrova N.S.* // in (Eds.) R.J. Thompson et al. Proc. Workshop: Solar - Terrest. Pred. Australia. 1990, NOAA, Boulder. v.1, p.518.
20. *Васильева В.В., Макаров В.И., Тлатов А.Г.* // Письма в АЖ, 2002, т.28, с.228-234.

## INDICES OF BACKGROUND MAGNETIC FIELD AND POLAR ACTIVITY OF THE SUN

Makarov V.I., Tlatov A.G.

### Summary

*Indices of the Wolf numbers, sunspot areas and radio flux at the wave of 10.7 cm connected with 11-year sunspot cycles and are limited by the latitudes  $\pm 40^\circ$ . They do not take into account of polar activity and large-scale background magnetic field on the all Sun.*

New indices of the large-scale magnetic field for all Sun  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$ ,  $R(t)$  and  $S_K(t)$  were obtained on the basis Ha synoptic charts for 1905-2003, the K-CaII spektroheliograms of full solar disk during 1907-1995 and the observations of the Sun at the Kislovodsk Solar Station in 1950-2004. Index  $A(t)$  is a sum of squares of dipole and oktopole magnetic moments, that characterizes the latitude-time distribution of global magnetic field of the Sun. Index  $L(t)$  is general length of magnetic neutral lines on the Ha synoptic chart. It describes the general topology pattern of the background magnetic field. Index  $K(t)$  characterizes complexity of topology pattern of general magnetic field of the Sun. It is determined by inverse number of crossing neutral lines with  $10^\circ$  meridian net on Ha chart. Index  $R(t)$  determines the correlation factor of polarity magnetic field in latitude zones  $\pm 40^\circ$ . It shows very low value  $R(t)$  that corresponds to Wolf number  $70 \pm 10$  in the maximum of the sunspot cycle 24. It was shown that the 11-year cycles of  $A(t)$ ,  $L(t)$ ,  $K(t)$  and  $R(t)$  have priority development as regards to the Wolf number cycles for 5 - 6 years.

The K-CaII spektroheliograms of full disc of the Sun were processed for 1907-1995. It was shown that the 11-year cycles of the area K-CaII bright points at the high latitudes precedes 11-year cycles of the sunspots and shifted in 5.5 years as regards to  $W(t)$ . It means that polar activity cycles have priority development as regards to 11-year sunspot cycles. It was shown that strong fluctuations in the number of polar faculae cycles  $N_{PF}$  have priority development as regards to strong fluctuations in the sunspot area  $S_P$  for the cycles 20-22 in  $T_{SP} - T_{PF} = 5.7 \pm 0.3$  years. It was found that the index  $T_{SP} - T_{PF}$  determines the strong fluctuations of sunspot area cycle  $S_P$ , 23. But in polar cycle 23,  $N_{PF}$  precedes  $S_P$  in the sunspot cycle 23 in 7.6 years.

New index of solar activity  $A_{PZ}$  was introduced for determination of polar zone area occupied by unipolar magnetic field in minimum activity. Index  $\langle A_{PZ} \rangle$  good correlates with geomagnetic index  $\langle aa \rangle$  and  $W(t)$ . It allowed determine the mean temperature on the Earth during the Maunder Minimum as regards to present time.

Duration of polar cycle  $T_{PF}$  was determined as a time in years between the polar magnetic field reversals. We found average duration an even polar cycle 11.7 years, and odd 9.9 years during 130 years from 1872 up to 2001. It was shown that there is a preference to use duration of polar cycle as index solar-terrestrial relation instead of the sunspot cycle.

New index of solar rotation SSPM(t) was introduced for determination presence or absence of sector structures of magnetic field. It was found that an index SSPM(t) have priority development as regards to the sunspot cycles  $W(t)$  in 5 - 6 years during 1904-2000.

## СВЕРХНОВЫЕ ТИПА II II. ЯРКИЕ СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ АРМ КАТАЛОГА ЮЖНОГО НЕБА

Полякова Г.Д.

*Представлены результаты статистического анализа и сравнения фотометрических систем каталогов RC3 и АРМ южного неба, проводившихся на основе выборки из 424 общих ярких ( $B_T < 16.^m5$ ) спиральных и неправильных галактик. Полученные уравнения линейной регрессии позволяют по данным из АРМ для позиционных углов, изофотных диаметров, отношений осей, звездных величин и показателей цвета ( $B_j - R$ ) определить их редуцированные значения в системе каталога RC3 и использовать их для определения физических параметров малоизученных родительских галактик сверхновых типа II.*

### Введение

К концу 2003 года было открыто 634 сверхновых типа II (SNe II). Они наблюдались в 597 родительских галактиках, из которых 201 является малоизученной. Получение нужной информации о них стало возможной благодаря появившимся в 90-е годы АРМ (Automatic Plate Measuring) каталогам северного и южного неба [1–3]. Они представляют собой оцифрованные версии первого Паломарского (POSS-I) и UKST (United Kingdom Schmidt Telescope) обзоров, являясь однотипными по своей структуре. Хотя составление каталога южного неба еще не закончено, в представляемой работе мы ограничимся исследованием новой версии каталога АРМ южного неба [2].

Австралийский обзор южного неба (от  $-17^\circ$  до  $-90^\circ$  по склонению) проводился на широкоугольном (поле  $6.5^\circ \times 6.5^\circ$ ) 48" телескопе системы Шмидта (UKST) в двух цветах. Первоначально было получено более 600 негативов с использованием гиперсенситивизированных фотографических пластинок Kodak IIIa-J и фильтра GG 395 для синезеленой области спектра, которая в [3,4] обозначена как  $b_j$ . Перекрытие соседних негативов составляло  $0.8^\circ$  как по склонению, так и по прямому восхождению. Центры полей отстояли друг от друга на  $5^\circ$  по обеим координатам. Предельная экспозиция ограничивалась фоном неба [3,5].

Позднее при проведении обзора SES R были получены негативы тех же самых полей для красной области спектра на гиперсенситивизированных фотографических пластинках Kodak IIIa-F с фильтром RG 630 [1].

Стеклянные копии оригинальных негативов IIIa-J были получены в ESO, для их изготовления использовались мелкозернистые высококонтрастные пластинки Kodak Proccoss [6]. Первоначально 185 из них, покрывающих область около 4300 квадратных градусов вблизи южного полюса Галактики ( $\delta < -20^\circ$ ) были просканированы с помощью измерительной машины в Кэмбридже. При этом было обнаружено  $20 \times 10^6$  объектов, из которых составлена однородная выборка  $2 \times 10^6$  галактик с предельной величиной  $B_j = 20.^m5$ . Позднее эта глубокая (порядка 600 Мпс при постоянной Хаббла  $H_0 = 100$  км/с, Мпс), однородная и представительная выборка использовалась для статистического изучения пространственного распределения галактик и крупномасштабной структуры Вселенной на больших угловых расстояниях [4,7].

Автоматическое сканирование стеклянных копий негативов IIIa-J и оригинальных пластинок IIIa-F проводилось с интервалом  $0''.5$  и разрешением  $1''$ . АРМ машина автоматически определяла положение всех изображений на негативе, измеряла их звездные



величины и форму. Пороговая поверхностная яркость обнаружения изображения на Ша-J и Ша-F пластинках составляла около  $25^m$  и  $24^m$  с квадратной секунды дуги, соответственно. Предельная фотографическая величина для голубой области спектра составляет  $B_j=22^m.5$ , а для красной –  $R = 21^m$  [1], что примерно на  $1^m.5$  слабее  $B$  величин Паломарского обзора [3,5]. Это объясняется как использованием мелкозернистых фотографических пластинок нового поколения (Kodak Ша-J, Ша-F), так и лучшими условиями наблюдений (качество изображений около  $2''$  и более темный фон неба) при идентичности Паломарского и УК телескопов [8].

В каталоге для каждого объекта приводятся экваториальные координаты  $\alpha$ ,  $\delta$ , а также измеренные по соответствующим негативам полные фотографические величины  $R$  и  $B_j$  и, приведенные к изофоте обнаружения большой радиус, эллиптичность ( $e = 1 - b/a$ ), позиционный угол и классификация изображения. Причем в качестве основных использовались негативы для красной области спектра, а негативы для голубой – для сравнения. Информацию об объекте можно получить по его координатам на эпохи B1950 и J2000 [2].

По оценке авторов в [3] вызванная дисторсией систематическая ошибка определения положения объекта составляет около  $1''$ , случайная – около  $0.2''$ . Полные фотографические величины имеют внутреннюю калибровку и определяются с ошибкой  $0^m.1 - 0^m.2$ . В качестве критерия автоматической классификации звезд и галактик использовались профили их изображений. Для звезд они определяются инструментальным профилем и качеством изображений во время наблюдений, а для галактик разных морфологических типов они существенно различаются. Яркие объекты (с  $B_j < 12^m.0$ ) из выборки  $2 \times 10^6$  галактик были просмотрены визуально. Для них ошибка в классификации минимальна, она возрастает для более слабых объектов.

При проведении статистических работ [10,11] информация о родительских галактиках сверхновых типа II бралась нами, в основном, из каталога RC3 [12]. В представляемой работе этот каталог использовался в качестве стандартного. В нем полные фотоэлектрические величины  $B_T$  (система Джонсона), большой ( $\lg D_{25}$ ) и малый диаметры, а также их отношение ( $\lg R_{25}$ ) отнесены к изофотам с уровнем поверхностной яркости  $\mu_B = 25^m.0$  с квадратной секунды дуги. Естественно, что фотометрические системы каталогов APM [1, 2] и RC3 [12] различаются между собой, поскольку изображения фотометрируемых объектов получены на разных телескопах при разных методах (фотографический и фотоэлектрический) наблюдений и измерений (автоматический и полуавтоматический) и для разного интервала длин волн. В APM  $B_j$  определялись для зелено-голубой области от  $3950\text{\AA}$  до  $5400\text{\AA}$  [5], тогда как в [12]  $B_T$  – в системе Джонсона. Поэтому необходимо провести сравнение этих фотометрических систем на основе данных для выборки ярких спиральных галактик, общих для двух каталогов (раздел 2). Затем для позиционных углов, изофотных диаметров, отношений осей и звездных величин определить связывающие их соотношения (раздел 3). Это являлось целью представляемой работы. Полученные в ней результаты будут использованы для определения некоторых физических параметров малоизученных родительских галактик.

### 1. База для сравнения данных каталогов APM и RC3

Хорошо известно, что сверхновые типа II наблюдаются в спиральных и неправильных галактиках. Поэтому из каталога RC3 мы отобрали 723 объекта этих морфологических типов с известными величинами  $B_T$  и склонениями  $\delta < 0^\circ$ . По их экваториальным координатам  $\alpha$ ,  $\delta$  (эпоха J2000) из каталога APM по Интернету были получены данные об объектах, расположенных только в 515 площадках неба, с размерами (выбранными нами)  $2' \times 2'$  или  $3' \times 3'$  [2]. Как отмечалось выше, в этом каталоге для каждого объекта приводятся экваториальные координаты  $\alpha$ ,  $\delta$  (эпохи B 1950 или J2000), изме-

ренные по "голубым" и "красным" негативам полные величины  $B_j$  и  $R$ , изофотные большие радиусы, эллиптичность  $e = (1 - b/a)$ , позиционные углы (РА) и классификация изображения.

Затем для каждой из 515 площадок было проведено отождествление галактик, по координатам которых получались данные из АРМ. При их идентификации существенными были классификация изображения и минимальные различия в координатах, значениях позиционных углов, отношениях осей  $b/a$  в этих двух каталогах. В процессе идентификации выяснилось, что зачастую данные о них приводились по измерениям только одного негатива. Действительно, согласно нашему отождествлению 91 объект из выборки спиральных и неправильных галактик измерялся только по "красным". Поэтому для дальнейшей статистической обработки мы отобрали 424 объекта, более 60% которых составляют спирали типов  $S_b$ ,  $S_{bc}$  и  $S_c$ ,  $S_{cd}$ .

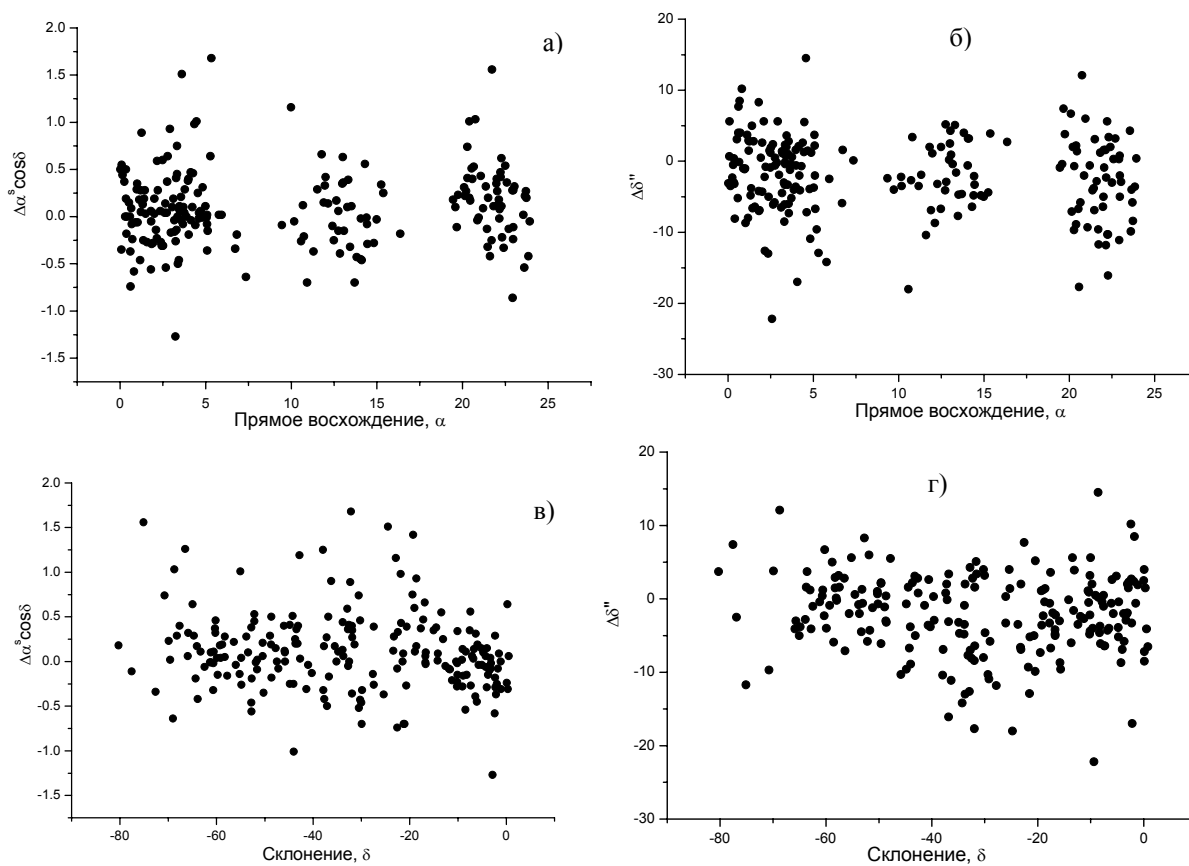


Рис.1.

Сравнение экваториальных координат галактик по данным RC3 [12] и АРМ [2] не выявило их систематического различия. Полученные различия по прямому восхождению (приведены к экватору) и по склонению (рис.1) носят случайный характер и определяются ошибками величин  $\alpha$  и  $\delta$  для протяженных объектов (галактик), методик вычисления координат на эпоху J2000 в этих каталогах, промахами при отождествлении и другими. По данным нашей выборки средние значения разностей составляют по прямому восхождению  $\langle \Delta \alpha \cos \delta \rangle = +1''.14 \pm 0''.24$  и по склонению  $-\langle \Delta \delta \rangle = -1''.84 \pm 0''.27$ , соответственно. Они получены для выборки только ярких спиральных галактик, поэтому отличаются от величины  $0''.5$ , приведенной авторами в [1] в качестве внешней ошибки каталога АРМ.

Кроме того, нами не установлено значимой зависимости разностей  $\Delta\alpha\cos\delta$  и  $\Delta\delta$  от звездных величин  $V_T$  галактик (рис.2). Вычисленные коэффициенты корреляции  $r$  (от 0.02 до 0.13) указывают на слабую связь между этими величинами.

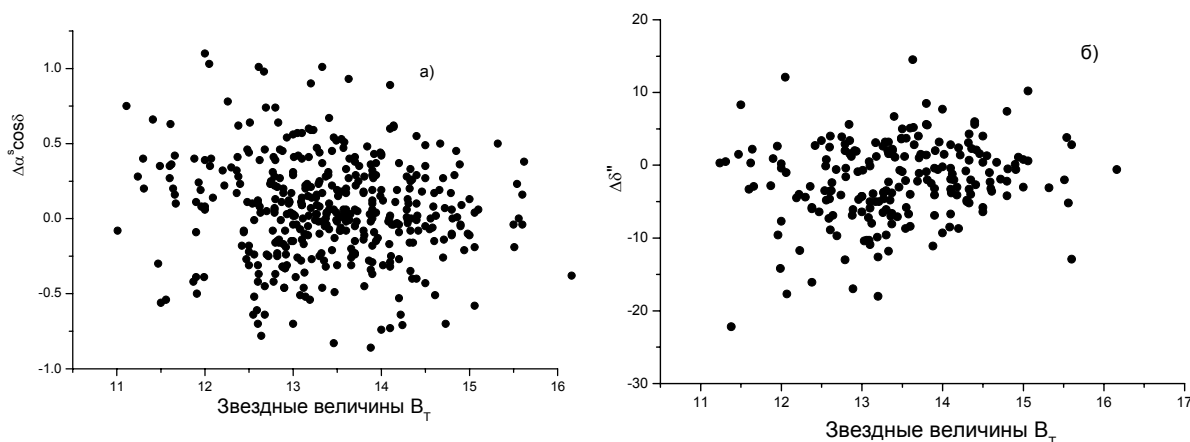


Рис.2.

## 2. Результаты сравнения каталогов АРМ и RC3

### Позиционные углы

Позиционный угол галактики  $PA$  – угол между направлениями на северный полюс мира и ее большой оси. Он возрастает в направлении от севера к востоку ( $N - E$ ).

Анализ величин позиционных углов из каталогов RC3 и АРМ южного неба мы проводили, используя выборку только из 374 спиральных галактик, поскольку для 50 объектов из 424 в [12] отсутствуют соответствующие данные.

Как и в [13], диапазон изменения позиционных углов от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  был разбит нами на 6 равных интервалов. Их середины и частоты распределений значений  $PA$   $n_i$  (АРМ) и  $n_k$  (RC3) приведены в табл. 1. Сравнение выборочных долей вариант по методу Фишера [14] показало, что относительные частоты (частоты) в обеих выборках примерно равны, а их отношения  $w_i/w_k$  не отличаются от 1 значимым образом. Вычисленные значения  $F$  (строка б) существенно меньше величины  $F_{01} = 6.70$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 372$  и уровне доверительной вероятности  $P = 99\%$ . Отсюда следует, что распределения частот  $n_i$  и  $n_k$  (табл.1) близко к равномерному.

Таблица 1. Позиционные углы.

Сравнение выборочных долей вариант по методу Фишера.

		$15^\circ$	$45^\circ$	$75^\circ$	$105^\circ$	$135^\circ$	$165^\circ$	Все
АРМ	$n_i$	77	53	64	58	58	64	374
	$w_i$	0.206	0.142	0.171	0.155	0.155	0.171	
RC3	$n_k$	82	56	62	57	56	61	374
	$w_k$	0.219	0.150	0.166	0.152	0.150	0.163	
	$w_i/w_k$	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	
	$F$	0.19	0.09	0.04	0.01	0.04	0.09	

Применение критерия Пирсона  $\chi^2$  не выявило различия самих распределений частот  $n_i$  и  $n_k$ . Вычисленное значение  $\chi^2 = 0.45$  существенно меньше величины  $\chi^2_{01}(5) = 15.1$  при числе степеней свободы  $f = 5$  и уровне  $P = 99\%$ . Оно показывает, что выборки позиционных углов для двух каталогов можно считать выборками из одной генеральной совокупности.

Кроме того, сравнение величин позиционных углов приводит к аналогичному заключению. Вычисленная средняя величина разностей, равная  $\langle PA(RC3) - PA(APM) \rangle = \langle \Delta PA \rangle = -1^{\circ}.5 \pm 2^{\circ}.8$  при  $\sigma_0 = \pm 55^{\circ}.2$  показывает, что систематического различия между величинами PA нет, и что полученные  $\Delta PA$  носят случайный характер. Они зависят от величины позиционных углов. Для каталога APM вычисленный коэффициент корреляции  $r = 0.51$ , а уравнение линейной регрессии показывает, что с ростом величины PA (APM) уменьшается величина разности  $\Delta PA$ .

$$\Delta PA(\text{cor}) = 43.902 - 0.518 \times PA(\text{APM}) \pm 4.689 \pm 0.046 \quad (1)$$

Для самих значений позиционных углов (рис.3) вычисленный коэффициент корреляции  $r = 0.48$ , а уравнение линейной регрессии имеет вид

$$PA(\text{cor}) = 43.907 + 0.482 \times PA(\text{APM}) \pm 4.690 \pm 0.046 \quad (2)$$

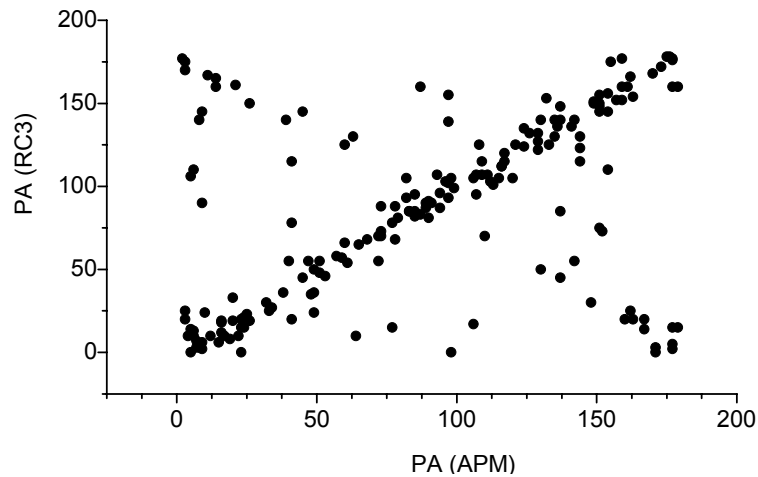


Рис.3.

Оно позволяет по известным  $PA(APM)$  получать их редуцированные значения  $PA(\text{cor})$  в системе каталога RC3. Значения  $PA(\text{cor})$ , вычисленные по этому уравнению, хорошо согласуются с величинами  $PA(RC3)$ . Среднее значение  $\langle PA(\text{cor}) - PA(RC3) \rangle = 0^{\circ}.005 \pm 2^{\circ}.460$  и  $\sigma_0 = \pm 47^{\circ}.584$ .

На рис.3 видно, что выборка спиральных галактик представляет собой 2 системы объектов, различающихся величиной разности  $\Delta PA$ . Для более представительной из них ( $n = 280$ ) существует тесная корреляция ( $r = 0.98$ ) между величинами позиционных углов в этих каталогах, а среднее значение  $\langle \Delta PA \rangle = -0^{\circ}.4 \pm 0^{\circ}.5$  и  $\sigma_0 = \pm 8^{\circ}.9$ .

В вычисленном уравнении линейной регрессии значимым является только угловой

$$PA(\text{cor}) = 0.006 + 0.995 \times PA(\text{APM}) \pm 1.043 \pm 0.010 \quad (3)$$

коэффициент, достигающий единицы. Из него следует, что значения позиционных углов в этих каталогах практически не различаются. Кроме того, это уравнение в пределах ошибок измерений хорошо согласуется с аналогичным уравнением (1) в [13], полученном нами при сравнении каталогов RC3 и APM северного неба.

Вторую систему мы разделили на 2 подсистемы (45 и 49 объектов) согласно знаку индивидуальных разностей  $\Delta PA$  (рис.3). Вычисленные средние значения  $\langle \Delta PA \rangle$  составляют  $+97^\circ.6 \pm 6^\circ.7$  и  $-99^\circ.6 \pm 6^\circ.6$ . Они значимо ( $P = 99\%$ ) отличаются от приведенной выше величины  $\langle \Delta PA \rangle = -0^\circ.4 \pm 0^\circ.5$  по критерию Стьюдента., т.к.  $t = 14.5$  и  $15.0$  существенно больше величины  $t_{0.1} = 3.31$  при числе степеней свободы  $f = 323$  и  $327$ , соответственно, что указывает на принадлежность к разным генеральным совокупностям выборок  $\Delta PA$  в этих системах [14].

Кроме того, нами получена достаточно тесная ( $r = 0.68$  и  $0.69$ ) корреляция разностей  $\Delta PA$  и самих позиционных углов  $PA$  и более слабая ( $r = 0.46$  и  $0.21$ ) для  $\Delta PA$  и отношений осей  $b/a$ . Заметим, что 46 галактик наблюдаются в фас ( $0.70 < b/a < 1.0$ ), причем, характерные для них большие различия в позиционных углах, вероятно, можно объяснить тем, что при выборе направлений больших осей галактик в разных каталогах использованы разные методики.

Остальные 48 галактик являются наклоненными спиралями ( $0.1 < b/a < 0.7$ ). Для них направление большой оси должно определяться достаточно хорошо, однако почти половина из них имеют сложную морфологию (пекулярные структуры, внутренние или внешние кольца), что, вероятно, приводит к большим расхождениям между каталогами при измерении расстояний, определяющих величину тангенса позиционного угла.

### **Изофотные диаметры**

Как указывалось авторами в [1] в каталоге АРМ южного неба [2] приведены выраженные в пикселях (1 пиксель =  $0.''5$ ) радиусы большой оси галактик, измеренные по изофоте обнаружения с уровнем поверхностной яркости  $\mu_b = 25^m$  с квадратной секунды дуги их фотографических изображений. Сравнение значений изофотных диаметров  $D$  из каталогов RC3 и АРМ проводилось по данным для 398 спиральных и неправильных галактик нашей выборки. Для 26-ти ярких галактик ( $B_t < 13^m$ ), для которых  $\Delta D = [D_{25}(RC3) - D_{25}(АРМ)] > 3\sigma$  ( $\sigma$  – ошибка среднего  $\langle \Delta D_{25} \rangle$ ) [15]. Они были исключены из дальнейшего анализа.

Вычисленное среднее значение разностей  $\langle \Delta D_{25} \rangle$ , равное  $+36.''59 \pm 1.''80$  и  $\sigma_0 = \pm 35.''93$ , указывает на систематическое различие в величинах изофотных диаметров обоих каталогов. Оно также показывает, что диаметры  $D_{25}$  (АРМ) являются систематически меньшими по величине, чем  $D_{25}$  (RC3). Как указывалось выше, они определялись двумя разными методами, из которых фотографический является менее чувствительным. Действительно, во время экспонирования изображения слабых внешних областей галактик получаются слабыми по плотности, соответствуя области недодержек характеристических кривых пластинок Kodak Ша-J и Ша-F, и это приводит к уменьшению видимых диаметров изображений галактик. Заметим, что ошибка определения величины изофотных диаметров  $D_{25}$  в каталоге АРМ составляет, в среднем,  $0.''2 \pm 0.''2$  [3], тогда как в RC3 –  $\pm 0.''068$  [12].

Эти индивидуальные разности  $\Delta D_{25}$  коррелируют с величинами самих изофотных диаметров. Для каталога АРМ эта зависимость получилась довольно слабой, ( $r = 0.10$ ), а уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\Delta D_{25} = 28.108 + 0.097 \times D_{25}(\text{АРМ}). \quad (4)$$

$$\pm 4.686 \pm 0.048$$

Для каталога RC3, напротив, эта зависимость получилась более тесной ( $r = 0.78$ ), а уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$\Delta D_{25} = -28.151 + 0.527 \times D_{25}(\text{RC3}). \quad (5)$$

$$\pm 2.904 \pm 0.022$$

Оба эти уравнения показывают, что с ростом величины изофотных диаметров растет величина индивидуальной разности  $D_{25}$  (RC3) –  $D_{25}$  (APM). Тесная корреляция ( $r = 0.75$ ) получена и для самих значений изофотных диаметров (рис.4).

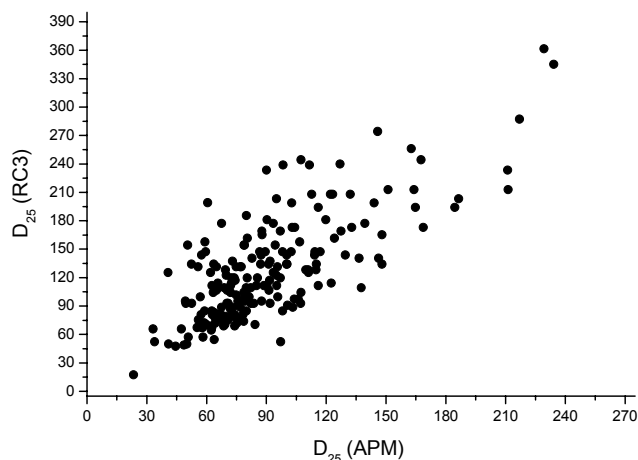


Рис.4.

Полученное уравнение линейной регрессии

$$D_{25}(\text{cor}) = 28.224 + 1.094 \times D_{25}(\text{APM}) \pm 4.678 \pm 0.048 \quad (6)$$

позволяет по известным  $D_{25}(\text{APM})$  определять их редуцированные значения  $D_{25}(\text{cor})$  в системе каталога RC3. Вычисленные  $D_{25}(\text{cor})$  хорошо согласуются с величинами  $D_{25}(\text{RC3})$ . Среднее значение  $\langle D_{25}(\text{cor}) - D_{25}(\text{RC3}) \rangle$  составляет  $0.^{\circ}013 \pm 1.^{\circ}793$  и  $\sigma_o = \pm 35.^{\circ}765$ . Уравнение (6) отличается от аналогичного уравнения (4) в [13], в котором значимым является только угловой коэффициент, а свободный член практически равен нулю.

Затем диапазон изменения изофотных диаметров  $D_{25}$  был разбит нами на 9 интервалов, середины которых приведены в табл. 2. Сравнение выборочных долей по методу Фишера [14] показало, что в выборке спиральных и неправильных галактик доля объектов со значениями  $D_{25} > 120''$  (колонки 8–11) существенно меньше в каталоге APM ( $w_i/w_k < 1$ ). Напротив, в последнем значительно больше ( $w_i/w_k > 1$ ) доля объектов с меньшими значениями диаметров ( $D < 80''$ ) (колонки 4,5). Для интервалов, середины которых равны  $90''$  и  $110''$ , (колонки 6,7) относительные частоты изофотных диаметров в обоих каталогах примерно равны ( $w_i/w_k$  порядка 1). Вычисленные значения величин  $F$  указывают на справедливость этих заключений, поскольку они существенно больше (или меньше) значения  $F_{01} = 6.70$  для уровня  $P = 99\%$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 397$ . Они указывают на значимое различие частот  $n_i$  и  $n_k$  изофотных диаметров в обоих каталогах.

**Таблица 2.** Изофотные диаметры.

Сравнение выборочных долей вариант по методу Фишера.

		30"	50"	70"	90"	110"	130"	150"	170"	>190"	Все
APM	$n_i$	6	70	122	88	51	27	8	11	15	398
	$w_i$	0.015	0.176	0.306	0.246	0.128	0.068	0.020	0.028	0.038	
RC3	$n_k$	1	16	56	85	64	48	40	23	65	398
	$w_k$	0.002	0.040	0.141	0.214	0.161	0.121	0.100	0.058	0.163	
	$w_i/w_k$	7.5	4.4	2.2	1.1	0.8	0.6	0.2	0.5	0.2	
	$F$	4.90	42.66	32.16	1.15	1.76	6.66	25.79	4.47	38.35	

Существенное различие самих распределений изофотных диаметров установлено по критерию Пирсона, поскольку вычисленное значение  $\chi^2 = 126.17$  получилось существенно большим, чем  $\chi^2_{01}(8) = 20.1$  при числе степеней свободы  $f = 8$  и доверительной вероятности  $P = 99\%$ . Оно показывает, что выборки изофотных диаметров из каталогов АРМ и RC3 можно считать выборками из разных генеральных совокупностей.

### Отношение осей

Отношения изофотных диаметров малой  $d_{25}$  и большой  $D_{25}$  осей галактик, измеренных по изофоте обнаружения с уровнем поверхностной яркости  $\mu_B = 25^m.0$  с квадратной секунды дуги, получены по данным анализируемых каталогов АРМ [2] ( $b/a = 1 - e$ ) и RC3 [12] [ $b/a = 1/R_{25} = (d/D)_{25}$ ], соответственно.

Величины отношений осей, изменяющиеся от 1.0 (галактика видна в фас) до 0.1 (галактика видна с ребра) были, как и в [13], разбиты на 9 равных интервалов, середины которых приведены в табл. 3. Полученные отношения частот ( $w_i/w_k$ ) указывают на значимое различие в распределениях частот  $n_i$  и  $n_k$  отношений осей  $b/a$  в обоих каталогах. Они показывают, что в выборке  $b/a$  из каталога АРМ относительные частоты наклоненных галактик (колонка 4) значимо больше ( $w_i/w_k > 1$ ), а видных почти в фас, (колонка 10) значимо меньше, чем в аналогичной выборке из RC3. В остальных случаях относительные частоты в обеих выборках примерно равны ( $w_i/w_k$  порядка 1). Вычисленные значения  $F$  (табл. 3) существенно меньше (или больше) значения  $F_{01} = 6.70$  при числе степеней свободы  $\nu(1) = 1$  и  $\nu(2) = 420$  и уровне  $P = 99\%$ .

**Таблица 3.** Отношения осей.  
Сравнение выборочных долей вариант по методу Фишера.

		0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	все
АРМ	$n_i$	22	56	66	55	55	57	48	41	19	419
	$w_i$	0.052	0.134	0.158	0.131	0.131	0.136	0.114	0.098	0.045	
RC3	$n_k$	16	26	43	51	64	66	69	72	12	419
	$w_k$	0.038	0.062	0.103	0.122	0.153	0.158	0.165	0.172	0.029	
	$w_i/w_k$	1.4	2.1	1.5	1.1	0.8	0.9	0.7	0.6	1.6	
	$F$	0.97	12.78	5.70	0.15	0.83	0.83	4.59	9.96	1.55	

Применение критерия Пирсона также выявило различие в распределениях величин  $b/a$ . Вычисленное значение  $\chi^2 = 32.1$ , что существенно больше величины  $\chi^2_{01}(8) = 20.1$  (при  $f = 8$  и уровне  $P = 99\%$ ). Оно показывает, что выборки отношений осей  $b/a$  спиральных и неправильных галактик из каталогов RC3 и АРМ можно считать принадлежащими разным генеральным совокупностям.

Сравнение самих значений  $b/a$  выявило их небольшое систематическое различие. Действительно, среднее значение разности  $\langle \Delta b/a \rangle = \langle b/a(\text{RC3}) - b/a(\text{АРМ}) \rangle$  составляет  $+0.070 \pm 0.006$  и  $\sigma_0 = \pm 0.128$  является значимым по критерию Стьюдента, ( $t = 11.7 > 2.59 = t_{01}$  при  $f = 421$ ). Оно показывает, что отношения осей  $b/a$  в каталоге RC3 имеют систематически большие значения, чем в АРМ.

Изучение индивидуальных разностей  $\Delta b/a = b/a(\text{RC3}) - b/a(\text{АРМ})$  показало, что они коррелируют с величинами самих отношений осей  $b/a$ , изофотных диаметров и звездными величинами  $B_T$ , которые мы рассматриваем в качестве аналога расстояний. Эти зависимости получились слабыми, но значимыми. Для каталога АРМ соответствующие коэффициенты корреляции равны 0.39, 0.22 и 0.15. Уравнение регрессии, связывающее значения разностей  $\Delta b/a$  и самих  $b/a$  показывает, что

$$\Delta b/a(\text{cor}) = 0.190 - 0.230 \times b/a(\text{АРМ}) \quad (7)$$

$$\pm 0.015 \pm 0.026$$

наибольшие индивидуальные разности  $\Delta b/a$  получаются для галактик, видимых с ребра, а наименьшие – для галактик, видимых в фас. Очевидно, что в каждом каталоге различия в величинах измеренных (разными методами) изофотных диаметров  $d_{25}$  и  $D_{25}$  у галактик, видимых в фас, являются наименьшими. Естественно, что для таких объектов разность отношений  $b/a$  или  $d_{25}/D_{25}$  будет минимальной. Для галактик, видимых с ребра, большие и малые изофотные диаметры существенно различаются по величине, определяются с большими ошибками (особенно малые диаметры) и разность их отношений согласно (7) является наибольшей.

Уравнение регрессии, связывающее значения разностей  $\Delta b/a$  и звездных величин  $V_T$ , показывает, что наибольшие разности получаются для ярких (близких) галактик.

$$\Delta b/a (\text{cor}) = 0.466 - 0.029 \times V_T \pm 0.088 \pm 0.006 \quad (8)$$

Для более далеких объектов измеряются, в основном, их ядерные области и это приводит к уменьшению величин изофотных диаметров и различий в их отношениях, т.е. в отношениях их осей. Этот результат подтверждается уравнением регрессии, связывающим значения  $\Delta b/a$  и логарифмов изофотных диаметров  $D_{25}$  и показывающим, что с уменьшением величины  $D_{25}$  (соответственно и его логарифма)

$$\Delta b/a (\text{cor}) = -0.122 + 0.101 \times \lg D_{25} (\text{APM}) \pm 0.073 \pm 0.038 \quad (9)$$

уменьшается, хотя и слабо ( $r = 0.13$ ), величина разности  $\Delta b/a$ .

Полученные уравнения регрессии (7–9) хорошо согласуются с аналогичными уравнениями, приведенными в [13].

Кроме того, нами получены соотношения, связывающие величины самих отношений осей  $b/a$  и логарифмов их изофотных диаметров  $D_{25}$ . Для каталога APM оно показывает их тесную связь ( $r = 0.64$ ) и имеет вид

$$b/a (\text{cor}) = 2.197 - 0.875 \times \lg D_{25} (\text{APM}) \pm 0.098 \pm 0.051 \quad (10)$$

Из него следует, что в выборке спиральных и неправильных галактик наибольшие значения изофотных диаметров  $D_{25}$  (и соответственно их логарифмов) соответствуют наименьшим значениям отношений  $b/a$ , т.е. наблюдаются у сильно наклоненных спиралей, а наименьшие – у объектов, видимых в фас. Другими словами более близкие и более яркие объекты представлены наклоненными спиральями, тогда как более далекие – видимыми в фас галактиками.

Тесная корреляция ( $r = 0.83$ ) была получена для самих значений  $b/a$  (рис.5).

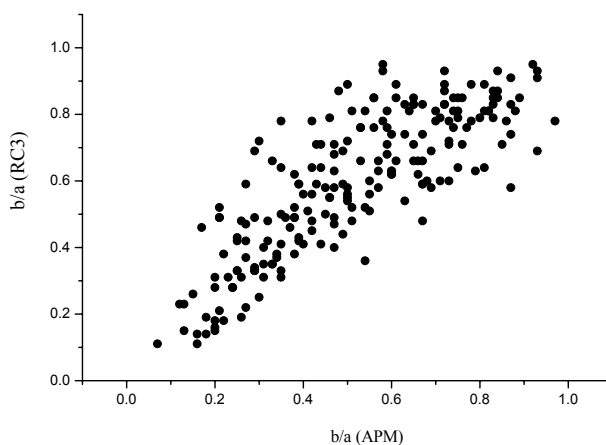


Рис.5.



Уравнение линейной регрессии позволяет по известным  $b/a$  (АРМ) определять их редуцированные значения в системе каталога RC3.

$$b/a(\text{cor}) = 0.186 + 0.779 \times b/a(\text{АРМ}) \pm 0.015 \pm 0.026 \quad (11)$$

Вычисленные  $b/a(\text{cor})$  хорошо согласуются с величинами  $b/a(\text{RC3})$ . Среднее значение  $\langle b/a(\text{cor}) - b/a(\text{RC3}) \rangle = 0.001 \pm 0.001$  и  $\sigma_0 = \pm 0.118$ . Оно также хорошо согласуется с аналогичным уравнением (8) из [13].

### **Звездные величины**

Полные звездные величины  $V_j$  и  $R$ , приведенные в каталоге АРМ [2], определены методом фотографической поверхностной фотометрии для сине-зеленой (от  $3950\text{\AA}$  до  $5400\text{\AA}$ ) и красной областей спектра. Они (достаточно точно) внутренне калиброваны. По оценке авторов цвета ( $V_j - R$ ) определяются с точностью до  $\pm 0.^m2$ , звездные величины слабых объектов – до  $\pm 0.^m25$ . Внешняя ошибка каталога составляет  $0.^m5$  [1,3].

Напомним, что при составлении выборки спиральных и неправильных галактик южного неба из каталога RC3 [12], были исключены яркие объекты с  $V_T < 11^m$ , поскольку для них согласно [13] получались большие индивидуальные различия в величинах изофотных диаметров, экваториальных координат и звездных величин при сравнении с данными каталога АРМ.

В изучаемой выборке величины  $V_T$  изменяются от  $11^m$  до  $16^m.5$ ,  $V_j$  – от  $7^m$  до  $14^m$ . Диапазон звездных величин, общих для обоих каталогов, является небольшим (от  $11^m$  до  $14^m$ ), поэтому мы не приводим результатов сравнения выборочных долей по методу Фишера и сравнения эмпирических распределений по критерию Пирсона.

Анализ величин  $V_T$  и  $V_j$  проводился нами по выборке из 297 общих галактик, поскольку 127 (из 424) объектов с отрицательными значениями  $V_j$  были исключены из дальнейшего рассмотрения. Он показал, что звездные величины галактик коррелируют с логарифмами их изофотных диаметров. Эта зависимость получилась довольно тесной ( $r = 0.75$ ) для выборки из RC3 и достаточно слабой ( $r = 0.37$ ) – для выборки из АРМ. Из уравнения линейной регрессии следует, что более ярким галактикам

$$V_j = 14.297 - 2.839 \times \lg D_{25}(\text{АРМ}) \pm 0.813 \pm 0.422 \quad (12)$$

соответствуют большие значения логарифмов изофотных диаметров.

Сравнение индивидуальных разностей  $\Delta V = (V_T - V_j)$  показало их систематическое различие. Действительно, среднее значение разности  $\langle V_T - V_j \rangle$  составляет  $4^m.52 \pm 0.^m09$  и  $\sigma_0 = \pm 1.^m50$ . Оно показывает, что величины  $V_T$  из каталога RC3 оказываются систематически слабее, в среднем, на  $\pm 4^m.52$ . Они (разности  $\Delta V$ ) коррелируют со значениями самих звездных величин. Из уравнения регрессии видно, что большие

$$\Delta V = 12.132 - 0.858 \times V_j \pm 0.363 \pm 0.040 \quad (13)$$

разности  $(V_T - V_j)$  соответствуют ярким галактикам, а меньшие – более слабым объектам.

Корреляция же между самими значениями  $V_T$  и  $V_j$  (рис.6) получилась довольно слабой ( $r = 0.21$ ). Уравнение линейной регрессии позволяет по данным из АРМ получать

$$V_j(\text{cor}) = 12.079 + 0.149 \times V_j \pm 0.359 \pm 0.040 \quad (14)$$

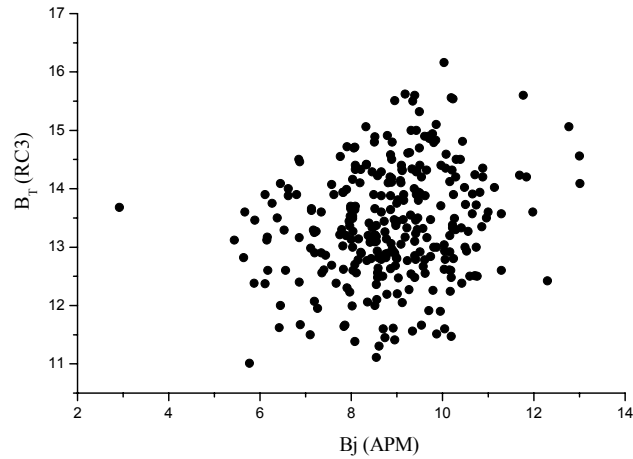


Рис.6.

их редуцированные значения  $B_j(\text{cor})$  в системе каталога RC3. Действительно, вычисленная средняя величина разностей  $\langle B_j(\text{cor}) - B_T \rangle$  составляет  $0^m.005 \pm 0^m.054$  и  $\sigma_o = \pm 0^m.939$ . Оно хорошо согласуется с аналогичным уравнением (12), полученным при сравнении величин  $B_T$  и  $B$  из каталога APM северного неба [13].

Анализ показателей цвета  $(B_j - R)$  и  $(B - V)_T$  проводился нами по выборке из 154 общих галактик. Средняя величина разности  $\langle (B_j - R) - (B - V)_T \rangle = \langle \Delta CI \rangle$  составляет  $0^m.690 \pm 0^m.130$  и  $\sigma_o = \pm 1^m.608$ , показывая, что цвета  $(B_j - R)$  являются систематически более красными, чем  $(B - V)_T$  (каталог RC3). Действительно, среднее значение  $\langle B_j - R \rangle = +1^m.380 \pm 0^m.130$  и  $\sigma_o = \pm 1^m.617$ , а  $\langle (B - V)_T \rangle = +0^m.689 \pm 0^m.013$  и  $\sigma_o = \pm 0^m.163$ . Различие этих показателей цвета помимо других причин, вероятно, можно объяснить различиями в диапазонах спектра, для которых определялись полные фотографические  $B_j$  и  $R$  величины [5], а также фотоэлектрические величины  $B_T$  и  $V_T$  в [12].

Корреляция показателей цвета получилась довольно слабой ( $r = 0.10$ ). Очень тесной ( $r = 0.99$ ) получилась зависимость между величинами  $(B_j - R)$  и  $\Delta CI$  (рис. 7).

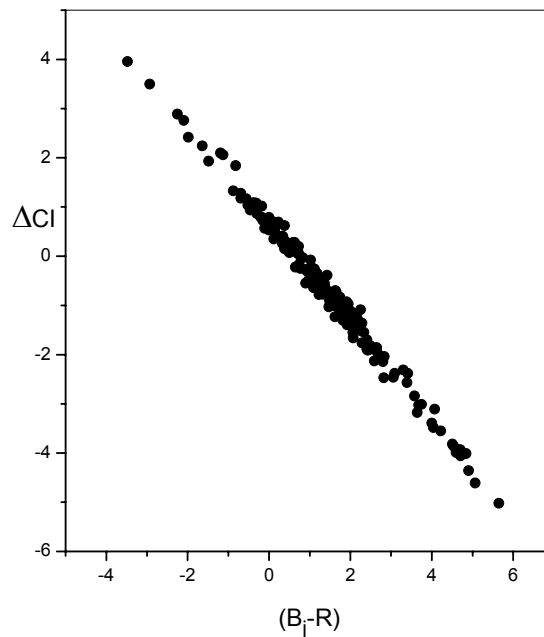


Рис.7.

Уравнение линейной регрессии

$$\Delta CI(\text{cor}) = -0.675 + 0.989x(B_j - R) \quad (15) \\ \pm 0.017 \pm 0.008$$

позволяет определять значения  $(B - V)_T(\text{cor})$  по известным показателям цвета из АРМ.

### 3. Заключение

По данным каталога (нового поколения) АРМ южного неба [2] проведено отождествление и составлена выборка из 424 ярких ( $B_T > 16^m.5$ ) спиральных и неправильных галактик, общих со Справочным каталогом RC3 [12]. Величины позиционных углов PA, больших диаметров  $D_{25}$ , отношений осей b/a, полных звездных величин  $B_j$  и  $B_T$  использовались для статистического анализа и сравнения фотометрических систем этих каталогов. Аналогичного исследования, насколько известно автору, не выполнялось ранее. В статье Лаведей [16] приведены результаты сравнения звездных величин, изофотных диаметров и морфологической классификации его каталога ярких галактик (АРМ – BGC) с ESO/Uppsala [17,18] и каталогом южных галактик Вокулеров и Корвина [19].

Сравнение экваториальных координат галактик в каталогах RC3 и АРМ не выявило их систематического различия. Средние значения разностей составляют по прямому восхождению  $\langle \Delta \alpha \cos \delta \rangle = 1.''14 \pm 0.''24$  и по склонению –  $\langle \Delta \delta \rangle = -1.''84 \pm 0.''27$ , соответственно. Они получены для выборки только ярких спиральных галактик, вероятно, поэтому отличаются от величины  $0''.5$ , приведенной в [1] в качестве внешней ошибки каталога АРМ.

Сравнение распределений изофотных диаметров, отношений осей и звездных величин в этих каталогах, проводившееся по критерию Пирсона  $\chi^2$ , показало их значимое (уровень 99%) различие и возможную принадлежность выборок этих величин разным генеральным совокупностям. Применение критерия Фишера (таблицы 2, 3) выявило достоверное различие частот этих распределений. Различия же в распределениях позиционных углов нами не установлено, выборки PA по критерию  $\chi^2$ , вероятно, относятся к одной генеральной совокупности. Распределения частот в выборках PA – близки к равномерному (табл. 1).

Вычисленные средние значения индивидуальных различий изофотных диаметров, отношений осей и звездных величин указывают на систематическое различие этих физических параметров галактик в каталогах RC3 и АРМ. Кроме того, установлено, что они (индивидуальные различия) коррелируют с величинами самих  $D_{25}$ , b/a,  $B_j$  и  $B_T$ . Полученные уравнения линейной регрессии (4,5,7,13, соответственно) показывают, что наибольшие значения этих разностей получаются для близких, видимых с ребра и ярких галактик.

Также была установлена тесная корреляция между величинами самих изофотных диаметров ( $r = 0.75$ ), отношений осей ( $r = 0.64$ ) одного каталога с соответствующими параметрами другого каталога. Более слабая корреляция получена для позиционных углов ( $r = 0.48$ ) и звездных величин  $B_T$  и  $B_j$  ( $r = 0.21$ ). Поэтому вычисленные уравнения регрессии (6, 11, 2, 14, соответственно) позволяют по данным из каталога АРМ получать редуцированные значения указанных выше параметров в системе каталога RC3.

Кроме того, они хорошо согласуются с уравнениями (4, 8, 12) полученными нами при аналогичном исследовании выборок ярких спиральных галактик из каталога АРМ северного неба и RC3 [13]. Однако, для позиционных углов хорошо согласуются уравнения (1) из [13] и (3) (данная работа). Оно получено для 280 галактик с малой величиной разности  $\Delta PA$ .

Считаю приятным долгом поблагодарить Н.М. Липовку, М.В. Кушнир, Ю.Д. Пикина, В.Н. Фролова, Ю.К. Ананьевскую, К.С. Тавастшерну, М.С. Чубея за помощь при выполнении работы.

### Литература

1. *Irwin M., Maddox St., McMahon R.*// Spectrum 1994. No2, P.14.
2. <http://www.ast.cam.ac.uk%/Eapmcat/>
3. *Maddox S.J., Sutherland W.J., Efstathiou G. et al.*//MNRAS 1990. Vol.243, P.692.
4. *Maddox S.J., Sutherland W.J., Efstathiou G. et al.*//MNRAS 1990. Vol.248, P.1P.
5. *Cannon R.D.*// Astrophys. Space Sci. Libr. 1984. Vol.110, P.25.
6. *West R.*//Modern Techiques in astronomical Photography. Eds. West R.M., Heudier J.L., ESO, Geneva, 1978. P.193.
7. *Maddox S.J., Efstathiou G., Sutherland W.J. et al.*//MNRAS 1996. Vol. 283, P.1227.
8. *Hartley M., Dawe J.A.*//Proc. ASA 1981. Vol.4. P.251.
9. *Maddox S.J., Efstathiou G., Sutherland W.J. et al.*//MNRAS 1990. Vol. 245, P.433.
10. *Полякова Г.Д., Компелева О.В.*//Изв. ГАО. 1996. N 211. С. 44.
11. *Полякова Г.Д.*//Изв. ГАО. 2000. № 215. С. 337.
12. *de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G. et al.* //Third Reference Catalogue of Bright Galaxies, Berlin: Springer. 1991.
13. *Полякова Г.Д.* // Изв. ГАО. 2002. № 216. С.574.
14. *Урбах В.Ю.*//Математическая статистика для биологов и медиков. М.: Издательство АН СССР. 1963. С. 200, 215 и 257.
15. *Агекян Т.А.*//Основы теории ошибок для астрономов и физиков. 1968. Издательство Наука. С. 113.
16. *Loveday J.*//MNRAS 1996. Vol. 278. P.1025.
17. *Lauberts A.*//The ESO/Uppsala Survey of the ESO (B) Atlas. European Southern Observatory. 1982.
18. *Lauberts J., Valentijn E.A.*// The Surface Photometry Catalogue of the ESO/Uppsala Galaxies. European Southern Observatory. 1989.
19. *Corwin H.G., de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A.*//Southern Galaxies Catalogue. Univ. Tex. Monogr. Astron. Vol. 4. 1985.

## THE TYPE II SUPERNOVAE.

### II. THE BRIGHT SPIRAL GALAXIES OF THE APM SOUTHERN SKY CATALOGUE

**Polyakova G.D.**

#### *Summary*

*The results of the statistical investigation and the comparison of RC3 and APM Southern Sky Catalogues photometric systems are presented using the sample of the bright ( $B_T < 16.^m5$ ) spiral and irregular galaxies. The equations of the linear regression have been obtained and permit us to get the corrected values of position angles, isophotal diameters, axis ratios and total magnitudes.*

*Памяти В.Н. Карпинского посвящается*

## **О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОСФЕРЫ**

**Правдюк Л.М., Окунев О.В.**

*Согласно современным представлениям, более адекватно описывать солнечную атмосферу не статистически, как поле случайных флуктуаций плотности, температуры, турбулентности и т.д., а как популяцию из различных видов элементов с присущими им различными типами эволюции и взаимоотношений. Исходя из представлений о гранулах и порулах как о первичных и равноправных элементах ансамбля фотосферных структур, независимо анализируются их топологические характеристики такие как: соотношение площадь-периметр, показатель формы, эффективный диаметр, фрактальная размерность. Анализируются некоторые пространственно-временные свойства фотосферного поля яркости на примере 16 минутной серии прямых стратосферных снимков Солнца с высоким пространственным разрешением.*

### **Введение**

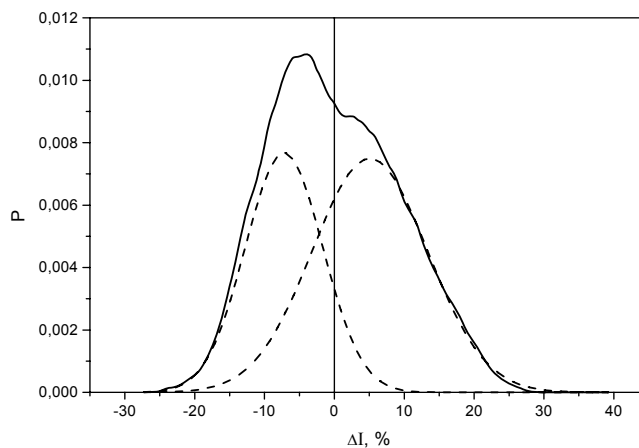
Одним из методов анализа тонкой структуры фотосферы (ТСФ) является феноменологический подход. Цель этого метода - изучение сложного фотосферного поля яркости, по возможности простое и определенное описание его структуры и динамики и нахождение присущих ему связей с другими крупномасштабными структурами солнечной атмосферы, и создание таким образом предпосылок для прогнозирования грануляционной картины и диагностики подфотосферных слоёв. Такой подход был применен В.Н. Карпинским и его коллегами [1-5] для анализа прямых фотоснимков, полученных в 60-70 годах с помощью стратосферного солнечного телескопа. Теоретическое разрешение стратосферного телескопа составляло  $0.25'' \sim 180$  км на поверхности Солнца и полученное пространственное разрешение на лучших стратосферных кадрах близко к дифракционному пределу. Наблюдаемый контраст  $\sigma_{\Delta I} = 7\% \div 9\%$ , а исправленный за инструментальное искажение меняется в пределах  $\sigma_{\Delta I \text{ corr}} = 24\% \div 30\%$ . Длина волны  $\lambda = 4650 \text{ \AA}$ .

Одним из интересных результатов, полученных из анализа стратосферных снимков высокого разрешения, является впервые обнаруженное характерное распределение флуктуаций яркости, существенно отличающееся от гауссового распределения [4]. Пример такой гистограммы построенной по лучшему кадру приведен на рисунке 1. Характерными особенностями данного распределения являются:

- максимум распределения не соответствует среднему значению яркости, а смещен в сторону отрицательных флуктуаций относительно среднего уровня
- распределение не симметрично
- кривая бимодальна, т.е. полученное распределение может быть представлено как комбинация двух гауссиан (штриховые линии на рисунке 1.)

Бимодальный характер кривой наводит на мысль о существовании двух компонент в фотосферном поле яркостей. Из этого следует, что более адекватно было бы описывать солнечную атмосферу не как поле случайных флуктуаций плотности, температуры, турбулентности и т.д., а как популяцию из различных видов элементов с при-

сущими им разными типами эволюции и взаимоотношений. В рамках данной концепции, сложное поле яркости солнечной фотосферы сводится к ансамблю локальных морфологических элементов — гранул, разделенных темной неограниченной межгранулярной сеткой, включающей более темные локальные образования – порулы. Термин «порула» был введен Рёшем [6].

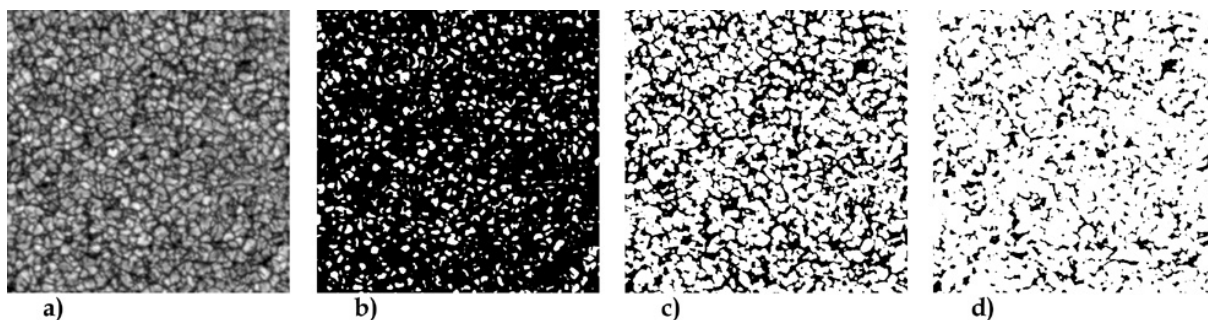


**Рис.1.** Распределение флуктуаций яркости в спокойной фотосфере.

Таким образом, было показано [1-5], что солнечная грануляция существенно отличается как от Бенаровской картины односвязных ярких образований, разделенных неограниченной многосвязной сетью темных промежутков, так и от гауссова поля. Для нее характерны структуры "полярного" типа "гранула - порула".

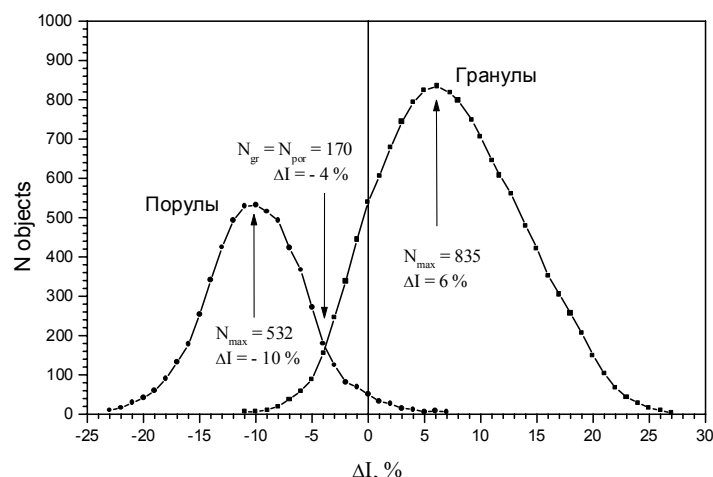
### Топология гранул и порул

Целью данной работы является сравнительный анализ некоторых свойств гранул и порул как первичных и равноправных элементов ансамбля фотосферных структур. Для этого лучшие стратосферные снимки были оцифрованы и аккуратно откалиброваны, используя построенную характеристическую кривую [7-9]. Размер анализируемой площадки составлял 60"× 60". Естественным образом гранулы и порулы дифференцируются по градациям интенсивности. Однако было необходимо найти объективный количественный критерий для выделения гранул и порул, т.е. найти уровни яркости, соответствующие этим структурам. Для этого был разработан следующий алгоритм. Выбирался некоторый пороговый уровень яркости  $\Delta I_p$ , и все интенсивности, которые лежат выше выбранного порога, кодировались белым цветом, ниже этого порога — черным. Если выбрать уровень достаточно высоко, то изображение предстанет в виде белых замкнутых «островков» (гранул) в «черном море» (рис.2b). При достаточно низком уровне пороговой яркости картина предстанет в виде черных замкнутых «островков» в «белом море» (рис.2d). Последовательно варьируя порог от самого большого  $\Delta I_{\max} = 30\%$  до самого маленького  $\Delta I_{\min} = -25\%$ , на каждом шаге цикла отдельно считалось количество замкнутых белых и черных областей. Полученные зависимости количества замкнутых областей от порогового уровня представлены на рисунке 3, из которого видно, что максимумы числа белых и черных замкнутых областей приходятся на уровни  $\Delta I_g = +6\%$  и  $\Delta I_p = -10\%$ , которые и были приняты в качестве гранулярного и порульного уровней соответственно. Наружные границы гранул и порул определялись соответственно самой низкой и самой высокой замкнутыми изофотами, включающими эти максимумы.



**Рис.2.** а) Исходная площадка б) гранулы  $\Delta I_g \geq +6\%$ , в) стартовый уровень  $\Delta I_s \cong -4\%$ , д) порулы  $\Delta I_p \leq -10\%$

Кривые на рисунке 3 имеют еще одну особенность, на уровне  $\Delta I_s = -4\%$  оказалось, что число белых областей равно числу черных  $N_g = N_p = 170$ , они топологически равноправны и изофоты на этом уровне не замкнуты. В морфологической модели, предложенной В.Н. Карпинским [1-2], этот уровень назван «стартовым»  $\Delta I_s$ , а гранулы и порулы представлены выбросами яркости вверх и вниз от этого уровня. В пределе, при приближении к стартовому уровню общая площадь выбросов вверх составляла 62%, а вниз –38%. Бинарные картинки, соответствующие полученным уровням и  $\Delta I_g$ ,  $\Delta I_p$  и  $\Delta I_s$  представлены на рисунке 2. Интересно отметить, что стартовый уровень оказался ниже уровня средней интенсивности на 4% и соответствует максимуму распределения флуктуаций яркости (рис.1)!



**Рис.3.** К определению уровней яркости, соответствующих гранулам и порулам – Зависимость белых и черных замкнутых областей (рис.2.) от порогового уровня

Таким образом, достаточно определенно можно охарактеризовать морфологические элементы поля флуктуаций яркости солнечной фотосферы: гранулы, межгранулярный промежуток, стартовый уровень, межпорульный и порулы.

– Гранула однозначно связывается с системой замкнутых изофот, определяющих её границу и конфигурацию. Она отождествляется с положительным импульсом яркости с основного уровня. Понижается неопределенность при подсчете числа гранул.

– Элемент "порула" определяется как внутренняя область изофоты, замкнутой вокруг минимума яркости, превышающей  $\Delta I_p$  (уровень порул).

– Межгранулярным назван более темный промежуток, разделяющий соседние гранулы, но выше стартового уровня.

– Межпорульным, соответственно, назван промежуток разделяющий порулы, находящийся ниже стартового уровня. Оба эти промежутка, примыкающие к стартовому уровню относятся к незамкнутым изофотам.

На гранулярном уровне число белых «островков» оказалось равным  $N_g = 835$ , а черных на порульном —  $N_p = 532$  на площадке размером  $60'' \times 60''$ .

В таблице 1 приведены данные о гранулах и порулах.

**Таблица 1.**

N п/п	Элемент	Гранулы	Порулы
1	Количество элементов на выбранной площадке	835	532
2	Количество элементов на поверхности Солнца	$3.7 \times 10^6$	$3.6 \times 10^6$
3	Занимаемая доля всей площади, (%)	$\geq 30$	$\geq 18$
4	Средняя площадь одного образования в км <sup>2</sup>	$51 \times 10^4$	$37 \times 10^4$
5	Диаметр круга, равный ср. площади в км	806	677
6	Ср. $\Delta I$ (Основание – вершина (%))	13.2	6.7
	Соотв. $\Delta T$ (К) $\lambda_{эфф} = 4650 \text{ \AA}$	174	92

Относительно стартовой плоскости нет существенных топологических различий в структуре элементов положительных и отрицательных импульсов яркости, хотя фотометрически они различны. Поэтому именно стартовый уровень естественно рассматривать, как уровень яркости однородной невозмущенной фотосферы, а флуктуации импульсов яркости вверх и вниз от него, как его возмущения — неоднородности, обусловленные механизмами, ответственными за существование тонкой структуры.

Используя введенные выше определения границ гранул и порул, независимо анализировались и сравнивались некоторые топологические характеристики этих структур: форма, распределение по площадям и фрактальные размерности. В качестве величины, характеризующей форму, был выбран показатель формы:

$$f = \frac{2\sqrt{\pi S}}{P}$$

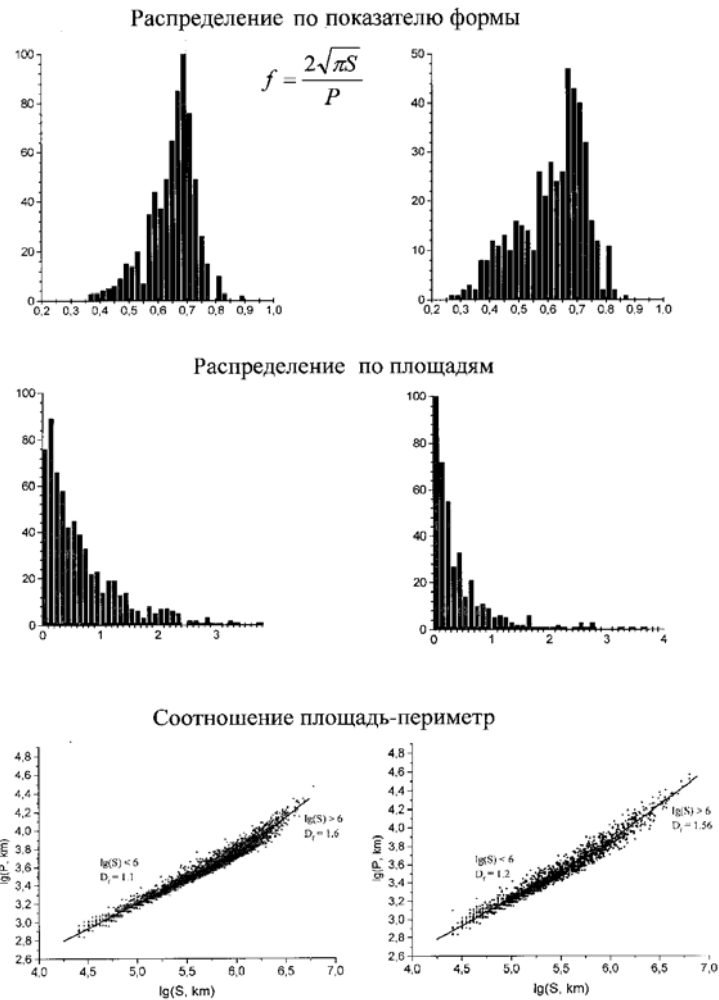
Этот параметр является безразмерным и нормированным на 1 для окружности. Смысл показатель формы: чем правильнее фигура, тем выше значение  $f$  и для вытянутых и имеющих сильно изрезанные границы фигур  $f$  уменьшается.

Приведенные на рисунке 4 распределения для показателей формы и площадей дают представление о различии гранул и порул: порулы меньше по площади и имеют более изрезанные границы. Также необходимо отметить, что соотношение площадь–периметр, дающее оценку фрактальной размерности, практически одинаково для гранул и порул, что возможно связано с малыми размерами порул и недостаточно малым шагом для измерения их периметра.



## Гранулы

## Порулы

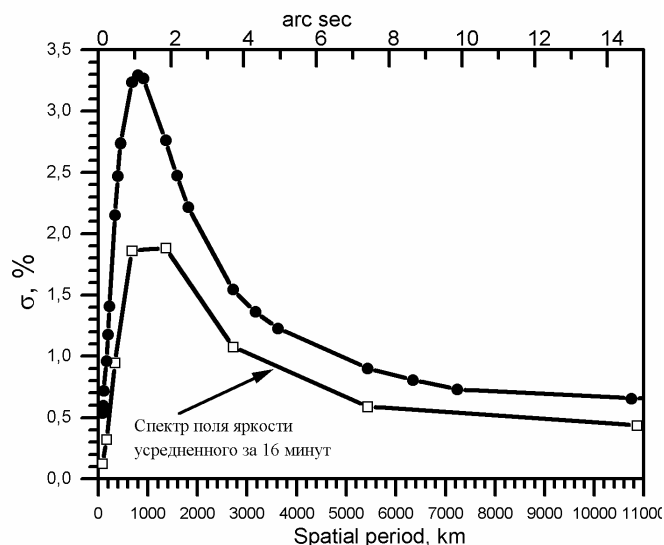


### Пространственно-временная структура фотосферного поля яркости

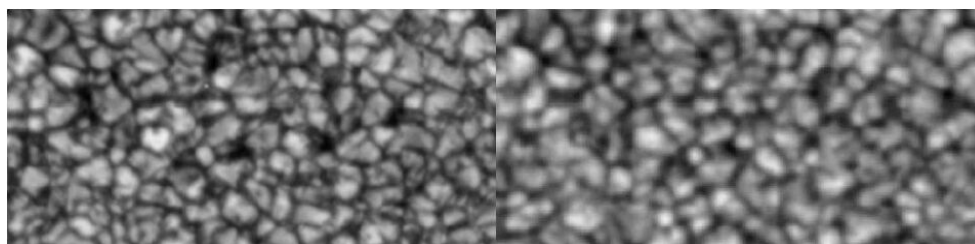
Для исследования поведения флуктуаций яркости со временем была использована серия из 42 кадров. Временной интервал ограничен 16 минутами. Все кадры серии были пространственно совмещены.

Для выделения из фотосферного поля яркости структур различных масштабов использовалась пространственная фильтрация, основанная на разложении двумерного поля по ортогональным функциям wavelet-ам. Использовался wavelet МНАТ. Каждый из кадров серии был разложен на 8 компонент с различными пространственными периодами, от 85 км до 11000 км.

Определив амплитуды флуктуаций яркости для каждого из полученных пространственных периодов, был построен амплитудный спектр, приведенный на рисунке 5. Максимум спектра приходится на 1", что примерно соответствует размеру гранул и порул, которые являются основными структурными элементами спокойной фотосферы Солнца.



**Рис.5.** Распределение амплитуд флуктуаций яркости по пространственным периодам.  
*Закрашенные кружки* — спектр, построенный по одному кадру из серии.  
*Пустые квадратики* — спектр, построенный для кадра усредненного за 16 минут.



**Рис.6.** Сравнение первого кадра в серии с усредненным за 16 минут.

Аналогичный амплитудный спектр был построен для поля яркости, усредненного за 16 минут. Как и ожидалось, амплитуда флуктуаций понизилась, но при этом сохранилось положение максимума амплитудного спектра (1"-2"). Возможно, это связано с тем, что 1"-2"-ные структуры имеют тенденцию появляться на одних и тех же местах на протяжении всей серии (16 мин.). Такая тенденция наблюдается также визуально. Контраст на усредненном изображении (рисунок 6) остается довольно высоким ~6% и корреляция суммарного изображения с первым и последним кадром составляет  $R \sim 0.6$ . Анализируемая серия, к сожалению, ограничена 16 минутами, что соответствует всего 2-3 характерным временам жизни гранул. Однако, в исследованиях D. Muller и др. получено, что активные гранулы могут существовать даже более 3-х часов [11]. «Привязанность» гранул к определенному месту длительное время, представляется очень важным результатом, так как это подтверждает, что флуктуации интенсивности в фотосфере не случайны и физически связаны со структурами, находящимися в более верхних слоях атмосферы Солнца.

#### Литература

1. *В.Н. Карпинский*, Солн. Данные, № 2, 1980.
2. *В.Н. Карпинский*, Солн. Данные, № 7, 1980.
3. *V.N. Karpinsky*, Nature, 341, 311, 1989.
4. *Л.М. Правдюк, В.Н. Карпинский, А.В. Андрейко*, Солн. Данные, № 2, 1974.
5. *V.N. Karpinsky and V.V. Mekhanikov*, Solar Phys., 54, 25, 1977.
6. *J. Rösch*, Ann. Ap., 22, 584, 1959.

7. **О.В. Окунев, Л.М. Правдюк**, Известия ГАО, № 212, 1998.
8. **О.В. Окунев, Л.М. Правдюк**, Труды конференции, посвященной 275-летию РАН и 160-летию Пулковской Обсерватории, 1999, с.205–209.
9. **О.В. Окунев, Л.М. Правдюк**, Труды конференции, посвященной 275-летию РАН и 160-летию Пулковской Обсерватории, 1999, с.209–212.
10. **В.Н. Карпинский**, Сборник Трудов IV Международной Конференции, посвященной 400-летию Декарта и 350-летию Лейбница «Проблемы пространства, времени, движения», т.1, стр. 154–169, 1997.
11. **D.A.N.Muller, O.Steiner, R.Schlichenmaier, P.N.Brandt**, Solar Physics 203, 211-232, 2001.

## ON SOME PECULIARITIES OF FINE STRUCTURE OF THE SOLAR PHOTOSPHERE

**Pravdjuk L.M., Okunev O.V.**

### *Summary*

*In the present work the white-light photographs taken by the balloon-borne solar telescope were analyzed. A time sequence of 42 images (16 min) was selected. On the best frames the spatial resolution is close to the diffraction limit 0.25" 180 km with r.m.s. contrast of 8% - 9%. Two approaches were used to investigate the observational material.*

*The first is based on the idea that it is more adequate to describe solar atmosphere not statistically as a field of random fluctuations of temperature, density etc but as a population of different type elements possessing peculiar types of evolution and relations. Following this idea we investigate some topological properties of the basic structures of the solar photosphere - **granules** and **porules** - considering them as members on equal rights of the ensemble of photospheric structures.*

*Second approach statistical: we study the properties of the brightness field making no difference between individual elements. The special interest was devoted to the space-time structure of the brightness field. For spatial filtering 2-D wavelet transformation was applied.*

*The analysis of the temporal average of all frames in the time sequence reveals that photospheric structures tend to reappear in the same places during the whole time sequence.*

## **СТРУКТУРА ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ В НИЖНЕЙ КОРОНЕ И ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ В ЭПОХУ СМЕНЫ ЗНАКА ОБЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА**

**Стоянова М.Н.**

*На основе атласа синоптических карт ультрафиолетового диапазона, публикуемых в NASA, и снимков Yohkoh в мягком рентгене исследовалось изменение крупномасштабных яркостных неоднородностей в полярных зонах в эпоху смены знака общего магнитного поля и их связь с мелкомасштабными проявлениями – яркими корональными точками. Результаты показывают взаимосвязь активных структур на полюсе в мягком рентгене и ультрафиолетовом диапазоне. Выявлено наличие устойчивых активных долготных интервалов.*

Процесс смены знака общего магнитного поля Солнца является глобальным по своей природе, затрагивающим все слои солнечной атмосферы. Взаимосвязанность отдельных явлений в едином общем процессе обуславливает интерес ко всем изменениям в этот период в структурах самого разного масштаба. В нашей предыдущей работе [1], а также в работах других авторов [2,3] была рассмотрена связь появления ярких точечных объектов в солнечной короне с эволюцией линии смены знака фонового поля. В частности, в период переполюсовки нами была установлена тесная взаимосвязь большинства ярких корональных точек с глобальной линией смены знака поля как результат множества локальных пересоединений магнитного поля в этой зоне.

В этой работе на основе изучения нового материала мы ставили целью совместное изучение макро и микро масштабов активности в полярных областях, ограничиваясь гелиографической широтой  $\pm 60^\circ$ . Под макро-активностью подразумеваются обширные (до  $20^\circ$ - $30^\circ$  по долготе) изменения интенсивности внутри полярных областей. Визуально исследовалось изменение таких яркостных неоднородностей в течение трех лет (1999–2001) и их связь с активностью мелкомасштабных яркостных объектов – корональных точек.

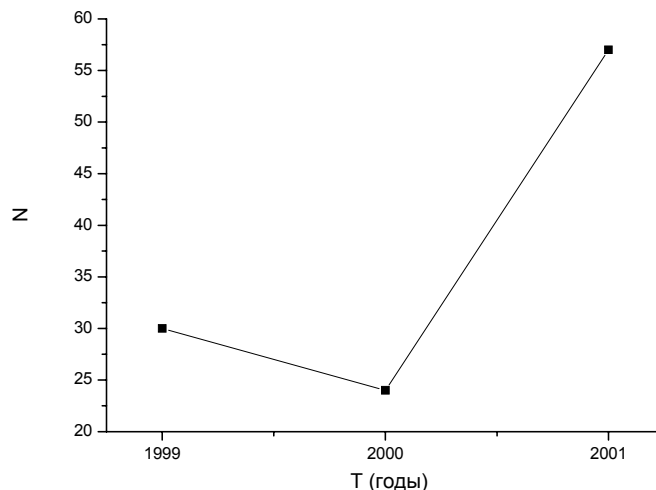
Второй задачей явилось исследование долготного распределения числа ярких корональных точек как индикатора проявления долготной активности в полярной зоне.

Основой данного исследования является атлас EIT синоптических карт в 4-х корональных линиях ультрафиолетового диапазона  $171\text{\AA}$ ,  $195\text{\AA}$ ,  $284\text{\AA}$  и  $304\text{\AA}$ , выполненный Е.Е. Беневоленской и опубликованный в Internetе [Solar Data Analysis Center, NASA Goddard Space Flight Center], а также снимки Yohkoh в мягком рентгене и отдельные снимки EIT, представленные в SOHO.

Практически весь рассматриваемый диапазон относится к высоте нижней короны и переходного слоя. Однако, механизмы возбуждения в мягком рентгене и в ультрафиолетовых линиях разные. Излучение в мягком рентгене носит тепловой характер и свидетельствует об изменении плотности свечения. Яркие корональные точки возникают в локальных пересоединениях, выделяемая ими энергия мала и их температура повышается незначительно [3], но они свидетельствуют о динамической неустойчивости поля и могут вести к его изменению в данном районе. Анализ снимков, полученных в мягком рентгене, выявляет существенную роль крайне слабых перепадов яркости в полярной области. По площади эти перепады могут быть достаточно обширны и занимать  $10^\circ$ - $20^\circ$  по широте. Большинство ярких точек в рентгене и в ультрафиолетовом диапазоне располагается по границам этих перепадов, как бы слабы они не были. Следует сказать, что согласно результатам нашей прежней работы [1], большая часть на-

блюденных ярких точек располагается вблизи линии раздела полярностей, но в данном исследовании в поле зрения были включены и более слабые светящиеся объекты. Также в основную задачу входило рассмотрение обширных яркостных неоднородностей в ультрафиолетовом диапазоне, почти постоянно существующих в полярных зонах. В основном они близко подходят к линии раздела полярностей и часто обнаруживаются в заливах, создаваемых линией раздела полярностей. Сопоставление показывает, что в этих местах наблюдается слабое повышенное свечение в рентгеновском диапазоне.

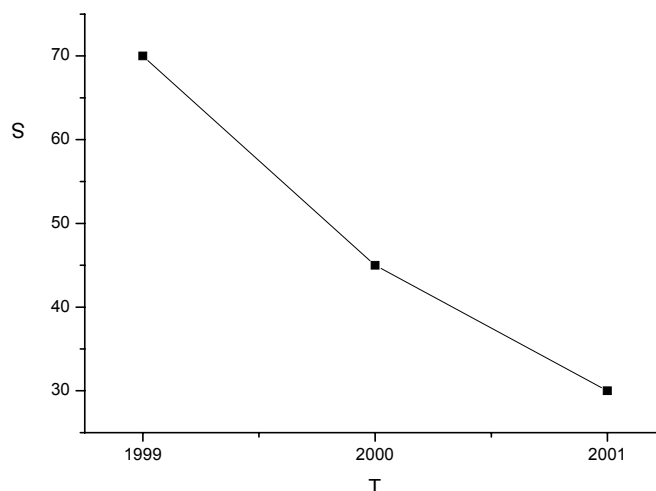
Результаты исследования рентгеновского диапазона за три года (1999-2001) выявляют заметное эволюционное изменение структуры полярных областей. При всем разнообразии распределения интенсивности в полярных зонах в отдельные дни, в целом, можно определенно говорить об изменении характера свечения полярной зоны в разные годы. В 1999 г. преобладал более интенсивный фон полярной зоны, перепады яркости внутри нее были достаточно слабы, а яркие рентгеновские точки располагались преимущественно на разделах этих перепадов. В 2000 г., особенно во второй его половине, все чаще начинают появляться обширные области пониженной яркости. По интенсивности их еще нельзя отнести к корональным дырам, однако такое понижение яркости свидетельствует о понижении плотности короны в этом участке. Яркие рентгеновские точки, как и в случае корональной дыры, располагаются по краям или внутри этих участков. Следует отметить, что в конце 2000 г. и в 2001 г. в рентгеновском диапазоне возникает большое количество слабых и аморфных образований повышенной интенсивности. Их также следует отнести к рентгеновским точкам. Однако, далеко не все рентгеновские точки имеют соответствие в ультрафиолете, что свидетельствует о локальности явления, ограниченного структурой магнитного поля на данной высоте. На рис.1 приведено распределение числа ярких рентгеновских точек в N - полярной зоне в период 1999–2001 гг.



**Рис.1.** Распределение ярких рентгеновских точек в N-полярной зоне.

Обширные участки повышенной или пониженной яркости в мягком рентгене всегда связаны со значительно более контрастными областями в ультрафиолетовом диапазоне. В конце 2000 г. и начале 2001 г. начинают появляться корональные дыры, занимающие высокие широты, постепенно увеличиваясь в количестве в 2001 г. Одновременно увеличивается и общая площадь пониженной яркости в полярной зоне. Основное число ярких корональных точек в ультрафиолетовом диапазоне связано именно с более разреженными темными областями. Возникновение ярких точек внутри областей пониженной интенсивности, возможно, обусловлено возрастанием локальных пересоединений в районах более открытого поля. Одновременно с этим в ультрафиолетовых об-

ластях существуют и локальные яркие области, состоящие из почти неразделимых ярких точек. В рентгене эти участки соответствуют участкам повышенной яркости. Эта разновидность структурных неоднородностей тяготеет к линии раздела полярностей фонового поля и свидетельствует, как уже отмечалось ранее [1,2], о большой роли глобальной пинии раздела полярностей в энергетике окружающего пространства. На рис.2 приведена гистограмма распределения площадей повышенной интенсивности в рентгеновском диапазоне за три года. За 100% принимается яркий рентгеновский фон всей полярной области. Оценивалась площадь повышенной интенсивности на каждом снимке в течение всего исследуемого периода. В 1999 г. эта доля составляет приблизительно 70%, в 2000 г. – 45% и в 2001 г. – 30%.



**Рис.2.** Распределение площадей повышенной интенсивности в рентгеновском диапазоне.

**Таблица 1.**

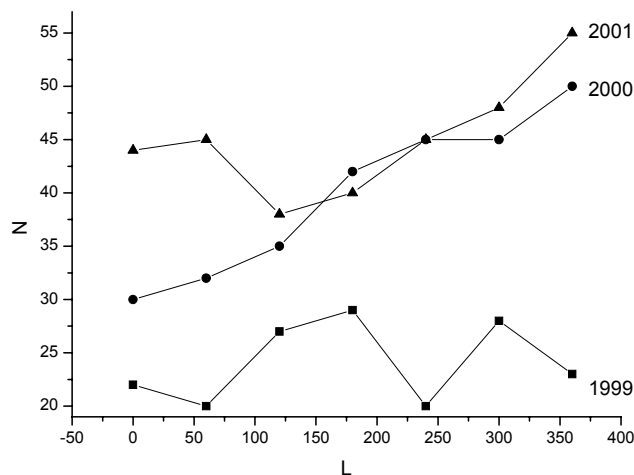
Распределение темных областей в N-полярной зоне в ультрафиолетовом диапазоне по долготным интервалам.

Месяц	Долготные диапазоны по годам (L°)		
	1999	2000	2001
01	–	120-150, 210-240	0-60, 120-180
02	–	270-310	0-90
03	150-240	–	300-330
04	0-60, 120-180	–	270-330
05	–	240-260	180-240, 270-300
06	–	210-230	240-330
07	240-270, 300-360	120-180	300-360
08	180-210, 330-360	180-240	180-240
09	90-120, 300-360	–	0-60, 240-300
10	240-270, 300-360	240-300	150-180, 330-360

Основной вклад в понижение интенсивности в 2001 г. вносят корональные дыры. Они резко отличаются по интенсивности от исследуемых слабых потемнений, и края их структур четко выделяются на общем фоне. Наличие темных и светлых областей как в рентгеновском, так и в ультрафиолетовом диапазонах является характеристикой активности полярной зоны и их площадь существенно меняется в процессе переполюсовки. В таблице 1 приведено распределение по долготным интервалам темных областей в N-полярной зоне в ультрафиолетовом диапазоне в период 1999–2001 гг. Корональные ды-

ры в это рассмотрение не входят, так как целью исследования являются более слабые объекты. Анализ показывает, что к окончанию переполусовки число темных областей увеличивается и вместе с тем увеличивается их концентрация в определенных интервалах долгот.

Одновременно с этим мы провели исследование распределения ярких точечных объектов в ультрафиолетовом диапазоне внутри долготных интервалов за тот же период. Полученные результаты приведены на рис.3.



**Рис.3.** Распределение ярких точек ультрафиолетового диапазона по долготе за 3 года.

Хотя распределения соответственно показывают большое разнообразие, однако в них можно выделить устойчивые долготные интервалы, характеризующиеся повышенной активностью. Они примерно совпадают с интервалами распределения темных областей. Этот результат в какой-то мере согласуется с результатом, полученным в [4].

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что даже слабые перепады яркости в рентгеновском диапазоне вызывают на их границах энергетический отклик, проявляющийся в локальных пересоединениях линий магнитного поля. Более сильные изменения яркости в ультрафиолетовом диапазоне, будучи в какой-то мере связанными с рентгеновским диапазоном, также обнаруживают сильные энергетические изменения, что выражается в распределении внутри них ярких точек. Анализ показывает, что приблизительно лишь половина всех ярких точек связана с линией раздела полярностей, вторая же часть связана в большей степени с наличием темных областей в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах. Количество этих областей менялось по мере окончания переполусовки в сторону их увеличения.

Таким образом, полярные зоны в эпоху смены знака общего магнитного поля Солнца (1999-2001) проявляют последовательное изменение своей активности. Выявляется существенная роль локальных областей слабого изменения контраста в мягком рентгене и образования ярких и темных изолированных структур в ультрафиолетовом диапазоне в переходной области. Это же подтверждает и полученные ранее на основе изучения кальциевых снимков [5] данные о существовании в полярных зонах изолированных центров активности со слабым энерговыделением внутри них. Поэтому, исходя из всех данных, можно сделать вывод о сложной динамической структуре полярных зон, существовании в них структур с повышенной активностью, их тесной взаимосвязи в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах и связи с общей структурой магнитного поля.

### Литература

1. **Стоянова М.Н.** // Труды конференции “Солнце в эпоху смены знака магнитного поля” 2001 г. СПб. С.369.
2. **Chertok Y.M** // Solar Phys. 2001, V.198. P.367.
3. **Bergman D. and Clotte F.** //Solar Phys. 1999. V.186. P.207.
4. **Бадалян О.Т, Обридко В.Н., Сикора Ю.** // Труды конференции “Солнце в эпоху смены знака магнитного поля”, СПб. С.41.
5. **Стоянова М.Н.** // Труды конференции “ Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца”, СПб, 2002. С.507.

## THE STRUCTURE OF POLAR REGION IN THE LOW CORONA AND TRANSITION LAYERS DURING OF THE GLOBAL MAGNETIC FIELD REVERSAL

**Stoyanova M.N.**

### *Summary*

*The connection between the polar structures in soft rentgen and in ultraviolet diapasons was considered on the base of SOHO and YOKHOH observations in the period of polar reversal. The activity of different structures in both diapasons were investigated. The results show significant changes of polar activity both in soft roentgen and ultraviolet diapasons during this period.*



## **КАТАЛОГ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР И ПОЛОСТЕЙ ВОЛОКОН ЗА ПЕРИОД 1974-2003**

**Тавастшерна К.С., Тлатов А.Г.**

*На основе наблюдений Солнца в линии HeI 10830A в обсерватории Китт Пик в период с 1974 по 2003 год (обороты N 1622–2003) подготовлен к печати Каталог корональных дыр и полостей волокон совместно с H- $\alpha$  синоптическими магнитными картами за этот же период. Используются синоптические карты в линии нейтрального гелия HeI 10830A и карты магнитных полей, представленные в Internet. Разработана компьютерная методика, которая использована при обработке наблюдений для выделения корональных дыр и полостей волокон. Обсуждаются результаты сравнения свойств корональных дыр по новому Каталогу с данными из каталога Санчез-Ибарра [1]. Изучено распределение корональных дыр в солнечном цикле и выполнен сравнительный анализ с данными магнитографических наблюдений.*

### **Введение**

В настоящее время хорошо известно, что вспышки, корональные дыры и полости волокон являются источниками усиленного солнечного ветра (со средней скоростью около 700 км/сек и пониженной плотностью плазмы  $n = 4 \text{ см}^{-3}$ ). Они локализируются в областях магнитного поля с открытыми силовыми линиями, которые не препятствуют радиальному расширению корональной плазмы. Это объясняет увеличение скорости потока корональной плазмы. Пониженная интенсивность рентгеновского излучения в области корональных дыр может быть связана как с пониженной температурой,  $0.8 \times 10^6 \text{ K}$ , так и с пониженной плотностью до 0.25 от плотности спокойной короны. Рекуррентные потоки, возникающие благодаря корональным дырам, существуют много месяцев, регулярно появляясь примерно через 27 дней. Они расположены в областях униполярного магнитного поля с радиально расходящимися силовыми линиями [2].

Вспышки и корональные выбросы масс представляют собой достаточно интенсивный источник спорадического высокоскоростного потока солнечного ветра со скоростями до 1200 км/сек. Двигаясь относительно спокойного медленного ветра, высокоскоростной поток как бы сгребает плазму, образуя перед его фронтом ударную волну. Время пробега высокоскоростного потока до Земли около 1–2 суток. Корональные выбросы масс и вспышки определенно связаны с протуберанцами или темными волокнами. Некоторая часть волокон также имеет открытые конфигурации магнитного поля и, в некотором смысле, представляет активные процессы как и корональные дыры. Они являются источниками медленной компоненты солнечного ветра с повышенной плотностью потока, скорость которого достигает 400 км/сек.

В 1992 году Санчез-Ибарра и Барраза-Парадес опубликовали Каталог корональных дыр (КД) [1] за период 1974-1991 гг., который затем был дополнен до 1995 года. Этот Каталог до настоящего времени является единственным источником исследования пространственно-временных свойств КД, если не считать синоптических карт, созданных на основании данных наблюдений в линии HeI 10830A в обсерватории Китт Пик К.Харви и Ф.Рисли и представленных в Internet в мае 2000 года. Ихсанов и Иванов [3] исследовали пространственное распределение КД и их вращение, используя данные [1]. Было подтверждено, что КД делятся на два класса: полярные и экваториальные. Полярные КД возникают после смены знака полярного магнитного поля и наблюдаются до следующей реполюсовки. Это значит, что они существуют в течение полярного

магнитного цикла активности Солнца. С другой стороны, экваториальные КД располагаются в зоне пятен, и занимают активные области “бабочек” Маундера. Таким образом, КД как особый класс активности, следуют пространственно-временному распределению активных процессов на всех широтах в глобальном цикле Солнца.

Представленная работа является продолжением статьи [4] и имеет целью детальное сравнение полученного нового Каталога корональных дыр и полостей волокон с данными каталога Sanchez-Ibarrá и Barraza-Paredes [1], а также с данными, представленными в Интернет.

### 1. Метод обработки данных

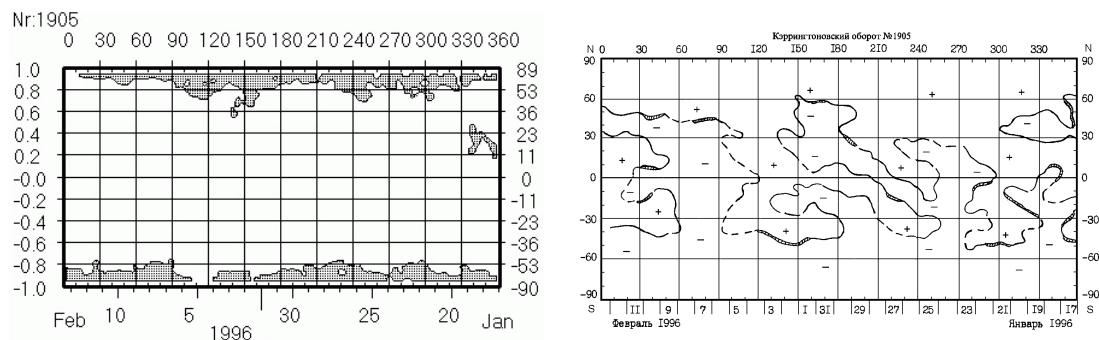
Исходным материалом для анализа служили данные синоптических карт Солнца в линии нейтрального гелия HeI 10830A обсерватории Китт Пик в период с 1974 по 2003 год (обороты N 1622-2003), а также карты магнитных полей, представленные в Internet. Использованы изображения Солнца в fits формате. Метод выделения областей корональных дыр и полостей волокон описан в [4]. На изображениях выделялись области с интенсивностью выше некоторой пороговой величины. Для выбора этого порогового значения строились функции распределения количества пикселей от интенсивности. Предварительно использовалась процедура сглаживания. Выделенные области формировались в структуры, которые имели общую границу. Далее проводилась фильтрация выделенных областей по площади. Структуры с площадью менее 1500 мдп, как правило, отбрасывались. Также не брались высокоширотные области, за границей видимости при изменении угла D с годовым ходом. Были вычислены характеристики этих структур на высоких и низких широтах, такие как координаты, исправленные за проекцию площади, площади, средняя яркость, средняя напряженность магнитного поля, степень униполярности и др.

### 2. Результаты

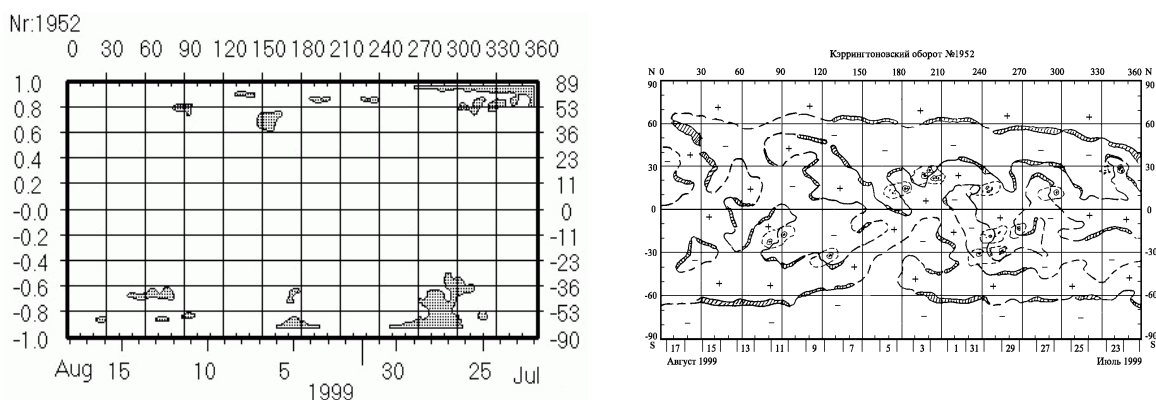
Как следует из рис. 1а работы (Тлатов и Тавастшерна, 2002) [4], на котором представлено широтно-временное распределение корональной активности в каталоге Санчес-Ибарра и Барраза-Парадес [1], он не содержит никаких данных об активности корональных дыр на широтах выше  $60^\circ$ . Это значит, что каталог [1] не учитывает полярную активность Солнца, которая определяет многие параметры активности пятен в процессе развития глобального цикла [5].

Другой очень важной характеристикой корональной активности Солнца является площадь корональных дыр. Согласно рис. 2 работы [4], данные каталога Санчес-Ибарра и Барраза-Парадес [1] в период 1974–1995 не показывают 11-летнего цикла активности в площади КД ни для общего числа КД, ни для полярных КД, хотя данные этого Каталога охватывают время спада активности КД в 21-м цикле, весь 22-й цикл и начало 23-го цикла. Поэтому результаты исследования широтно-временного распределения КД, полученные из данных Каталога [1], могут иметь ряд неточностей.

На рис. 1 и 2 показаны примеры обработки синоптических карт в линии нейтрального гелия HeI 10830A и магнитные синоптические карты в линии Na для периода глубокого минимума (рис. 1) и для эпохи максимума активности Солнца (рис. 2). Для примера также приведена Таблица 1 параметров некоторых выделенных структур для оборота 1952. На этой карте были выделены области повышенной эмиссии в линии HeI 10830A, соответствующие как корональным дырам, так и полостям волокон. Из этой таблицы видно, что свойства КД и полостей существенно различаются. Так яркость полостей, как правило, ниже, чем у КД. Более существенно, что магнитные поля КД и степень униполярности их магнитных полей значительно выше, чем для полостей. Этот признак может быть использован для отождествления этих различных структур.



**Рис. 1.** Слева: границы корональных дыр, выделенных для оборота N 1905, по данным наблюдений в линии HeI 10830A. Справа: синоптическая Н-альфа карта за этот период.



**Рис. 2.** Слева: границы корональных дыр, выделенных для оборота N 1952. В приполярных областях выделяются полости волокон в линии HeI 10830A. Справа: синоптическая Н-альфа карта.

**Таблица 1.**

Параметры некоторых структур в линии HeI 10830A, выделенных для оборота 1952.

Широта $\theta$	Долгота $\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	S мдп	Яркость	V, Гс	Унип.	Примеч.
45	153	12.6	19	5895	28	-5	0.5	КД
-43	65	7.8	36	5781	23	5.4	0.62	КД
-67	176	12	34	9210	22	-5.8	0.51	КД
60	233	5.1	13	2150	14	0.93	0.05	Полость
-61	72	3.9	10.0	1622	18	4.6	0.35	Полость
-58	92	4.8	10.0	1633	19	2.2	0.12	Полость

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 02-02-16035 и 03-02-16091.

### Литература

1. *Sanchez-Ibarra A. and Barraza-Paredes.* М.: 1992, Report UAG-102.
2. *Insley J.E., Moore V. and Harrison R.A.:* 1995, Solar Phys., v.160, p.1.
3. *Ikhsanov R.N. and Ivanov V.G.* 1999, Solar Phys., v.188, p.245.
4. *Тлатов А.Г., Тавастииерна К.С.:* 2002, Труды международной конференции ГАО РАН 17-22 июня 2002. с. 549-558.
5. *Макаров В.И., Тлатов А.Г.:* 2004, Изв. ГАО (настоящий сборник).

# CATALOGUE OF CORONAL HOLES AND FILAMENT CAVITIES IN PERIOD 1974-2003

**Tavastsherna K.S., Tlatov A.G.**

## *Summary*

*Catalogue of the coronal holes and filament cavities, creative on the base of observations of the Sun in line 10830A at Kitt Peak Observatory in the period 1974–2003 (rotations No. 1622–2003), is being prepared for the press together with H $\alpha$  synoptic charts for the same time. Synoptic charts in line 10830A and magnetic charts according to Internet have been used. PC method was worked out for processing of the observations to emerge the coronal holes and filament cavities. Comparison of the properties of coronal holes according to new Catalogue with the Catalogue of Sanchez-Ibarra and Barraza-Paredes [1] has been discussed. Distribution of the coronal holes in the solar cycle has been studied. Comparative analysis of the coronal holes with magnetic data was carried out.*

## **22-ЛЕТНЯЯ МОДА ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА**

**Тлатов А. Г., Макаров В.И.**

*В работе изучено вращение атмосферы Солнца по данным синоптических H-альфа карт за 117 лет в период с 1887 по 2003 год. Построены широтно-временные диаграммы изменения периодов вращения в диапазоне широт  $\pm 45^\circ$ . Использован метод определения периодов в "окнах" шириной порядка 8-12 лет, с последующим сдвигом "окна" вдоль ряда. Такой метод дает возможность выявить долговременные вариации вращения. Показано, что в диапазоне широт  $\pm 20^\circ$  основной период вращения фонового магнитного поля Солнца составляет 22 года. Скорость вращения в эпоху нечетных циклов активности замедлена, в то время как в четных циклах наблюдается более быстрое вращение. При увеличении "окна" выборки до  $\sim 17$  лет выделяется квази - период вращения около 55–60 лет. В этом случае максимум скорости вращения приходится на эпохи около 1930 и 1990 годы. Обсуждается возможность генерации солнечного цикла крутильными волнами с периодом 22-года, при взаимодействии их с реликтовым магнитным полем.*

### **Введение**

Вращение поверхностных слоев Солнца испытывает циклические вариации. Наиболее хорошо изучены вариации, имеющие 11-летнюю периодичность, связываемые с крутильными волнами. В тоже время в настоящее время нет систематических, взаимно подтверждающих, сведений о длительных вариациях вращения Солнца. Наиболее часто при анализе вращения используют солнечные пятна в качестве трассеров. Такие исследования предпринимались неоднократно в работах [1-5]. Суммируя результаты этих исследований можно показать, что Солнце наиболее быстро вращалось в эпоху 12-13 циклов активности [3, 4], в эпоху 15 цикла [1,4], во время 17-18 циклов [2,4] и во время 20 цикла [4,5]. Некоторым авторам удалось выделить долговременные вариации вращения длительностью 55-лет [3,5], а также с периодичностью 22-года [6]. Однако использование солнечных пятен имеет свои недостатки, связанные с трудностью учета собственных движений, и отсутствием информации в годы минимума активности.

Другими данными, по которым можно восстановить вращение Солнца за длительный период времени, являются карты раздела полярности крупномасштабного фонового поля по наблюдениям в линии H $\alpha$ . Анализ H $\alpha$  карт показал существование 22-летней вариации во вращении секторной структуры [9], а также  $\sim 55$ -летнюю вариацию в крутильных колебаниях [7] и во вращении Солнца [12].

### **1. Исходные данные и метод обработки**

Структура глобального магнитного поля Солнца определяется распределением униполярных магнитных областей, которые отчетливо видны на магнитограммах. Эти униполярные области выделяются границами с нулевой радиальной компонентой магнитного поля (или нейтральными магнитными линиями), которые трассируются протуберанцами и темными волокнами в центре линии H $\alpha$  [13]. Совокупность нейтральных магнитных линий за оборот Солнца создает топологическую картину распределения полярности глобального магнитного поля. Но эти данные не дают информации о величине магнитного поля. Однако широтно-временное распределение нейтральных магнитных линий показывает топологию магнитного поля с большей точностью, чем можно получить из магнитограмм, особенно для областей слабого поля

и в полярных зонах Солнца [13]. В данной работе был использован сводный ряд, в котором использовались  $H\alpha$  карты с 1887 по 1915 годы, подготовленные на основе Атласа Вольфера и данных обсерватории Кодайканал [14]. За время с 1915 по 1964  $H\alpha$  карты подготовлены на основе наблюдений в обсерватории Кодайканал и представленные в работе [12]. За время с 1964 по 1978 были оцифрованы  $H\alpha$  карты из Solar Geophysical Data [15,16]. За годы с 1978 по 2003 использованы регулярные синоптические  $H\alpha$  карты Кисловодской Горной астрономической станции [17], публикуемые в Солнечных Данных. Следует отметить, что при изучении глобальных процессов активности в крупномасштабном фоновом магнитном поле (без учета полей активных областей) основное значение имеет топология поля. Поэтому, при изучении структуры поля на  $H\alpha$  картах областям положительной и отрицательной полярности магнитного поля (например, размером  $5^\circ \times 5^\circ$ ) можно приписать величину поля  $+1$  или  $-1$  Гаусс. В результате можно создать ряды значений магнитного поля на всех широтах.

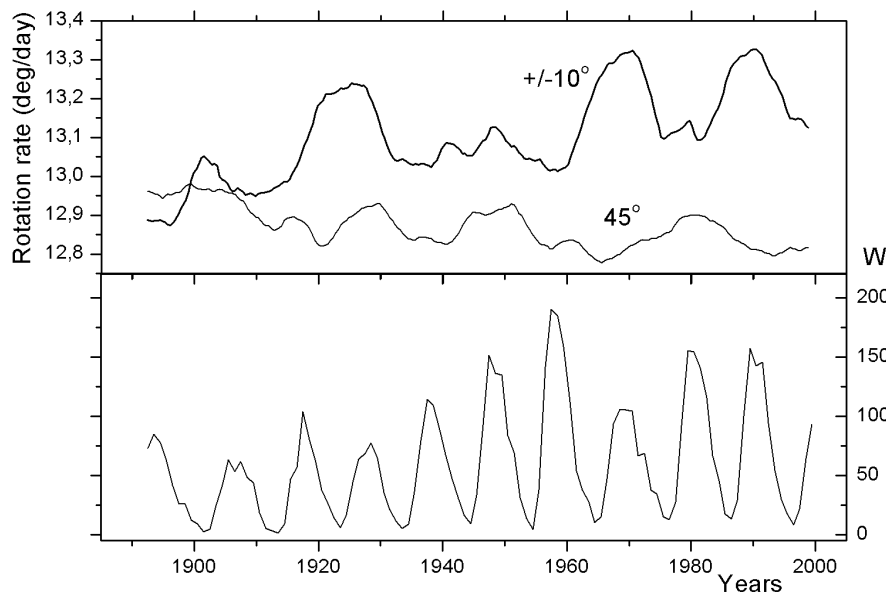
В данной работе исследовалось вращение Солнца в широтной зоне  $\pm 45^\circ$  от экватора. Для каждого  $5^\circ$  интервала по широте по широте и  $10^\circ$  по долготе находилась величина магнитного поля  $\alpha(t)$ . Полный ряд  $\alpha(t)$  за период с 1887 по 2003 год составил около 56000 значений для каждого широтного интервала. Спектральный анализ всего ряда проводился с использованием быстрого Фурье преобразования. При изучении скорости вращения использовались “окна” размером от 4000 до 9000 значений. Поскольку  $10^\circ$  долготный интервал соответствует промежутку времени  $dt = 0.757647$  дней, размер “окна” при этом составлял от 8 до 17 лет. В этом случае можно определить максимальный период вращения в диапазоне 26-29 дней. Поиск основных периодов повторялся при смещении “окна” вдоль ряда. Таким образом, была сформирована матрица, характеризующая скорость вращения Солнца в зависимости от времени и широты. Обоснованность выбранного метода обработки обусловлена использованием других, таких как авто регрессионный и ковариационный методы спектрального анализа, и проверкой результатов при других “окнах” выборки. Близкая процедура применялась ранее в работе [9] для определения скорости вращения секторной структуры, но при меньших размерах “окон” при использовании спектрального анализа.

## 2. Результаты

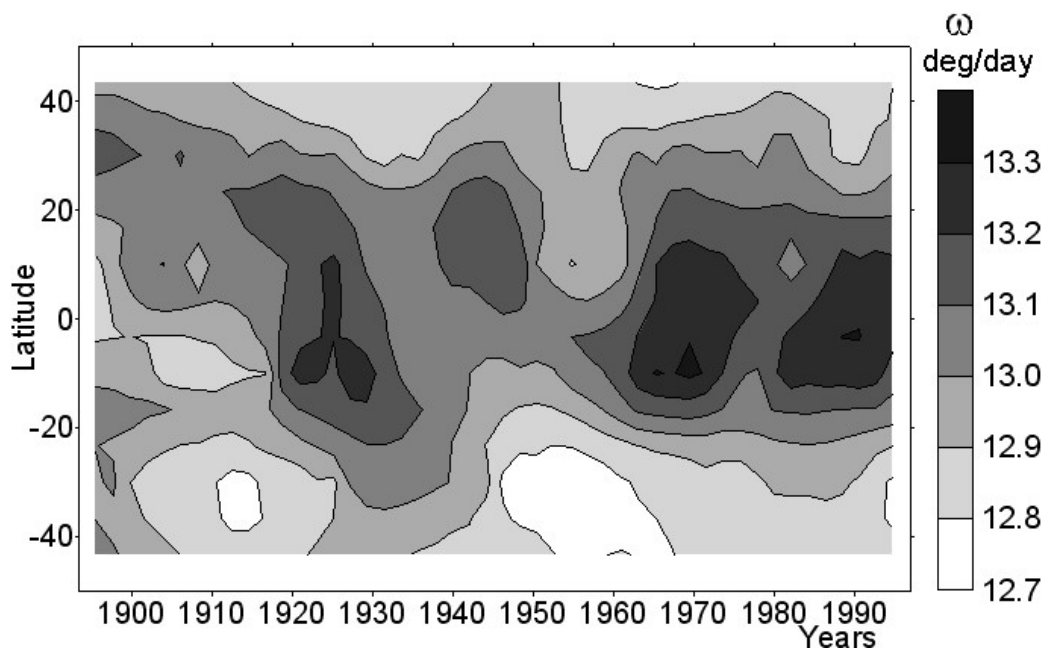
Скорость вращения Солнца зависит как от широты, так и от времени. На рис. 1 (верхняя панель) представлено поведение скорости вращения от времени для экваториальной зоны шириной  $\pm 10^\circ$  и для зоны  $40^\circ - 50^\circ$ . Значения периодов вращения северного и южного полушарий были усреднены. Ширина “окна” для определения периодов составляла 6100 значений, при этом выделяются флуктуации скорости вращения длительностью 20-22 года. Следует отметить, что экваториальная и среднеширотная зоны имеют долговременные тренды с разными градиентами наклона, так что скорость вращения низкоширотной зоны возрастает, а скорость вращения среднеширотной зоны уменьшается. На нижней панели рис.1 для сравнения представлено поведение активности Солнца по числам Вольфа. Можно заметить, что минимум скорости вращения приходится на нечетные циклы активности.

Полученная картина распределения периодов в координатах широта-время для “окна” шириной 6100 значений, или на времени соизмеримом с длительностью цикла активности, представлена на рис.2. Наиболее быстрое вращение наблюдалось в периоды 1920-1930, 1940-1950, 1960-1970 и 1980-2000 годов. Скорость вращения была максимальна вблизи экватора и в зависимости от эпохи варьировалась в пределах 13-13.3 градусов/сутки. Для уменьшения шумовой составляющей на рис.3 была применена процедура усреднения скорости вращения по полушариям в соответствующих широт-

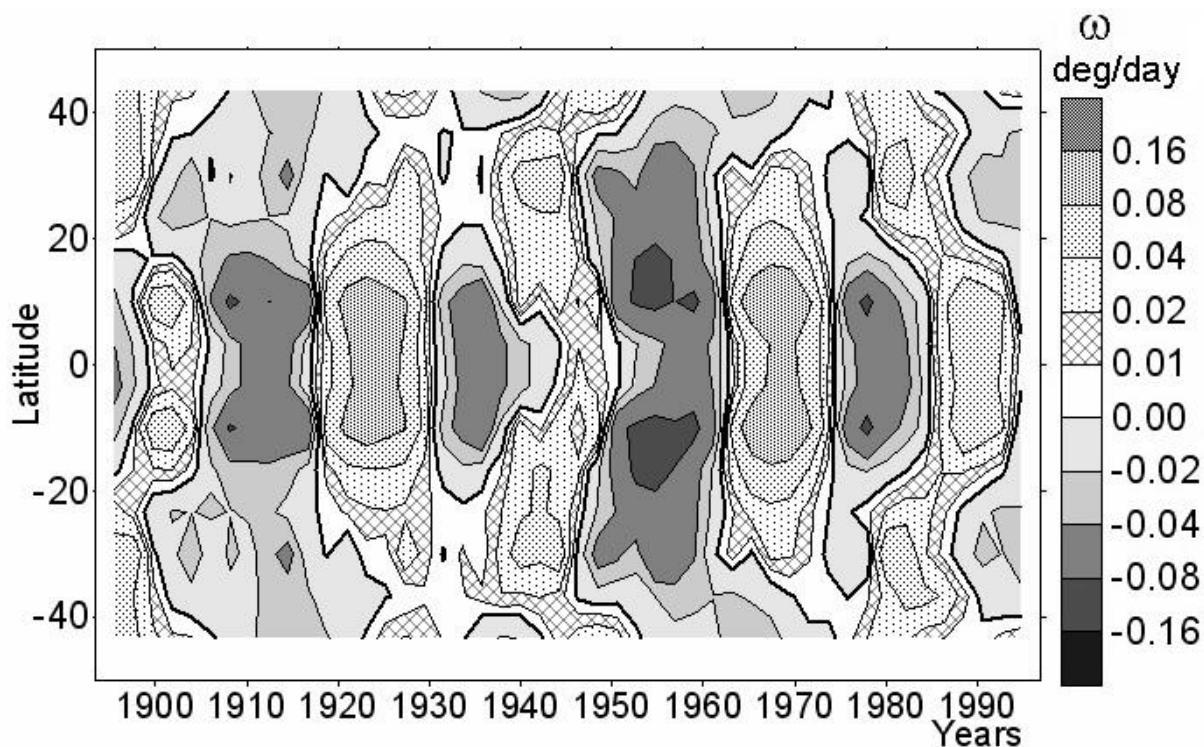
ных интервалах. Затем был вычтен тренд в каждом  $5^\circ$  широтном интервале. Представленная на рис.3 широтно-временная диаграмма скорости вращения обладает регулярной структурой. В области широт  $\pm 20^\circ$  основной является 22-летняя мода вращения. После устранения тренда, наиболее медленное вращение наблюдалось перед 19-м циклом активности, 1955-1965. Среднеширотная и низкоширотная зоны имеют различные фазы вариаций скорости. Заметим, что согласно рис.1, до 19-го цикла вариации скорости вращения около экватора и на широтах  $\sim 45^\circ$  совпадали по фазе, а после 19-го цикла находились в противофазе. На широтно-временной диаграмме, рис.3, видно изменение скорости и направление волн замедления и ускорения вращения от средних широт к низким широтам. Это факт подтверждает выводы работы [7] о долговременных вариациях крутильных колебаний.



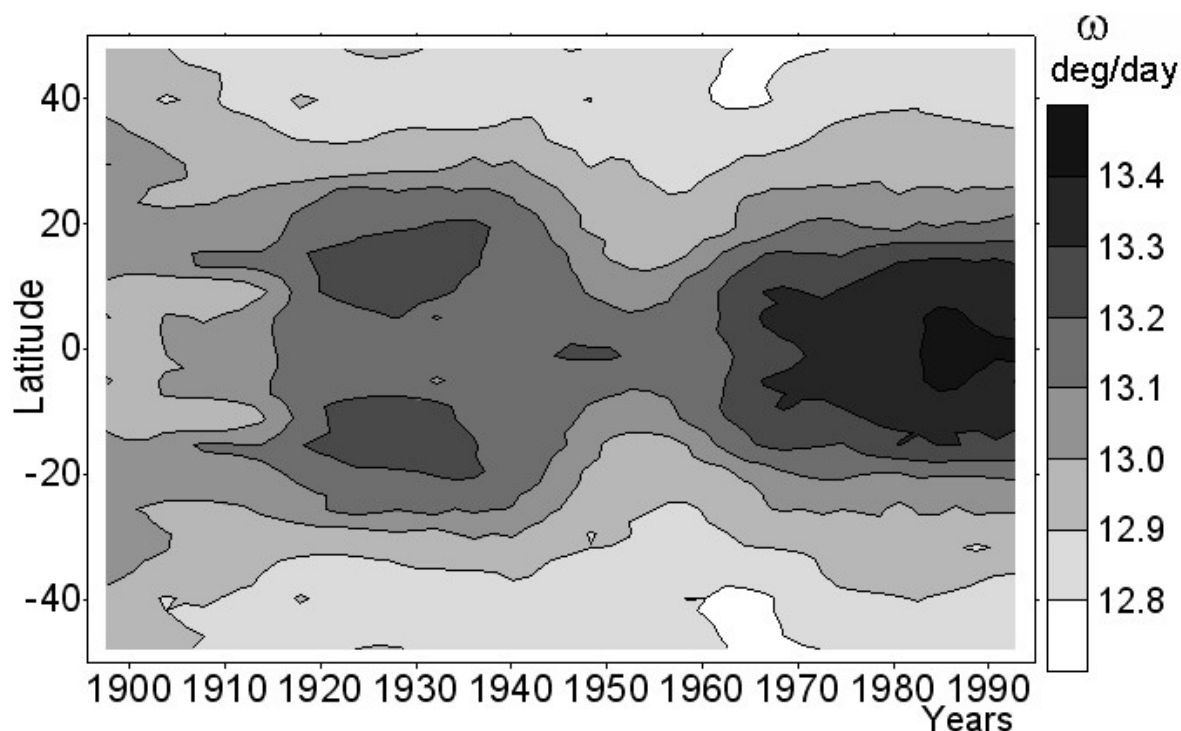
**Рис.1.** Средняя скорость вращения на широтах  $\pm 10^\circ$  и  $40^\circ - 50^\circ$  северного и южного полушарий (верхняя панель). Среднегодовые числа Вольфа (нижняя панель).



**Рис. 2.** Скорость вращения в зависимости от широты при ширине “окна” 12 лет, полученная спектральным анализом. Скорость приведена в град/сутки.



**Рис. 3.** Отклонения скорости вращения от среднего значения на соответствующих широтах. Ширина “окна” для спектрального анализа составила 12 лет. Области замедления вращения закрашены более темным цветом. Значения скорости усреднены по северному и южному полушариям.



**Рис. 4.** Скорость вращения Солнца в зависимости от широты при ширине “окна” для спектрального анализа 17 лет. Значения усреднены по северному и южному полушариям.

Дальнейшее увеличение размера “окна” позволяет выявить еще более долговременные вариации вращения. На рис.4 представлено поведение скорости вращения при “окне” шириной ~ 17 лет. Можно отметить, что наибольшая скорость вращения наблю-



далась в эпоху близкую к 1930 и 1990 годам. В эпоху 1900 и 1955 годов наблюдается минимумы скорости вращения. Это подтверждает ранее установленный факт о существовании 55-60 летнего квази-периода в скорости вращения фоновых магнитных полей [7,11].

### 3. Обсуждение

Обнаружение 22-летней модуляции скорости вращения может служить предпосылкой для уточнения моделей солнечного цикла. К настоящему времени в динамо-моделях, предлагаемых для объяснения солнечного магнитного цикла, остаются принципиально не разрешенные вопросы [18], поэтому привлечение не динамо механизмов для решения проблемы цикличности может считаться актуальной задачей. Один из подходов, при которых генерация поля осуществляется без динамо механизма, связан с трансформацией мощного реликтового поля Солнца в магнитные поля, наблюдаемые на поверхности. При этом предполагается существование сильного поля, заключенного в ядре Солнца, к моменту достижения им главной последовательности. Оценки величины такого поля, ограниченного эффектами турбулентной диффузии и плавучести магнитных полей, дают значения напряженности остаточных магнитных полей порядка  $10^6$  -  $10^7$  гаусс [18,20]. Привлекая гипотезу достаточно сильных крутильных колебаний [19], Пидингтон описал колебательный характер получаемых магнитных полей. В работе [19] предполагалось, что полоидальное магнитное поле периодически изменяет свое положение относительно цилиндрических изоротационных поверхностей в конвективной оболочке. В настоящее время, благодаря гелиосейсмологическим исследованиям, представления о характере вращения Солнца существенно изменились. В частности, маловероятно, что 22-летний магнитный цикл формируется в конвективной зоне. Вместе с тем гипотеза о крутильных колебаниях, как источнике магнитного цикла Солнца, применима и в настоящее время. Можно представить, что твердотельное вращение возможно под конвективной оболочкой на уровнях ниже  $\sim 0.6$  радиуса Солнца. Можно принять также, что реликтовое магнитное поле существует на этих глубинах. Предположим, что основание конвективной зоны подвержено крутильным колебаниям, причем на этих глубинах экватор может вращаться как быстрее, так медленнее полярных областей. В этом случае будет генерироваться азимутальная компонента магнитного поля под действием  $\omega$  - эффекта. Топологическая модель и оценка амплитуды крутильных колебаний под конвективной зоной были выполнены в работе [21]. Наиболее спорным предположением данной модели являлась гипотеза о существовании крутильных колебаний с периодом порядка  $T \sim 22$  лет. Настоящая работа позволяет говорить, что 22-летняя мода отчетливо проявляется во вращении фонового магнитного поля. Таким образом, генерация солнечного магнитного цикла не динамо механизмом, а взаимодействием крутильных волн с реликтовым полем, по нашему мнению, может существовать внутри Солнца.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 03-02-16091 и 02-02-16035.

### Литература

1. *Newton H.W., Nunn M.L* // Mon.Not.Roy.Astron.Soc, 1956, v.115, p.398.
2. *Ward F.* // Astropys.J., 1966, v.145, p.416.
3. *Ихсанов Р.Н., Витинский Ю.И.* // ДАН СССР, 1980, т.254, с.577.
4. *Baltazar H., Wöhl H.* // Atron. Astrophys, 1980, v. 92, p.111.
5. *Yoshimura H., Kambyr M.A.* // Sol. Phys., 1993, v.148, p.11.
6. *Чистяков В.Ф.* // Солн. Данные 1982, N 3, с. 97.
7. *Макаров В.И., Тлатов А.Г.* // Астрон. журн. 1997, т.74. с. 474.

8. *Ivanov, E.V., Obridko, V.N., Ananyev, I.V.* // Solar Physics, 2001, v. 199, p. 405
9. *Vasil'eva, V. V., Makarov, V. I., Tlatov, A. G.* // Astr. Let, 2002, v.28, p.199.
10. *Stix T.J.* // *Solar Phys.*, 1981, v. 74, p.79.
11. *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д.* // Астрон. журн. 2000, т.77. с.303.
12. *Makarov V.I., Sivaraman K.R.* // Solar Phys. 1989, v.119. p.35.
13. *Дюваль и др.(Duvall T.L., Wilcox J.M., Svalgaard L., Scherrer P., and McIntosh P.S.)* // Solar Phys.1977. v.55. p.63.
14. *Васильева В.В.* // Труды конф. "Новый цикл активности Солнца: наблюдательные и теоретические аспекты" Санкт-Петербург, ГАО РАН, 1998, с.213-216.
15. *McIntosh, P.S.* // Annotated Atlas of H-alpha Synoptic Charts, 1979, World Data Center A for Solar Terrestrial Physics, NOAA.
16. *SGD.* // Solar Geophys. Data, 1964-1978, US Department of Commerce. Boulder (Colo). USA.
17. *Solnechnye Dannye* // 1990-2003, N 1-12.
18. *Stix T.J.* // *Solar Phys.*, 1981, v. 74, p.79.
19. *Piddington J.H.* // *Astrophys.Space Sci.*, 1975, v. 35, p.269; v.39, p.157.
20. *Долгунов А.З.* // Письма в АЖ, 1976, v. 2, с.151-154.
21. *Тлатов А.Г.* // Сб. трудов. конференции "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля", Санкт-Петербург, 2001, с.379-384.

## 22 – YEARS VARIATIONS OF SOLAR ROTATION

**Tlatov V.G., Makarov V.I.**

### *Summary*

*Rotation of solar atmosphere was investigated according to the synoptic H-alpha charts during 1887 – 2003. Latitude-time diagrams of the rotation periods were constructed on the latitudes +/- 45°. The method of definition of the periods was used in "windows" by the width ~ 8-12 years with the subsequent shift of a "window" along the row. Thus, it was possible to reveal the long-term variations of rotation rate. It was shown, that on the latitudes +/-20° the basic mode of rotation is 22-years. The rotation rate was slowed down during an odd cycles, and the fast rotation was observed during even cycles. The mode of rotation of the Sun was allocated ~ 55 - 60 years with an increase of "window" up to ~17 years. In this case the maximum of rotation rate falls at an epochs ~ 1930 and 1990. The opportunity of generation of the solar cycle by the torsional waves with the period of the 22-years in cooperation with a relic magnetic field under convective zone was discussed.*

**АСТРОМЕТРИЯ**  
**И**  
**НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА**



## **О ПОКАЗАТЕЛЯХ ЛЯПУНОВА ВРАЩЕНИЯ СРЕДНИХ И КРУПНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ**

**Алешкина Е.Ю.**

*Спутники планет Солнечной системы средних и крупных размеров (с диаметром более 300 км), согласно наблюдениям, все, кроме Нереиды, вращаются синхронно с орбитальным движением. В ходе приливной динамической эволюции, при прохождении окрестностей сепаратрис синхронного резонанса (с последующим захватом в него) они находились в состоянии хаотического вращения. В работе исследуются хаотические режимы вращения пяти модельных спутников с инерционными и орбитальными параметрами реальных спутников средних и крупных размеров (Мимаса (S1), Энцелада (S2), Япета (S8), Нереиды (N2) и Протея (N8)). Вычислены полные спектры показателей Ляпунова в модели, представляющей спутник как трехосный эллипсоид на фиксированной эллиптической орбите. Полученные значения ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики), если за единицу времени принять орбитальный период спутника, находятся примерно в тех же пределах, что и известные значения ляпуновских времен для малых спутников.*

### **Введение**

Спутники средних и крупных размеров (с диаметром более 300 км) планет Солнечной системы, согласно наблюдениям, все, кроме Нереиды, вращаются синхронно с орбитальным движением [1,2]. В ходе приливной динамической эволюции, при прохождении окрестностей сепаратрис синхронного резонанса (с дальнейшим захватом в последний) они находились в состоянии хаотического вращения по всем трем осям («хаотического кувыркания»), поскольку в окрестности сепаратрис движение неустойчиво относительно наклона оси вращения, а при ненулевом эксцентриситете орбиты хаотический слой существует и в плоской задаче, то есть при плоском вращении спутника [3,4]

Эффективный способ качественного анализа динамики – расчет характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ), являющихся количественной мерой неустойчивости траекторий хаотического движения (см., например, [3, 5]). Наличие ненулевых значений показателей говорит о хаотическом характере движения. Если все показатели равны нулю – движение является периодическим или квазипериодическим и относится к разряду регулярных. Величина, обратная максимальному ляпуновскому показателю  $L_{max}$ , определяет горизонт предсказуемости  $T_L$  – максимальное характерное время, на котором можно предсказывать поведение динамической системы.

В настоящей работе проведен анализ вращательной динамики пяти относительно крупных спутников планет-гигантов в предположении, что вращение имеет место в окрестности сепаратрис синхронного резонанса. Вычислены показатели Ляпунова для Мимаса (S1), Энцелада (S2), Япета (S8), Нереиды (N2) и Протея (N8). Выбор спутников обусловлен наличием наблюдательных данных об их орбитальных и инерционных параметрах. Для Нереиды, для которой данные о геометрической форме отсутствуют, приняты модельные значения инерционных параметров. Рассматриваемые спутники в настоящее время вращаются регулярно (либо синхронно, либо очень быстро) [6,1], кроме, возможно, Протея, для которого отсутствуют наблюдательные данные о характере вращения. Исследуемые режимы вращения, однако, могли проявляться в предшествующие эпохи динамической эволюции.

## 1. Динамическая модель

Рассматривается модель асимметричного спутника, представляемого трехосным эллипсоидом однородной плотности ( $A < B < C$  – главные моменты инерции). Спутник движется по фиксированной эллиптической орбите с заданным значением эксцентриситета. Размеры спутника считаются пренебрежимо малыми по отношению к полуоси орбиты.

Система из 6 уравнений – три кинематических и три динамических уравнения Эйлера – описывает вращение спутника. Система координат  $abc$  – система главных осей инерции – жестко связана со спутником, ось  $a$  совпадает с наибольшей осью эллипсоида. Пространственная ориентация спутника определяется относительно инерциальной системы  $xyz$ , оси которой ориентированы в точке перицентра следующим образом. Ось  $x$  параллельна линии планета-спутник и направлена в сторону от планеты, ось  $y$  – совпадает с направлением орбитального движения в перицентре, ось  $z$  – перпендикулярна плоскости орбиты и дополняет тройку до правой. В начальный момент оси  $abc$  совпадают с осями  $xyz$ . Для представления ориентации тела используем вариант системы углов Эйлера  $\theta, \varphi, \psi$  (УЭ), использованный ранее в работах [7, 8, 5].

## 2. Расчет характеристических показателей Ляпунова

Проведен анализ возможного хаотического вращения пяти спутников Сатурна и Нептуна – Мимаса (S1), Энцелада (S2), Япета (S8), Нереиды (N2) и Протей (N8). Данные для инерционных параметров Нереиды взяты априори близкими к единице. Для остальных спутников динамические параметры, представленные в табл. 1, вычислены из соотношений  $A/C = (b^2 + c^2)/(a^2 + b^2)$ ,  $B/C = (a^2 + c^2)/(a^2 + b^2)$  на основании данных о полуосях эллипсоидов  $a, b, c$  (для Мимаса и Протей из [9], Энцелада – из [10], Япета – из [11]). Орбитальные параметры – эксцентриситет  $e$ , большая полуось орбиты, орбитальный период  $T_{orb}$  взяты из [9], период вращения  $T_{rot}$  – из [6].

**Таблица 1.** Параметры спутников и их орбит (по данным [6,11,9,10]).

Спутник	$a/b/c$ , км	$A/C$	$B/C$	$T_{rot}$ , сут	$e$	$T_{orb}$ , сут	$r$ , тыс. км
Мимас (S1)	209/196/191.5	0.91463	0.97876	0.942	0.01940	0.942	186
Энцелад(S2)	256.3/247.3/244.6	0.95380	0.98953	1.370	0.00490	1.370	238
Япет(S8)	767/742/713	0.92982	0.96295	79.331	0.02850	79.331	3562
Нереида(N2)	170	0.99000	0.99500	0.480	0.75100	360.135	5513
Протей (N8)	218/208/201	0.92154	0.96847	–	0.00044	1.122	117.6

Численное интегрирование траекторий вращательного движения методом Дормана–Принса [12] и вычисление характеристических показателей Ляпунова ХПЛ посредством HQRВ-метода, который позволяет осуществлять расчет ляпуновского спектра динамической системы с непрерывным временем [13], производится с использованием алгоритмов, реализованных и ранее применявшихся в [8, 5].

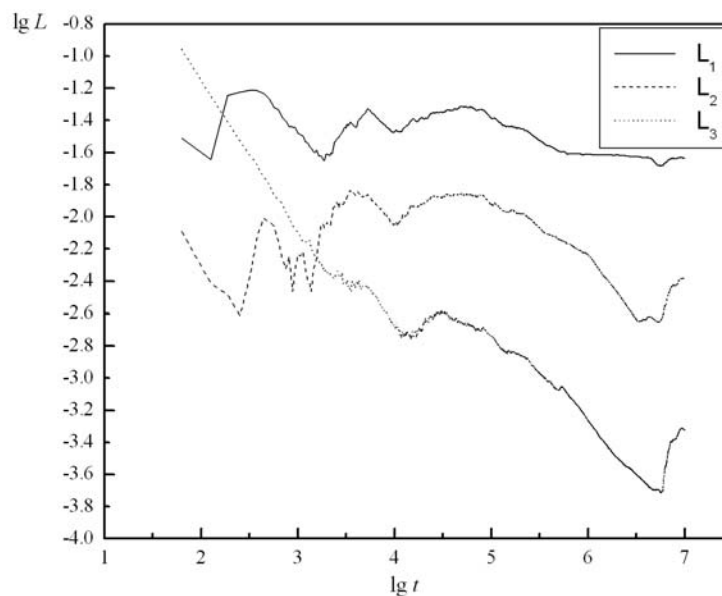
Расчет ХПЛ проведен для всех указанных спутников со следующими значениями начальных данных:  $\theta_0 = \pi/2 - 10^{-4}$ ,  $\varphi_0 = 0.001$ ,  $\psi_0 = 0.001$ ,  $d\theta/dt_0 = 1$ ,  $d\varphi/dt_0 = 0$ ,  $d\psi/dt_0 = 0$ . Эти начальные данные соответствуют положению спутника, при котором ось его вращения почти перпендикулярна плоскости орбиты, а наибольшая ось спутника рас-

положена в плоскости орбиты и перпендикулярна прямой планета-спутник. Интегрирование уравнений вращательного движения спутников проведено на интервале времени  $t = 10^7$ , при этом время  $t$  измеряется в единицах  $T_{orb}/2\pi$ . В случае Япета интегрирование доведено до момента  $t = 4.6 \cdot 10^6$ , при котором возникает сингулярность, обусловленная особенностью используемой системы углов Эйлера. Для вычисления  $T_L$  в сутках используется соотношение  $T_L = T_{orb}/(2\pi L_{max})$ . В табл. 2 представлены рассчитанные максимальные показатели Ляпунова. Пример зависимости текущих показателей Ляпунова от времени (в случае Мимаса (S1)) показан на рис. 1.

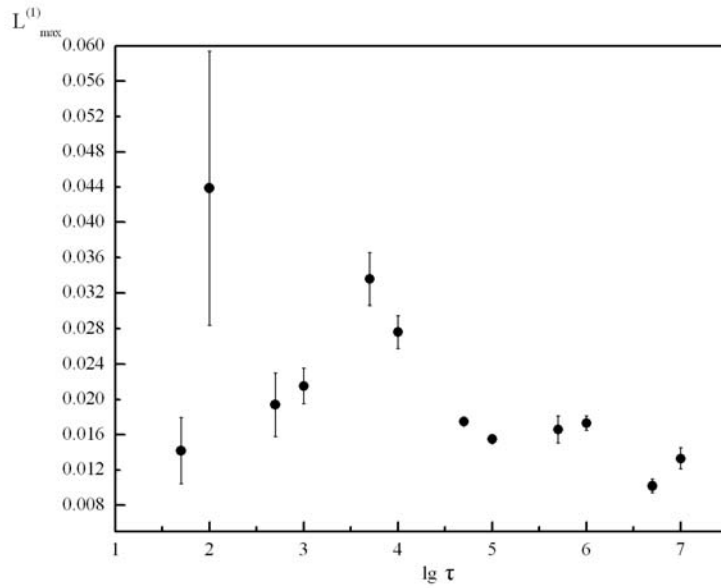
Рис. 2 и 3 показывают зависимости значения максимального показателя Ляпунова от величины интервала интегрирования в случаях Энцелада и Нереиды, имеющих по сравнению с остальными исследуемыми спутниками наименьшее отклонение от сферической формы (для Нереиды – согласно модели) и значительно отличающиеся друг от друга эксцентриситеты орбит. Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что в случае спутника с большим эксцентриситетом орбиты («Нереида») расчет ХПЛ требует вдвое меньшего интервала интегрирования.

**Таблица 2.** Показатели Ляпунова и горизонт предсказуемости  $T_L$

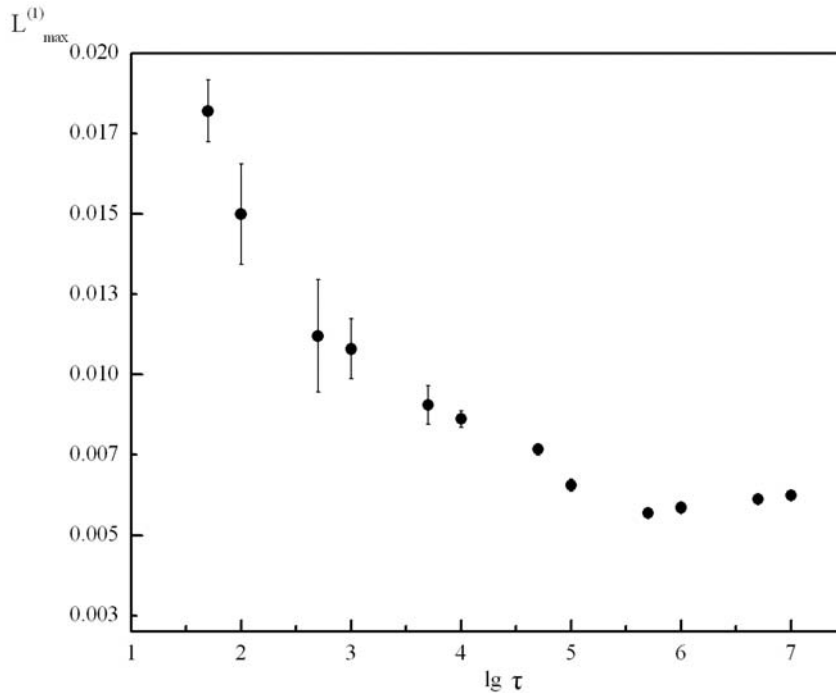
Спутник	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$T_L$ , сут
Мимас	0.022	0.003	0.001	6.8
Энцелад	0.013	0.003	0.000	16.8
Япет	0.021	0.005	0.001	601
Нереида	0.006	0.001	0.000	9550
Протей	0.037	0.003	0.000	4.8



**Рис.1.** Текущие показатели Ляпунова  $L_1, L_2, L_3$  в случае Мимаса (S1).



**Рис.2.** Энцелад (S2). Зависимость максимального показателя Ляпунова  $L_{max}^{(1)}$  от интервала интегрирования  $\tau$ .



**Рис.3.** То же для Нереиды (N2).

### 3. Заключение

В окрестности сепаратрис синхронного резонанса движение является неустойчивым относительно наклона оси вращения спутника к плоскости орбиты, поэтому в предшествующие эпохи динамической эволюции все спутники, находящиеся сейчас в синхронном резонансе, неизбежно проходили через состояние хаотического вращения [4].

В настоящей работе проведен расчет ХПЛ вращения для некоторых спутников средних и крупных размеров – Мимаса (S1), Энцелада (S2), Япета (S8), Нереиды (N2) и Протея (N8). Он показывает, что максимальные показатели Ляпунова для этих спутников находятся приблизительно в тех же пределах, что и известные значения показателей для малых спутников [3,8,5]. Полученные значения ляпуновского времени, выра-



женные в единицах орбитальных периодов спутников, составляют примерно несколько десятков оборотов, что в пределах порядка величины одно и то же для всех спутников, как средних, так и малых, несмотря на большие различия в их инерционных и орбитальных параметрах. Расчеты показывают, что для достаточно точного вычисления значений показателей Ляпунова (зависимости текущих показателей от времени при этом выходят на плато) требуется интегрирование уравнений на временах равных, по крайней мере, нескольким миллионам орбитальных периодов.

Автор выражает благодарность И.И. Шевченко и В.В. Куприянову за внимание к работе и полезные советы. Работа поддержана грантом РФФИ № 03-02-17356. Вычисления частично проведены на ЭВМ Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН, Минобрнауки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований.

### Литература

1. *Grav, T., Holman, M.J., Kavelaars, J.J.*, 2003, *Astrophys. J.*, 591, L71.
2. *Peale S.J.*, 1977, *Rotation histories of the natural satellites*, in "Planetary satellites", ed. Burns J.A., Univ. of Arizona Press, Tucson, 87-112.
3. *Шевченко И.И.*, 2002, *Космич. Исслед.*, 40, 317.
4. *Wisdom, J.* 1987, *Astron. J.*, 94, N 5, 1350.
5. *Шевченко И.И., Куприянов В.В.*, 2002, *Astron. Astrophys.*, 394, 663.
6. *Уральская В.С.*, *Естественные спутники планет (информационный справочник)* <http://lnfm1.sai.msu.su/neb/rw/croixrw.htm>
7. *Wisdom J., Peale S.J., Mignard F.*, 1984, *Icarus*, 58, 137.
8. *Куприянов В.В., Шевченко И.И.*, 2003, *Astron. Astrophys.*, 410, 749.
9. *Ephemerides Astronomiques 2000* (Annuaire du Bureau des Longitudes) (Masson, Paris)
10. *Wisdom J.*, 2004, *Astron. J.*, 128, 484.
11. *Denk T. et al.*, *Lunar and Planetary Science*, XXXI, 1596.
12. *Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.* *Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи.*, М.: Мир, 1990, 512 с.
13. *von Bremen H. F., Udvardia F. E., Proskurowski W.* 1997. *Physica D*, 101, 1.

## ON THE LYAPUNOV EXPONENTS OF ROTATION OF INTERMEDIARY AND LARGE SATELLITES

Aleshkina E.Yu.

### Summary

*According to observations, the planetary satellites of intermediary and large size (those with diameters larger than 300 km) in the Solar system are all in synchronous rotation state, except Nereid. In the course of the tidal dynamical evolution, upon passing the neighborhood of the separatrices of synchronous resonance (with the following capture in it), they all rotated chaotically. The chaotic regimes of rotation of five model satellites with the inertial and orbital parameters of real satellites of intermediary and large size (Mimas (S1), Enceladus (S2), Iapetus (S8), Nereid (N2), Proteus (N8)) are studied. The full spectra of the Lyapunov characteristic exponents are computed in the model of a satellite as a tri-axial ellipsoid in a fixed eccentric orbit. The obtained values of the Lyapunov time (the time of predictable dynamics), expressed in units of satellite's orbital period, are approximately in the same limits as those known for small satellites.*

## АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ УРАНА В 2003 ГОДУ НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ В ПУЛКОВЕ

**Бронникова Н.М., Васильева Т.А.**

*Приведены 17 положений Урана, полученные по пластинкам нормального астрографа с 1 августа 2003г. по 2 января 2004г. Редукция выполнена линейным методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога Тучо-2. Проведено сравнение наблюдений с эфемеридой DE-200 по программе ЭПОС [Львов В.Н. и др. 1999]. Средние значения (О-С) равны  $-0^{\circ}.008 \pm 0^{\circ}.006$  по  $\alpha$  и  $-0^{\circ}.11 \pm 0^{\circ}.06$  по  $\delta$ . Ошибка одного положения равна  $\pm 0^{\circ}.34$  по  $\alpha$  и  $\pm 0^{\circ}.26$  по  $\delta$ .*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект N 04-02-16157 и договора с ИПА N4/ГК-03 по государственному контракту N 40.022.12.1109.*

Фотографические наблюдения Урана на нормальном астрографе, возобновленные в 2002 году [Bronnikova N.M., Vasil'eva T.A., 1999], были продолжены в 2003 г. В период с 1 августа 2003 г. по 2 января 2004 г. было получено 17 пластинок. Для ослабления блеска Урана использовался нейтральный фильтр с алюминиевым напылением размером  $5 \times 15$  мм. Фильтр закрывал только центральную область фотопластинки с изображением Урана, он вставлялся в кассету перед фотопластинкой. Блеск планеты ослаблялся на  $3.1^m$ . В период наблюдений Уран имел величину от  $5.7^m$  до  $5.9^m$ , и на пластинках Уран получался как звезда от  $8.8^m$  до  $9.0^m$ . На каждой пластинке получали по 3 изображения с экспозициями по 4 минуты.

Опорные звезды (от 6 до 8 звезд) для редукции были выбраны из каталога Тучо-2 со средней величиной от  $9.1^m$  до  $10.1^m$ . Разность величин Урана и опорных звезд  $\Delta m$  лежит в пределах от  $0.1^m$  до  $1.2^m$ . При такой разности величин объекта и опорных звезд на положение объекта не влияет ошибка уравнивания блеска [Бронникова Н.М. и др., 1977]. Пластинки измерены на полуавтоматической измерительной машине Аско-рекорд с записью данных измерений на ПК. Для обработки использованы усредненные по 3 изображениям измеренные координаты  $x$  и  $y$ . Астрометрическая редукция выполнена методом шести постоянных с учетом дифференциальной рефракции. Ошибки единицы веса  $S_{x,y}$  и редукции  $E_{x,y}$ , характеризующие точность измерений, в среднем по 17 пластинкам имеют значения:  $S_x = \pm 0^{\circ}.34$ ,  $S_y = \pm 0^{\circ}.51$ ,  $E_x = \pm 0^{\circ}.15$ ,  $E_y = \pm 0^{\circ}.22$ .

В результате были получены геоцентрические экваториальные координаты Урана в системе экватора и равноденствия J2000, приведенные в таблице 1, в которой даны моменты наблюдений в шкале времени UTC и (О-С), полученные из сравнения наблюдений с эфемеридой DE-200/ LE200, вычисленные по программе ЭПОС [Львов В.Н. и др., 1999]. В последней колонке таблицы 1 приведены фамилии наблюдателей: Бр. – Бронникова Н.М., Бб – Бобылев В.В., На – Нарижная Н.В. В среднем, по наблюдениям в 2003 г. (О-С) имеют значения:  $(O-C)_\alpha = -0^{\circ}.008 \pm 0^{\circ}.006$ ;  $(O-C)_\delta = -0^{\circ}.11 \pm 0^{\circ}.06$ . По уклонениям отдельных (О-С) от среднего среднеквадратичная ошибка (СКО) одного положения равна:  $\sigma_\alpha \cos \delta = \pm 0^{\circ}.34$ ,  $\sigma_\delta = \pm 0^{\circ}.26$ .

Ошибка по  $\alpha$  в 2003 году имеет тот же порядок, что и в 2002 г., а по  $\delta$  она меньше в 1.6 раза. Это уменьшение ошибки по  $\delta$  можно объяснить тем, что в 2002 г. Уран наблюдался без ослабления блеска и на больших зенитных расстояниях.

**Таблица 1.** Геоцентрические экваториальные координаты Урана в 2003 году.

Дата (UTC)	$\alpha_{J2000}$ h m s	$\delta_{J2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha}$ s	(O-C) $_{\delta}$ "	Наблю- датель
2003 08 01.939393	22 15 48.800	-11 37 21.31	-0.005	-0.18	Бр
08 18.914726	22 13 20.664	-11 51 23.96	-0.027	-0.13	Бр
08 18.932039	22 13 20.519	-11 51 25.02	-0.015	-0.31	Бр
09 03.906079	22 10 54.967	-12 04 54.20	+0.014	+0.18	Бр
09 05.813352	22 10 37.911	-12 06 27.96	-0.016	-0.06	Бб
09 05.877122	22 10 37.352	-12 06 31.20	-0.008	-0.19	Бб
09 17.847513	22 08 55.342	-12 15 45.66	0.000	-0.11	Бр
09 20.835406	22 08 31.575	-12 17 53.61	-0.029	-0.57	Бр
10 24.744983	22 05 22.920	-12 34 07.76	-0.055	-0.04	На
11 25.699441	22 05 29.663	-12 32 16.53	+0.006	-0.09	Бб
11 25.712003	22 05 29.715	-12 32 16.05	+0.016	+0.14	Бб
12 09.625682	22 06 34.419	-12 25 50.50	+0.028	+0.21	Бб
12 09.637859	22 06 34.460	-12 25 50.29	-0.004	0.00	Бб
12 13.633179	22 06 59.530	-12 23 24.71	-0.033	-0.58	Бр
12 23.631565	22 08 14.243	-12 16 13.50	+0.006	+0.30	Бб
2003 12 23.640395	22 08 14.336	-12 16 13.34	+0.026	+0.04	Бб
2004 01 02.643572	22 09 44.510	-12 07 38.33	-0.037	-0.51	На

В таблице 2 приведена сводка значений (O-C) для Урана по наблюдениям на Нормальном астрографе (НА) в Пулкове в 1968-1974 годах (Бронникова Н.М. и др., 1989), в 2002 г. (Бронникова Н.М. и др., 2002) и по наблюдениям в Абастумани на двойном астрографе Цейсса (ДЦА) в 1987-1994 г. [Чантурия С.М. и др., 2002].

**Таблица 2.** Сводка значений (O-C) и СКО по фотографическим наблюдениям.

Период наблю- дений	Телескоп обсерва- тория	(O-C) $_{\alpha}$ $\pm \epsilon_{\alpha}$ s	(O-C) $_{\delta}$ $\pm \epsilon_{\delta}$ "	$\sigma_{\alpha} \cos \delta$ "	$\sigma_{\delta}$ "	Число на- блю- дений	Опорный каталог	Ср. зенит. расст. °
1968- 1974	НА Пулково	+0.038 $\pm 0.003$	-0.12 $\pm 0.03$	$\pm 0.24$	$\pm 0.29$	23	Фокат B1950, FK5	64
1987- 1994	ДАЦ Абасту- мани	-0.026 $\pm 0.003$	-0.24 $\pm 0.02$	$\pm 0.20$	$\pm 0.25$	105	PPM, J2000, FK5	65
2002	НА Пулково	-0.016 $\pm 0.005$	-0.42 $\pm 0.10$	$\pm 0.35$	$\pm 0.43$	22	Tycho2J20 00, ICRS	74
2003	НА Пулково	-0.008 $\pm 0.006$	-0.11 $\pm 0.06$	$\pm 0.34$	$\pm 0.26$	17	Tycho2J200 0, ICRS	72

### Заключение

При фотографических наблюдениях ярких объектов, в данном случае Урана, ошибки определения положения имеют порядок не меньше 0."2, независимо от того, в какой системе опорных звезд выполняется обработка, т.к. она определяется в основном ошибкой измерений. В 2002–2003 гг. Уран наблюдался на старых пластинках, имеющих сильную вуаль. При измерении таких пластинок ошибки довольно большие.

Авторы выражают благодарность наблюдателям В.В. Бобылеву и Н.В. Нарижной.

### Литература

1. **Bronnikova N.M., Vasil'eva T.A.** – 2003 – Astrometric observations of the Uranus in 2002 with Normal Astrograph at Pulkovo – Journees-2003; “Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarssecond to microarssecond”, sept. 22-25, S-Pt., Russia, p.10.
2. **Бронникова Н.М., Шрамко И.А.** – 1977 – Исследование влияния уравнения блеска на положение объекта по наблюдениям Новой Лебеда, Астр. Цирк., N970, окт. 25, стр.7-8.
3. **Бронникова Н.М., Дементьева А.А., Рыльков В.П. и др.** – 1984 – Точные положения Урана по фотографическим наблюдениям в Пулковке в 1968-1974 гг., Изв. ГАО, N206, с.23-25.
4. **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, С-Пб., Пулково, 28 с.
5. **Чантурия С.М., Киселева Т.П., Емельянов Н.В.** – 2002 – Фотографические позиционные наблюдения Урана и его спутников Титании и Оберона в Абастумани в 1987–1994 гг., Изв ГАО N 216, с.349-362.

### ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF THE URANUS IN 2003 WITH THE NORMAL ASTROGRAPH AT PULKOVO

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

#### *Summary*

*17 positions of the Uranus are given. The plates were taken with the normal astrograph at Pulkovo in 2003. The reference stars were taken from catalogue Tycho-2. The obtained positions were compared with the ephemeris DE –200.*

*The average (O-C) are as follows :  $(O-C)_\alpha = -0.^s008 \pm 0.^s006$  ;  $(O-C)_\delta = -0.^"11 \pm 0.^"06$ . The errors of one position are equal to  $\pm 0.^"34$  for  $\alpha$  and  $\pm 0.^"26$  for  $\delta$ .*

## ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛОЙ ПЛАНЕТЫ ЮНОНА НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ В ПУЛКОВЕ

**Васильева Т.А.**

*Приведены 39 положений малой планеты Юно (3) по наблюдениям на нормальном астрографе в Пулкове в период с 1998 по 2002 годы. Редукция пластинок выполнена методом шести постоянных с использованием опорных звезд из каталога ТУСНО-2. Проведено сравнение с эфемеридой при помощи программы ЭПОС. Средние значения разностей за весь период наблюдений составили  $(O-C)_{\alpha \cos \delta} = 0''019 \pm 0.037$ ;  $(O-C)_{\delta} = 0''036 \pm 0.034$ .*

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

На нормальном астрографе в Пулкове продолжают регулярные наблюдения малых планет для определения их точных положений. В данной работе использованы наблюдения малой планеты Юно (3) в период с 1998 по 2002 годы. Из-за проблем технического характера в 2004 году было измерено небольшое количество пластинок. Выбрано и обработано 13, удовлетворяющих 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 ТУСНО-2. Каждая экспозиция обрабатывалась отдельно. Ошибки единицы веса в среднем равны:  $S_x = \pm 0''23$ ,  $S_y = \pm 0''24$ , а ошибки редукции:  $E_x = \pm 0''11$ ,  $E_y = \pm 0''13$ .

Результаты наблюдений малой планеты Юнона 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:

$$(O-C)_{\alpha \cos \delta} = 0''019 \pm 0.037; (O-C)_{\delta} = 0''036 \pm 0.034.$$

Средняя квадратичная ошибка одного наблюдения составляет  $0''23$  по  $\alpha$  и  $0''22$  по  $\delta$ .

**Таблица.** Топоцентрические координаты малой планеты Юнона 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 03 06.96844	12 09 08.77	+01 19 05.86	-0''24	0''07
1998 03 06.97260	12 09 08.59	+01 19 07.94	-0.10	-0.18
1998 03 06.97675	12 09 08.42	+01 19 10.26	0.19	- 0.19
1998 03 20.90052	11 58 11.56	+03 30 38.90	0.23	-0.26
1998 03 20.90468	11 58 11.34	+03 30 41.18	-0.09	-0.30
1998 03 20.90883	11 58 11.12	+03 30 43.95	-0.34	0.16
1998 03 25.89496	11 54 14.39	+04 16 05.94	0.41	- 0.21
1998 03 25.89981	11 54 14,16	+04 16 08.06	0.28	-0.67
1998 03 25.90327	11 54 13.98	+04 16 10.60	0.21	0.02
1998 04 15.85170	11 40 33.52	+06 52 08.14	0.23	0.17

1998 04 15.85417	11 40 33.45	+06 52 08.86	0.28	0.05
1998 04 15.85724	11 40 33.33	+06 52 09.75	-0.14	-0.11
2000 08 02.96513	21 23 23.79	-03 22 14.19	0.09	-0.21
2000 08 02.96928	21 23 23.56	-03 22 15.91	-0.34	-0.25
2000 08 02.97344	21 23 23.38	-03 22 17.23	-0.01	-0.38
2000 08 05.92342	21 21 01.32	-03 43 01.23	-0.11	-0.09
2000 08 05.92758	21 21 01.11	-03 43 03.22	-0.14	-0.26
2000 08 05.93173	21 21 00.89	-03 43 05.01	0.32	-0.24
2002 03 14.81547	09 05 03.95	+09 31 29.92	0.25	-0.25
2002 03 14.81963	09 05 03.86	+09 31 32.32	-0.13	0.08
2002 03 14.82378	09 05 03.79	+09 31 34.06	-0.22	-0.25
2002 03 16.80859	09 04 38.66	+09 47 44.12	-0.26	0.01
2002 03 16.81280	09 04 38.61	+09 47 45.86	-0.24	-0.27
2002 03 16.81696	09 04 38.56	+09 47 48.04	-0.23	-0.08
2002 04 03.82942	09 05 42.78	+11 43 39.46	0.07	0.34
2002 04 03.83369	09 05 42.83	+11 43 40.48	-0.24	0.12
2002 04 03.83784	09 05 42.92	+11 43 41.71	0.07	0.15
2002 04 04.82915	09 06 01.01	+11 48 25.19	0.14	-0.04
2002 04 04.83331	09 06 01.09	+11 48 26.57	0.21	0.18
2002 04 04.83815	09 06 01.17	+11 48 27.96	0.10	0.22
2002 04 10.83921	09 08 20.41	+12 13 27.78	0.08	0.15
2002 04 10.84336	09 08 20.54	+12 13 28.63	0.37	0.10
2002 04 10.84752	09 08 20.66	+12 13 29.36	0.51	-0.08
2002 04 18.82872	09 12 39.84	+12 37 22.28	-0.12	0.06
2002 04 18.83356	09 12 40.01	+12 37 23.12	-0.23	0.11
2002 04 18.83841	09 12 40.20	+12 37 24.04	-0.05	0.35
2002 04 22.83611	09 15 18.85	+12 45 30.81	0.18	0.25
2002 04 22.83957	09 15 18.99	+12 45 31.16	0.14	0.25
2002 04 22.84304	09 15 19.14	+12 45 31.47	0.24	0.21

### 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 MINOR PLANET JUNO (3) WITH THE NORMAL ASTROGRAPH AT PULKOVO

Vasyľeva T.A.

#### Summary

39 positions of minor planet Juno (3) are given. The plates are taken with normal astrograph at Pulkovo during the period from 1998 to 2002. The reference stars are taken from catalogue TYCHO-2. The average  $(O-C)_{\alpha, \delta}$  are equal to:  $(O-C)_{\alpha} \cos \delta = 0."019 \pm 0.037$ ;  $(O-C)_{\delta} = 0."036 \pm 0.034$ .

## **КАТАЛОГ СПИРАЛЬНОГО РУКАВА ОРИОНА (ORION SPIRAL ARM CATALOGUE, OSACA)**

**Гончаров Г.А.**

*Координаты, параллаксы и собственные движения из каталога Hipparcos и вычисленные с использованием разных источников, включая новый каталог CORAVEL-CfA, средневзвешенные лучевые скорости использованы для определения галактических координат  $X, Y, Z$  и скоростей  $U, V, W$  примерно 20 тысяч звёзд в радиусе 500 пк от Солнца. При этом  $U, V, W$  определены с медианной точностью  $\pm 1$  км/с. Вместе с другими характеристиками эти величины представлены в виде каталога галактического спирального рукава Ориона, Orion Spiral Arm Catalogue (OSACA) для исследования кинематики звёзд. Дано сравнение лучевых скоростей CORAVEL-CfA с остальными. Протестирована возможность совместного использования лучевых скоростей и собственных движений. Использование каталога OSACA рассмотрено на примере движения звёзд пояса Гулда в течение  $\pm 15$  миллионов лет: показано возникновение этой и других структур рукава Ориона (Большого туннеля и Местного пузыря) во взаимодействии двух основных звёздных потоков.*

### **Введение**

В работах (Гончаров 2002; Gontcharov 2004) мной показан пример совместного использования собственных движений и лучевых скоростей для исследования распределения и движения звёзд в окрестностях Солнечной системы. При этом на основе величин  $\alpha, \delta, \pi, \mu_\alpha, \mu_\delta, V_r$  вычисляются координаты и скорости в стандартной галактической прямоугольной системе координат:  $X, Y, Z, U, V, W$ , где  $X$  растёт в направлении центра Галактики,  $Y$  - в направлении её вращения,  $Z$  - в направлении северного полюса Галактики. Этот подход позволяет не только вычислить формальные параметры, отражающих деформацию и вращение совокупностей звёзд, но и подробно рассмотреть движение и кинематическую эволюцию групп звёзд и галактических структур в течение миллионов лет в прошлом и будущем, включая их рождение и распад. Можно оценить, структуры какого размера, и в течение какого интервала времени мы можем рассматривать. Скорости 1 км/с соответствует 1 пк/миллион лет. Поэтому, зная пространственные скорости звёзд с точностью лучше  $\pm 1$  км/с, можно исследовать движение, вращение и деформацию структур размером более 50 пк в течение, по крайней мере,  $\pm 15$  миллионов лет.

Для такого исследования мной сформирована и постоянно обновляется база различных данных для примерно 20 тысяч звёзд и соответствующий каталог - Orion Spiral Arm Catalogue (OSACA), которые будут доступны через Интернет. Данная публикация включает описание каталога и пример его использования.

### **1. Лучевые скорости**

Отбор звёзд с точными лучевыми скоростями и вычисление точных средневзвешенных лучевых скоростей является ключевой задачей при формировании базы данных и каталога OSACA.

Каталог WEB (Duflot et al., 1995) содержал всего лишь 8450 звёзд с известными тригонометрическими параллаксами, лучевые скорости которых известны с точностью лучше  $\pm 1.2$  км/с. В последние годы особенно большое число точных лучевых скоростей измерено с фотоэлектрическими кросскорреляционными спектрометрами CORAVEL и

цифровыми спидометрами Харвард-Смитсоновского центра астрофизики (CfA): итогом многолетней работы являются лучевые скорости с точностью лучше  $\pm 1$  км/с для примерно 10 тысяч звёзд (Nordstrom B. et al., 2004) - далее "каталог CORAVEL-CfA". Указанная работа показывает, что совместное использование собственных движений и лучевых скоростей вместе с оценками межзвёздного покраснения, металличности, многополосной фотометрией и параметрами двойственности позволяет делать выводы об абсолютной величине, возрасте, массе и галактических орбитах звёзд, формируя материал для проверки астрофизических и звёздно-кинематических моделей.

Каталог CORAVEL-CfA включает в основном лучевые скорости звёзд спектральных классов F-K главной последовательности. Точные лучевые скорости примерно 10 тысяч других звёзд вычислены мной как средневзвешенные значения для массива лучевых скоростей, собранных мной из различных источников. Таким образом, в настоящий момент имеются примерно 20 тысяч звёзд, для которых весьма точно известно распределение и движение.

Для вычисления средневзвешенных лучевых скоростей использованы данные из более чем 1400 публикаций (в основном относящихся к отдельным звёздам), включая все, упомянутые в каталогах WEB (Duflot et al., 1995), Barbier-Brossat & Figon (2000), Malaroda et al. (2004). Кроме этих трёх публикаций и каталога CORAVEL-CfA ключевыми источниками лучевых скоростей послужили: Bersier et al. (1994), Fehrenbach et al. (1997), Fernley & Barnes (1997), Flynn & Freeman (1993), Grenier et al. (1999), Imbert (1999), Madsen et al. (2002) и другие публикации этой серии, de Medeiros & Mayor (1999), de Medeiros et al. (2002), Rucinski et al. (2003) и другие публикации этой серии, Solano et al. (1997), Storm et al. (2004). Полный список использованных источников лучевых скоростей будет опубликован отдельно.

Так как среди рассматриваемых 20 тысяч звёзд около 7 тысяч являются известными и предполагаемыми неодиоными звёздными системами, включая около 800 известных и 4500 предполагаемых спектрально-двойных, одной из основных проблем при вычислении средневзвешенных лучевых скоростей оказались имеющиеся во многих публикациях ошибки идентификации компонентов неодионых звёздных систем. То есть авторы часто неправильно указывают компонент, лучевая скорость которого измерена, или вообще не указывают, к какому компоненту относится измерение. Причём в заметной степени эти ошибки вызваны тем, что до недавнего времени номенклатура неодионых звёздно-планетных систем не была стандартизирована, то есть в разных каталогах один компонент обозначен по-разному. В итоге я внёс в исходный материал более тысячи исправлений такого рода.

Во всех случаях, когда гравитационная связанность компонентов звёздной системы не вызывает сомнений (как правило, расстояние между компонентами менее 20000 а.е.), мной вычислена и далее рассматривается только системная лучевая скорость. Для гравитационно-широких звёздных пар (расстояние между компонентами более 20000 а.е.) в каталоге OSACA приведены оба компонента и их лучевые скорости. В рассматриваемый массив данных попало множество членов известных звёздных скоплений (например, Гиад), хотя мы не ставили цель представить все члены какого-либо скопления.

Медианная точность вычисленных лучевых скоростей составила  $\pm 1$  км/с, при этом рассматриваются только звёзды, лучевая скорость которых известна с точностью лучше  $\pm 5$  км/с.

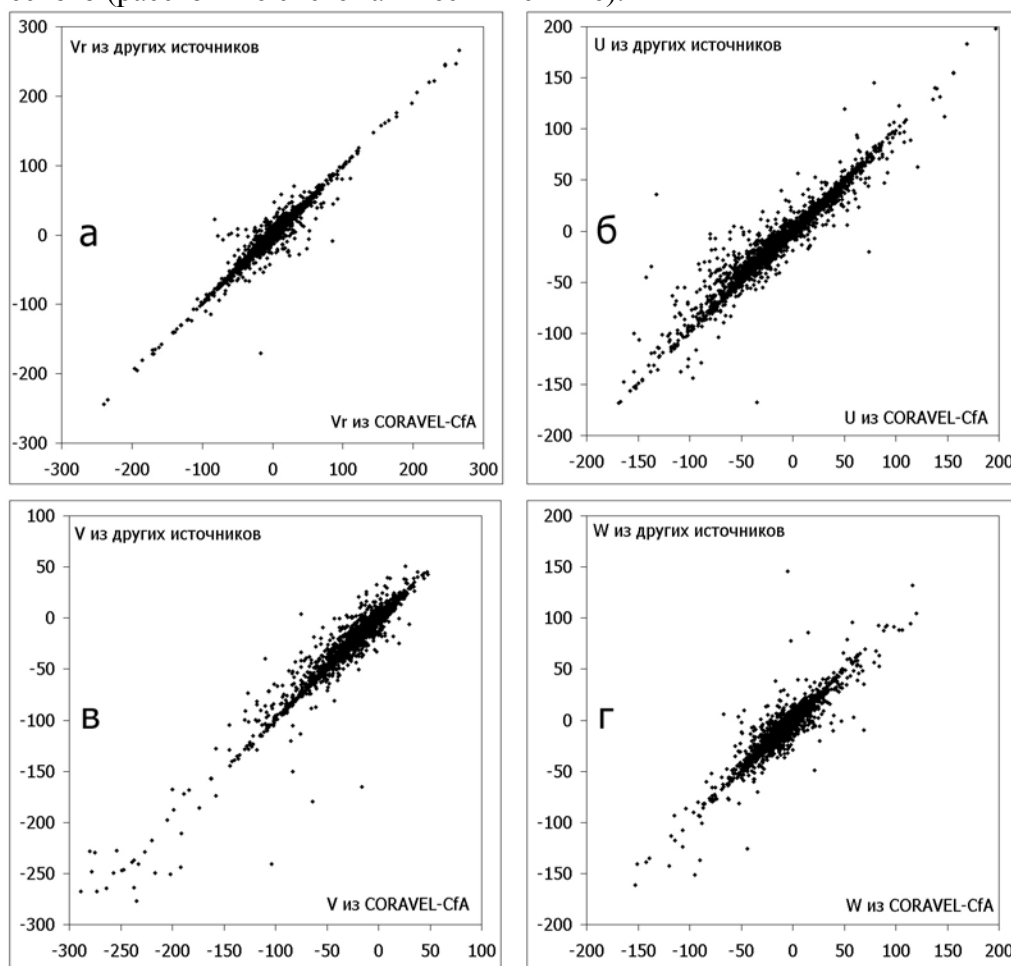
## **2. Сравнение каталога CORAVEL-CfA с другими источниками лучевых скоростей**

Необходимо отметить, что для примерно 10 тысяч звёзд из каталога CORAVEL-CfA приведённые в этом каталоге лучевые скорости либо являются единственным ис-



точником, либо столь точны по сравнению с остальными источниками, что для этих звёзд мы ограничились в основном использованием данных каталога CORAVEL-CfA.

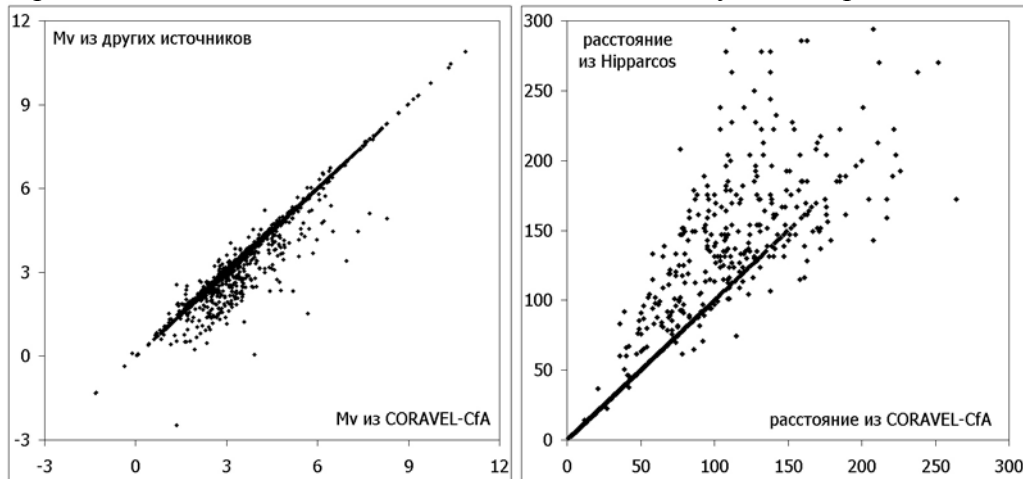
Для 3400 общих звёзд данные по каталогу CORAVEL-CfA сравниваются с величинами, вычисленными мной по другим источникам лучевых скоростей. На рисунке 1 показано сравнение лучевых скоростей и компонентов пространственной скорости: заметна сильная корреляция, указывающая на высокую точность вычисленных мной лучевых скоростей. Заметны и небольшие систематические отклонения в компонентах  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , которые вызваны тем, что в случаях, когда тригонометрический параллакс звезды из Hipparcos известен с точностью хуже 13%, для вычисления расстояния до звезды и соответствующего перевода собственного движения из угловой меры в линейную (км/с) создателями каталога CORAVEL-CfA использован фотометрический параллакс. Как признают сами авторы каталога, эти фотометрические расстояния не применимы для двойных звёзд, гигантов и особых звёзд. Мной обнаружено, что 1) многие звёзды, показывающие существенно разную скорость по каталогу CORAVEL-CfA и нашим данным, согласно наиболее достоверной спектральной классификации, не относятся к главной последовательности, 2) для таких звёзд-гигантов (по классу светимости) в каталоге CORAVEL-CfA фотометрический параллакс систематически больше тригонометрического (расстояние систематически меньше).



**Рис.1.** Сравнение скоростей из каталога CORAVEL-CfA со скоростями, вычисленными мной по другим источникам лучевых скоростей (3400 общих звёзд): а) лучевая скорость, б) компонент скорости  $U$ , в) компонент скорости  $V$  и г) компонент скорости  $W$  в км/с.

Как видно на рисунке 2, этот же эффект исказил абсолютные звёздные величины многих звёзд из каталога CORAVEL-CfA. Межзвёздное поглощение вычислено авто-

рами каталога по межзвёздному покраснению  $E(b-y)$  с учётом величины  $\beta$  на основе многополосной фотометрии Стрёмгрена. В текущей реализации каталога OSACA межзвёздное покраснение  $E(B-V)$  и соответствующее поглощение, принятое за  $A_V=3.1 \cdot E(B-V)$ , вычислены гораздо более простым способом - по трёхмерной модели галактического межзвёздного поглощения (Arenou et al. 1992). Однако, сравнение абсолютных звёздных величин общих звёзд на рисунке 2 показывает, что результаты довольно хорошо согласуются, и для подавляющего большинства звёзд межзвёздное поглощение не превосходит  $0.1^m$ . Это объясняется, прежде всего, сравнительно небольшими расстояниями до звёзд. Рассматриваемые звёзды являются хорошим материалом для будущего сравнения величин межзвёздного поглощения, полученных разными методами.



**Рис.2.** Слева: сравнение абсолютных звёздных величин из каталога CORAVEL-CfA с величинами, вычисленными по параллаксу из Hipparcos с учётом межзвёздного поглощения (3400 общих звёзд). Разница вызвана различием в учёте поглощения и использованием неточных фотометрических параллаксов в каталоге CORAVEL-CfA. Справа: расстояние до звёзд из каталога CORAVEL-CfA в сравнении с расстоянием из Hipparcos.

Таким образом, массив рассматриваемых лучевых скоростей весьма однороден: лучевые скорости CORAVEL-CfA можно использовать вместе с остальными.

### 3. Координаты и собственные движения

Экваториальные координаты из каталога Hipparcos для рассматриваемых звёзд имеют медианную точность около  $\pm 0.001''$ . Неопределённость, вносимая этой величиной в галактические прямоугольные координаты ничтожно мала: даже на расстоянии 1000 пк от Солнца величина  $\pm 0.001''$  соответствует 1 а.е.. Собственные движения из каталога Hipparcos для рассматриваемых звёзд имеют медианную точность  $\pm 0.0007$  и  $\pm 0.0006''/\text{год}$  по прямому восхождению и склонению соответственно, и  $\pm 0.0009''/\text{год}$  - для тангенциальной скорости. Учитывая, что медианная точность лучевых скоростей рассматриваемых звёзд составляет  $\pm 1$  км/с, можно заключить, что в радиусе 200 пк от Солнца тангенциальная скорость звезды, определяемая по собственному движению, в среднем известна точнее, чем радиальная скорость, определяемая по лучевой скорости (12500 звёзд), а для более далёких звёзд - наоборот (7550 звёзд). На расстоянии более 400 пк от Солнца заметную неопределённость в галактические прямоугольные координаты звёзд вносит неточность знания параллакса, которая и в целом ограничивает исследование распределения и движения звёзд. 17000 рассматриваемых звёзд (85%) находятся ближе 400 пк. Таким образом, точность координат и собственных движений из каталога Hipparcos для большинства рассматриваемых звёзд вполне достаточна для выполняемого исследования.

Однако, собственные движения некоторых звёзд неточны. В основном это касается известных и предполагаемых неодионых звёзд. Для уточнения их собственных движений мной использованы собственные движения из каталога Tycho2, каталога ARHIP астрономического института в Гейдельберге, Карлсбергского меридианного каталога СМС12. Кроме того, собственные движения уточнялись с использованием координат звёзд из каталогов, приведённых к единой координатной системе (ICRS), но имеющих существенно разные эпохи наблюдений, отличные от эпохи каталога Hipparcos (1991.25): каталог AC2000.2, меридианный каталог Бордо M2000 (Rapaport et al. 2001), каталог служб времени KCB2 (Горшков & Щербакова 1998), каталог CPC2, каталог TAC2 и другие. В результате для примерно 1500 звёзд заметно точнее определены собственные движения по прямому восхождению и для примерно 800 звёзд - по склонению. Тем не менее, медианная точность собственных движений практически не изменилась:  $\pm 0.0006''/\text{год}$  по обеим координатам, что соответствует точности  $\pm 0.0008''/\text{год}$  для тангенциальной скорости. При этом для всех звёзд тангенциальная скорость известна с точностью лучше  $\pm 0.002''/\text{год}$ .

#### 4. Состав и формат каталога OSACA

Каталог Orion Spiral Arm CAlogue (OSACA) создан для исследования трёхмерного распределения и движения звёзд в окрестностях Солнечной системы, в основном в радиусе 400 пк, и для исследования связей между различными характеристиками этих звёзд. Каталог не претендует на полноту выборки звёзд по какому-либо параметру (расстояние, блеск и т.д.). Основными используемыми характеристиками рассматриваемых звёзд являются 6 параметров, определяющих их положение и движение:  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\pi$ ,  $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\delta$ ,  $V_r$  в системе ICRS на эпоху J2000, а также соответствующие координаты и скорости в галактической прямоугольной системе координат: X, Y, Z, U, V, W.

Кроме того, важными исходными данными являются величины B и V, имеющиеся для всех звёзд. По возможности будут введены и другие фотометрические величины. Также приведён показатель цвета B-V.

Предполагается постоянное пополнение базы данных и каталога OSACA данными из новых публикаций и каталогов. Планируется также определить и включить в будущие версии каталога эффективную температуру, металличность, возраст, массу и галактическую орбиту каждой звезды с использованием методов, упомянутых в (Nordstrom et al., 2004). Сейчас каталог имеет следующий состав: основная таблица, таблица ссылок на публикации лучевых скоростей по строке на звезду, таблица ссылок на публикации лучевых скоростей по строке на публикацию, таблица перекрёстной идентификации звёзд.

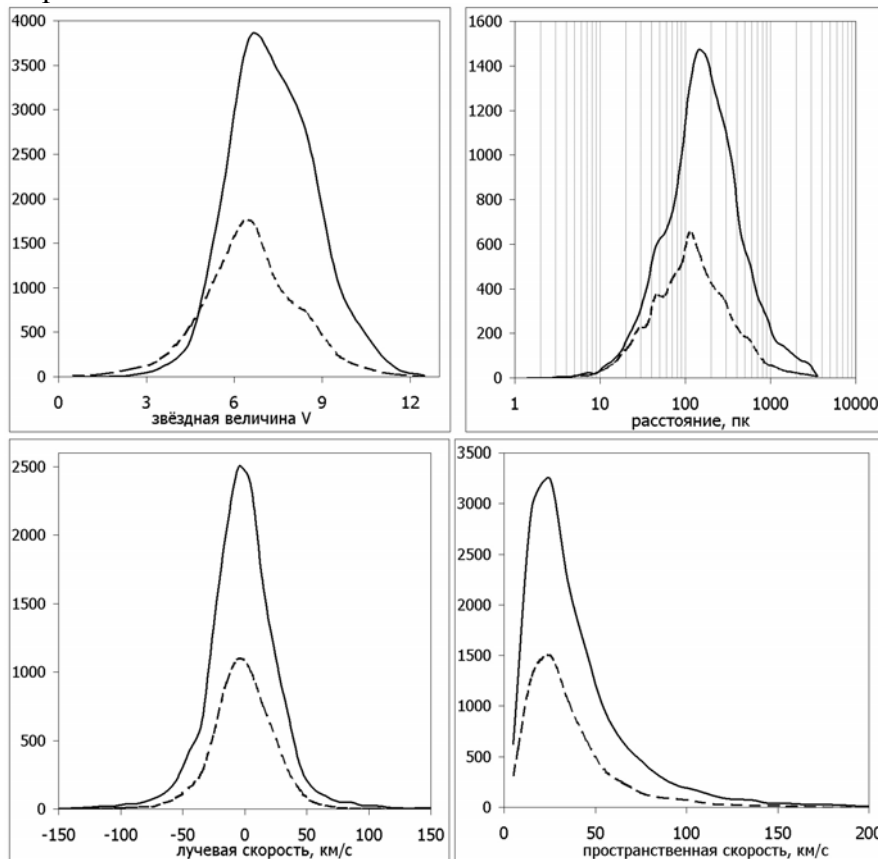
#### Формат основной таблицы:

Номер по каталогу Hipparcos	I6
Прямое восхождение в градусах с долями	F11.6
Склонение в градусах с долями	F11.6
Параллакс в миллисекундах дуги	F6.1
Десятичный логарифм параллакса	F6.2
Собственное движение по прямому восхождению в $0.001''/\text{год}$	F9.1
Собственное движение по склонению в $0.001''/\text{год}$	F9.1
Лучевая скорость в км/с	F7.1
Точность лучевой скорости в км/с	F4.1
Звёздная величина V в системе Джонсона (из Hipparcos)	F6.2
Звёздная величина B в системе Джонсона (из Hipparcos)	F6.2
Звёздная величина I в системе Джонсона (из Hipparcos)	F6.2

Показатель цвета B-V в системе Джонсона (из Hipparcos)	F7.3
Показатель цвета V-I в системе Джонсона (из Hipparcos)	F6.2
Межзвёздное покраснение E(B-V)	F6.3
Абсолютная звёздная величина $M_V$	F6.1
Параметр двойственности (1-одиночная, 2-неодиночная звезда)	A1
Спектральный класс, включая класс светимости (из НИС)	A13
Галактическая долгота в градусах с долями	F11.6
Галактическая широта в градусах с долями	F11.6
Собственное движение по галактической долготе, 0.001"/год	F8.1
Собственное движение по галактической широте, 0.001"/год	F8.1
Полная пространственная скорость в км/с	F7.1
Компонент скорости U в галактической системе координат, км/с	F8.1
Компонент скорости V в галактической системе координат, км/с	F8.1
Компонент скорости W в галактической системе координат, км/с	F8.1
Координата X в галактической системе координат, пк	F8.1
Координата Y в галактической системе координат, пк	F8.1
Координата Z в галактической системе координат, пк	F8.1

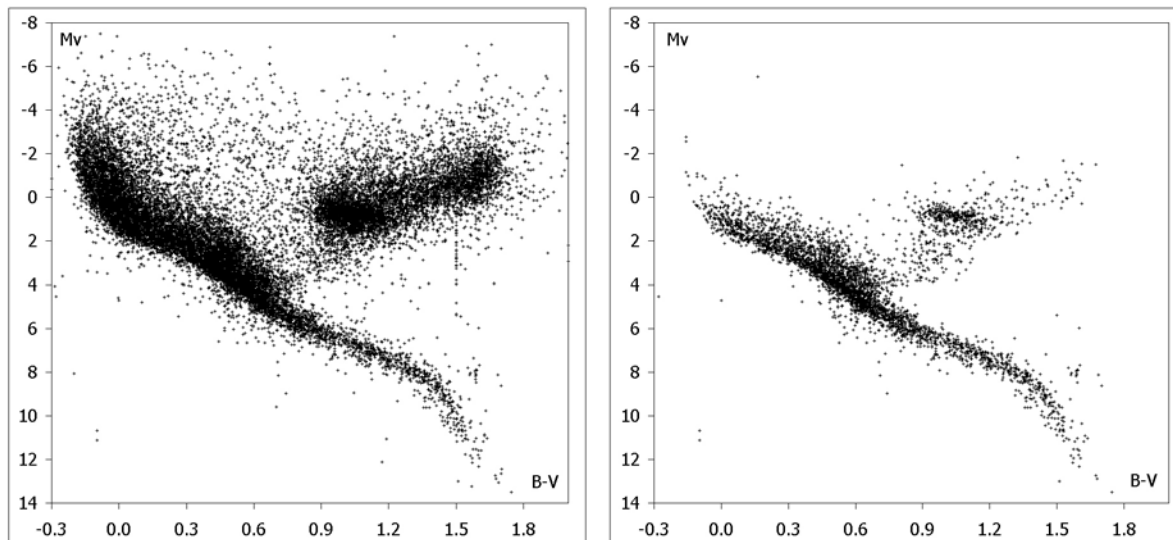
### 5. Статистика рассматриваемых звёзд

Распределение рассматриваемых 20 тысяч звёзд по звёздной величине, расстоянию от Солнечной системы, лучевой и пространственной скорости показано на рисунке 3: сплошной кривой - для одиночных звёзд и пунктиром - для неодиночных. Эти распределения примерно одинаковы для звёзд из каталога CORAVEL-CfA и остальных звёзд.



**Рис.3.** Распределение звёзд OSACA по звёздной величине, расстоянию, лучевой и пространственной скорости: сплошная кривая для одиночных звёзд, пунктир - для неодиночных.

Распределение рассматриваемых звёзд на диаграмме "абсолютная звёздная величина-показатель цвета B-V" (рисунок 4) напоминает распределение всех звёзд каталога Hipparcos: представлены все спектральные классы и классы светимости, хотя под влиянием каталога CORAVEL-CfA преобладают звёзды классов F-K главной последовательности.



**Рис.4.** Звёзды OSACA на диаграмме " $M_v$  - B-V": слева - все 20000 звёзд, справа - одиночные звёзды ближе 100 пк. Видно, что неодионые звёзды в среднем ярче.

Среди звёзд с большой пространственной скоростью доля неодионых звёзд меньше, чем среди медленных звёзд, что отражено в таблице:

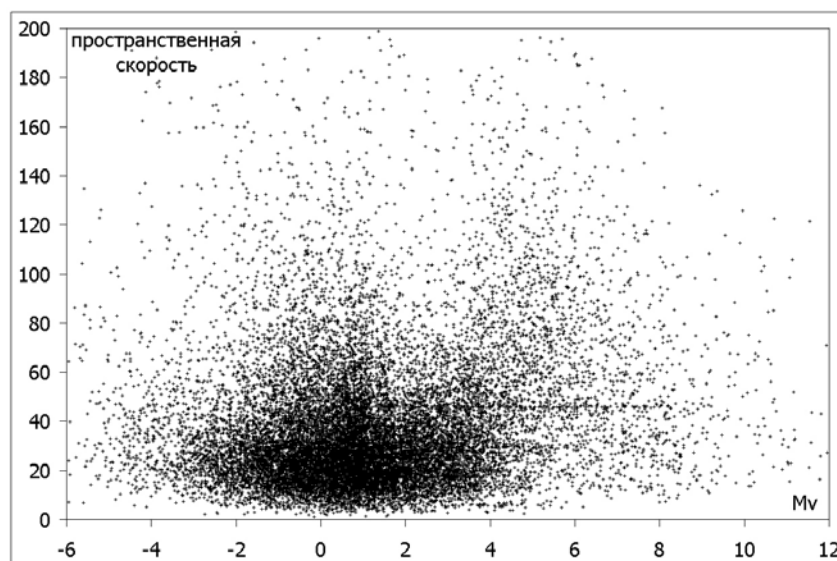
пространственная скорость, км/с	число звёзд	процент неодионых звёзд
0-50	15382	32 %
50-100	3566	27 %
100-150	635	24 %
150-200	170	20 %
200-250	91	12 %
250-300	61	15 %

Медианная пространственная скорость рассматриваемых звёзд относительно Солнца составила  $30.8 \pm 0.5$  км/с для одиночных и  $29.1 \pm 0.5$  км/с для неодионых.

Как видно на рисунке 5, рассматриваемые звёзды разделяются на три класса в зависимости от абсолютной звёздной величины и пространственной скорости: звёзды главной последовательности спектральных классов O-F, красные гиганты (далее обозначены RG) и звёзды главной последовательности классов G-M. Мной установлены следующие формальные границы этих трёх групп звёзд: группа O-F это звёзды с  $B-V < 0.8^m$  и  $M < 3.5^m$ ; группа G-M это звёзды с  $M > 3.5^m$ ; группа красных гигантов (RG) это звёзды с  $B-V > 0.8^m$  и  $M < 3.5^m$ .

Представленное здесь разделение звёзд на 3 группы соответствует эффекту Паренаго (Паренаго 1950), заключающемуся в том, что кинематические характеристики звёзд главной последовательности существенно и скачкообразно меняются при переходе от ранних к поздним спектральным классам. Выполненное ранее исследование кинематики звёзд с использованием только собственных движений (Дробитько & Витязев 2003) как подтвердило существование эффекта Паренаго для звёзд каталога Hipparcos,

так и позволило предположить, что в значительной степени этот эффект вызван селекцией звёзд, точнее отсутствием в выборке сравнительно далёких звёзд поздних спектральных классов.



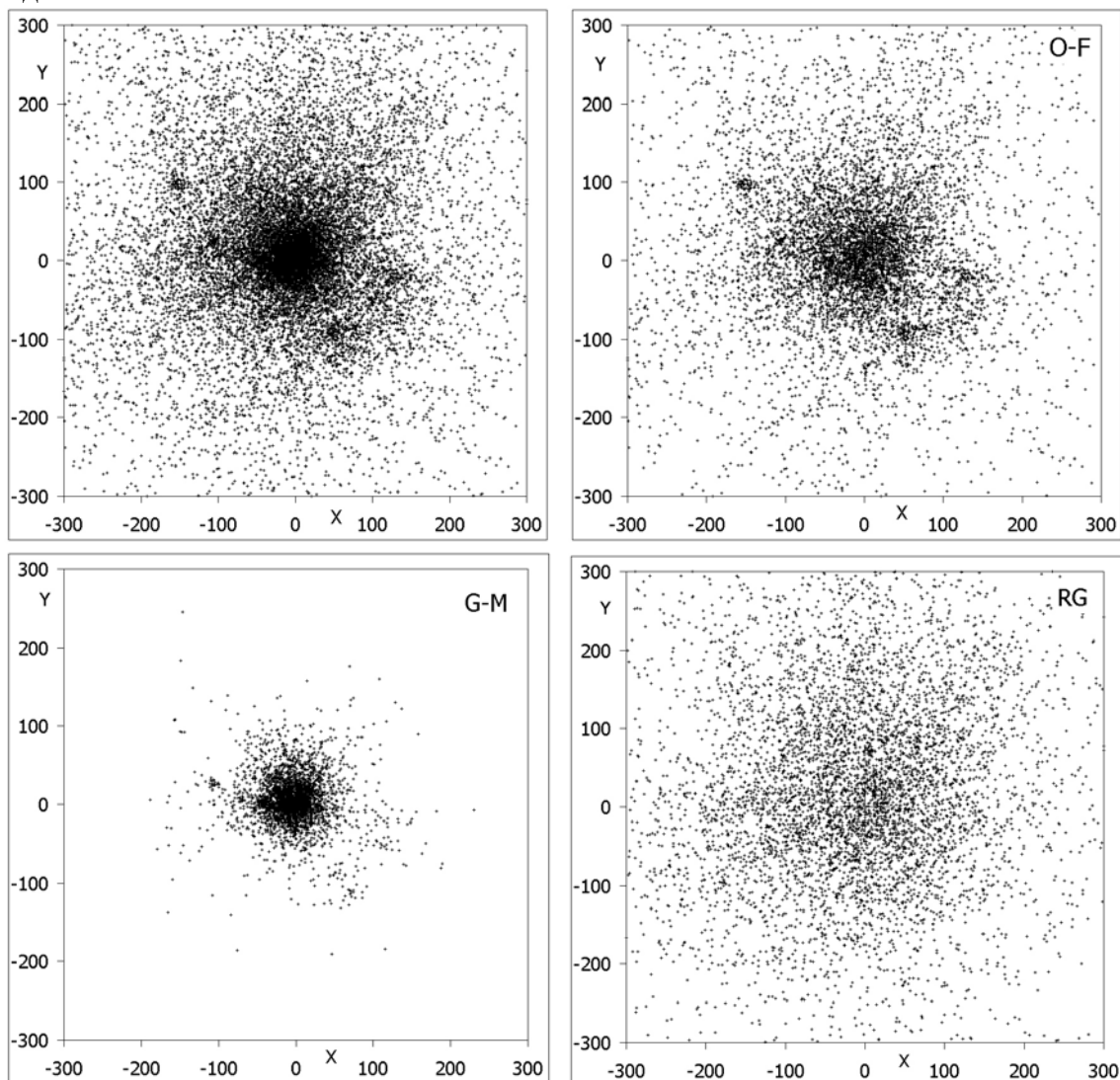
**Рис.5.** Зависимость пространственной скорости от абсолютной величины звезды. Видны 2 "рога": левый отражает сравнительно высокие скорости и большой разброс скоростей для красных гигантов, правый - для звёзд классов G-M ГП, внизу слева - звёзды классов O-F ГП с малыми скоростями и малым их разбросом. Горизонтальная "цепочка" - Гиады.

Соответствующие средние скорости (в км/с), их стандартные отклонения, медианное расстояние и статистика одиночных (обозначены "1") и неодинокных (обозначены "2") звёзд представлены в следующей таблице.

класс	U	V	W	$\sigma(U)$	$\sigma(V)$	$\sigma(W)$	число звёзд	медианное расстояние, пк	процент двойных
все звёзды:									
O-F 1	-8.9	-16.8	-7.3	39	47	24	6349	172	
O-F 2	-9.3	-13.6	-7.4	25	22	17	3272	130	34%
RG 1	-8.1	-21.4	-7.6	41	40	26	5377	222	
RG 2	-6.8	-19.2	-8.3	34	29	19	1685	159	24%
G-M 1	-12.2	-35.3	-8.2	56	55	29	2337	48	
G-M 2	-10.2	-29.9	-9.1	48	46	26	1036	36	31%
близкие звёзды:									
O-F 1	-9.9	-12.8	-6.8	23	15	10	360	42	
O-F 2	-11.1	-12.9	-6.5	23	16	11	528	42	59%
RG 1	-12.5	-19.6	-9.1	32	27	19	72	42	
RG 2	-0.1	-20.6	-10.9	30	26	19	132	42	65%

На первый взгляд разброс скоростей неодинокных звёзд оказывается заметно меньше, чем одиночных. Но, как и ожидалось, звёзды G-M, в отличие от остальных, сосредоточены вблизи Солнечной системы, что отражено на рисунке 6, и, кроме того, для всех классов звёзд неодинокные звёзды в среднем ближе к нам, чем одиночные. В последних четырёх строках таблицы представлены характеристики ближайших

звёзд O-F и RG, отобранных так, чтобы медианное расстояние выборки было таким же, как для звёзд G-M (практически это соответствует ограничению 55 пк от Солнечной системы). Видно, что вблизи Солнечной системы неодинокых звёзд больше, чем одиночных, а их кинематические характеристики практически одинаковы. Вся же первоначально обнаруженная разница в кинематике одиночных и неодинокых звёзд объясняется только зависимостью кинематических характеристик от расстояния до Солнечной системы и преобладанием одиночных звёзд на больших расстояниях. Кроме того, видно, что разброс скоростей звёзд вблизи Солнечной системы заметно меньше, чем вдали. Пространство в радиусе примерно 100 пк от Солнечной системы отличается от более далёких областей: здесь сравнительно мало газа, пыли и абсолютно ярких звёзд. Это так называемый Местный пузырь (Local bubble), обычно рассматриваемый как результат сравнительно недавнего взрыва сверхновой (Sfeir et al. 1999). Видимо, кинематика звёзд внутри Местного пузыря заметно отличается от ситуации за его пределами: например, Местный пузырь включает звёздные скопления - Плеяды, Гиады, Большую медведицу и Волосы Вероники, так что здесь преобладают систематические движения звёзд.

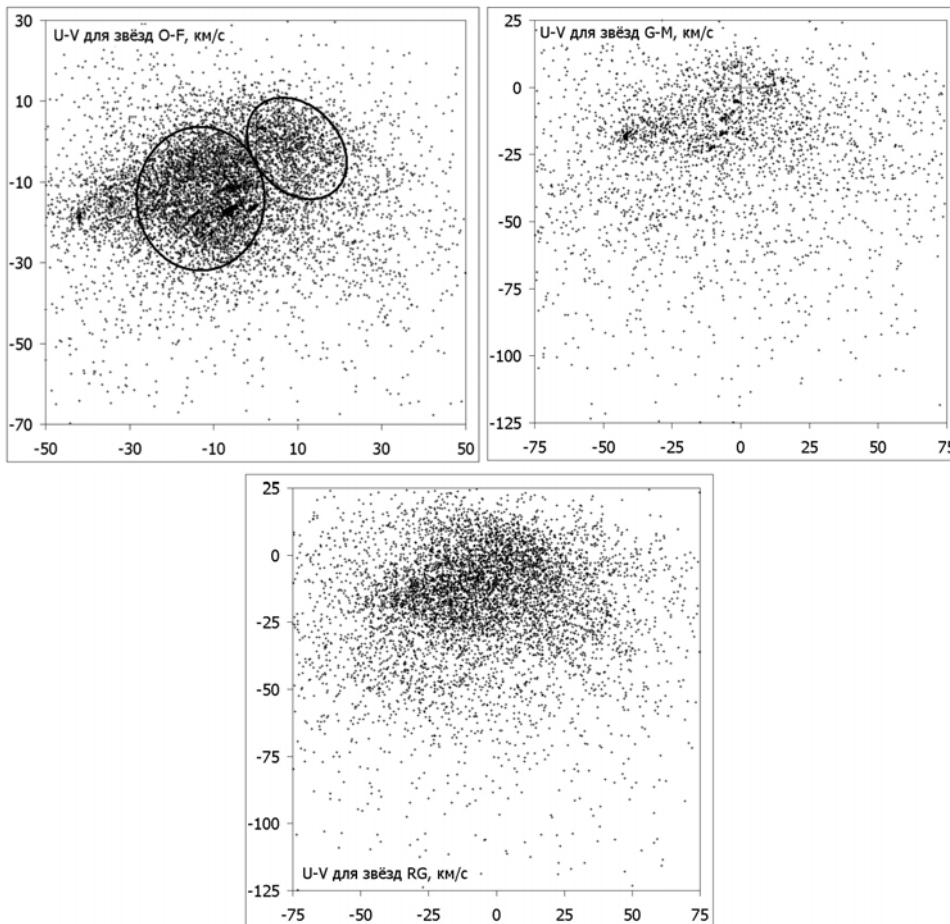


**Рис.6.** Распределение звёзд в проекции на галактическую плоскость: все звёзды OSACA - слева сверху, остальное - классы O-F, G-M и RG отдельно. Заметны Плеяды, Гиады и другие скопления. Заметна малая кластеризация красных гигантов.

## 6. Потоки звёзд и эволюция пояса Гулда

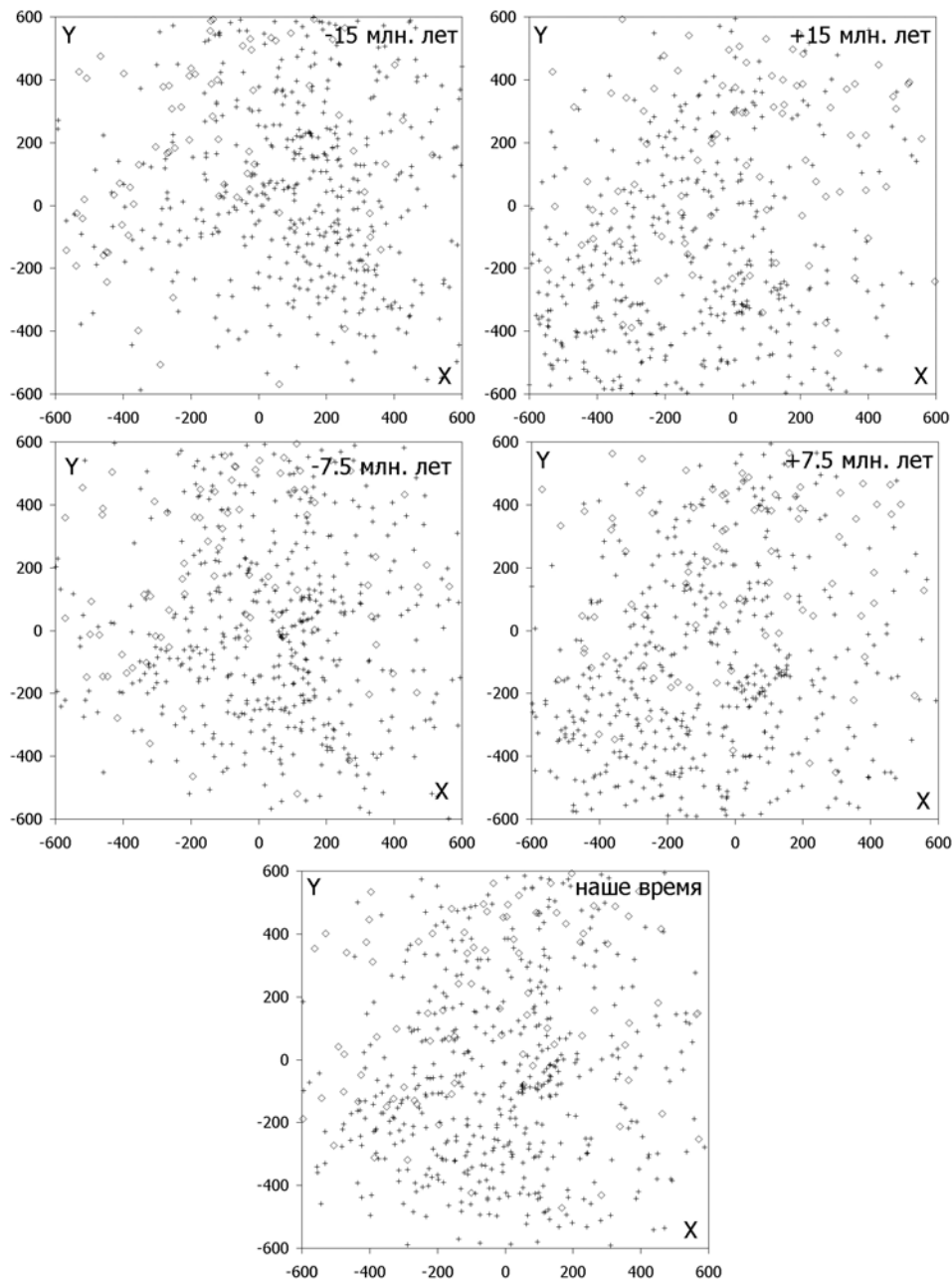
На рисунке 7 показано распределение рассматриваемых звёзд в зависимости от компонентов скорости  $U$  и  $V$ . Видны звёздные скопления, а также два основных потока звёзд в окрестностях Солнечной системы, отмеченные на рисунке овалами: поток Ориона с отрицательными значениями  $U$ , включающий все 7 звёзд астеризма Ориона и сотни других ярких звёзд, а также некий поток с положительными значениями  $U$ .

Так как каталог OSACA почти полон для звёзд ярче  $8^m$  в радиусе 400 пк от Солнца, он является почти полной выборкой абсолютно ярких звёзд ( $M_V < -2^m$ ) в этом пространстве. Это позволяет делать выводы о крупномасштабных галактических структурах местного спирального рукава, так как абсолютно яркие звёзды являются их трассерами: как правило они входят в скопления и ассоциации на окраинах гигантских молекулярных облаков, будучи связаны с ними происхождением. Кроме того, учитывая связь между светимостью, массой и возрастом, можно предположить, что все эти звёзды образовались не ранее 30 миллионов лет назад и сохраняют достаточно прямолинейное движение с момента рождения. Таким образом, наш материал позволяет рассмотреть распределение и проследить движение абсолютно ярких звёзд от самого их рождения до нашего времени и на несколько миллионов лет в будущее вплоть до их гибели с указанием мест рождения и гибели.



**Рис.7.** Распределение звёзд O-F (вверху слева), G-M (вверху справа) и RG (внизу) в зависимости от компонентов скорости  $U$  и  $V$ . Для звёзд O-F выделяется поток Ориона и противоположный ему поток. Как сгущения видны Гиады, Плеяды и другие скопления. Скорости относительно Солнца даны в км/с.

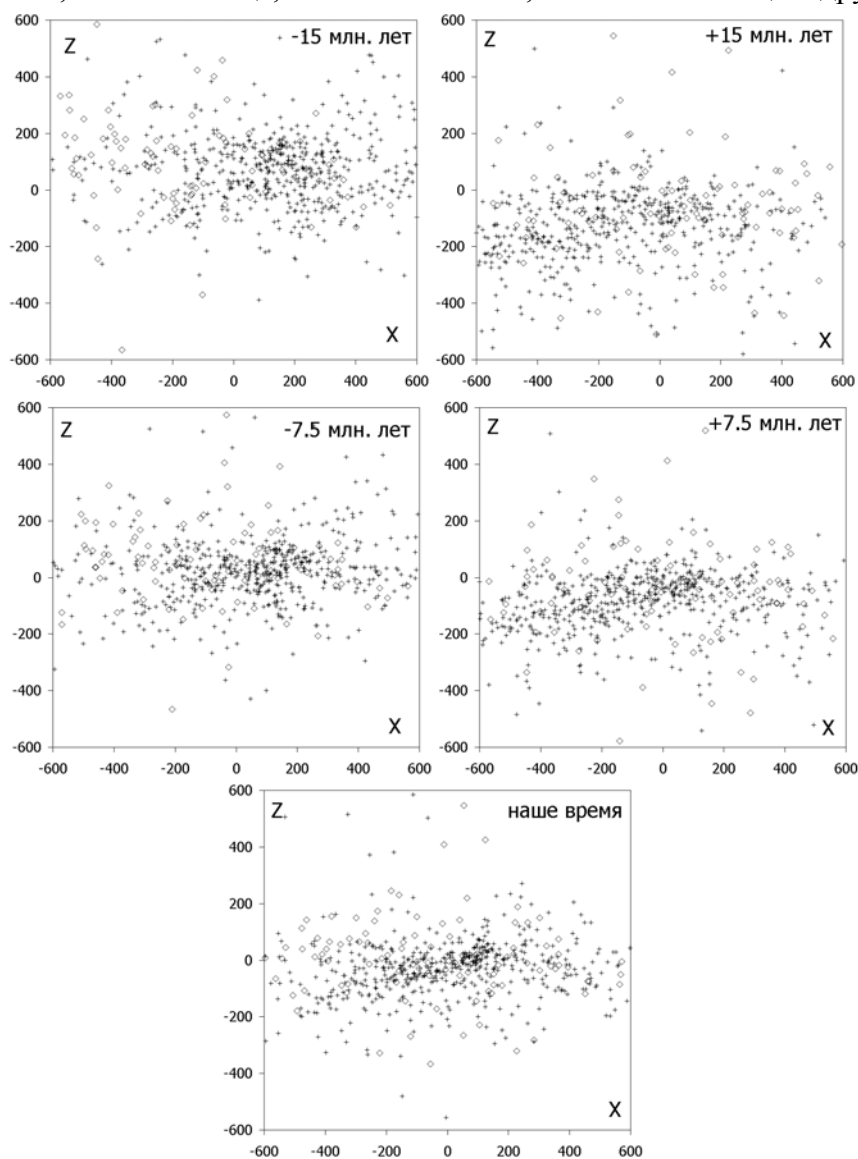




**Рис.8.** Распределение абсолютно ярких звёзд ( $M < -2$ ) в окрестностях Солнечной системы в проекции на галактическую плоскость (XY) для времени 15, 7.5 млн. лет назад, в наше время, через 7.5 и 15 млн. лет. Расстояния даны в пк, Солнце - в центре. Звёзды потока Ориона отмечены крестиками, противоположка - ромбами.

На рисунке 8 показано распределение абсолютно ярких звёзд в проекции на галактическую плоскость (XY) в прошлом, в наше время и в будущем. В наше время рассматриваемая область сравнительно бедна яркими звёздами на расстоянии более 400 пк от Солнца в направлении на центр и антицентр Галактики (на левом и правом краях рисунка). Учитывая полноту выборки, можно заключить, что здесь абсолютно яркие звёзды представляют отрезок местного спирального рукава Галактики, рукава Ориона, который проходит на рисунке сверху вниз. В наше время заметны две крупномасштабные структуры: Местный пузырь - кольцевая структура ярких звёзд радиусом около 100 пк в центре рисунка и включающий его так называемый Большой туннель - две извилистых примерно параллельных друг другу протяжённых структуры ярких звёзд, прохо-

дящих на рисунке сверху вниз и влево. Повышенные концентрации ярких звёзд на краях Большого туннеля включают в себя известные О-В ассоциации: Скорпиона-Кентавра, Ориона, Персея и другие. А области пониженной плотности ярких звёзд вдоль Большого туннеля включают гигантские молекулярные и пылевые комплексы: туманность Гама, облако Тельца, Угольный мешок, облако Змееносца и другие.



**Рис.9.** Распределение абсолютно ярких звёзд ( $M < -2$ ) в окрестностях Солнечной системы в проекции на плоскость  $XZ$  для времени 15, 7.5 млн. лет назад, в наше время, через 7.5 и 15 млн. лет. Расстояния даны в пк, Солнце - в центре. Звёзды потока Ориона отмечены крестиками, противопотока - ромбами.

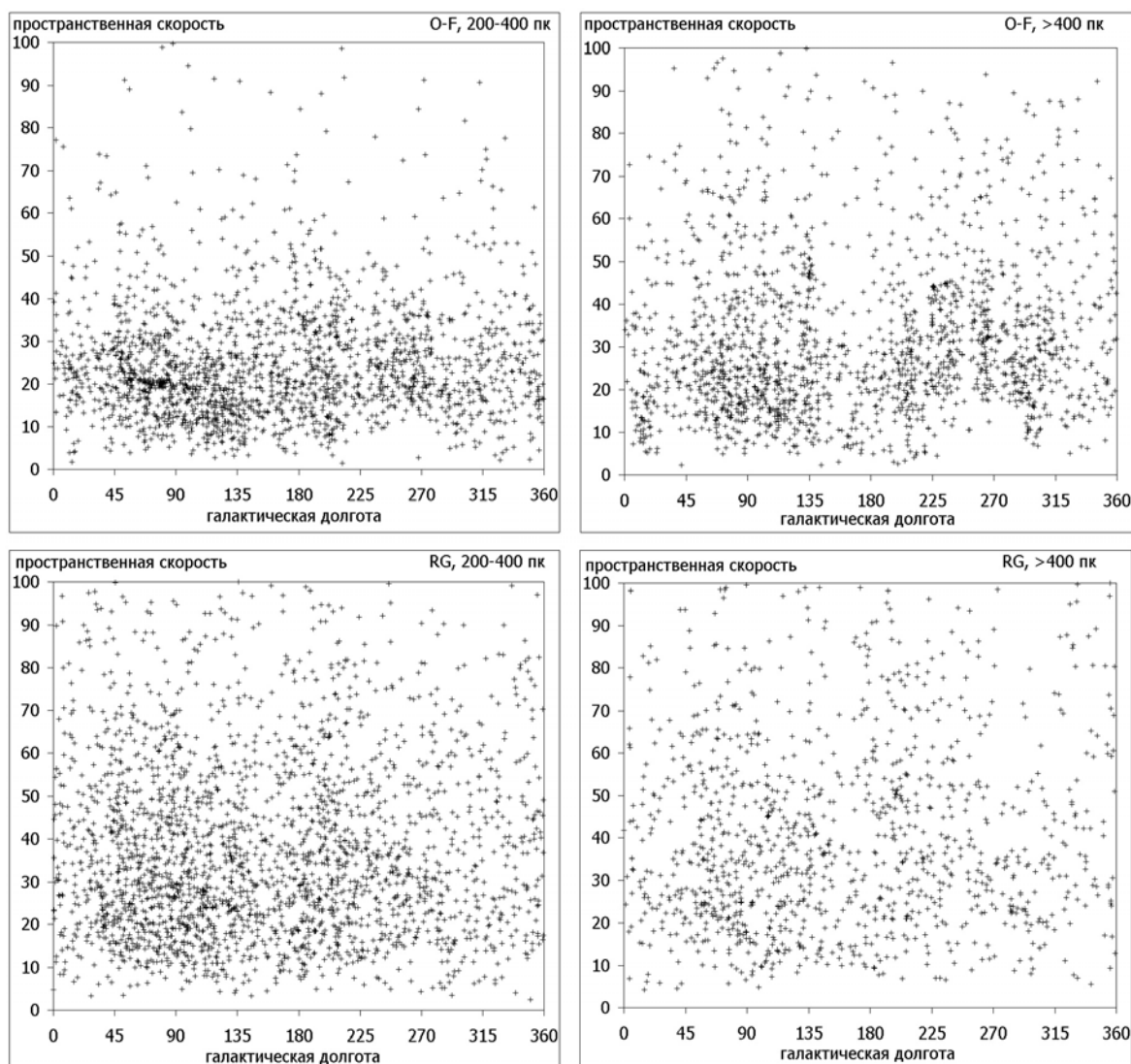
Ещё одна структура, пояс Гулда виден как наклонённый к галактической плоскости диск на рисунке 9, где показано распределение тех же звёзд в проекции на плоскость  $X-Z$ . На рисунках 8 и 9 звёзды, с определённой долей уверенности относящиеся к потоку Ориона, отмечены крестиками, а к противопотоку - ромбами. Видно, что 15 миллионов лет назад звёзды потоков были обособлены друг от друга. Видно взаимодействие потоков в более поздние времена и возникновение дугообразных структур из ярких звёзд, возможно, отражающих распространение неких фронтов, возникающих при взрывах сверхновых или при распространении волн плотности в галактическом диске (см. обсуждение результатов в статье (Nordstrom B. et al., 2004)). На рисунке 9

для моментов 15 и 7.5 миллионов лет назад именно в области пересечения потоков заметно уплощение структуры, превратившейся в наше время в пояс Гулда.

На рисунке 9 видна эволюция пояса Гулда: очевидно, что он возник в течение последних 15 миллионов лет во взаимодействии двух звёздных потоков и, если нынешнее движение звёзд сохранится, эта звёздная структура прекратит существование в ближайшие 15 миллионов лет. На рисунке 8 видно, что Местный пузырь и Большой туннель также возникли в области пересечения этих потоков в течение последних 15 миллионов лет.

### 7. Тест однородности скоростей звёзд

Если звёзды потока или скопления в окрестностях Солнечной системы имеют существенно разные галактические долготы, то какая-либо неоднородность скоростей этих звёзд, возникающая при совместном использовании их собственных движений и лучевых скоростей, проявится в том, что пространственные скорости этой звёздной группы будут систематически зависеть от галактической долготы. Причина этого в том, что на одной долготе в пространственной скорости будет преобладать тангенциальная составляющая, на другой - лучевая скорость.



**Рис.10.** Пространственная скорость в зависимости от галактической долготы для звёзд O-F на расстоянии 200-400 пк (вверху слева), далее 400 пк (вверху справа) и для красных гигантов на расстоянии 200-400 пк (внизу слева), далее 400 пк (внизу справа).

На рисунках 6 и 7 видно, что практически все звёзды классов O-F ГП входят в то или иное скопление или поток и, таким образом, они подходят для теста однородности. На рисунке 10 представлена пространственная скорость в зависимости от галактической долготы для сравнительно близких и далёких звёзд O-F ГП и красных гигантов. Видно, что распределение красных гигантов на этом рисунке довольно равномерно в то время, как распределение звёзд O-F не однородно. Видно, что далёкие звёзды O-F формируют на рисунке некие вертикально ориентированные группы. Так выглядят на этом рисунке сравнительно далёкие звёздные скопления: различие индивидуальных параллаксов звёзд одного скопления приводит к заметному различию в их пространственных скоростях из-за ошибочного пересчёта собственных движений в линейную меру (в км/с). Этот эффект практически не проявляется для звёзд на расстоянии меньше 400 пк: на рисунке для расстояний 200-400 пк видны несколько протяжённых вдоль галактической долготы скоплений с одинаковыми пространственными скоростями звёзд. Именно этот эффект ограничивает пространство, где возможно совместное использование собственных движений и лучевых скоростей: примерно в радиусе 400 пк от Солнца.

## 8. Выводы

Данное исследование показало возможность совместного использования собственных движений и лучевых скоростей звёзд, собранных в базе данных и каталоге OSACA, для воссоздания трёхмерного распределения и движения звёзд в галактических окрестностях Солнечной системы, в пределах спирального рукава Ориона, на протяжении, по крайней мере,  $\pm 15$  миллионов лет. При этом видно, что основные крупномасштабные галактические структуры (Местный пузырь, Большой туннель и пояс Гулда) возникли не ранее 15 миллионов лет назад и просуществуют не дольше 15 миллионов лет в будущем. Видимо, возникновение и эволюция этих структур является результатом галактических процессов, индикаторами которых являются два взаимодействующих и в значительной мере противонаправленных потока молодых звёзд.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 02-02-16570

## Литература

- Гончаров Г.А.*, 2002, Известия ГАО РАН, 216, 84.  
*Горшков В.Л., Щербак Н.В.*, 1998, Известия ГАО РАН, 213, 25.  
*Дробитько Е.В., Витязев В.В.*, 2003, Астрофизика, 46, вып.2, 279.  
*Паренаго П.П.*, 1950, Астрон. журнал, 27, № 3, 150.  
*Arenou F., Grenon M., Gomez A.*, 1992, Astron. Astrophys., 258, 104.  
*Bersier D., Burki G., Mayor M., Duquennoy A.*, 1994, Astron. Astrop. Suppl. Ser., 108, 25.  
*Duflot M., Figon P. & Meysonnier N.*, 1995, Astron. Astrophys. Suppl., 114, 269.  
*Barbier-Brossat M., Figon P.*, 2000, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 142, 217.  
*Fehrenbach C., Duflot M., Mannone C., et al.*, 1997, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 124, 255.  
*Fernley J., Barnes T.G.*, 1997, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 125, 313.  
*Flynn C., Freeman K.C.*, 1993, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 97, 835.  
*Gontcharov G.A.*, 2004, Astron. society of the Pacific Conf. Ser., Conf. AGAVA-2003, 276.  
*Grenier S., Baylac M.O., Rolland L., et al.*, 1999, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 137, 451.  
*Imbert M.*, 1999, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 140, 79.  
*Madsen S., Dravins D., Lindegren L.*, 2002, Astron. Astrophys., 381, 446.

- Malaroda S., Levato H., Galliani S.*, 2004, Bibliographic catalogue of stellar radial velocities: (1991 - 2003), Complejo Astronomico El Leoncito.
- de Medeiros J.R., Mayor M.*, 1999, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 139, 433.
- de Medeiros J.R., Udry S., Burki G., Mayor M.*, 2002, *Astron. Astrophys.*, 395, 97.
- Nordstrom B., Mayor M., Andersen J., et al.*, 2004, *Astron. Astrophys.*, 418, 989.
- Rapaport M., Le Campion J.-F., Soubiran C., et al.*, 2001, *Astron. Astrophys.*, 376, 325.
- Rucinski S.M., Capobianco C.C., Lu W., et al.*, 2003, *Astron. Journal*, 125, 3258-3264, 2003.
- Solano E., Garrid R., Fernley J., Barnes T.G.*, 1997, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 125, 321.
- Sfeir D.M., Lallement R., Crifo F., Welsh B.Y.*, 1999, *Astron. Astrophys.*, 346, 785.
- Storm J., Carney B.W., Gieren W.P., et al.*, 2004, *Astron. Astrophys.*, 415, 531.

## ORION SPIRAL ARM CATALOGUE (OSACA)

**Gontcharov G.A.**

### *Summary*

*Hipparcos coordinates, parallaxes and proper motions together with mean weighted radial velocities calculated from various sources (including the new CORAVEL-CfA catalogue) are used for determination of the galactic coordinates X, Y, Z and velocities U, V, W for about 20000 stars within 500 pc from the Sun. In this way U, V, W are determined with median precision of  $\pm 1$  km/s. These and other parameters are presented as the Orion Spiral Arm Catalogue (OSACA) to study stellar kinematics. The comparison of CORAVEL-CfA radial velocities with others is done. The possibility of mutual usage of radial velocities and proper motions is tested. The usage of the OSACA is considered with the example of the motion of Gould belt stars within  $\pm 15$  million years: it is shown the birth of this and other structures of the Orion spiral arm (the Great tunnel and the Local bubble) in an interaction of two main stellar streams.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОМПОНЕНТ А И В ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ 61 ЛЕБЕДЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОПОРНЫМ ЗВЕЗДАМ**

**Горшанов Д.Л., Шахт Н.А., Киселев А.А., Поляков Е.В.**

*По фотографическим наблюдениям на 26" рефракторе двойной звезды 61 Лебеда в 1958–1997 гг. ранее были получены относительные положения компонент В–А [1]. В настоящей работе было исследовано движение каждой компоненты в отдельности относительно опорных звезд. Получены кинематические параметры компонент А и В и центра масс системы. Сделана предварительная оценка масс компонент на основе имеющейся суммы масс, равной 1.3 массы Солнца, и полученного на данном материале отношения масс компонент  $V = M_A / (M_A + M_B)$ , равного  $0.38 \pm 0.04$ , которая согласуется с их спектральным классом и не дает оснований для наличия заметной скрытой массы. Делается вывод о возможном невидимом спутнике или нескольких таких спутниках, но с массой не более 0.01 масс Солнца.*

### **Введение**

В настоящей работе выполнено исследование двух рядов наблюдений компонент А и В двойной звезды 61 Лебеда. При этом движение каждой компоненты исследовалось как движение одиночного объекта, а измерения были произведены по отношению к опорным звездам. Основной задачей было исследование невязок О–С, полученных после исключения собственного движения и параллакса, с целью сравнения их с невязками, полученными по относительным расстояниям В–А [1], и выявления возможного влияния невидимого спутника.

В связи с тем, что наш наблюдательный ряд является достаточно протяженным, была сделана попытка определения отношения масс для оценки возможной скрытой массы.

В то время как сумма масс определяется с помощью третьего закона Кеплера при известном периоде, большой полуоси относительной орбиты и параллаксе данной звезды, отношение масс можно определить, если определено движение каждой из компонент в системе опорных звезд. Однако здесь могут возникнуть сложности, так как в силу специфических условий наблюдений не всегда удается получить достаточное число опорных звезд на пластинках с двойными звездами. Кроме того, для получения нужного веса неизвестных необходим протяженный по времени наблюдательный ряд.

Исследуемый нами ряд является одним из наиболее протяженных наблюдательных рядов, а определение отношения масс для 61 Cyg можно считать первым таким опытом за всю историю пулковских наблюдений.

Отношение масс для 61 Cyg определялось ранее в работах ван де Кампа [2,3] на основе разных алгоритмов. Эти методы были использованы в нашей работе.

### **Наблюдательный материал**

Наблюдательный материал 61 Cyg (ADS 14636;  $\alpha = 21^{\text{h}}0^{\text{m}}6$ ,  $\delta = 38^{\circ}45'$ ;  $5^{\text{m}}4$   $6^{\text{m}}1$ ; K5V, K7V) состоял из пластинок, полученных с помощью 26" рефрактора в течение 1959–1997 гг., которые были измерены на пулковском автоматическом комплексе «Фантазия» и использовались для получения относительных взаимных расстояний В–А (ряд I) [1]. Для получения относительных положений  $\rho$  и  $\theta$  было использовано 317 пластинок с общим числом около 5000 экспозиций. Относительные расстояния получены со среднеквадратичной ошибкой одного среднегодового места, равной  $0''008$ . На всех

этих пластинках были выбраны и измерены опорные звезды, которые затем были использованы для получения относительных положений каждой компоненты по отношению к стандартной пластинке (ряд II). Данные об опорных звездах из каталога TYCHO-2 даны в таблице 1.

**Таблица 1.** Данные об опорных звёздах, взятые из каталога TYCHO-2.

№	$\alpha_{(2000)}$	$\delta_{(2000)}$	$\mu_{\alpha}$ (″/год)	$\mu_{\delta}$ (″/год)	$m_V$	$B-V$
1	21 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> 54.64024 <sup>s</sup> ±0.00060	+38° 32' 20.5691" ±0.0070	-0.00076 ±0.00011	-0.0078 ±0.0013	8.468 0.012	1.87
2	21 07 30.54857 0.00137	+38 52 24.8245 0.0150	+0.00113 0.00017	-0.0032 0.0019	9.598 0.020	1.67
3	21 06 14.23475 0.00154	+38 35 02.1842 0.0170	+0.00066 0.00013	+0.0047 0.0015	10.225 0.030	0.50
4	21 06 30.68477 0.00137	+38 45 32.0648 0.0150	+0.00098 0.00013	-0.0071 0.0015	9.630 0.021	1.49
5	21 06 25.05849 0.00146	+38 54 33.1110 0.0160	+0.00156 0.00013	-0.0094 0.0015	10.029 0.027	0.59
6	21 08 06.41733 0.00043	+38 31 44.8321 0.0050	+0.00245 0.00011	+0.0021 0.0013	7.778 0.010	0.40

Рисунок, на котором указано расположение опорных звезд, приведён в статье [4].

### Методика обработки

Все измерения пластинок были приведены в систему стандартной пластинки, за которую была выбрана пластинка под номером 9658, полученная на 26" рефракторе 14 августа 1978 г.

Предварительно была произведена оценка качества пластинок с помощью метода, предложенного А.А. Киселевым [5] и используемого в обработке всех наблюдений одиночных звезд по отношению к опорной системе. В этом методе для каждой экспозиции  $j = 1, 2, \dots, n$  производится обработка и получение положения объекта относительно опорных звезд, затем эти экспозиции сравниваются, и по полученным положениям вычисляется ошибка одной экспозиции  $\varepsilon_{1xy}$  и ошибка среднего положения звезды на пластинке, или внутренняя ошибка одной пластинки  $\varepsilon_{xy}$ . Следует отметить, что при обработке ряда I ошибка пластинки зависит только от ошибок измерений звезд А и В, а при обработке ряда II — также и от измерений опорных звезд и не всегда величина ошибки в относительных положениях В–А соответствует ошибкам положений отдельных компонент.

Для наиболее корректной обработки нам пришлось решить несколько предварительных задач:

- 1) из имеющегося материала произвести отбор пластинок удовлетворительного качества, на которых получено максимальное число экспозиций звезд опорной системы;
- 2) исследовать случайные и систематические ошибки этих пластинок, которые способны повлиять на динамические и кинематические параметры компонент исследуемой звезды, получаемые при вычислениях;
- 3) привлечь результаты исследования геометрического масштаба  $M_0$  26" рефрактора для контроля используемых расстояний В–А.

Кроме того, необходимо было выбрать оптимальный алгоритм для определения отношения масс.

Из имеющегося материала было отобрано 279 пластинок удовлетворительного качества, на которых было получено максимальное число экспозиций всех звезд опорной системы.

Далее на основе этих пластинок были получены предварительные значения собственного движения и параллакса, произведена оценка точности. Звезда 61 Лебеда на протяжении всего периода наблюдений наблюдалась как двойная, ее компоненты, близкие по звездной величине, не ослаблялись.

Таким образом, мы должны были проверить, как влияет разность звездных величин опорных звезд и объекта на точность измерений и на получаемые параметры. По полученным О–С по всем пластинкам без отсева были вычислены ошибки единицы веса, или внешние ошибки одной пластинки, которые в среднем по координатам  $X$ ,  $Y$  оказались равными  $0''.122$  и  $0''.079$  для А и В компонент соответственно; то есть ошибка для более яркой компоненты А оказалась больше, чем для В.

В таблице 2 даны соответствующие значения ошибок  $E_{0x}, E_{0y}$  для числа пластинок  $N$ , которые выбраны после отсева значений О–С, превосходящих по абсолютной величине приведенное во втором столбце таблицы 2 значение  $v$ , выраженное в микронах. В третьей строке даны ошибки  $E_{0x}, E_{0y}$ , полученные по всем 279 пластинкам без отсева.

**Таблица 2.** Оценка точности ряда 61 Cyg А и 61 Cyg В.

$N$	$v$	61 Cyg А		61 Cyg В	
		$E_{0x}$	$E_{0y}$	$E_{0x}$	$E_{0y}$
279	—	$0''.145$	$0''.100$	$0''.078$	$0''.080$
230	100	72	76	55	60
220	60	68	72	44	50
200	45	40	42	37	38

Из таблицы 2 видно, что измерения ряда II для компоненты В получаются точнее, чем для А, особенно это проявляется в пластинках, полученных без отсева или с небольшим отсевом, что, по-видимому, объясняется большей разностью в звездных величинах между компонентой А и опорными звездами по сравнению с компонентой В.

В дальнейшем для исследования движения каждой компоненты использовались от 200 до 240 пластинок. Для определения отношения масс  $B$ , где коэффициентом при  $B$  являются относительные расстояния В–А, для предварительного счета были выбраны 150 пластинок, для которых внутренняя ошибка пластинки не превышала 0.8 мкм, а ошибка среднего на пластинке расстояния В–А не превышала 1.0 мкм.

На первом этапе были определены значения собственного движения, параллакса, а также квадратичный член, включающий в себя вековое перспективное ускорение и орбитальное движение соответствующей компоненты по отношению к принятому нуль-пункту в системе стандартной пластинки. Кроме того, если у опорных звезд имеются заметные собственные движения, то в  $Q$  также входит суммарное собственное движение опорных звезд  $[\Delta D\mu_x], [\Delta D\mu_y]$  ( $\Delta D$  — годовое изменение депенденсов).

Следует отметить, что 61 Cyg наблюдалась только осенью, в достаточно узком временном диапазоне с августа по конец ноября, и прямая задача определения параллакса не ставилась, к тому же, параллакс этой звезды хорошо известен.

Таким образом, параллакс, полученный нами из наблюдений, служил только для контроля, то есть для оценки точности ряда, оценки весов неизвестных, а также для исследования возможных корреляций между неизвестными, в том числе, корреляции с возможным орбитальным движением, вызванным влиянием невидимого спутника.

Таким образом, на первом этапе использовались следующие общие уравнения:



$$\begin{cases} X_A = C_{AX} + \mu_{AX}t + \pi_X P_\alpha + Q_{AX}t^2 \\ Y_A = C_{AY} + \mu_{AY}t + \pi_Y P_\delta + Q_{AY}t^2 \\ X_B = C_{BX} + \mu_{BX}t + \pi_X P_\alpha + Q_{BX}t^2 \\ Y_B = C_{BY} + \mu_{BY}t + \pi_Y P_\delta + Q_{BY}t^2 \end{cases} \quad (1)$$

В этих уравнениях  $X, Y$  — относительные положения компонент А или В, вычисленные по отношению к нуль-пункту стандартной пластинки и ориентированные первоначально по осям  $X, Y$  движения каретки машины «Фантазия», затем в дальнейшем ориентировка была исправлена поворотом осей на  $3.5$  с учетом разности позиционного угла направления  $\mu$  на  $2000.0$ ;

$\mu_X, \mu_Y$  — собственное движение соответствующей компоненты;

$\pi_X, \pi_Y$  — параллакс,

$Q_X, Q_Y$  — квадратичные члены, которые выделяются только на большом интервале наблюдений для достаточно близких звезд; предполагается, что в данном случае их величину можно отделить от собственного движения, и они не коррелируют с другими неизвестными.

Теоретически величины  $Q_X, Q_Y$  являются суммой: 1) орбитального эффекта в движении данной компоненты по отношению к центру масс системы в предположении того, что этот эффект можно представить квадратичной формулой, 2) квадратичного эффекта в движении центра масс системы, зависящего от собственного движения опорных звезд, а также 3) векового перспективного ускорения системы.

Предварительные результаты, полученные по всем 279 пластинкам без отсева, даны в таблице 3. Оценка точности неизвестных производилась по  $E_{0xy}$ , приведённым в таблице 2.

Из таблицы 3 видно, что в связи со специфическими условиями наблюдений вес параллакса недостаточен, однако в среднем по  $X$  и по  $Y$  получены почти одинаковые значения параллакса для обеих компонент, равные  $0.311 \pm 0.015, 0.314 \pm 0.014$  для компоненты А и В соответственно.

**Таблица 3.** Предварительные значения  $\mu, \pi$  и  $Q$  для компонент А и В 61 Cyg.

А X	$C_X$	$\mu_X$	$\pi_X$	$Q_X$
	0.057 16	3.9220 9	0.319 26	0.000260 83
А Y	$C_Y$	$\mu_Y$	$\pi_Y$	$Q_Y$
	-0.246 12	3.5148 6	0.303 16	-0.000030 58
В X	$C_X$	$\mu_X$	$\pi_X$	$Q_X$
	0.106 16	3.8893 10	0.356 28	-0.000115 90
В Y	$C_Y$	$\mu_Y$	$\pi_Y$	$Q_Y$
	-0.222 10	3.3912 5	0.263 12	0.000290 46

Как следует из дальнейших вычислений, параллакс имеет корреляцию с постоянными  $C_X, C_Y$ , в то время как собственное движение является наиболее устойчивым параметром.

В таблице 4 даны выраженные в секундах дуги значения  $C_X$ ,  $\mu_X$ ,  $Q_X$ ,  $C_Y$ ,  $\mu_Y$ ,  $Q_Y$  для компонент А и В, полученные после исключения каталожного значения параллакса из относительных положений А и В, то есть из левых частей формулы (1).

**Таблица 4.** Параметры движения  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $Q_X$ ,  $Q_Y$  для А и В компонент, ошибки измерений стандартной пластинки  $C_X$ ,  $C_Y$  и ошибки единицы веса  $E_{0X}$ ,  $E_{0Y}$  полученные при решении после исключения параллактического смещения.

А  $N = 230$	$C_X$	$\mu_X$	$Q_X$	$E_{0X}$
	0"0185 60	3"9226 3	0"000230 41	0"068
	$C_Y$	$\mu_Y$	$Q_Y$	$E_{0Y}$
	0.0130 55	3.5140 5	0.000006 50	0.075
В  $N = 220$	$C_X$	$\mu_X$	$Q_X$	$E_{0X}$
	0.0281 50	3.8894 4	-0.000069 33	0.055
	$C_Y$	$\mu_Y$	$Q_Y$	$E_{0Y}$
	0.0158 46	3.3901 3	0.000313 30	0.050

Приведенные в таблице 4 величины  $C_X$  и  $C_Y$  зависят только от ошибок измерений стандартной пластинки, в то время как в величинах  $C_X$  и  $C_Y$ , приведенных в таблице 3, присутствует эффект неисключенного параллакса, то есть разность между геоцентрическим и гелиоцентрическим положением объекта на стандартной пластинке.

В связи с тем, что 61 Cyg является близкой к Солнцу звездой, и нам предстояло исследовать невязки по возможности более корректным образом, в параллактические коэффициенты  $P_{\alpha\delta}$  были внесены соответствующие поправки.

Параллактические множители вычислялись по формулам:

$$\begin{cases} P_{\alpha} = -X \sin \alpha + Y \cos \delta \\ P_{\delta} = -X \cos \alpha \sin \delta - Y \sin \alpha \sin \delta + Z \cos \delta \end{cases} \quad (2)$$

где  $X = R \cos \odot$ ,  $Y = R \sin \odot \cos \varepsilon$ ,  $Z = R \sin \odot \sin \varepsilon$  — гелиоцентрические экваториальные прямоугольные координаты Солнца по отношению к Земле, выраженные в астрономических единицах ( $\odot$  — истинная долгота Солнца,  $\varepsilon = 23^{\circ}27'$  — наклон экватора к эклиптике,  $R$  — радиус-вектор земной орбиты).

Из таблиц 3 и 4 видно, что собственное движение остается постоянным,  $C_{XY}$  изменились в связи с тем, что в первом случае нуль-пунктом служило геоцентрическое положение компоненты А на стандартной пластинке, в другом случае нуль-пункт исправлен за параллакс.

Отношение масс в первом приближении было вычислено по значениям  $Q$ , приведенным в таблице 4. Была использована формула:

$$\frac{M_B}{M_A} = -\frac{Q'_A}{Q'_B} \quad (3)$$

Здесь  $M_A$  и  $M_B$  — массы яркой и слабой компонент, а  $Q'_A$ ,  $Q'_B$  — разности квадратичных коэффициентов  $Q$ , получаемых из уравнений (1) для каждой компоненты, и перспективного ускорения, которое можно рассчитать по формуле:

$$Q_p = -1.024 \cdot 10^{-6} \mu\pi V_r, \quad (4)$$

зная собственное движение, параллакс и лучевую скорость  $V_r$  равную для этой звезды  $-64$  км/с, и которое практически одинаково для каждой компоненты 61 Cyg и составляет  $Q_{pX} = 0.000079$  (по  $X$ ) и  $Q_{pY} = 0.000061$  (по  $Y$ ).

Квадратичный эффект, связанный с собственными движениями опорных звезд, и вычисляемый по формулам  $[\Delta D\mu_X]$ ,  $[\Delta D\mu_Y]$  для нашей системы опорных звезд, равен по  $X$  и  $Y$  соответственно  $-0.000003$  и  $-0.000050$ .

Было также сделано предположение о том, что орбитальное движение на данном интервале наблюдений можно считать параболическим.

Определить отношение масс таким образом в нашем случае удалось только по координате  $X$ . Из значений  $Q_X$  для компонент А и В, приведенных в таблице 3, было исключено вековое перспективное ускорение и суммарное собственное движение опорных звезд, и по полученным  $Q'_A$ ,  $Q'_B$ , равным соответственно  $+0.000151$  и  $-0.000148$ , было вычислено отношение массы слабой компоненты к яркой  $M_B/M_A$ , которое оказалось равным  $0.97$ .

Таким образом, предварительная величина  $B$  равна  $0.48$ . Однако мы считаем эту величину не совсем уверенной. Возможно, что орбитальное движение компонент относительно центра тяжести системы недостаточно точно аппроксимируется параболической формулой. Отношение массы слабой компоненты к яркой, полученное таким же приближенным способом в работе [2], равно  $0.99$ , а величина  $B$  равна  $0.50$ .

На следующем этапе из относительных положений компонент помимо параллакса было исключено также и вековое перспективное ускорение, вычисленное по формуле (4).

Далее были решены уравнения вида (5). В качестве коэффициентов при отношении масс  $B$  были выбраны относительные расстояния В–А полученные при обработке 61 Cyg как двойной звезды, которые в проекциях на оси  $X$ ,  $Y$  даны в уравнениях (6) как  $(X_A - X_B)$ ,  $(Y_A - Y_B)$  и которые равны соответственно:  $X_A - X_B = \rho \sin\theta$ ;  $Y_A - Y_B = \rho \cos\theta$ :

$$\begin{cases} X'_{Ai} = C_X + \mu_X(t_i - t_0) - B(X_B - X_A) \\ Y'_{Ai} = C_Y + \mu_Y(t_i - t_0) - B(Y_B - Y_A) \end{cases} \quad (5)$$

В уравнениях (5):

$X'_{Ai}$ ,  $Y'_{Ai}$  — положения компоненты А на  $i$ -ой пластинке относительно её положения на стандартной пластинке, ориентированной на равноденствие 2000.0 (здесь из  $X'_{Ai}$ ,  $Y'_{Ai}$  исключены параллакс и вековое перспективное ускорение);

$C_X$ ,  $C_Y$  — положение центра тяжести системы на момент наблюдений стандартной пластинки;

$\mu_X$ ,  $\mu_Y$  — собственное движение центра тяжести системы;

$B$  — отношение массы слабой компоненты к суммарной массе системы.

Из всех пластинок были отобраны только те, у которых ошибка одного изображения  $\varepsilon_{1XY}$  не превышала  $2.5$  микрон при измерениях с опорными звездами. Как показала практика измерений параллактических пластинок и, в частности, звезды Глизе 623 с имеющимся спутником [6], внутренняя ошибка, превышающая  $2.5$  микрона, как правило, ведет к большим значениям  $O-C$ , которые искажают орбитальное движение звезды, описываемое ею под влиянием спутника, а также значение параллакса. Поэтому подбор пластинок был произведен с учетом следующих условий:

1) точность положений отдельной компоненты согласовывалась с точностью относительных расстояний В–А,

- 2) оставлены те пластинки, которые при различных вариантах и выборках не меняли отношение масс на величину больше, чем  $3\sigma$ , где  $\sigma$  — среднеквадратичная ошибка отношения масс, равная 0.04.

Таким образом, для предварительной оценки удалось использовать попарно положение одиночной звезды и В–А для того же момента на 150 пластинках со средними ошибками около 1.0 микрона для каждой пластинки.

При этом были получены следующие значения (см. таблицу 5).

Следует отметить, что величина ***B***, а также относительное положение центра тяжести, получаются в данной задаче со значительно меньшим весом по сравнению с собственным движением и другими неизвестными, причем вес зависит от соотношения между длительностью ряда наблюдений и периодом и кривизной орбиты.

В таблице 5 во втором и третьем столбцах приведены полученные результаты с использованием относительных положений компоненты А и разностей В–А. Под каждой строчкой с результатами в квадратных скобках приведены значения относительных весов, получаемые при решении систем уравнений по способу наименьших квадратов. Для компоненты А постоянные  $C_{XY}$  с обратным знаком являются положением компоненты А относительно центра тяжести на момент наблюдений стандартной пластинки и на равноденствие 2000.0.

В четвертом и пятом столбцах таблицы 5 приведены результаты из работы [2]. Здесь  $C_{XY}$  являются положением центра масс относительно центра депенденсов опорных звезд на эпоху 1925.0. Остальные величины имеют тот же смысл, что и полученные нами.

**Таблица 5.** Параметры центра тяжести и отношение масс 61 Суг А и В.

Наблюдения	Пулково 150 пластинок		Спрул 72 пластинки	
<i>T</i>	1957–1997 гг.		1872–1939 гг.	
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
<i>C</i> [ " ]	+6.13 ±0.68 [0.003]	–9.86 ±1.35 [0.001]	+404.0 ±0.7 [0.0073]	+172.7 ±0.7 [0.0085]
$\mu$ [ "/год ]	4.1136 ±0.0017 [520.8]	3.2227 ±0.0067 [37.5]	4.1164 ±0.0006 [9500]	3.2100 ±0.0070 [85]
<b><i>B</i></b>	0.37 ±0.04 [0.903]	0.38 ±0.05 [0.527]	0.37 ±0.04 [1.12]	0.38 ±0.04 [1.24]
$E_0$ [ " ]	0.040	0.040	0.090	0.090

Из таблицы 5 также можно видеть, каковы реальные значения относительных весов, получающихся при решении задачи по способу наименьших квадратов.

В данном случае мы имели некоторое преимущество, которое заключалось в большем числе имеющихся пластинок, поэтому мы также имели возможность получить достаточно малое значение ошибки единицы веса и при меньшей протяженности ряда иметь веса неизвестных, сравнимые с [2].

Из таблицы видно, что отношение масс совпадает с полученным ранее по такому же алгоритму отношению масс в работе Ван де Кампа.

Однако отношение масс, получаемое при аппроксимации в первом приближении орбитального движения с помощью параболы, отличается от ***B***, вычисляемого по более строгому алгоритму (5) как в работе [2], так и по нашим наблюдениям.

Кроме того, по пулковскому ряду орбитальное движение по  $Y$  для компоненты А получается менее уверенно, что, возможно, объясняется ошибкой типа уравнения блеска из-за разности звездных величин между яркой звездой и опорными звездами. Следует отметить, что трудности подобного рода отмечены и в работе [1], где использовались пластинки, полученные также без ослабления ярких объектов, причем на разных обсерваториях.

Мы полагаем, что для обработки нашего ряда приемлем более точный алгоритм (5), а отношение масс, равное  $0.38 \pm 0.4$ , является более уверенным значением, чем полученное по приближенным формулам.

С учетом полученной ранее [7] суммы масс компонент 61 Cyg, нами были вычислены значения масс компонент, которые составили  $0.7M_{\odot}$  и  $0.6M_{\odot}$  для А и В соответственно.

Точность, полученная нами, позволяет обнаружить скрытую массу до нескольких сотых  $M_{\odot}$ . Наш анализ данного ряда показал, что предполагаемый спутник может иметь массу не более  $0.01M_{\odot}$ . Для более подробного анализа нами были исследованы невязки, получаемые в результате решения уравнений (1), (5).

На рис.1–4 даны периодограммы, полученные в результате исследования этих невязок.

Рис.1 — периодограмма, построенная по невязкам  $(O-C)_X$  для компоненты А (сплошная кривая) и для В (пунктирная кривая). По оси абсцисс отложена частота  $\omega$ , равная  $1/P$ , где  $P$  — период, по оси ординат — значение ординаты спектра мощности  $P(\omega)$  в относительных единицах. Из приведенного графика видно, что в спектре частот для  $(O-C)_X$ , полученных в движении компоненты А, имеется небольшой пик, соответствующий периоду 6.2 года, тогда как  $P(\omega)$  для компоненты В представляет собой полностью шумовой спектр.

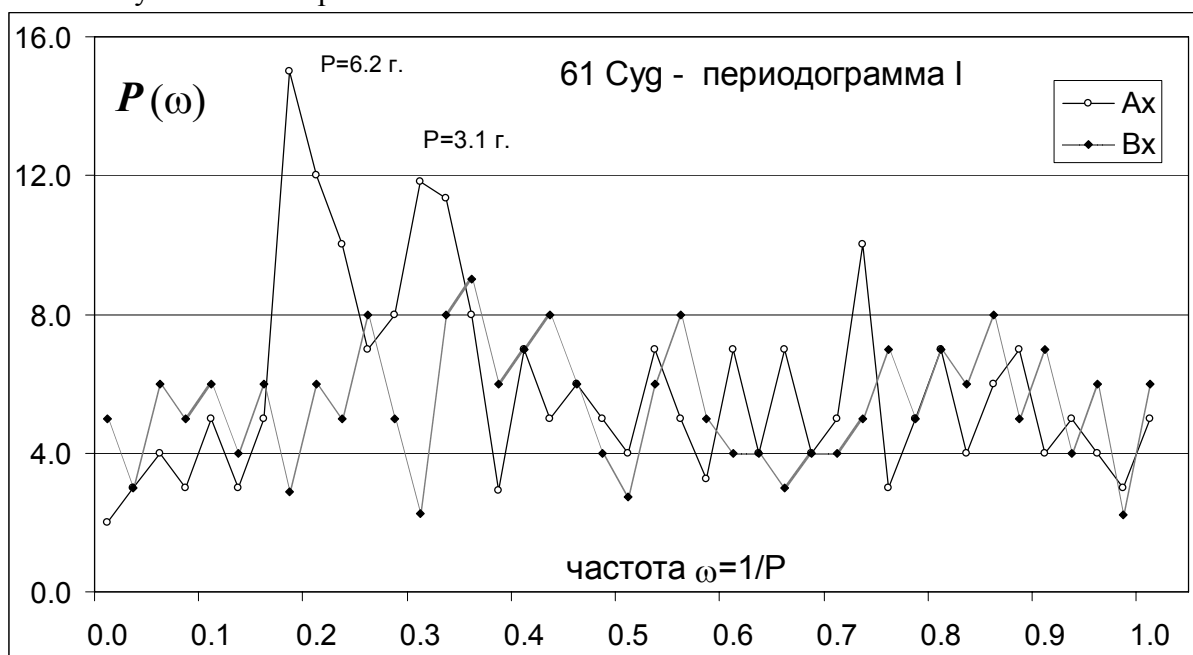


Рис.1. Периодограмма, построенная по невязкам  $(O-C)_X$  для компонент А и В.

На рис.2 приведены периодограммы, отражающие поведение невязок в движении по  $Y$  для компонент А (сплошная кривая) и В (пунктир). Здесь можно отметить почти совпадающие пики, соответствующие периодам 12.0 и 10.8 лет для А и В соответственно. Возможно, что в их проявлении играют роль небольшие периодические изменения масштаба  $M_0$ , отмеченные в работе [4] (см. статью Горшанова в настоящем сборнике),

во всяком случае, они являются общими для компонент А и В и вряд ли могут быть вызваны невидимым спутником.

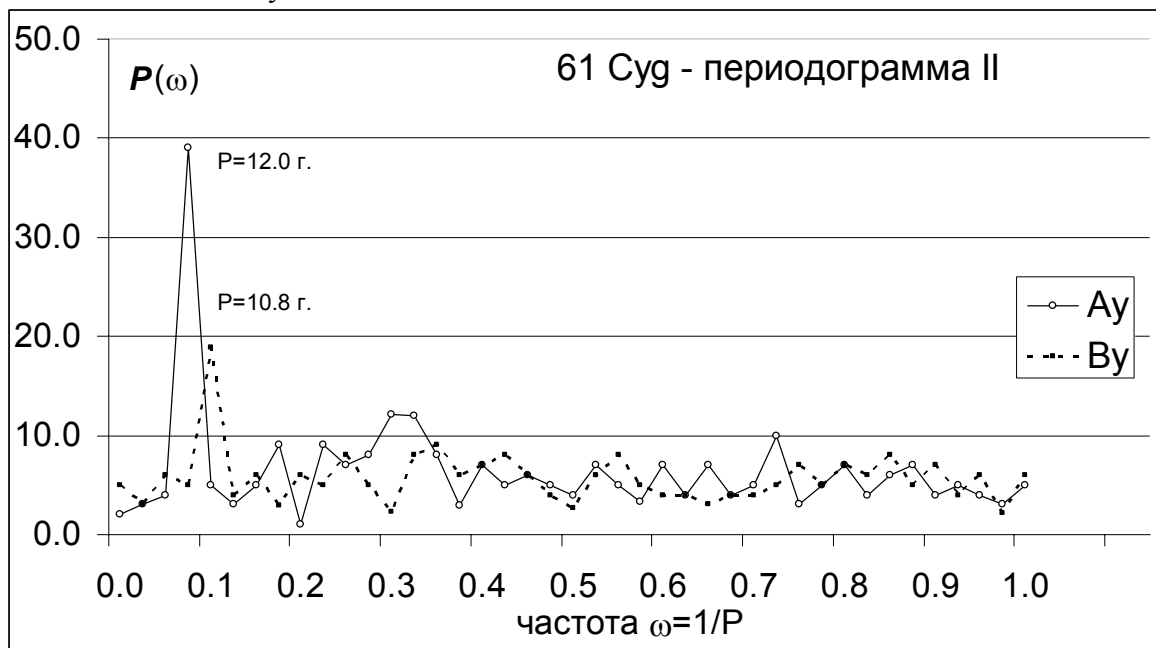


Рис.2. Периодограмма, построенная по невязкам  $(O-C)_Y$  для компонент А и В.

На следующих двух графиках дано сравнение периодограмм рис.1 и 2 с контрольной периодограммой построенной по невязкам, полученным в движении одиночной звезды Глизе 623 (АС  $48^{\circ}1595/1589$ ) с имеющимся темным спутником с массой  $0.09M_{\odot}$ . При этом точность наблюдений этой звезды сравнима с точностью наблюдений 61 Cyg. Из сравнения видно, что наши периоды 6.2 года по  $A_X$  и 12.0 и 10.8 года проявляются очень неуверенно и также сравнимы с шумом. Хотя период 6.2 года близок к периоду 6.0 года, полученному в свое время А.Н. Дейчем по части имеющегося у нас ряда [8,9], и периоду 6.5 года, полученному в нашей работе [1].

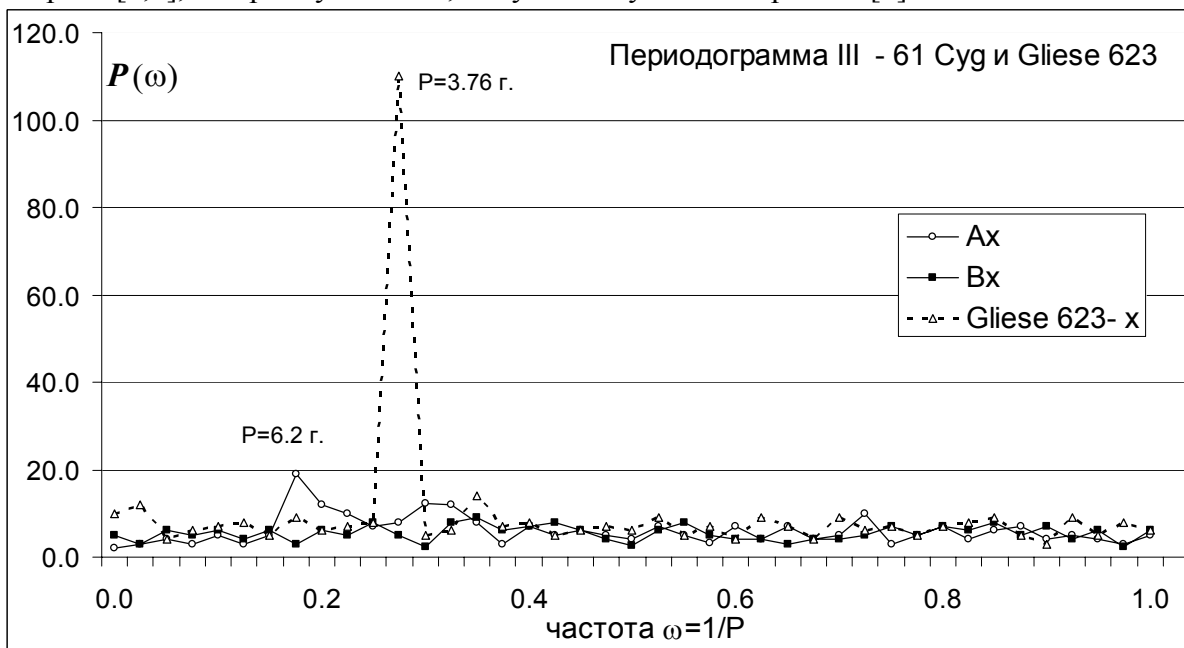
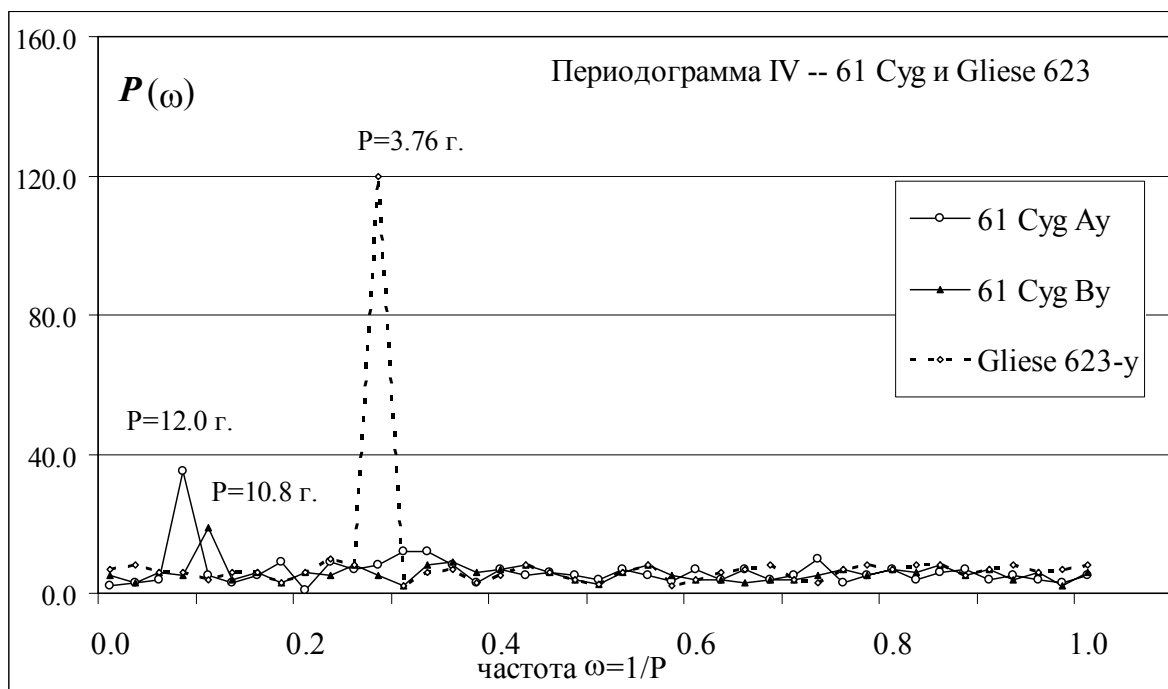


Рис.3. Сравнение периодограммы 61 Cyg (рис.1) с контрольной периодограммой для одиночной звезды Глизе 623.



**Рис.4.** Сравнение периодограммы 61 Cyg (рис. 2) с контрольной периодограммой для одиночной звезды Глизе 623.

Таким образом, можно сказать, что наше исследование невязок и полученное отношение масс не показало присутствия спутника или скрытой массы в пределах  $0.10\text{--}0.01M_{\odot}$ . Периоды 11–12 лет можно объяснить астроклиматическими причинами или очень слабыми периодическим изменениями масштаба. Остается необъясненным период 6.2–6.5 лет, который присутствует как во взаимных расстояниях, так и в движении компоненты А, хотя в последнем случае также на уровне ошибок.

В дальнейшем предполагается произвести дополнительное исследование взаимных расстояний В–А с привлечением нового наблюдательного материала 1998–2004 гг., измерения которого в настоящее время также возможно провести с помощью машины «Фантазия».

Полученные нами результаты не противоречат результатам, полученным в свое время А.Н. Дейчем [8,9], так как выявленные им в свое время периоды подтвердились в ряде (I) и также в исследуемом ряде (II), однако они оказались менее уверенными, а их оценка более сложной и не предполагающей однозначного объяснения. Если здесь все же имеются реальные возмущения, то возможно влияние нескольких спутников, в том числе с нестационарными орбитами.

В нашей работе [1] отмечалось, что звезда 61 Лебедя по своим параметрам близка к звездам, у которых, согласно современным исследованиям, теоретически возможно существование планетоподобных спутников, имеющих внешние и внутренние орбиты, то есть вращающихся или вокруг одной компоненты (S-орбиты) или вокруг системы в целом (P-орбиты) [10,11]. В настоящее время по нашей просьбе д-р Д.Бенест рассчитал возможность существования и границы зоны стабильных планетных орбит типа S для компонент А и В 61 Cyg, причем с конкретными значениями периодов от 6 до 7 лет. Его исследование подтвердило, что при достаточно большом диапазоне начальной угловой скорости компонент относительно центра тяжести системы возможно существование стабильных планетных орбит с периодами 6–7 лет [12]. Под стабильностью здесь подразумевается существование таких орбит за время, превышающее орбитальный период системы самой двойной звезды, по крайней мере, на два порядка.

## Выводы

- 1) Основным результатом нашей работы является вывод о том, что наш наблюдательный ряд оказался достаточно протяженным и точным для предварительного вычисления отношения масс между компонентами и получения положения и собственного движения центра масс двойной системы 61 Cyg (ADS 14636). В результате исследования движения отдельных компонент и оценки их масс можно сделать вывод об отсутствии у этой звезды спутников с субзвездной массой  $0.01-0.08M_{\odot}$ .
- 2) Получен период 6.2 года в движении компоненты А, однако с очень слабой относительной спектральной мощностью  $P(\omega)$ . Все же, если учесть то обстоятельство, что близкие периоды были выявлены в относительных расстояниях В–А [1], а также теоретическую возможность планетных спутников с массами  $<0.01M_{\odot}$ , можно полагать, что вопрос о наличии или отсутствии планетного спутника у 61 Cyg пока окончательно не решен. По-видимому, к этой проблеме в дальнейшем можно подходить постепенно: с увеличением протяженности наблюдательного ряда исследовать влияние спутников с меньшими массами в конкретных диапазонах масс.
- 4) В связи с вышесказанным мы предполагаем дальнейшие наблюдения этой звезды — фотографические и с ПЗС-матрицей.
- 5) Возможности имеющихся наблюдений еще не исчерпаны, мы надеемся на возобновление работы машины «Фантазия» и измерения пластинок 1999–2004 гг.
- 6) В любом случае мы предполагаем продолжить нашу работу (см. [13,14]), по исследованию различных вариантов моделей фотоцентрической орбиты, описываемой компонентой 61 Cyg под влиянием возможного спутника, и вычисления эфемериды, а также уточнить относительную орбиту двойной звезды [9], которая определялась в Пулковке, на более коротком интервале наблюдений.

## Литература

1. **Горшанов Д.Л., Шахт Н.А., Поляков Е.В., Киселев А.А., Канаев И.И.**, «Предварительные результаты обработки пулковского ряда фотографических наблюдений двойной звезды 61 Лебедя, измеренного на автоматической машине «Фантазия», 2002, Изв. ГАО, № 216, с.100–113.
2. **Van de Kamp P.** «A determination of the mass ratio and parallax of 61 Cygni», 1942, AJ, v. XLIX, No 1126, p.33–38.
3. **Van de Kamp P.** «Stellar paths», 1981, Astroph. Space Science Library, v. 85, p. 1–155.
4. **Горшанов Д.Л.** «Исследование изменения масштаба 26 рефрактора Пулковской обсерватории в период с 1958 по 1997 гг.» (настоящий сборник).
5. **Киселёв А.А.** «Опыт определения тригонометрических параллаксов звезд по наблюдениям в часовых углах», 1982, Изв. ГАО, № 199, с.3–12.
6. **Shakht N.A.** «A study of the motion of the star Gliese 623 with a low mass dark companion on the basis of observation at Pulkovo», 1997, Astr. Astroph. Trans., v.13, p.327–337.
7. **Kisselev A.A., Kiyeva O.V., Romanenko L.G.** 1997, «Visual Double Stars Orbits Obtained by Apparent Motion Parameters Method at Pulkovo» Astroph.Space Science Library, v. 223, Proc. of Workshop «Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks».(Santiago de Compostella Spain) Kluwer Acad. Publ., p.377–388.
8. **Дейч А.Н., Орлова О.Н.** «О невидимых спутниках звезды 61 Лебедя», 1977, АЖ т.54, вып.2, с.327–339.
9. **Дейч А.Н.** «Новые данные о невидимых спутниках звезды 61 Лебедя», 1978, Письма в АЖ, т.4, № 2, с.95–97.



10. **Benest D.** «Stable planetary orbit in binary systems». Astroph.Space Science Library v.223, Proc. of Workshop «Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks». (Santiago de Compostella Spain) Kluwer Acad. Publ., 1997, p.233–240.
11. **Benest D.** «Planetary orbits in double stars: Influence of the binary's orbital eccentricity» Proc. Coll. 197 IAU «Dynamics of Populations of Planetary Systems», 2004, Belgrade, (в печати).
12. **Benest D.**, 2004, частное сообщение.
13. **Gorshanov D.L., Shakht N.A., Polyakov E.V., Kisselev A.A.** «A Phenomenon of 61 Cygni: some hypothesis of its satellites» Proc. Conf. AGAVA 2002, St.-Petersburg, ASP Conf. Series, v.316, p.158–160.
14. **Gorshanov D.L., Shakht N.A.**, «Observations of 61 Cygni at Pulkovo with 65 cm refractor» Proc. Coll. 197 IAU «Dynamics of Populations of Planetary Systems», 2004, Belgrade, (в печати).

## A STUDY OF THE MOTION OF 61 CYGNI A AND 61 CYGNI B WITH RESPECT TO THE REFERENCE STARS

**Gorshanov D.L., Shakht N.A., Kisselev A.A., Polyakov E.V.**

### *Summary*

*The relative positions B–A of 61 Cyg have been made by means of the photographic observations in 1958–1997 on 26" refractor [1]. Now the motion of each component has been investigated with respect to reference stars. The kinematical parameters of A, B and center of the masses have been obtained.*

*The preliminary estimation of the components masses have been made on the basis of the total mass equaled  $1.3M_{\odot}$  and on the mass ratio  $B = M_A / (M_A + M_B)$  obtained with the present data and equaled  $0.38 \pm 0.04$ . This estimation is agree with their spectral classes and does not show any considerable hidden mass more than  $0.01M_{\odot}$ .*

*Nevertheless the possibility of the presence of satellites with mass less than  $0.01M_{\odot}$  still remains.*

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ  
СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА,  
ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320 В 1999-2004 гг.**

**Девяткин А.В., Алешкина Е.Ю., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Бехтева А.С.,  
Батурина Г.Д., Корнилов Э.В., Сидоров М.Ю.**

*Приводятся результаты астрометрических наблюдений спутников Юпитера Гималии, Эллары и Пасифе и спутников Сатурна Титана, Гипериона, Япета и Фебы. Получено 1011 положение в системе каталогов USNO-A2.0 и USNO-B1.0. Обработка наблюдений выполнена с использованием программной системы АПЕКС с учетом хроматической рефракции. Средняя точность наблюдений по прямому восхождению и склонению составляет 0".3.*

С 1998 г. на зеркальном астрографе ЗА-320 ведутся регулярные астрометрические наблюдения избранных спутников Юпитера и Сатурна (Бекашев и др., 1998; Девяткин, 2000). Наблюдения на ЗА-320 с 2001 г. ведутся в автоматическом режиме (Канаев и др., 2002; Девяткин и др., 2004). Обработка ПЗС-наблюдений была выполнена при помощи программной системы АПЕКС (Девяткин, 2000). С ее помощью были получены величины "О". Редукция наблюдений производилась методом 8 постоянных. Обработка наблюдений, полученных до октября 2003 г., была проведена в системе каталога USNO-A2.0, а позднее – в системе каталога USNO-B1.0. Для учета хроматической рефракции были приняты следующие значения показателя цвета В–V: Гималия - 0.67, Элара - 0.69, Пасифе - 0.63, Титан - 1.28, Гипериона - 0.78, Япет – 0.72, Феба - 0.70. Значения "С" были вычислены по эфемеридам, полученным через Интернет ([telnet://ssd.jpl.nasa.gov](http://ssd.jpl.nasa.gov)).

В результате было получено 1011 положений спутников Юпитера и Сатурна. В таблицах 1-7 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, Корнилов — Kor, Куприянов — Kou, Сидоров — Sid, Бехтева - Bek., Саловатова – Sal, Лемесева – Lem, Михайлова – Mik, Григорьева – Gri). В таблице 8 приведены средние значения разностей (O–C) и оценки точности наблюдений (среднеквадратические ошибки), вычисленные по значениям (O–C).

**Таблица 1. Гималия (J6).**  
**Результаты наблюдений 2000.01–2004.05**

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2000 01 20.690255	01 42 31.753	+09 52 28.37	-0.43	-0.44	Dev
2000 01 23.736339	01 43 36.053	+09 59 34.74	0.23	0.26	Dev
2000 01 25.657420	01 44 19.565	+10 04 13.54	0.52	-0.34	Dev
2000 01 31.676480	01 46 50.016	+10 19 42.41	0.02	0.22	Gor
2000 02 01.778177	01 47 19.792	+10 22 39.96	-0.51	-0.46	Dev
2000 09 18.065884	04 41 06.531	+21 44 30.02	0.19	-0.06	Kou
2000 09 19.060256	04 41 19.108	+21 45 13.56	-0.04	0.30	Gor
2000 09 20.967252	04 41 40.770	+21 46 29.05	-0.15	0.27	Sid
2000 09 23.004240	04 42 00.210	+21 47 39.28	-0.11	0.19	Sid
2000 09 24.038507	04 42 08.596	+21 48 10.99	-0.23	0.48	Dev
2000 09 25.980425	04 42 21.681	+21 49 02.36	-0.17	0.51	Sid
2000 09 29.046865	04 42 34.988	+21 50 02.78	-0.09	0.46	Dev
2000 10 02.064960	04 42 39.292	+21 50 37.40	0.06	0.52	Kou
2000 10 03.000933	04 42 38.865	+21 50 43.06	0.03	0.50	Gor
2000 10 06.090056	04 42 31.307	+21 50 45.05	0.09	0.48	Dev
2000 10 17.971850	04 40 36.556	+21 46 48.90	-0.07	0.37	Sid
2000 10 18.996373	04 40 20.355	+21 46 10.34	-0.02	0.27	Kor
2000 10 20.018458	04 40 03.219	+21 45 29.02	0.02	0.37	Dev
2000 11 17.879960	04 26 16.986	+21 07 09.78	-0.18	0.38	Dev
2000 11 25.977105	04 21 05.506	+20 51 01.24	-0.06	0.86	Sid
2000 12 27.706214	04 02 02.339	+19 44 26.60	-0.50	-0.39	Sid
2001 01 16.908248	03 55 25.202	+19 17 53.13	-0.13	0.29	Sid
2001 01 22.919070	03 54 39.398	+19 14 24.25	0.03	0.50	Gor
2001 01 23.784537	03 54 35.690	+19 14 05.32	-0.44	0.34	Kor
2001 02 22.815749	03 59 40.949	+19 32 02.33	-0.11	0.68	Sid
2001 03 07.801241	04 05 51.187	+19 55 19.03	0.43	0.04	Sid
2001 3 8.793675	04 06 24.581	+19 57 24.07	-0.13	-0.02	Dev
2001 3 9.830128	04 07 00.192	+19 59 37.67	-0.42	0.61	Sid
2001 3 20.820188	04 14 01.564	+20 25 21.33	0.03	0.48	Sid
2001 3 24.812905	04 16 52.939	+20 35 30.16	-0.31	0.33	Sid
2001 3 25.835950	04 17 38.304	+20 38 08.51	-0.28	-0.37	Kou
2001 3 29.753845	04 20 37.242	+20 48 27.55	-0.02	0.34	Dev
2001 9 26.030413	06 58 48.918	+22 18 30.11	-0.70	0.71	Sid
2001 10 1.047884	07 00 43.082	+22 13 43.98	0.32	0.31	Kou
2001 10 22.051331	07 05 15.141	+22 01 11.63	0.24	0.04	Sid
2001 10 23.975084	07 05 22.766	+22 00 48.19	-0.10	0.49	Dev
2001 10 24.911997	07 05 25.401	+22 00 39.55	-0.42	0.35	Sid
2001 11 13.080711	07 03 52.053	+22 05 45.75	-0.58	-0.30	Sid
2001 11 20.994122	07 01 57.199	+22 12 19.68	0.11	0.05	Kor
2001 11 21.968971	07 01 40.347	+22 13 18.60	0.14	0.44	Gor
2001 11 30.956702	06 58 40.385	+22 23 48.93	0.07	0.58	Gri
2001 12 12.972279	06 53 44.354	+22 41 06.15	0.05	0.36	Sid
2001 12 18.042425	06 51 26.266	+22 49 00.78	-0.14	0.17	Gor
2001 12 20.942622	06 50 05.235	+22 53 35.65	-0.20	0.24	Dev
2001 12 22.968655	06 49 08.022	+22 56 47.71	0.34	0.33	Sid
2001 12 23.978221	06 48 39.369	+22 58 23.08	0.38	0.39	Kou
2002 2 14.986804	06 29 06.870	+23 52 08.85	0.30	0.30	Dev
2002 2 17.823402	06 28 44.502	+23 52 48.19	0.22	0.24	Dev
2002 3 5.829321	06 28 26.677	+23 52 38.64	0.29	0.43	Kor
2002 3 8.813393	06 28 43.982	+23 51 56.83	0.08	0.08	Dev
2002 3 12.792683	06 29 17.169	+23 50 43.94	0.31	0.11	Kor
2002 3 14.794513	06 29 38.179	+23 50 00.03	0.30	0.23	Dev
2002 3 15.881913	06 29 50.751	+23 49 34.23	0.02	0.49	Sid
2002 3 19.800119	06 30 43.170	+23 47 49.27	0.27	0.25	Kor
2002 3 24.851567	06 32 06.304	+23 45 08.19	0.30	0.33	Dev
2002 3 24.851567	06 32 06.304	+23 45 07.72	0.30	-0.13	Dev

Таблица 1 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2002 3 30.799670	06 34 05.764	+23 41 22.96	0.08	0.61	Sid
2002 4 2.831438	06 35 15.217	+23 39 12.98	0.14	0.37	Dev
2002 4 3.884692	06 35 40.669	+23 38 25.43	0.24	0.17	Sid
2002 4 4.837564	06 36 04.275	+23 37 41.49	0.26	-0.08	Dev
2002 4 7.828708	06 37 21.864	+23 35 18.19	0.31	0.17	Kou
2002 4 8.826472	06 37 48.870	+23 34 28.64	-0.08	0.61	Gor
2002 4 10.789232	06 38 43.754	+23 32 47.24	0.31	0.41	Kor
2002 4 11.795435	06 39 12.726	+23 31 53.88	0.57	0.53	Dev
2002 4 12.813347	06 39 42.604	+23 30 58.71	0.79	0.45	Kor
2002 4 22.833738	06 45 05.429	+23 20 59.52	0.27	0.54	Gor
2002 4 25.801327	06 46 50.395	+23 17 42.20	0.13	0.24	Dev
2002 5 2.833540	06 51 14.464	+23 09 19.40	0.01	-0.26	Dev
2002 11 30.060420	09 26 25.296	+16 07 33.62	0.34	0.32	Sid
2002 12 1.047281	09 26 31.535	+16 06 58.94	0.12	0.40	Dev
2002 12 2.042872	09 26 37.020	+16 06 27.11	0.51	0.49	Sid
2002 12 17.048450	09 26 14.320	+16 05 22.17	0.18	0.72	Gor
2002 12 8.037878	09 26 51.657	+16 04 26.94	-0.01	0.50	Kou
2002 12 11.052906	09 26 47.125	+16 04 13.50	0.13	0.35	Kor
2002 12 12.924534	09 26 40.328	+16 04 21.37	0.17	0.55	Dev
2002 12 23.115322	09 25 09.017	+16 08 38.57	0.31	0.40	Kou
2002 12 24.985492	09 24 42.481	+16 10 04.70	-0.04	0.47	Kor
2002 12 27.029128	09 24 10.015	+16 11 52.08	-0.20	0.18	Dev
2002 12 31.040622	09 22 56.180	+16 16 03.81	0.56	0.65	Gor
2003 1 7.073122	09 20 15.583	+16 25 24.60	0.31	0.41	Gor
2003 1 9.949137	09 18 59.421	+16 29 54.26	0.42	0.30	Sid
2003 1 10.963064	09 18 31.197	+16 31 34.69	0.58	0.56	Sid
2003 1 12.878547	09 17 36.049	+16 34 50.80	0.11	0.65	Kou
2003 1 16.975429	09 15 30.545	+16 42 17.52	0.17	0.47	Dev
2003 1 20.044539	09 13 50.450	+16 48 14.03	-0.03	0.44	Kou
2003 2 3.932042	09 04 53.465	+17 20 00.58	0.44	0.32	Gor
2003 2 4.897431	09 04 16.964	+17 22 10.00	0.44	0.60	Dev
2003 2 14.861927	08 58 01.426	+17 44 14.42	-0.10	0.10	Sid
2003 3 2.894403	08 48 54.645	+18 16 47.15	0.11	0.70	Dev
2003 3 3.850503	08 48 26.186	+18 18 31.63	-0.19	0.63	Gor
2003 3 4.855789	08 47 56.907	+18 20 19.91	-0.11	0.86	Dev
2003 3 5.952530	08 47 25.701	+18 22 15.35	-0.14	0.69	Lem, Mik
2003 3 6.941584	08 46 58.339	+18 23 57.48	0.14	0.35	Sid
2003 3 8.955441	08 46 04.724	+18 27 20.14	-0.50	0.52	Dev
2003 3 9.866815	08 45 41.543	+18 28 49.60	-0.11	0.95	Dev
2003 3 20.920445	08 41 53.652	+18 44 23.64	0.50	0.20	Sid
2003 3 21.866534	08 41 39.054	+18 45 30.89	0.09	0.45	Sid
2003 3 25.926620	08 40 45.815	+18 49 53.42	0.28	0.26	Dev
2003 3 28.914140	08 40 16.520	+18 52 40.68	0.11	0.49	Sid
2003 4 1.866656	08 39 50.937	+18 55 46.03	0.27	0.53	Dev
2003 4 2.860104	08 39 46.888	+18 56 26.08	0.38	0.56	Dev
2003 3 26.906669	08 40 35.301	+18 50 51.16	0.52	0.71	Lem, Mik
2003 3 27.792152	08 40 26.556	+18 51 40.89	-0.10	0.68	Sid
2003 3 29.866889	08 40 08.971	+18 53 29.44	-0.04	0.78	Lem, Mik
2003 3 30.836514	08 40 02.226	+18 54 16.15	0.34	0.65	Kou
2003 4 8.876209	08 39 42.683	+18 59 29.74	0.07	0.24	Dev
2003 4 10.870512	08 39 48.959	+19 00 08.45	-0.16	0.62	Sid
2003 4 11.798640	08 39 53.211	+19 00 22.33	0.04	0.43	Sid
2003 4 12.868673	08 39 59.090	+19 00 35.39	0.50	0.62	Gor
2003 4 15.805183	08 40 20.662	+19 00 53.67	0.02	0.58	Dev
2003 4 19.863228	08 41 03.446	+19 00 36.33	0.37	0.54	Kou
2003 4 20.823065	08 41 15.726	+19 00 24.87	0.31	0.38	Dev

Таблица 1 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2003 4 21.853383	08 41 29.751	+19 00 09.39	-0.29	0.37	Gor
2003 4 23.898623	08 42 00.415	+18 59 28.81	-0.03	0.19	Gor
2003 4 24.853301	08 42 15.986	+18 59 05.75	0.22	0.37	Sid
2003 4 25.863841	08 42 33.215	+18 58 37.75	-0.52	0.21	Sid
2003 4 26.869854	08 42 51.353	+18 58 07.13	0.53	0.57	Dev
2003 4 27.839886	08 43 09.539	+18 57 34.23	0.24	0.54	Kou
2003 5 9.861647	08 47 55.774	+18 46 31.56	-0.09	0.14	Sid
2003 5 11.860776	08 48 53.468	+18 43 55.12	0.42	-0.09	Kou
2003 5 12.851809	08 49 22.965	+18 42 32.99	-0.39	0.07	Gor
2003 10 30.161784	10 59 17.531	+07 11 48.59	0.76	-0.38	Sid
2004 01 4.165562	11 18 14.671	+05 45 55.82	0.50	-0.37	Gor
2004 01 24.133798	11 15 51.666	+06 22 30.38	-0.22	0.13	Bek
2004 02 10.893896	11 10 59.712	+07 09 02.92	-0.46	0.10	Sid
2004 02 12.962783	11 10 17.830	+07 14 53.58	0.22	0.16	Bek
2004 03 4.983379	11 02 19.973	+08 13 31.64	0.20	0.01	Dev
2004 03 10.059369	11 00 20.068	+08 26 22.21	-0.07	0.01	Sid
2004 03 12.049342	10 59 33.624	+08 31 09.86	-0.24	0.15	Dev
2004 03 13.054737	10 59 10.367	+08 33 31.53	0.10	0.09	Dev
2004 03 14.086539	10 58 46.621	+08 35 54.54	0.14	0.19	Gor
2004 03 19.790157	10 56 38.980	+08 48 14.12	-0.08	-0.04	Bek
2004 03 28.784986	10 53 35.099	+09 04 20.83	0.14	0.04	Kou
2004 03 29.816666	10 53 15.760	+09 05 54.68	0.22	0.41	Ale
2004 03 30.830312	10 52 57.135	+09 07 22.59	-0.20	0.10	Sid
2004 04 1.916901	10 52 20.161	+09 10 12.56	0.25	0.12	Dev
2004 04 3.975340	10 51 45.444	+09 12 44.08	0.01	-0.35	Gor
2004 04 4.778403	10 51 32.443	+09 13 39.19	-0.64	-0.42	Kou
2004 04 5.765663	10 51 16.843	+09 14 43.99	-0.27	-0.06	Ale
2004 04 6.759666	10 51 01.567	+09 15 45.18	-0.10	-0.08	Sid
2004 04 7.796504	10 50 46.096	+09 16 45.49	-0.12	0.33	Sid
2004 04 8.783947	10 50 31.840	+09 17 38.65	-0.30	0.27	Kou
2004 04 9.780629	10 50 17.955	+09 18 28.71	0.06	0.38	Bek
2004 04 10.963250	10 50 02.019	+09 19 23.25	0.14	0.48	Dev
2004 04 13.779383	10 49 27.096	+09 21 11.03	0.12	0.32	Sid
2004 04 15.832190	10 49 04.193	+09 22 10.49	0.60	0.46	Ale
2004 04 16.787266	10 48 54.292	+09 22 32.31	0.32	0.27	Bek
2004 04 16.796772	10 48 54.181	+09 22 32.70	0.15	0.46	Bek
2004 04 17.806565	10 48 44.238	+09 22 52.09	-0.18	0.56	Gor
2004 04 18.812746	10 48 34.920	+09 23 07.02	0.04	0.18	Kou
2004 04 19.841521	10 48 25.949	+09 23 18.29	0.16	-0.08	Ale
2004 04 22.838190	10 48 03.221	+09 23 28.28	0.16	0.23	Dev
2004 04 22.848015	10 48 03.157	+09 23 28.30	0.24	0.28	Dev
2004 04 23.910160	10 47 56.305	+09 23 23.17	0.21	0.21	Bek
2004 04 24.862738	10 47 50.739	+09 23 14.92	0.05	0.18	Gor
2004 04 25.845331	10 47 45.548	+09 23 02.61	0.12	0.07	Kou
2004 04 25.849859	10 47 45.533	+09 23 02.72	0.25	0.24	Kou
2004 04 26.843708	10 47 40.834	+09 22 46.50	0.11	0.31	Ale
2004 04 26.848305	10 47 40.834	+09 22 46.34	0.43	0.23	Ale
2004 05 7.865621	10 47 27.239	+09 15 35.29	0.04	0.19	Dev
2004 05 8.882891	10 47 29.508	+09 14 32.49	-0.32	-0.31	Kou
2004 05 9.927648	10 47 32.546	+09 13 25.16	0.77	0.27	Dev
2004 05 12.846148	10 47 44.197	+09 09 55.31	0.42	0.20	Sid
2004 05 13.870917	10 47 49.433	+09 08 34.59	0.11	0.26	Dev
2004 05 14.869346	10 47 55.122	+09 07 12.78	-0.04	0.58	Bek
2004 05 16.883653	10 48 08.385	+09 04 16.61	0.32	0.43	Kou
2004 05 17.916807	10 48 16.015	+09 02 40.56	-0.35	0.03	Ale
2004 05 20.882256	10 48 41.479	+08 57 47.11	0.34	0.63	Dev

Таблица 1 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 05 21.895300	10 48 51.223	+08 55 59.24	-0.55	-0.21	Bek
2004 05 22.910005	10 49 01.676	+08 54 08.65	0.45	-0.30	Gor
2003 10 30.161784	10 59 17.531	+07 11 48.59	0.76	-0.38	Sid
2004 01 4.165562	11 18 14.671	+05 45 55.82	0.50	-0.37	Gor
2004 01 24.133798	11 15 51.666	+06 22 30.38	-0.22	0.13	Bek
2004 02 10.893896	11 10 59.712	+07 09 02.92	-0.46	0.10	Sid
2004 02 12.962783	11 10 17.830	+07 14 53.58	0.22	0.16	Bek
2004 03 4.983379	11 02 19.973	+08 13 31.64	0.20	0.01	Dev
2004 03 10.059369	11 00 20.068	+08 26 22.21	-0.07	0.01	Sid
2004 03 12.049342	10 59 33.624	+08 31 09.86	-0.24	0.15	Dev
2004 03 13.054737	10 59 10.367	+08 33 31.53	0.10	0.09	Dev
2004 03 14.086539	10 58 46.621	+08 35 54.54	0.14	0.19	Gor
2004 03 19.790157	10 56 38.980	+08 48 14.12	-0.08	-0.04	Bek
2004 03 28.784986	10 53 35.099	+09 04 20.83	0.14	0.04	Kou
2004 03 29.816666	10 53 15.760	+09 05 54.68	0.22	0.41	Ale
2004 03 30.830312	10 52 57.135	+09 07 22.59	-0.20	0.10	Sid
2004 04 1.916901	10 52 20.161	+09 10 12.56	0.25	0.12	Dev
2004 04 3.975340	10 51 45.444	+09 12 44.08	0.01	-0.35	Gor
2004 04 4.778403	10 51 32.443	+09 13 39.19	-0.64	-0.42	Kou
2004 04 5.765663	10 51 16.843	+09 14 43.99	-0.27	-0.06	Ale
2004 04 6.759666	10 51 01.567	+09 15 45.18	-0.10	-0.08	Sid
2004 04 7.796504	10 50 46.096	+09 16 45.49	-0.12	0.33	Sid
2004 04 8.783947	10 50 31.840	+09 17 38.65	-0.30	0.27	Kou
2004 04 9.780629	10 50 17.955	+09 18 28.71	0.06	0.38	Bek
2004 04 10.963250	10 50 02.019	+09 19 23.25	0.14	0.48	Dev
2004 04 13.779383	10 49 27.096	+09 21 11.03	0.12	0.32	Sid
2004 04 15.832190	10 49 04.193	+09 22 10.49	0.60	0.46	Ale
2004 04 16.787266	10 48 54.292	+09 22 32.31	0.32	0.27	Bek
2004 04 16.796772	10 48 54.181	+09 22 32.70	0.15	0.46	Bek
2004 04 17.806565	10 48 44.238	+09 22 52.09	-0.18	0.56	Gor
2004 04 18.812746	10 48 34.920	+09 23 07.02	0.04	0.18	Kou
2004 04 19.841521	10 48 25.949	+09 23 18.29	0.16	-0.08	Ale
2004 04 22.838190	10 48 03.221	+09 23 28.28	0.16	0.23	Dev
2004 04 22.848015	10 48 03.157	+09 23 28.30	0.24	0.28	Dev
2004 04 23.910160	10 47 56.305	+09 23 23.17	0.21	0.21	Bek
2004 04 24.862738	10 47 50.739	+09 23 14.92	0.05	0.18	Gor
2004 04 25.845331	10 47 45.548	+09 23 02.61	0.12	0.07	Kou
2004 04 25.849859	10 47 45.533	+09 23 02.72	0.25	0.24	Kou
2004 04 26.843708	10 47 40.834	+09 22 46.50	0.11	0.31	Ale
2004 04 26.848305	10 47 40.834	+09 22 46.34	0.43	0.23	Ale
2004 05 7.865621	10 47 27.239	+09 15 35.29	0.04	0.19	Dev
2004 05 8.882891	10 47 29.508	+09 14 32.49	-0.32	-0.31	Kou
2004 05 9.927648	10 47 32.546	+09 13 25.16	0.77	0.27	Dev
2004 05 12.846148	10 47 44.197	+09 09 55.31	0.42	0.20	Sid
2004 05 13.870917	10 47 49.433	+09 08 34.59	0.11	0.26	Dev
2004 05 14.869346	10 47 55.122	+09 07 12.78	-0.04	0.58	Bek
2004 05 16.883653	10 48 08.385	+09 04 16.61	0.32	0.43	Kou
2004 05 17.916807	10 48 16.015	+09 02 40.56	-0.35	0.03	Ale
2004 05 20.882256	10 48 41.479	+08 57 47.11	0.34	0.63	Dev
2004 05 21.895300	10 48 51.223	+08 55 59.24	-0.55	-0.21	Bek
2004 05 22.910005	10 49 01.676	+08 54 08.65	0.45	-0.30	Gor

**Таблица 2. Элара (J7).**  
Результаты наблюдений 2000.02–2004.05

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2000 2 1.752668	01 43 04.422	+09 30 10.88	0.27	0.36	Dev
2000 9 24.021956	04 39 35.238	+21 32 11.11	-0.23	0.21	Dev
2000 9 29.055518	04 39 14.425	+21 28 30.42	0.83	0.53	Dev
2000 10 2.081777	04 38 50.596	+21 25 38.02	0.25	0.88	Kou
2000 10 20.026308	04 33 54.907	+21 00 08.63	0.31	0.25	Dev
2000 11 17.887969	04 19 40.772	+20 05 02.01	-0.62	0.36	Dev
2000 11 25.985986	04 15 11.220	+19 50 11.28	-0.11	0.03	Sid
2000 11 27.915305	04 14 07.931	+19 46 50.41	0.40	-0.28	Gor
2000 12 26.791987	04 01 03.303	+19 11 43.15	-0.02	0.73	Kor
2000 12 27.719002	04 00 45.800	+19 11 10.07	-0.30	0.54	Sid
2000 12 28.704145	04 00 27.867	+19 10 37.59	-0.19	0.16	Sid
2000 12 28.725737	04 00 27.491	+19 10 37.03	0.06	0.24	Sid
2001 1 16.898254	03 57 05.284	+19 09 53.83	0.16	0.46	Sid
2001 2 25.805429	04 05 31.447	+20 01 39.05	-0.24	0.60	Sid
2001 3 20.801227	04 18 31.044	+20 51 45.71	-0.23	-0.35	Sid
2001 3 27.829632	04 23 23.767	+21 08 03.99	-0.25	0.12	Kor
2001 9 19.034883	06 51 15.651	+22 15 35.92	-0.00	0.48	Sid
2001 9 20.037059	06 51 49.183	+22 14 58.76	-0.43	0.08	Sid
2001 9 26.021901	06 54 58.034	+22 11 38.40	-0.46	0.16	Sid
2001 10 1.058731	06 57 20.929	+22 09 18.92	0.54	0.31	Kou
2001 10 22.058229	07 04 18.445	+22 05 43.76	0.31	0.75	Sid
2001 10 24.935608	07 04 51.165	+22 06 07.83	-0.06	0.37	Sid
2001 11 21.023132	07 04 46.019	+22 21 53.70	-0.05	-0.63	Kor
2001 11 21.990095	07 04 35.356	+22 22 51.47	0.14	0.38	Gor
2001 12 12.981397	06 58 05.912	+22 48 06.02	0.14	-0.13	Sid
2001 12 20.952171	06 54 32.929	+22 59 03.41	0.16	0.42	Dev
2001 12 22.977273	06 53 34.838	+23 01 51.05	0.17	0.28	Sid
2001 12 23.986502	06 53 05.370	+23 03 14.18	-0.22	0.15	Kou
2002 1 6.924084	06 45 58.109	+23 21 30.48	0.16	0.35	Kou
2002 2 15.001683	06 29 02.491	+23 48 06.43	0.40	0.19	Dev
2002 2 21.892520	06 27 26.194	+23 47 34.46	0.40	0.45	Dev
2002 3 5.846615	06 26 01.624	+23 43 02.73	0.26	0.16	Kor
2002 3 8.822125	06 25 57.835	+23 41 18.17	0.46	-0.20	Dev
2002 3 14.803589	06 26 12.011	+23 37 14.01	0.48	0.03	Dev
2002 4 7.836828	06 32 06.618	+23 16 32.67	-0.23	0.76	Kou
2002 11 30.038043	09 25 14.384	+16 02 15.43	0.26	0.56	Sid
2002 12 1.056805	09 25 14.284	+16 01 46.56	0.49	0.75	Dev
2002 12 8.045020	09 24 46.350	+16 00 09.85	0.75	0.67	Kou
2002 12 12.931472	09 23 58.953	+16 00 52.34	0.38	0.20	Dev
2002 12 24.994796	09 20 30.151	+16 09 15.29	0.48	0.47	Kor
2003 1 7.113467	09 14 36.146	+16 28 20.19	0.42	0.27	Gor
2003 1 10.953328	09 12 33.276	+16 35 34.32	-0.54	0.10	Sid
2003 1 16.980347	09 09 08.151	+16 48 05.24	-0.07	0.27	Dev
2003 1 20.049542	09 07 19.379	+16 54 53.02	0.25	-0.07	Kou
2003 2 1.890992	08 59 31.990	+17 25 08.51	0.17	0.40	Dev
2003 2 3.056950	08 58 49.732	+17 27 57.01	0.31	0.97	Kou
2003 2 3.937807	08 58 18.059	+17 30 03.22	0.34	0.33	Gor
2003 2 4.904036	08 57 43.439	+17 32 22.27	0.35	0.60	Dev
2003 2 14.853208	08 52 02.732	+17 55 33.27	0.03	0.75	Sid
2003 3 2.900359	08 44 34.121	+18 27 49.24	0.42	0.43	Dev
2003 3 3.856753	08 44 12.622	+18 29 27.62	0.03	0.29	Gor
2003 3 4.861794	08 43 50.791	+18 31 08.45	0.29	0.05	Dev
2003 3 5.959351	08 43 27.765	+18 32 56.47	0.46	0.69	Lem, Mik
2003 3 6.932539	08 43 08.097	+18 34 29.16	-0.18	0.56	Sid
2003 3 8.961943	08 42 29.531	+18 37 34.64	0.18	0.32	Dev
2003 3 9.872990	08 42 13.287	+18 38 54.83	0.21	0.50	Dev

Таблица 2 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2003 3 20.956227	08 39 49.263	+18 52 06.27	0.36	0.33	Sid
2003 3 21.872939	08 39 41.921	+18 52 56.38	0.33	0.13	Sid
2003 3 25.932450	08 39 17.770	+18 56 09.68	0.45	0.17	Dev
2003 3 26.892053	08 39 14.112	+18 56 49.03	0.63	0.72	Lem, Mik
2003 3 27.798098	08 39 11.331	+18 57 22.94	-0.09	0.36	Sid
2003 3 29.872822	08 39 07.579	+18 58 31.91	-0.10	0.03	Lem, Mik
2003 4 1.854515	08 39 08.622	+18 59 49.43	0.85	-0.10	Dev
2003 4 2.866142	08 39 10.610	+19 00 10.68	0.50	0.73	Dev
2003 4 8.881589	08 39 40.005	+19 01 09.48	0.02	-0.02	Dev
2003 4 10.870512	08 39 56.236	+19 01 05.61	0.53	-0.35	Sid
2003 4 15.816570	08 40 49.941	+19 00 07.73	0.60	0.30	Dev
2003 4 19.855900	08 41 47.514	+18 58 27.94	0.31	0.57	Kou
2003 4 20.829478	08 42 03.145	+18 57 57.22	-0.46	0.91	Kou
2003 4 21.859275	08 42 20.498	+18 57 20.56	-0.12	0.09	Gor
2003 4 24.860249	08 43 15.355	+18 55 19.60	0.33	0.66	Sid
2003 4 26.875780	08 43 55.650	+18 53 43.55	-0.50	0.55	Dev
2003 5 11.867474	08 50 18.621	+18 35 52.83	0.06	0.57	Kou
2004 01 4.146957	11 16 55.809	+05 47 10.37	0.88	-0.18	Gor
2004 01 25.097594	11 15 12.827	+06 16 21.88	0.23	0.34	Gor
2004 01 24.127883	11 15 23.192	+06 14 23.57	0.35	-0.47	Bek
2004 02 10.898859	11 11 01.046	+06 57 15.03	0.17	0.25	Sid
2004 03 4.977920	11 02 46.762	+08 03 24.64	0.28	0.31	Dev
2004 03 10.039722	11 00 50.902	+08 17 12.89	-0.04	0.06	Sid
2004 03 12.044272	11 00 05.380	+08 22 28.02	0.38	0.05	Dev
2004 03 13.050259	10 59 42.616	+08 25 02.78	0.07	-0.21	Dev
2004 03 28.803885	10 54 08.718	+08 59 28.04	0.08	0.20	Kou
2004 03 30.835612	10 53 30.050	+09 02 55.07	-0.07	0.26	Sid
2004 04 1.911559	10 52 51.857	+09 06 10.93	-0.26	0.51	Dev
2004 04 4.790541	10 52 01.406	+09 10 15.03	0.05	0.34	Kou
2004 04 6.790953	10 51 28.007	+09 12 45.51	0.09	-0.14	Sid
2004 04 7.801815	10 51 11.640	+09 13 55.58	-0.50	-0.35	Sid
2004 04 8.789258	10 50 56.075	+09 15 01.07	-0.37	0.37	Kou
2004 04 9.785943	10 50 40.756	+09 16 02.78	0.10	0.55	Bek
2004 04 10.957932	10 50 23.098	+09 17 09.70	-0.46	0.24	Dev
2004 04 13.784635	10 49 43.108	+09 19 29.74	0.16	0.25	Sid
2004 04 15.837550	10 49 16.071	+09 20 51.47	0.49	0.36	Ale
2004 04 16.787266	10 49 04.198	+09 21 23.42	0.51	0.24	Bek
2004 04 16.796772	10 49 04.050	+09 21 24.04	0.11	0.57	Bek
2004 04 17.811884	10 48 51.788	+09 21 53.97	0.44	0.26	Gor
2004 04 18.839178	10 48 39.771	+09 22 20.40	-0.27	0.30	Kou
2004 04 19.841521	10 48 28.622	+09 22 41.72	0.51	-0.08	Ale
2004 04 20.830445	10 48 17.972	+09 22 59.56	-0.20	0.30	Sid
2004 04 22.838190	10 47 57.871	+09 23 23.00	0.22	0.14	Dev
2004 04 22.848015	10 47 57.769	+09 23 23.07	0.15	0.13	Dev
2004 04 23.905691	10 47 47.934	+09 23 28.46	0.29	-0.46	Bek
2004 04 23.910160	10 47 47.890	+09 23 28.66	0.26	-0.26	Bek
2004 04 24.858247	10 47 39.532	+09 23 30.57	-0.10	0.03	Gor
2004 04 25.845331	10 47 31.323	+09 23 29.18	0.09	0.65	Kou
2004 04 25.849859	10 47 31.286	+09 23 28.76	0.10	0.26	Kou
2004 04 26.843708	10 47 23.495	+09 23 23.17	0.17	0.52	Ale
2004 05 7.861488	10 46 30.800	+09 18 12.51	0.24	0.27	Dev
2004 05 8.878807	10 46 29.196	+09 17 22.31	0.70	0.48	Kou
2004 05 9.923550	10 46 28.061	+09 16 26.29	0.16	-0.06	Dev
2004 05 12.850438	10 46 28.225	+09 13 31.83	-0.34	0.13	Sid
2004 05 13.897478	10 46 29.456	+09 12 22.95	-0.25	0.68	Dev
2004 05 14.865260	10 46 31.159	+09 11 14.50	-0.23	-0.51	Bek



Таблица 2 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 01 4.146957	11 16 55.809	+05 47 10.37	0.88	-0.18	Gor
2004 01 25.097594	11 15 12.827	+06 16 21.88	0.23	0.34	Gor
2004 01 24.127883	11 15 23.192	+06 14 23.57	0.35	-0.47	Bek
2004 02 10.898859	11 11 01.046	+06 57 15.03	0.17	0.25	Sid
2004 03 4.977920	11 02 46.762	+08 03 24.64	0.28	0.31	Dev
2004 03 10.039722	11 00 50.902	+08 17 12.89	-0.04	0.06	Sid
2004 03 12.044272	11 00 05.380	+08 22 28.02	0.38	0.05	Dev
2004 03 13.050259	10 59 42.616	+08 25 02.78	0.07	-0.21	Dev
2004 03 28.803885	10 54 08.718	+08 59 28.04	0.08	0.20	Kou
2004 03 30.835612	10 53 30.050	+09 02 55.07	-0.07	0.26	Sid
2004 04 1.911559	10 52 51.857	+09 06 10.93	-0.26	0.51	Dev
2004 04 4.790541	10 52 01.406	+09 10 15.03	0.05	0.34	Kou
2004 04 6.790953	10 51 28.007	+09 12 45.51	0.09	-0.14	Sid
2004 04 7.801815	10 51 11.640	+09 13 55.58	-0.50	-0.35	Sid
2004 04 8.789258	10 50 56.075	+09 15 01.07	-0.37	0.37	Kou
2004 04 9.785943	10 50 40.756	+09 16 02.78	0.10	0.55	Bek
2004 04 10.957932	10 50 23.098	+09 17 09.70	-0.46	0.24	Dev
2004 04 13.784635	10 49 43.108	+09 19 29.74	0.16	0.25	Sid
2004 04 15.837550	10 49 16.071	+09 20 51.47	0.49	0.36	Ale
2004 04 16.787266	10 49 04.198	+09 21 23.42	0.51	0.24	Bek
2004 04 16.796772	10 49 04.050	+09 21 24.04	0.11	0.57	Bek
2004 04 17.811884	10 48 51.788	+09 21 53.97	0.44	0.26	Gor
2004 04 18.839178	10 48 39.771	+09 22 20.40	-0.27	0.30	Kou
2004 04 19.841521	10 48 28.622	+09 22 41.72	0.51	-0.08	Ale
2004 04 20.830445	10 48 17.972	+09 22 59.56	-0.20	0.30	Sid
2004 04 22.838190	10 47 57.871	+09 23 23.00	0.22	0.14	Dev
2004 04 22.848015	10 47 57.769	+09 23 23.07	0.15	0.13	Dev
2004 04 23.905691	10 47 47.934	+09 23 28.46	0.29	-0.46	Bek
2004 04 23.910160	10 47 47.890	+09 23 28.66	0.26	-0.26	Bek
2004 04 24.858247	10 47 39.532	+09 23 30.57	-0.10	0.03	Gor
2004 04 25.845331	10 47 31.323	+09 23 29.18	0.09	0.65	Kou
2004 04 25.849859	10 47 31.286	+09 23 28.76	0.10	0.26	Kou
2004 04 26.843708	10 47 23.495	+09 23 23.17	0.17	0.52	Ale
2004 05 7.861488	10 46 30.800	+09 18 12.51	0.24	0.27	Dev
2004 05 8.878807	10 46 29.196	+09 17 22.31	0.70	0.48	Kou
2004 05 9.923550	10 46 28.061	+09 16 26.29	0.16	-0.06	Dev
2004 05 12.850438	10 46 28.225	+09 13 31.83	-0.34	0.13	Sid
2004 05 13.897478	10 46 29.456	+09 12 22.95	-0.25	0.68	Dev
2004 05 14.865260	10 46 31.159	+09 11 14.50	-0.23	0.51	Bek

Таблица 3. Пасифе (J8).  
Результаты наблюдений 2000.01 – 2004.05

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2000 1 23.750200	01 35 23.185	+09 46 41.18	0.63	-0.34	Dev
2000 9 23.028853	04 38 20.973	+20 08 55.37	-0.08	0.28	Sid
2000 9 24.030324	04 38 21.504	+20 08 21.72	0.16	0.52	Dev
2000 9 25.026216	04 38 21.169	+20 07 46.51	-0.02	0.41	Kou
2000 9 26.013430	04 38 20.018	+20 07 10.34	0.08	0.41	Sid
2000 9 29.078238	04 38 11.131	+20 05 09.92	0.48	0.18	Dev
2000 10 3.045512	04 37 47.705	+20 02 16.10	0.09	0.17	Gor
2000 10 17.994553	04 34 21.312	+19 48 26.27	-0.61	0.74	Sid
2000 10 19.025479	04 34 00.490	+19 47 18.87	0.34	0.26	Kor
2000 10 20.033909	04 33 39.254	+19 46 12.39	-0.09	0.47	Dev
2000 11 17.895667	04 19 04.380	+19 07 58.33	0.19	0.43	Dev

Таблица 3 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2000 11 27.932752	04 12 50.538	+18 53 22.80	0.46	0.55	Gor
2000 12 26.803246	03 56 50.324	+18 19 58.92	0.03	-0.50	Kor
2000 12 27.745564	03 56 26.205	+18 19 19.20	0.37	0.18	Sid
2001 1 16.923929	03 50 33.805	+18 14 06.73	-0.32	0.75	Sid
2001 1 22.933559	03 49 54.820	+18 16 10.13	0.01	0.17	Gor
2001 1 23.808534	03 49 51.827	+18 16 37.31	0.29	0.55	Kor
2001 2 22.824804	03 54 38.693	+18 51 45.93	0.23	-0.50	Sid
2001 2 25.841878	03 55 46.823	+18 57 08.45	-0.46	-0.58	Sid
2001 9 18.057559	06 50 32.861	+23 10 50.00	0.48	0.14	Sid
2001 9 19.027304	06 51 09.009	+23 10 36.33	-0.52	0.18	Sid
2001 9 20.028985	06 51 45.912	+23 10 23.26	0.56	0.82	Sid
2001 9 21.048026	06 52 22.671	+23 10 09.65	-0.43	0.93	Kou
2001 9 30.001744	06 57 18.444	+23 08 29.32	0.76	-0.06	Sid
2001 10 1.067763	06 57 50.086	+23 08 21.22	0.04	0.45	Kou
2001 10 22.065304	07 05 24.901	+23 09 05.86	-0.00	0.76	Sid
2001 10 23.998992	07 05 49.263	+23 09 35.14	0.11	0.64	Dev
2001 11 21.033557	07 05 41.163	+23 26 01.23	0.16	0.04	Kor
2001 11 22.014416	07 05 28.655	+23 26 53.58	0.03	0.19	Gor
2001 12 12.988911	06 58 11.827	+23 48 08.80	-0.04	0.23	Sid
2001 12 22.990669	06 53 16.069	+23 58 36.35	-0.17	0.15	Sid
2002 1 28.023521	06 35 09.084	+24 23 08.14	0.67	0.58	Kor
2002 2 17.854485	06 29 32.131	+24 24 18.00	-0.66	0.64	Dev
2002 2 21.852634	06 29 06.992	+24 23 33.16	0.48	0.57	Dev
2002 4 4.858618	06 37 33.527	+24 00 19.29	0.67	0.24	Dev
2002 11 30.025235	09 14 57.209	+15 32 25.41	0.23	-0.10	Sid
2002 12 8.052952	09 14 48.853	+15 33 56.00	0.21	0.50	Kou
2002 12 11.062270	09 14 33.117	+15 35 32.04	0.80	0.30	Kor
2002 12 12.954594	09 14 19.676	+15 36 50.10	-0.06	0.50	Dev
2002 12 16.998591	09 13 42.001	+15 40 20.96	-0.00	0.47	Gor
2002 12 17.194575	09 13 39.795	+15 40 32.55	0.03	0.40	Gor
2002 12 23.129117	09 12 21.977	+15 47 32.91	-0.56	0.72	Kou
2002 12 25.007826	09 11 52.221	+15 50 11.33	0.10	0.79	Kor
2002 12 31.085612	09 09 59.164	+16 00 02.30	0.01	0.54	Gor
2003 1 1.915847	09 09 20.496	+16 03 22.29	-0.07	0.15	Sid
2003 1 7.126130	09 07 19.315	+16 13 44.20	0.06	0.67	Gor
2003 1 10.944145	09 05 41.433	+16 22 01.56	0.25	-0.03	Sid
2003 1 12.896336	09 04 48.724	+16 26 28.27	0.44	0.14	Kou
2003 1 20.056743	09 01 22.486	+16 43 41.78	0.38	-0.07	Kou
2003 2 1.915792	08 54 41.677	+17 16 41.11	0.63	0.56	Dev
2003 2 3.063813	08 54 05.199	+17 19 39.17	0.24	0.56	Kou
2003 2 3.943638	08 53 37.428	+17 21 55.10	0.56	0.19	Gor
2003 2 4.920717	08 53 06.575	+17 24 25.95	0.42	0.14	Dev
2003 3 2.906236	08 41 07.672	+18 23 28.77	-0.13	0.32	Dev
2003 3 3.863350	08 40 47.419	+18 25 12.95	-0.05	0.32	Gor
2003 3 4.869025	08 40 26.764	+18 27 00.03	0.26	0.56	Dev
2003 3 5.966108	08 40 04.904	+18 28 53.20	-0.31	0.37	Lem, Mik
2003 3 6.923957	08 39 46.607	+18 30 29.86	0.40	0.66	Sid
2003 3 8.968959	08 39 09.483	+18 33 46.90	-0.42	0.33	Dev
2003 3 20.965084	08 36 34.441	+18 49 01.20	-0.51	0.46	Sid
2003 3 21.879464	08 36 27.274	+18 49 53.45	0.52	0.52	Sid
2003 3 25.940956	08 36 03.067	+18 53 14.30	-0.10	0.83	Dev
2003 3 26.898766	08 35 59.307	+18 53 53.78	-0.37	0.26	Lem, Mik
2003 3 27.804967	08 35 56.499	+18 54 29.20	0.08	0.37	Sid
2003 3 28.950805	08 35 53.785	+18 55 10.32	0.09	0.69	Sid
2003 3 29.879369	08 35 52.450	+18 55 40.72	0.42	0.83	Lem, Mik
2003 4 1.860466	08 35 52.775	+18 56 59.16	0.14	0.25	Dev

Таблица 3 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2003 4 2.879423	08 35 54.515	+18 57 19.32	-0.40	-0.25	Dev
2003 4 8.887421	08 36 22.202	+18 58 16.35	0.30	-0.14	Dev
2003 4 10.885120	08 36 37.832	+18 58 10.48	0.71	-0.41	Sid
2003 4 11.803076	08 36 46.030	+18 58 04.65	0.02	0.21	Sid
2003 4 15.851649	08 37 30.120	+18 57 05.02	0.31	0.17	Dev
2003 4 19.869899	08 38 26.115	+18 55 18.10	-0.35	0.41	Kou
2003 4 20.835867	08 38 41.425	+18 54 45.38	0.20	0.55	Kou
2003 4 21.865855	08 38 58.472	+18 54 07.52	0.57	0.73	Gor
2004 01 24.140880	11 27 18.952	+06 11 23.05	-0.30	0.20	Bek
2004 03 4.988466	11 10 46.965	+08 05 33.80	0.21	-0.27	Dev
2004 03 10.088196	11 08 09.630	+08 21 19.63	0.56	0.89	Sid
2004 03 13.071275	11 06 37.942	+08 30 15.48	-0.89	0.67	Dev
2004 03 19.998367	11 03 09.992	+08 49 51.28	-0.76	-0.29	Bek
2004 03 28.795056	10 59 04.232	+09 11 39.74	-0.13	-0.13	Kou
2004 03 29.828060	10 58 37.216	+09 13 56.52	0.06	-0.52	Ale
2004 03 30.841658	10 58 11.167	+09 16 07.87	0.34	-0.10	Sid
2004 04 1.922789	10 57 19.029	+09 20 25.20	0.09	0.05	Dev
2004 04 4.784300	10 56 10.772	+09 25 52.72	-0.06	0.40	Kou
2004 04 5.771623	10 55 48.167	+09 27 38.57	0.27	0.64	Ale
2004 04 7.807704	10 55 03.030	+09 31 03.26	-0.34	-0.37	Sid
2004 04 8.795235	10 54 41.993	+09 32 37.54	0.25	0.06	Kou
2004 04 9.791933	10 54 21.246	+09 34 08.24	0.08	0.11	Bek
2004 04 13.790527	10 53 03.687	+09 39 31.10	0.18	0.04	Sid
2004 04 15.843579	10 52 27.455	+09 41 51.20	-0.03	0.36	Ale
2004 04 16.802826	10 52 11.455	+09 42 49.89	0.31	-0.11	Bek
2004 04 17.830501	10 51 54.893	+09 43 49.57	0.18	0.68	Gor
2004 04 18.845127	10 51 39.212	+09 44 42.60	0.48	-0.04	Kou
2004 04 22.852848	10 50 43.606	+09 47 31.01	0.28	-0.12	Dev
2004 04 23.914941	10 50 30.575	+09 48 03.82	0.06	-0.10	Bek
2004 04 24.867626	10 50 19.571	+09 48 28.69	0.16	-0.49	Gor
2004 04 25.854650	10 50 08.769	+09 48 51.37	0.05	0.18	Kou
2004 05 7.870009	10 48 49.071	+09 47 39.85	0.50	-0.47	Dev
2004 05 8.887118	10 48 46.664	+09 47 06.34	0.03	0.20	Kou
2004 05 12.855494	10 48 43.938	+09 44 12.26	0.37	0.27	Sid
2004 05 13.902205	10 48 44.970	+09 43 14.76	1.08	-0.45	Dev
2004 05 14.873384	10 48 46.423	+09 42 18.21	-0.46	-0.37	Bek
2004 01 24.140880	11 27 18.952	+06 11 23.05	-0.30	0.20	Bek
2004 03 4.988466	11 10 46.965	+08 05 33.80	0.21	-0.27	Dev
2004 03 10.088196	11 08 09.630	+08 21 19.63	0.56	0.89	Sid
2004 03 13.071275	11 06 37.942	+08 30 15.48	-0.89	0.67	Dev
2004 03 19.998367	11 03 09.992	+08 49 51.28	-0.76	-0.29	Bek
2004 03 28.795056	10 59 04.232	+09 11 39.74	-0.13	-0.13	Kou
2004 03 29.828060	10 58 37.216	+09 13 56.52	0.06	-0.52	Ale
2004 03 30.841658	10 58 11.167	+09 16 07.87	0.34	-0.10	Sid
2004 04 1.922789	10 57 19.029	+09 20 25.20	0.09	0.05	Dev
2004 04 4.784300	10 56 10.772	+09 25 52.72	-0.06	0.40	Kou
2004 04 5.771623	10 55 48.167	+09 27 38.57	0.27	0.64	Ale
2004 04 7.807704	10 55 03.030	+09 31 03.26	-0.34	-0.37	Sid
2004 04 8.795235	10 54 41.993	+09 32 37.54	0.25	0.06	Kou
2004 04 9.791933	10 54 21.246	+09 34 08.24	0.08	0.11	Bek
2004 04 13.790527	10 53 03.687	+09 39 31.10	0.18	0.04	Sid
2004 04 15.843579	10 52 27.455	+09 41 51.20	-0.03	0.36	Ale
2004 04 16.802826	10 52 11.455	+09 42 49.89	0.31	-0.11	Bek
2004 04 17.830501	10 51 54.893	+09 43 49.57	0.18	0.68	Gor
2004 04 18.845127	10 51 39.212	+09 44 42.60	0.48	-0.04	Kou
2004 04 22.852848	10 50 43.606	+09 47 31.01	0.28	-0.12	Dev

Таблица 3 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha} \cos \delta$ "	(O-C) $_{\delta}$ "	Набл.
2004 04 23.914941	10 50 30.575	+09 48 03.82	0.06	-0.10	Bek
2004 04 24.867626	10 50 19.571	+09 48 28.69	0.16	-0.49	Gor
2004 04 25.854650	10 50 08.769	+09 48 51.37	0.05	0.18	Kou
2004 05 7.870009	10 48 49.071	+09 47 39.85	0.50	-0.47	Dev
2004 05 8.887118	10 48 46.664	+09 47 06.34	0.03	0.20	Kou
2004 05 12.855494	10 48 43.938	+09 44 12.26	0.37	0.27	Sid
2004 05 13.902205	10 48 44.970	+09 43 14.76	1.08	-0.45	Dev
2004 05 14.873384	10 48 46.423	+09 42 18.21	-0.46	-0.37	Bek

**Таблица 4. Титан (S6).**  
Результаты наблюдений 1999.10–2004.04

Дата, UT	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha} \cos \delta$ "	(O-C) $_{\delta}$ "	Набл.
1999 10 29.783779	02 50 53.833	+13 38 16.36	-0.09	0.13	Kor
2000 2 25.740004	02 41 04.975	+13 22 54.57	-0.01	0.74	Gor
2000 9 23.038803	03 56 41.761	+18 07 04.17	0.03	0.71	Sid
2000 9 28.916325	03 56 31.152	+18 05 24.53	-0.37	0.08	Dev
2000 11 17.792570	03 43 46.140	+17 23 17.12	0.40	0.22	Dev
2002 9 25.985170	05 54 43.229	+22 07 29.65	-0.56	0.61	Sid
2002 10 5.961387	05 55 56.687	+22 08 26.97	0.02	0.69	Sid
2003 2 1.783804	05 27 22.262	+22 01 04.38	0.17	0.13	Dev
2003 4 2.750047	05 31 47.735	+22 18 39.46	-0.47	0.47	Dev
2003 4 12.773033	05 35 25.684	+22 21 40.40	0.23	0.42	Gor
2004 04 13.774694	06 32 39.727	+22 48 15.51	0.18	0.21	Sid
2004 04 22.802712	06 35 02.270	+22 46 49.05	0.20	0.63	Dev
2004 04 22.800741	06 35 02.228	+22 46 48.86	0.19	0.36	Dev
2004 04 26.810546	06 36 41.178	+22 45 22.78	0.22	0.35	Ale
2004 04 13.774694	06 32 39.727	+22 48 15.51	0.18	0.21	Sid
2004 04 22.802712	06 35 02.270	+22 46 49.05	0.20	0.63	Dev
2004 04 22.800741	06 35 02.228	+22 46 48.86	0.19	0.36	Dev
2004 04 26.810546	06 36 41.178	+22 45 22.78	0.22	0.35	Ale

**Таблица 5. Гиперион (S7).**  
Результаты наблюдений 1999.10–2004.04

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha} \cos \delta$ "	(O-C) $_{\delta}$ "	Набл.
1999 10 29.776687	02 50 50.325	+13 37 08.13	-0.55	0.40	Kor
1999 10 31.938950	02 50 16.263	+13 34 49.42	0.61	0.45	Dev
1999 11 10.852782	02 46 39.471	+13 22 18.81	0.14	0.34	Kou
1999 11 14.007614	02 45 35.050	+13 16 45.66	0.45	0.28	Dev
1999 11 15.826141	02 45 05.803	+13 13 38.74	-0.61	0.50	Bat
1999 11 20.907918	02 43 57.169	+13 07 19.22	0.43	0.40	Dev
1999 12 11.867021	02 38 25.065	+12 45 29.48	-0.46	0.69	Dev
2000 1 7.759177	02 34 53.429	+12 38 06.18	-0.20	0.54	Dev
2000 1 15.797689	02 34 22.173	+12 39 23.29	0.33	0.38	Dev
2000 1 22.704685	02 35 05.176	+12 42 00.13	0.18	0.21	Dev
2000 1 23.658257	02 35 12.670	+12 42 53.34	0.36	0.61	Dev
2000 1 27.666261	02 35 36.871	+12 47 10.13	-0.14	0.53	Dev
2000 2 3.653066	02 36 07.583	+12 53 59.09	0.33	0.47	Dev
2000 2 18.733230	02 39 35.364	+13 12 47.11	0.79	0.39	Gor
2000 2 25.740004	02 41 06.393	+13 23 34.79	0.24	0.75	Gor

Таблица 5 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2000 3 5.758403	02 44 19.254	+13 37 30.16	0.84	0.21	Kou
2000 3 8.758791	02 45 27.583	+13 43 53.25	-0.30	-0.15	Dev
2000 3 12.715998	02 46 48.239	+13 52 24.56	-0.67	0.45	Dev, Sal
2000 3 18.774885	02 48 48.892	+14 03 46.48	-0.05	0.30	Kou
2000 3 20.740074	02 49 35.107	+14 07 00.63	-0.14	0.70	Dev
2000 3 21.730437	02 50 00.931	+14 08 39.23	0.77	0.67	Dev
2000 9 6.975873	03 56 54.133	+18 12 17.81	0.13	0.33	Dev, Sid
2000 9 7.996332	03 56 55.312	+18 11 42.29	-0.22	0.36	Dev, Sid
2000 9 8.000418	03 56 55.399	+18 11 42.26	0.92	0.48	Dev, Sid
2000 9 10.098468	03 57 02.057	+18 10 29.56	-0.62	0.23	Dev
2000 9 18.000882	03 57 26.934	+18 09 51.88	0.24	-0.03	Kou
2000 9 19.983981	03 57 20.455	+18 10 02.12	-0.47	0.26	Kor
2000 9 21.981584	03 57 08.073	+18 09 55.15	0.04	0.08	Dev
2000 9 23.038803	03 56 59.365	+18 09 41.82	-0.62	0.66	Sid
2000 9 28.938813	03 56 02.241	+18 05 32.09	-0.23	0.46	Dev
2000 10 1.954936	03 55 44.296	+18 02 29.73	0.39	0.58	Kou
2000 10 5.950866	03 55 27.137	+18 00 05.57	0.07	0.61	Dev
2000 10 9.956046	03 54 52.658	+17 58 56.45	0.65	0.81	Gor
2000 10 17.885131	03 52 42.279	+17 53 42.62	0.12	0.76	Sid
2000 10 19.941483	03 52 06.009	+17 51 01.17	0.52	0.19	Dev
2000 10 20.902373	03 51 50.930	+17 49 40.33	0.31	0.59	Sal, Sid
2000 11 17.792570	03 43 47.963	+17 21 09.37	0.11	0.53	Dev
2000 12 23.745616	03 32 32.967	+16 50 31.04	-0.40	-0.36	Sid
2001 1 13.624483	03 29 08.902	+16 43 59.12	0.21	0.06	Sid
2001 1 20.822864	03 29 09.533	+16 43 47.85	0.67	-0.40	Sid
2001 1 21.903918	03 29 10.086	+16 44 22.63	-0.31	-0.37	Sid
2001 1 22.677450	03 29 10.118	+16 44 50.59	-0.01	-0.01	Sid
2001 1 22.781461	03 29 10.077	+16 44 54.06	0.26	-0.35	Gor
2001 1 22.903069	03 29 09.996	+16 44 59.00	0.13	0.18	Gor
2001 1 23.679612	03 29 09.470	+16 45 27.91	0.22	-0.19	Dev
2001 1 23.720522	03 29 09.435	+16 45 29.35	0.44	-0.31	Kor
2001 2 4.784774	03 29 01.680	+16 49 30.06	-0.05	-0.03	Kou
2001 2 25.768876	03 32 15.755	+17 07 08.59	-0.78	0.36	Sid
2001 3 7.769742	03 35 21.180	+17 19 52.80	-0.58	0.03	Sid
2001 3 8.743369	03 35 37.202	+17 21 27.14	-0.34	0.34	Dev
2001 3 9.747535	03 35 53.118	+17 23 01.91	-0.34	0.19	Sid
2001 3 24.757481	03 41 00.586	+17 41 58.66	-0.04	-0.05	Sid
2001 3 27.793008	03 42 18.199	+17 47 33.66	0.36	0.00	Kor
2001 3 28.803139	03 42 42.541	+17 49 28.65	0.05	0.30	Sid
2001 3 30.762372	03 43 27.711	+17 53 08.03	-0.10	0.73	Gri
2001 8 23.997877	04 51 25.856	+20 43 42.22	0.25	0.63	Sid
2001 8 24.010817	04 51 26.074	+20 43 42.65	0.42	0.49	Sid
2001 8 28.014867	04 52 18.347	+20 46 15.42	0.35	0.48	Sid
2001 8 29.053639	04 52 28.222	+20 46 42.69	-0.19	0.65	Sid
2001 9 7.017048	04 53 50.021	+20 45 23.02	-0.24	0.57	Sid
2001 10 9.897190	04 55 06.379	+20 45 35.59	0.12	0.37	Sid
2001 12 17.930024	04 35 38.869	+20 10 47.43	-0.04	0.43	Gor
2001 11 21.890147	04 44 56.961	+20 26 27.35	0.21	0.26	Gor
2001 12 17.930024	04 35 38.869	+20 10 47.43	-0.04	0.43	Gor
2002 2 21.809000	04 26 33.438	+20 05 28.92	-0.33	0.82	Dev
2002 2 22.769829	04 26 40.674	+20 05 26.91	0.12	-0.46	Dev
2002 3 14.758390	04 30 25.352	+20 19 24.66	-0.15	0.31	Dev
2002 3 15.901282	04 30 43.503	+20 19 42.71	-0.07	-0.62	Sid
2002 3 16.736216	04 30 58.498	+20 20 01.08	0.23	-0.10	Dev
2002 3 24.751007	04 33 49.575	+20 27 24.87	0.34	0.45	Dev
2002 4 7.777177	04 38 27.522	+20 39 47.46	-0.42	0.15	Kou

Таблица 5 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2002 9 12.053785	05 52 46.039	+22 07 36.44	-0.23	0.55	Sid
2002 9 25.985170	05 54 44.375	+22 06 32.59	-0.36	0.72	Sid
2002 10 4.111648	05 55 58.039	+22 07 03.88	-0.07	0.49	Sid
2002 10 5.961387	05 56 04.366	+22 07 47.59	0.06	0.68	Sid
2002 12 26.928634	05 37 52.171	+22 01 51.00	0.28	0.62	Dev
2002 12 28.030977	05 37 30.987	+22 02 18.87	0.45	0.51	Sid
2003 1 6.896688	05 33 39.713	+22 02 00.73	0.37	0.04	Gor
2003 1 10.838925	05 32 34.434	+22 00 01.47	0.44	0.81	Sid
2003 1 16.951247	05 31 16.504	+22 00 58.87	0.14	0.22	Dev
2003 1 19.903204	05 30 32.061	+22 02 23.85	0.18	0.48	Kor
2003 2 1.783804	05 27 28.957	+22 00 18.62	0.26	0.06	Dev
2003 3 1.754654	05 26 22.722	+22 06 54.55	0.70	-0.41	Kou
2003 3 2.731941	05 26 26.195	+22 07 37.24	0.14	0.20	Dev
2003 3 4.741630	05 26 31.145	+22 08 56.91	0.22	0.36	Dev
2003 3 20.755596	05 28 52.220	+22 11 56.25	-0.22	0.59	Sid
2003 3 25.754380	05 29 59.567	+22 15 47.82	0.38	0.20	Dev
2003 4 1.759320	05 31 23.969	+22 17 18.21	-0.10	0.29	Dev
2003 4 2.752593	05 31 41.285	+22 17 10.14	0.58	0.34	Dev
2003 3 30.763900	05 30 55.310	+22 17 31.72	0.11	0.40	Kou
2003 4 6.765580	05 33 07.339	+22 17 33.49	-0.16	-0.31	Kou
2003 4 10.856185	05 34 44.916	+22 19 54.26	0.06	0.56	Sid
2003 4 11.771017	05 35 06.215	+22 20 36.43	0.15	0.49	Sid
2003 4 12.777062	05 35 29.057	+22 21 24.97	0.20	0.61	Gor
2003 4 15.778187	05 36 32.552	+22 23 45.47	0.04	-0.30	Dev
2003 4 21.813374	05 38 28.872	+22 25 36.90	0.08	0.25	Gor
2003 4 24.806071	05 39 41.328	+22 25 15.14	0.43	0.49	Sid
2003 09 9.038405	06 48 52.503	+22 12 44.51	-0.09	0.67	Kou
2003 10 19.021388	06 56 54.141	+22 01 57.56	-0.44	0.32	Dev
2003 10 24.934632	06 57 16.150	+22 04 03.88	0.17	0.12	Dev
2003 11 8.128688	06 56 18.453	+22 02 47.06	-0.43	0.43	Bek
2003 11 25.946585	06 53 02.263	+22 07 48.60	0.02	0.10	Sid
2003 11 25.963918	06 53 02.044	+22 07 48.28	-0.29	-0.23	Sid
2003 11 25.967310	06 53 02.005	+22 07 48.35	-0.29	-0.16	Sid
2004 01 3.973911	06 40 39.612	+22 26 35.91	-0.11	0.23	Gor
2004 02 10.967761	06 29 46.344	+22 42 32.06	-0.45	0.03	Sid
2004 02 19.872652	06 27 58.055	+22 41 42.80	-0.25	0.14	Dev
2004 02 19.874238	06 27 58.054	+22 41 42.75	-0.17	0.09	Dev
2004 03 30.790853	06 28 55.597	+22 48 16.70	0.09	0.60	Sid
2004 03 9.912162	06 26 47.209	+22 46 18.74	0.32	0.22	Sid
2004 03 9.914556	06 26 47.173	+22 46 18.60	-0.24	0.13	Sid
2004 03 9.917574	06 26 47.200	+22 46 18.69	0.05	0.28	Sid
2004 03 11.864209	06 26 54.355	+22 45 49.51	-0.20	0.51	Dev
2004 03 12.859435	06 27 00.186	+22 45 43.35	0.10	0.17	Dev
2004 03 13.868019	06 27 07.144	+22 45 44.59	0.24	0.27	Gor
2004 03 19.730079	06 27 53.878	+22 47 50.52	0.22	0.08	Bek
2004 03 19.731630	06 27 53.884	+22 47 50.65	0.16	0.16	Bek
2004 04 1.753996	06 29 20.830	+22 47 28.94	-0.10	0.32	Dev
2004 04 2.830246	06 29 37.124	+22 47 11.63	0.03	0.12	Bek
2004 04 9.799728	06 31 38.088	+22 48 07.95	0.03	-0.11	Bek
2004 04 13.772967	06 32 38.825	+22 49 29.33	-0.28	0.06	Sid
2004 04 13.774694	06 32 38.869	+22 49 29.22	0.01	-0.06	Sid
2004 04 19.819693	06 34 02.109	+22 47 52.69	0.56	-0.56	Ale
2004 04 20.806510	06 34 19.976	+22 47 16.61	0.40	0.34	Sid
2004 04 22.800741	06 35 01.377	+22 46 08.33	-0.00	0.15	Dev
2004 04 22.802712	06 35 01.417	+22 46 08.34	-0.06	0.23	Dev
2003 09 9.038405	06 48 52.503	+22 12 44.51	-0.09	0.67	Kou

Таблица 5 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2003 10 19.021388	06 56 54.141	+22 01 57.56	-0.44	0.32	Dev
2003 10 24.934632	06 57 16.150	+22 04 03.88	0.17	0.12	Dev
2003 11 8.128688	06 56 18.453	+22 02 47.06	-0.43	0.43	Bek
2003 11 25.946585	06 53 02.263	+22 07 48.60	0.02	0.10	Sid
2003 11 25.963918	06 53 02.044	+22 07 48.28	-0.29	-0.23	Sid
2003 11 25.967310	06 53 02.005	+22 07 48.35	-0.29	-0.16	Sid
2004 01 3.973911	06 40 39.612	+22 26 35.91	-0.11	0.23	Gor
2004 02 10.967761	06 29 46.344	+22 42 32.06	-0.45	0.03	Sid
2004 02 19.872652	06 27 58.055	+22 41 42.80	-0.25	0.14	Dev
2004 02 19.874238	06 27 58.054	+22 41 42.75	-0.17	0.09	Dev
2004 03 30.790853	06 28 55.597	+22 48 16.70	0.09	0.60	Sid
2004 03 9.912162	06 26 47.209	+22 46 18.74	0.32	0.22	Sid
2004 03 9.914556	06 26 47.173	+22 46 18.60	-0.24	0.13	Sid
2004 03 9.917574	06 26 47.200	+22 46 18.69	0.05	0.28	Sid
2004 03 11.864209	06 26 54.355	+22 45 49.51	-0.20	0.51	Dev
2004 03 12.859435	06 27 00.186	+22 45 43.35	0.10	0.17	Dev
2004 03 13.868019	06 27 07.144	+22 45 44.59	0.24	0.27	Gor
2004 03 19.730079	06 27 53.878	+22 47 50.52	0.22	0.08	Bek
2004 03 19.731630	06 27 53.884	+22 47 50.65	0.16	0.16	Bek
2004 04 1.753996	06 29 20.830	+22 47 28.94	-0.10	0.32	Dev
2004 04 2.830246	06 29 37.124	+22 47 11.63	0.03	0.12	Bek
2004 04 9.799728	06 31 38.088	+22 48 07.95	0.03	-0.11	Bek
2004 04 13.772967	06 32 38.825	+22 49 29.33	-0.28	0.06	Sid
2004 04 13.774694	06 32 38.869	+22 49 29.22	0.01	-0.06	Sid
2004 04 19.819693	06 34 02.109	+22 47 52.69	0.56	-0.56	Ale
2004 04 20.806510	06 34 19.976	+22 47 16.61	0.40	0.34	Sid
2004 04 22.800741	06 35 01.377	+22 46 08.33	-0.00	0.15	Dev
2004 04 22.802712	06 35 01.417	+22 46 08.34	-0.06	0.23	Dev

Таблица 6. Япет (S8).  
Результаты наблюдений 1999.10–2004.05

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
1999 10 29.806640	02 50 03.298	+13 36 57.06	-0.11	0.65	Kor
1999 10 30.866759	02 49 42.115	+13 35 10.86	-0.49	0.71	Kor, Gri
1999 10 31.927039	02 49 21.138	+13 33 24.57	-0.52	0.10	Dev
1999 11 10.916554	02 46 16.257	+13 17 46.80	0.39	-0.30	Kou
1999 11 15.826141	02 44 54.930	+13 11 08.31	-0.52	0.08	Bat
1999 11 18.810399	02 44 08.474	+13 07 31.35	-0.34	0.66	Dev
2000 1 15.796243	02 34 03.923	+12 38 17.42	0.13	0.80	Dev
2000 1 20.703144	02 34 11.977	+12 39 37.20	0.12	0.71	Dev, Kor
2000 1 23.758622	02 34 25.020	+12 41 01.40	-0.13	0.59	Dev
2000 2 18.738152	02 39 44.416	+13 11 41.07	-0.68	0.77	Gor
2000 3 5.758403	02 44 40.755	+13 41 08.14	-0.81	0.11	Kou
2000 3 8.758791	02 45 40.132	+13 46 51.95	0.72	0.49	Dev
2000 3 12.710175	02 47 00.063	+13 54 23.51	0.24	0.09	Dev, Sal
2000 9 6.975873	03 56 48.922	+18 12 51.12	0.20	0.49	Dev, Sid
2000 9 7.996332	03 56 48.685	+18 12 31.00	-0.43	0.42	Dev, Sid
2000 9 10.098468	03 56 47.240	+18 11 44.53	-0.36	0.42	Dev
2000 9 20.977102	03 56 22.029	+18 06 25.37	0.11	0.02	Sid
2000 9 22.992158	03 56 14.707	+18 05 18.99	0.27	0.23	Sid
2000 9 24.986635	03 56 06.676	+18 04 13.14	0.03	0.60	Kou
2000 9 25.954653	03 56 02.482	+18 03 40.93	-0.44	0.64	Sid
2000 9 27.093908	03 55 57.338	+18 03 02.91	-0.17	0.31	Kor

Таблица 6 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2000 9 28.945050	03 55 48.467	+18 02 01.86	0.24	0.10	Dev
2000 10 1.954936	03 55 32.246	+18 00 24.91	-0.34	0.39	Kou
2000 10 17.945758	03 53 16.715	+17 52 06.48	-0.04	0.40	Sid
2000 10 18.945797	03 53 04.596	+17 51 32.76	-0.11	0.05	Kor
2000 10 21.030793	03 52 37.703	+17 50 20.87	-0.08	0.38	Sal, Sid
2000 12 27.792134	03 32 00.327	+16 46 32.48	-0.33	-0.10	Sid
2001 1 20.827474	03 29 30.587	+16 47 58.06	-0.19	0.29	Sid
2001 1 21.906106	03 29 26.900	+16 48 14.99	0.08	0.74	Sid
2001 1 22.669345	03 29 24.502	+16 48 26.56	-0.24	0.17	Sid
2001 1 23.697814	03 29 21.504	+16 48 42.92	0.01	-0.19	Kor
2001 2 4.808220	03 29 13.400	+16 52 39.22	-0.13	-0.59	Kou
2001 2 25.768876	03 31 53.581	+17 05 18.74	-0.30	-0.39	Sid
2001 3 7.778013	03 34 44.223	+17 16 20.12	0.21	-0.21	Sid
2001 3 8.767602	03 35 03.962	+17 17 38.85	-0.64	0.80	Dev
2001 3 9.797896	03 35 25.073	+17 19 01.83	-0.43	0.56	Sid
2001 3 21.768526	03 39 59.001	+17 37 31.79	-0.43	0.59	Sid
2001 3 24.759456	03 41 13.336	+17 42 39.19	0.72	0.63	Sid
2001 3 27.783783	03 42 29.783	+17 47 55.17	0.50	-0.55	Kor
2001 3 28.800343	03 42 55.690	+17 49 43.59	0.09	0.30	Sid
2001 3 30.762372	03 43 45.996	+17 53 11.11	-0.39	-0.43	Gri
2001 9 19.001975	04 55 54.266	+20 50 01.64	0.07	0.30	Sid
2001 9 20.932976	04 55 58.611	+20 50 08.99	0.05	0.47	Kou
2001 10 1.000718	04 55 41.809	+20 49 00.33	-0.67	0.22	Kou
2001 10 21.949879	04 52 31.295	+20 38 39.00	-0.05	0.13	Sid
2001 11 21.899582	04 45 14.440	+20 24 34.87	0.03	-0.48	Gor
2002 3 24.773315	04 33 03.469	+20 27 16.54	0.70	-0.05	Dev
2002 4 7.777177	04 38 08.809	+20 38 08.89	-0.03	0.24	Kou
2002 9 12.059364	05 51 54.291	+22 06 18.69	0.05	0.66	Sid
2002 9 19.994218	05 53 38.036	+22 05 29.56	-0.06	0.34	Sid
2002 9 25.981639	05 54 45.590	+22 05 28.48	-0.45	0.82	Sid
2002 11 29.992011	05 46 16.094	+22 02 05.14	0.12	0.40	Sid
2002 10 5.958568	05 56 05.776	+22 06 25.98	0.13	0.64	Sid
2002 11 30.999250	05 45 56.980	+22 01 52.20	-0.07	0.46	Dev
2002 12 8.017543	05 43 46.443	+22 00 51.18	0.02	0.45	Kou
2002 12 26.901182	05 38 05.832	+22 02 23.43	0.51	0.96	Dev
2002 12 28.030977	05 37 44.950	+22 02 35.43	0.34	0.74	Sid
2002 12 30.970502	05 36 50.254	+22 03 07.08	0.61	0.40	Gor
2003 1 1.868775	05 36 14.538	+22 03 27.29	0.26	0.68	Sid
2003 1 2.791631	05 35 57.086	+22 03 36.20	0.12	0.34	Dev
2003 1 6.913781	05 34 38.533	+22 04 13.06	0.27	0.59	Gor
2003 1 9.816151	05 33 43.000	+22 04 32.43	0.10	0.50	Dev
2003 1 10.845363	05 33 23.330	+22 04 37.69	0.25	0.39	Sid
2003 1 12.730903	05 32 47.436	+22 04 45.25	0.23	0.38	Kor
2003 1 16.953941	05 31 28.138	+22 04 50.54	0.35	0.13	Dev
2003 1 19.910960	05 30 34.296	+22 04 45.35	0.09	0.55	Kou
2003 2 1.783804	05 27 13.375	+22 03 10.25	0.05	0.32	Dev
2003 2 3.859990	05 26 48.544	+22 02 50.34	-0.03	0.21	Gor
2003 2 4.817764	05 26 38.017	+22 02 41.60	-0.00	0.29	Dev
2003 2 14.734066	05 25 26.421	+22 01 44.19	-0.09	0.32	Sid
2003 2 15.754675	05 25 23.165	+22 01 43.94	0.03	0.39	Gor
2003 2 27.720363	05 25 40.538	+22 03 34.86	-0.26	0.32	Sid
2003 3 20.758767	05 29 14.042	+22 13 46.90	-0.04	0.42	Sid
2003 3 21.784353	05 29 28.055	+22 14 21.19	0.10	0.36	Sid
2003 3 25.761498	05 30 24.503	+22 16 31.24	0.08	0.27	Dev
2003 3 27.734715	05 30 53.726	+22 17 33.31	0.16	0.47	Sid
2003 3 30.767539	05 31 40.141	+22 19 03.64	0.04	0.54	Kou



Таблица 6 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2003 4 1.761708	05 32 11.696	+22 19 59.26	0.25	0.54	Dev
2003 4 2.757270	05 32 27.755	+22 20 25.81	0.15	0.51	Dev
2003 4 8.759429	05 34 09.292	+22 22 47.23	0.43	0.58	Dev
2003 4 10.856185	05 34 46.834	+22 23 28.46	0.51	0.41	Sid
2003 4 11.771017	05 35 03.582	+22 23 45.54	0.33	0.53	Sid
2003 4 12.773033	05 35 22.206	+22 24 03.12	0.34	0.46	Gor
2003 4 20.797752	05 38 02.925	+22 25 54.91	0.24	0.28	Dev
2003 4 27.808915	05 40 43.484	+22 27 03.33	-0.62	-0.23	Kou
2003 09 9.038405	06 49 14.908	+22 15 01.35	-0.23	0.32	Kou
2003 10 8.987132	06 55 18.294	+22 04 18.77	-0.06	0.12	Sid
2003 10 8.994636	06 55 18.342	+22 04 18.29	-0.05	-0.22	Sid
2003 10 19.027219	06 56 11.538	+22 01 49.87	0.02	0.17	Dev
2003 10 24.940161	06 56 32.192	+22 01 20.84	-0.13	0.33	Dev
2003 11 25.908551	06 53 59.873	+22 10 57.67	-0.11	0.11	Sid
2003 11 25.911530	06 53 59.823	+22 10 57.62	-0.21	-0.03	Sid
2004 01 2.897458	06 40 35.946	+22 24 07.23	-0.04	0.06	Bek
2004 01 2.899442	06 40 35.903	+22 24 07.32	-0.05	0.11	Bek
2004 01 3.971811	06 40 13.511	+22 24 28.13	-0.09	0.16	Gor
2004 01 23.870396	06 34 25.173	+22 33 23.82	-0.10	0.23	Dev
2004 02 10.957717	06 30 21.434	+22 42 48.92	0.14	0.25	Sid
2004 02 12.903999	06 29 57.990	+22 43 37.20	0.20	0.16	Bek
2004 02 19.878139	06 28 40.118	+22 45 56.23	0.09	0.61	Dev
2004 03 6.917411	06 26 44.665	+22 47 36.74	0.13	-0.24	Gor
2004 03 9.912162	06 26 37.943	+22 47 30.05	0.11	0.21	Sid
2004 03 9.914556	06 26 37.932	+22 47 30.09	-0.00	0.25	Sid
2004 03 9.917574	06 26 37.931	+22 47 30.25	0.04	0.43	Sid
2004 03 11.862362	06 26 36.744	+22 47 23.15	0.21	0.19	Dev
2004 03 12.849165	06 26 37.134	+22 47 19.20	0.29	0.25	Dev
2004 03 12.852237	06 26 37.131	+22 47 19.24	0.23	0.30	Dev
2004 03 13.865146	06 26 38.199	+22 47 14.29	-0.26	-0.39	Gor
2004 03 19.734287	06 26 59.271	+22 46 49.07	-0.20	-0.43	Bek
2004 03 19.735849	06 26 59.288	+22 46 49.18	-0.08	-0.31	Bek
2004 03 28.770828	06 28 20.446	+22 46 30.10	-0.02	0.05	Kou
2004 03 29.795888	06 28 33.129	+22 46 30.30	-0.22	0.04	Ale
2004 03 30.790853	06 28 46.105	+22 46 31.25	0.01	0.23	Sid
2004 04 1.753996	06 29 13.387	+22 46 33.97	0.15	0.08	Dev
2004 04 2.828525	06 29 29.208	+22 46 35.95	-0.17	-0.23	Bek
2004 04 3.775637	06 29 43.711	+22 46 38.61	0.04	-0.12	Gor
2004 04 4.839963	06 30 00.540	+22 46 41.39	0.29	-0.40	Kou
2004 04 13.774694	06 32 40.975	+22 47 18.33	-0.02	-0.16	Sid
2004 04 15.825659	06 33 21.722	+22 47 26.86	0.02	0.12	Ale
2004 04 16.816559	06 33 41.804	+22 47 30.38	-0.20	0.01	Bek
2004 04 17.800917	06 34 02.021	+22 47 33.72	-0.06	0.03	Gor
2004 04 18.791451	06 34 22.572	+22 47 36.61	-0.04	-0.06	Kou
2004 04 18.807387	06 34 22.915	+22 47 36.77	0.12	0.08	Kou
2004 04 20.799341	06 35 04.889	+22 47 41.07	0.02	-0.01	Sid
2004 04 24.843660	06 36 32.338	+22 47 42.25	0.30	-0.01	Gor
2004 04 26.818137	06 37 15.898	+22 47 38.33	0.01	0.10	Ale
2004 05 7.839373	06 41 27.349	+22 46 01.16	-0.37	0.14	Dev
2003 09 9.038405	06 49 14.908	+22 15 01.35	-0.23	0.32	Kou
2003 10 8.987132	06 55 18.294	+22 04 18.77	-0.06	0.12	Sid
2003 10 8.994636	06 55 18.342	+22 04 18.29	-0.05	-0.22	Sid
2003 10 19.027219	06 56 11.538	+22 01 49.87	0.02	0.17	Dev
2003 10 24.940161	06 56 32.192	+22 01 20.84	-0.13	0.33	Dev
2003 11 25.908551	06 53 59.873	+22 10 57.67	-0.11	0.11	Sid
2003 11 25.911530	06 53 59.823	+22 10 57.62	-0.21	-0.03	Sid

Таблица 6 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha} \cos \delta$ "	(O-C) $_{\delta}$ "	Набл.
2004 01 2.897458	06 40 35.946	+22 24 07.23	-0.04	0.06	Bek
2004 01 2.899442	06 40 35.903	+22 24 07.32	-0.05	0.11	Bek
2004 01 3.971811	06 40 13.511	+22 24 28.13	-0.09	0.16	Gor
2004 01 23.870396	06 34 25.173	+22 33 23.82	-0.10	0.23	Dev
2004 02 10.957717	06 30 21.434	+22 42 48.92	0.14	0.25	Sid
2004 02 12.903999	06 29 57.990	+22 43 37.20	0.20	0.16	Bek
2004 02 19.878139	06 28 40.118	+22 45 56.23	0.09	0.61	Dev
2004 03 6.917411	06 26 44.665	+22 47 36.74	0.13	-0.24	Gor
2004 03 9.912162	06 26 37.943	+22 47 30.05	0.11	0.21	Sid
2004 03 9.914556	06 26 37.932	+22 47 30.09	-0.00	0.25	Sid
2004 03 9.917574	06 26 37.931	+22 47 30.25	0.04	0.43	Sid
2004 03 11.862362	06 26 36.744	+22 47 23.15	0.21	0.19	Dev
2004 03 12.849165	06 26 37.134	+22 47 19.20	0.29	0.25	Dev
2004 03 12.852237	06 26 37.131	+22 47 19.24	0.23	0.30	Dev
2004 03 13.865146	06 26 38.199	+22 47 14.29	-0.26	-0.39	Gor
2004 03 19.734287	06 26 59.271	+22 46 49.07	-0.20	-0.43	Bek
2004 03 19.735849	06 26 59.288	+22 46 49.18	-0.08	-0.31	Bek
2004 03 28.770828	06 28 20.446	+22 46 30.10	-0.02	0.05	Kou
2004 03 29.795888	06 28 33.129	+22 46 30.30	-0.22	0.04	Ale
2004 03 30.790853	06 28 46.105	+22 46 31.25	0.01	0.23	Sid
2004 04 1.753996	06 29 13.387	+22 46 33.97	0.15	0.08	Dev
2004 04 2.828525	06 29 29.208	+22 46 35.95	-0.17	-0.23	Bek
2004 04 3.775637	06 29 43.711	+22 46 38.61	0.04	-0.12	Gor
2004 04 4.839963	06 30 00.540	+22 46 41.39	0.29	-0.40	Kou
2004 04 13.774694	06 32 40.975	+22 47 18.33	-0.02	-0.16	Sid
2004 04 15.825659	06 33 21.722	+22 47 26.86	0.02	0.12	Ale
2004 04 16.816559	06 33 41.804	+22 47 30.38	-0.20	0.01	Bek
2004 04 17.800917	06 34 02.021	+22 47 33.72	-0.06	0.03	Gor
2004 04 18.791451	06 34 22.572	+22 47 36.61	-0.04	-0.06	Kou
2004 04 18.807387	06 34 22.915	+22 47 36.77	0.12	0.08	Kou
2004 04 20.799341	06 35 04.889	+22 47 41.07	0.02	-0.01	Sid
2004 04 24.843660	06 36 32.338	+22 47 42.25	0.30	-0.01	Gor
2004 04 26.818137	06 37 15.898	+22 47 38.33	0.01	0.10	Ale
2004 05 7.839373	06 41 27.349	+22 46 01.16	-0.37	0.14	Dev

Таблица 7. Феба (S9).  
Результаты наблюдений 1999.10–2004.04

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	(O-C) $_{\alpha} \cos \delta$ "	(O-C) $_{\delta}$ "	Набл.
1999 1 8.759215	01 45 26.033	+08 13 51.93	-0.81	0.50	Dev
1999 2 10.683906	01 50 34.236	+08 51 24.32	0.52	-0.52	Dev
1999 10 29.806640	02 49 54.833	+13 34 33.04	-0.22	0.21	Kor
1999 10 31.972057	02 49 17.297	+13 31 51.48	-0.69	0.37	Dev
2000 1 22.754434	02 36 16.827	+12 52 20.25	0.05	0.29	Dev
2000 2 25.770538	02 43 08.879	+13 34 44.54	-0.43	-0.34	Gor
2000 9 24.013951	03 56 15.072	+18 04 59.74	-0.47	-0.43	Dev
2000 9 29.025264	03 55 37.990	+18 02 08.02	-0.34	-0.25	Dev
2000 10 2.050976	03 55 10.472	+18 00 11.08	-0.03	0.65	Kou
2000 10 2.980201	03 55 01.296	+17 59 32.51	0.16	0.39	Gor
2000 10 6.051432	03 54 28.376	+17 57 19.47	0.01	0.38	Dev
2000 10 10.035762	03 53 40.263	+17 54 12.22	-0.09	0.37	Gor
2000 10 17.957907	03 51 47.735	+17 47 15.14	0.43	0.20	Sid
2000 10 19.924233	03 51 16.548	+17 45 23.33	-0.04	0.28	Dev
2000 10 20.986897	03 50 59.184	+17 44 21.90	-0.33	0.54	Sa

Таблица 7 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_\alpha \cos \delta$ "	$(O-C)_\delta$ "	Набл.
2000 11 17.865870	03 41 59.359	+17 14 04.71	-0.25	0.19	Dev
2000 11 25.925759	03 39 11.520	+17 05 08.93	0.27	0.14	Sid
2000 11 27.886889	03 38 31.237	+17 03 02.72	-0.31	0.33	Gor
2000 12 27.675490	03 29 57.231	+16 38 13.19	0.25	0.13	Sid
2000 12 28.939505	03 29 41.408	+16 37 35.31	0.27	0.43	Sid
2001 1 16.882736	03 27 06.051	+16 33 25.15	0.43	-0.46	Sid
2001 1 22.855586	03 26 50.830	+16 34 19.62	-0.29	0.65	Gor
2001 1 23.770386	03 26 50.065	+16 34 33.18	0.33	0.22	Kor
2001 2 25.784978	03 30 44.433	+16 58 58.75	-0.01	0.56	Sid
2001 3 7.791211	03 33 30.579	+17 11 42.90	0.36	0.03	Sid
2001 3 8.777345	03 33 49.000	+17 13 04.35	-0.87	-0.25	Dev
2001 3 9.811121	03 34 08.818	+17 14 31.90	-0.46	0.60	Sid
2001 3 18.837548	03 37 18.103	+17 27 53.36	0.72	-0.25	Kou
2001 3 20.765768	03 38 02.122	+17 30 54.24	0.01	-0.27	Sid
2001 3 21.780778	03 38 25.740	+17 32 30.73	-0.99	-0.06	Sid
2001 3 24.778707	03 39 37.670	+17 37 19.56	-0.55	-0.25	Sid
2001 3 25.796980	03 40 02.803	+17 38 59.77	0.54	0.37	Kou
2001 3 27.807119	03 40 53.153	+17 42 18.16	0.06	0.19	Kor
2001 4 2.779303	03 43 29.653	+17 52 20.89	-0.10	-0.27	Gor
2001 8 24.034029	04 53 25.813	+20 51 24.90	0.44	0.54	Sid
2001 8 27.996098	04 54 23.303	+20 52 31.63	0.20	0.30	Sid
2001 8 30.996562	04 55 02.445	+20 53 13.60	0.09	0.15	Sid
2001 8 31.014062	04 55 02.650	+20 53 14.07	-0.06	0.38	Sid
2001 9 6.973710	04 56 18.320	+20 54 24.12	0.32	0.63	Sid
2001 9 25.963702	04 57 50.700	+20 54 24.65	-0.10	0.49	Sid
2001 9 29.016578	04 57 49.423	+20 53 59.94	-0.09	0.36	Sid
2001 9 30.974721	04 57 46.228	+20 53 39.55	-0.70	-0.73	Kou
2001 10 9.885947	04 57 08.770	+20 51 40.03	-0.26	0.12	Sid
2001 10 20.026784	04 55 41.179	+20 48 20.17	0.10	0.25	Gri
2001 10 21.833871	04 55 20.773	+20 47 37.03	-0.64	-0.46	Sid
2001 10 24.866332	04 54 43.516	+20 46 22.37	-0.49	0.18	Sid
2001 11 21.861507	04 46 32.850	+20 31 19.82	-0.47	-0.32	Dev
2001 12 12.964061	04 38 55.972	+20 18 03.51	-0.42	0.01	Sid
2001 12 17.967752	04 37 10.158	+20 15 03.10	-0.41	-0.01	Gor
2001 12 20.931840	04 36 09.352	+20 13 21.02	-0.14	0.32	Dev
2001 12 23.938227	04 35 09.471	+20 11 41.28	0.58	0.39	Kou
2002 1 6.897970	04 31 02.290	+20 05 10.04	0.12	0.41	Kou
2002 3 15.843209	04 30 18.546	+20 17 45.20	0.03	0.24	Sid
2002 3 30.790672	04 34 39.240	+20 29 43.51	0.04	0.40	Sid
2002 4 2.772647	04 35 40.757	+20 32 20.03	-0.03	0.03	Dev
2002 9 19.982158	05 53 23.127	+22 05 54.50	-0.05	0.22	Sid
2002 11 30.012102	05 48 28.691	+22 06 30.76	0.12	0.13	Sid
2002 11 30.930714	05 48 12.163	+22 06 31.60	0.12	0.22	Dev
2002 12 2.033839	05 47 52.023	+22 06 32.46	0.16	0.33	Sid
2002 12 8.007984	05 45 58.998	+22 06 35.96	-0.02	0.44	Kou
2002 12 11.026866	05 44 59.853	+22 06 37.00	0.08	0.19	Kor
2002 12 12.773463	05 44 25.241	+22 06 37.71	-0.07	0.33	Dev
2002 12 16.969728	05 43 01.064	+22 06 38.79	0.23	0.27	Gor
2002 12 24.891187	05 40 21.483	+22 06 40.07	0.07	0.35	Kor
2002 12 27.871999	05 39 22.133	+22 06 40.34	-0.03	0.23	Sid
2002 12 30.985484	05 38 21.052	+22 06 41.05	-0.20	0.27	Gor
2003 1 1.864387	05 37 44.888	+22 06 41.37	0.04	-0.02	Sid
2003 1 2.811876	05 37 26.866	+22 06 41.83	0.36	0.09	Dev
2003 1 6.907769	05 36 10.695	+22 06 44.60	0.32	0.35	Gor
2003 1 10.858033	05 35 00.739	+22 06 48.60	0.29	0.34	Sid
2003 1 12.740613	05 34 28.779	+22 06 51.21	-0.03	0.41	Kou

Таблица 7 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2003 1 13.867075	05 34 10.092	+22 06 53.14	0.03	0.53	Gor
2003 1 16.963761	05 33 20.685	+22 06 58.93	0.06	0.34	Dev
2003 1 19.918667	05 32 36.365	+22 07 06.33	0.26	0.44	Kou
2003 2 1.802787	05 29 59.668	+22 08 00.71	-0.05	0.15	Dev
2003 2 3.821583	05 29 41.117	+22 08 13.21	-0.09	0.05	Gor
2003 2 4.768508	05 29 33.041	+22 08 19.90	0.01	0.41	Dev
2003 2 14.744374	05 28 31.985	+22 09 43.13	-0.61	-0.08	Sid
2003 2 15.772207	05 28 28.310	+22 09 53.97	0.11	0.28	Gor
2003 2 27.730589	05 28 21.162	+22 12 20.39	0.09	0.34	Sid
2003 3 2.740359	05 28 29.906	+22 13 04.61	0.13	0.65	Sid
2003 3 3.755287	05 28 33.804	+22 13 19.67	0.02	0.26	Gor
2003 3 5.764277	05 28 42.950	+22 13 51.33	0.15	0.53	Le
2003 3 6.766953	05 28 48.194	+22 14 07.15	-0.11	0.25	Sid
2003 3 7.752073	05 28 53.840	+22 14 23.29	0.14	0.31	Sid
2003 3 8.742132	05 28 59.928	+22 14 39.73	-0.08	0.28	Dev
2003 3 9.749362	05 29 06.573	+22 14 56.79	-0.32	0.36	Dev
2003 3 20.829542	05 30 49.600	+22 18 18.49	-0.13	0.27	Sid
2003 3 21.802079	05 31 01.181	+22 18 37.26	0.03	0.18	Sid
2003 3 25.771410	05 31 52.467	+22 19 55.68	0.17	0.38	Dev
2003 3 27.745419	05 32 20.331	+22 20 35.53	-0.20	0.61	Sid
2003 3 28.856630	05 32 36.773	+22 20 57.59	0.66	0.32	Sid
2003 3 30.783838	05 33 06.340	+22 21 37.15	0.50	0.55	Kou
2003 4 1.788862	05 33 38.639	+22 22 18.12	0.54	0.53	Dev
2003 4 2.807183	05 33 55.559	+22 22 38.30	-0.39	-0.23	Dev
2003 4 12.801147	05 37 02.276	+22 26 04.59	0.55	0.55	Gor
2003 4 19.802679	05 39 32.800	+22 28 23.89	-0.21	-0.04	Kou
2003 4 21.828627	05 40 19.161	+22 29 03.49	-0.25	0.33	Gor
2003 09 24.076283	06 50 58.733	+22 08 41.03	-0.15	0.24	Sid
2003 09 25.018968	06 51 11.252	+22 08 24.36	-0.52	0.48	Sid
2003 10 8.981310	06 53 33.263	+22 05 04.22	0.07	0.22	Sid
2003 10 19.033522	06 54 22.288	+22 03 47.00	-0.27	0.21	Dev
2003 10 20.045498	06 54 24.668	+22 03 42.77	-0.08	0.29	Kou
2003 10 24.920725	06 54 29.463	+22 03 30.15	0.46	-0.58	Dev
2003 10 30.105250	06 54 22.191	+22 03 35.57	-0.38	-0.08	Sid
2003 11 8.119565	06 53 40.222	+22 04 26.11	0.14	0.04	Bek
2003 11 25.958512	06 50 33.310	+22 08 32.53	-0.23	0.27	Sid
2003 11 25.972470	06 50 33.117	+22 08 32.82	-0.15	0.30	Sid
2003 11 25.980212	06 50 33.009	+22 08 32.97	-0.12	0.30	Sid
2003 12 9.038769	06 47 02.398	+22 13 11.44	-0.16	0.20	Ale
2003 12 9.079019	06 47 01.661	+22 13 12.35	-0.22	0.18	Ale
2003 12 9.866845	06 46 47.445	+22 13 31.01	-0.35	0.19	Sid
2003 12 9.876638	06 46 47.280	+22 13 31.29	-0.14	0.23	Sid
2003 12 30.876114	06 39 49.930	+22 22 28.51	-0.72	0.43	Bek
2004 01 2.823409	06 38 49.142	+22 23 45.39	-0.07	0.18	Bek
2004 01 3.965624	06 38 25.617	+22 24 14.89	-0.19	-0.04	Gor
2004 01 24.683045	06 31 50.820	+22 32 42.39	-0.55	0.14	Gor
2004 01 23.864453	06 32 04.643	+22 32 23.89	0.09	0.02	Dev
2004 02 10.946507	06 27 53.628	+22 38 34.41	0.22	0.41	Sid
2004 02 12.898060	06 27 34.226	+22 39 09.10	-0.23	0.17	Bek
2004 02 19.862459	06 26 39.074	+22 41 05.13	0.30	-0.13	Dev
2004 02 21.847545	06 26 27.488	+22 41 36.49	0.24	0.46	Gor
2004 02 25.746918	06 26 10.312	+22 42 33.26	0.19	-0.15	Sid
2004 03 28.774278	06 28 31.690	+22 47 29.49	-0.05	0.37	Kou
2004 03 4.805710	06 25 58.478	+22 44 18.16	0.38	-0.02	Dev
2004 03 9.739286	06 26 07.138	+22 45 12.44	0.59	-0.36	Sid
2004 03 11.859245	06 26 14.472	+22 45 34.09	0.02	0.13	Dev

Таблица 7 (продолжение)

Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$ "	$(O-C)_{\delta}$ "	Набл.
2004 03 12.849165	06 26 18.737	+22 45 43.83	0.80	0.50	Dev
2004 03 13.861041	06 26 23.512	+22 45 52.88	0.44	0.23	Gor
2004 03 30.824805	06 28 57.459	+22 47 35.98	0.23	0.16	Sid
2004 04 13.774694	06 32 40.465	+22 47 33.84	-0.07	-0.08	Sid
2004 04 15.823065	06 33 19.848	+22 47 26.54	0.24	0.48	Ale
2004 04 20.799341	06 35 02.009	+22 46 58.50	-0.01	0.29	Sid
2004 04 26.814483	06 37 17.173	+22 46 06.62	0.22	-0.37	Ale
2003 09 24.076283	06 50 58.733	+22 08 41.03	-0.15	0.24	Sid
2003 09 25.018968	06 51 11.252	+22 08 24.36	-0.52	0.48	Sid
2003 10 8.981310	06 53 33.263	+22 05 04.22	0.07	0.22	Sid
2003 10 19.033522	06 54 22.288	+22 03 47.00	-0.27	0.21	Dev
2003 10 20.045498	06 54 24.668	+22 03 42.77	-0.08	0.29	Kou
2003 10 24.920725	06 54 29.463	+22 03 30.15	0.46	-0.58	Dev
2003 10 30.105250	06 54 22.191	+22 03 35.57	-0.38	-0.08	Sid
2003 11 8.119565	06 53 40.222	+22 04 26.11	0.14	0.04	Bek
2003 11 25.958512	06 50 33.310	+22 08 32.53	-0.23	0.27	Sid
2003 11 25.972470	06 50 33.117	+22 08 32.82	-0.15	0.30	Sid
2003 11 25.980212	06 50 33.009	+22 08 32.97	-0.12	0.30	Sid
2003 12 9.038769	06 47 02.398	+22 13 11.44	-0.16	0.20	Ale
2003 12 9.079019	06 47 01.661	+22 13 12.35	-0.22	0.18	Ale
2003 12 9.866845	06 46 47.445	+22 13 31.01	-0.35	0.19	Sid
2003 12 9.876638	06 46 47.280	+22 13 31.29	-0.14	0.23	Sid
2003 12 30.876114	06 39 49.930	+22 22 28.51	-0.72	0.43	Bek
2004 01 2.823409	06 38 49.142	+22 23 45.39	-0.07	0.18	Bek
2004 01 3.965624	06 38 25.617	+22 24 14.89	-0.19	-0.04	Gor
2004 01 24.683045	06 31 50.820	+22 32 42.39	-0.55	0.14	Gor
2004 01 23.864453	06 32 04.643	+22 32 23.89	0.09	0.02	Dev
2004 02 10.946507	06 27 53.628	+22 38 34.41	0.22	0.41	Sid
2004 02 12.898060	06 27 34.226	+22 39 09.10	-0.23	0.17	Bek
2004 02 19.862459	06 26 39.074	+22 41 05.13	0.30	-0.13	Dev
2004 02 21.847545	06 26 27.488	+22 41 36.49	0.24	0.46	Gor
2004 02 25.746918	06 26 10.312	+22 42 33.26	0.19	-0.15	Sid
2004 03 28.774278	06 28 31.690	+22 47 29.49	-0.05	0.37	Kou
2004 03 4.805710	06 25 58.478	+22 44 18.16	0.38	-0.02	Dev
2004 03 9.739286	06 26 07.138	+22 45 12.44	0.59	-0.36	Sid
2004 03 11.859245	06 26 14.472	+22 45 34.09	0.02	0.13	Dev
2004 03 12.849165	06 26 18.737	+22 45 43.83	0.80	0.50	Dev
2004 03 13.861041	06 26 23.512	+22 45 52.88	0.44	0.23	Gor
2004 03 30.824805	06 28 57.459	+22 47 35.98	0.23	0.16	Sid
2004 04 13.774694	06 32 40.465	+22 47 33.84	-0.07	-0.08	Sid
2004 04 15.823065	06 33 19.848	+22 47 26.54	0.24	0.48	Ale
2004 04 20.799341	06 35 02.009	+22 46 58.50	-0.01	0.29	Sid
2004 04 26.814483	06 37 17.173	+22 46 06.62	0.22	-0.37	Ale

Таблица 8. Средние значения и ошибки наблюдений

Спутник	N	$\overline{(O-C)_{\alpha} \cos \delta}$	$\sigma_{\alpha} \cos \delta$	$\overline{(O-C)_{\delta}}$	$\sigma_{\delta}$
Гималия	219	+0".08	±0".29	+0".26	±0".29
Элара	151	+0.13	±0.32	+0.24	±0.32
Пасифе	131	+0.11	±0.37	+0.21	±0.38
Тиган	18	+0.05	±0.26	+0.41	±0.22
Гиперион	155	+0.04	±0.33	+0.25	±0.31
Япет	167	0.00	±0.26	+0.20	±0.31
Феба	170	-0.01	±0.34	+0.19	±0.28

### Основные результаты

Выполнены и обработаны наблюдения спутников Юпитера и Сатурна. Сделана оценка точности этих наблюдений, средние значения которой составляют по прямому восхождению и склонению  $0''.3$ .

Авторы выражают свою благодарность В.К. Абалакину за помощь в получении электронной копии каталога USNO B1.0 и А. Саловатовой, А. Лемесевой, Н. Михайловой, И. Григорьевой за участие в наблюдениях.

### Литература

1. *Бекяшев 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.
2. *Десяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Свидунович А.Г.* Астрометрические наблюдения спутников Сатурна на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1998-1999 гг.// Изв. ГАО, 2000, № 214, с.382-386.
3. *Десяткин 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. *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.П. // Изв. ГАО, данный сборник.
5. *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 зеркальном астрографе ЗА-320 // Изв. ГАО, 2002, № 216, с.128-156.
6. [telnet://ssd.jpl.nasa.gov](mailto:telnet://ssd.jpl.nasa.gov)

### ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF SATELLITES OF JUPITER AND SATURN ON MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 1999-2004

**Devyatkin A.V., Aleshkina E. Yu., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Bekhteva A.S., Baturina G.D., Kornilov E.V., Sidorov M.Yu.**

#### *Summary*

*Astrometric observations in 1999-2004 of Jupiter's satellites Himalia, Elara and Pasiphae and of Saturn's satellites Titan, Hyperion, Yapetus and Phoebe were made in Pulkovo Observatory with ZA-320 Mirror Astrograph. Processing of the observations was done by means of APEX program system in USNO-A2.0 and USNO-B1.0 catalogues system in view of chromatic refraction.*

## **НАБЛЮДЕНИЯ ВЗАИМНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320 В 2002-2003 гг.**

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л.**

*Проведены наблюдения взаимных явлений в системе спутников Юпитера. Получены 24 фотометрические кривые этих явлений. Проведена интерпретация наблюдений и определены минимальные расстояния между спутниками и соответствующие им моменты времени.*

### **Наблюдения**

С октября 2002 по май 2003 гг. на телескопе ЗА-320 Пулковской обсерватории (Бекашев и др., 1998) велись наблюдения взаимных явлений в системе спутников Юпитера. Наблюдались взаимные затмения и покрытия четырёх галилеевых спутников. Целью наблюдений являлось получение кривой блеска явления — относительного ослабления блеска затмеваемого или покрываемого спутника.

При наблюдениях использовалась та же аппаратура, что и в предыдущей аналогичной работе, выполненной в 1997 г. (Девяткин, Грицук, Свидуневич, 1998). Наблюдения начинались примерно за 10 минут до предвычисленного момента наибольшей фазы явления и заканчивались примерно через 10 минут после него. Точность фиксации моментов была лучше 0.1 сек. Длительность экспозиций была 0.1-0.4 сек. Из 44 попыток наблюдения явлений удачными оказались 24, что связано, в основном, с погодой.

В настоящей работе для повышения точности фотометрии размеры кадра выбирались такими, чтобы в кадр попадал не только исследуемый спутник, но и другие объекты (другие спутники и звёзды сравнимой яркости), если таковые оказывались на расстоянии 2–3 угловых минут. Блеск объектов, так же как и ранее, измерялся в интегральной полосе инструмента (300–900 нм).

### **Обработка**

Каждый присутствующий на кадрах объект измерялся при помощи двух вложенных прямоугольных апертур. Внутренняя апертура располагалась на кадре так, чтобы в неё попадали все пиксели, освещённые светом объекта. Внешняя служила для определения уровня фона вокруг объекта. Для каждого пикселя внутренней апертуры определялось индивидуальное значение фона следующим образом. Отсчёты всех пикселей, попадающих в прямоугольную кольцевую зону вокруг объекта (т.е. находящиеся внутри внешней апертуры, но вне внутренней), усреднялись с весом обратно пропорциональным расстоянию пикселя фона от данного пикселя объекта:

$$F_{kl} = \frac{\sum_i \sum_j F_{ij} p_{(kl)ij}}{\sum_i \sum_j p_{(kl)ij}}, \quad p_{(kl)ij} = \frac{1}{1 + \sqrt{(i-k)^2 + (j-l)^2}}.$$

Здесь  $F_{ij}$  — отсчёты пикселей с координатами на матрице  $(i, j)$ , входящие в кольцевую зону;

$F_{kl}$  — предполагаемый (вычисляемый) уровень фона для пикселя с координатами  $(k, l)$  из апертуры объекта.

Затем полученное значение фона  $F_{kl}$  вычиталось из отсчёта  $O_{kl}$  пиксела, находящегося во внутренней апертуре. Все значения таких пикселей суммировались, и совершался переход к шкале звёздных величин:

$$m = -2.5 \lg \sum_k \sum_l (O_{kl} - F_{kl})$$

Затем вычислялись разности между посчитанными таким способом значениями блеска исследуемого спутника и всех других объектов, попавших в кадр. Все такие разности усреднялись для каждого кадра:

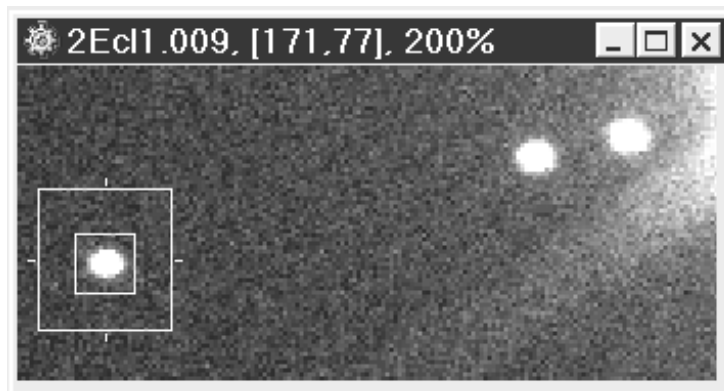
$$\overline{\Delta m} = \frac{\sum_i^n (m_l - m_i)}{n}$$

( $m_l$  — блеск исследуемого спутника,  $m_i$  — блеск  $i$ -го объекта сравнения,  $n$  — число объектов сравнения).

Вычисленная таким образом величина  $\overline{\Delta m}$  в идеале должна оставаться постоянной от кадра к кадру. Её изменения обусловлены:

- во-первых, атмосферным и аппаратным шумами,
- во-вторых, изменением атмосферной экстинкции, которое предполагается одинаковым для всех объектов (без учёта их цвета, т.к. изменения селективной прозрачности атмосферы и воздушной массы за 20–25 минут наблюдения должны быть невелики),
- в-третьих, изменением блеска исследуемого объекта во время явления (блеск объектов сравнения предполагается постоянным).

Использование объектов сравнения, находящихся на том же кадре, что и исследуемый спутник, позволяет избавиться от изменений атмосферной экстинкции, а наличие на кадре нескольких таких объектов (когда это возможно) несколько уменьшает влияние шумов. На рис.1 показан пример кадра, снятого при наблюдениях явления 26 марта 2003 г. (Европа затмевает Ио).



**Рис.1.** ПЗС-кадр, снятый при наблюдениях явления 2003-03-26 (Европа затмевает Ио). Объекты на кадре (слева направо): Каллисто, Европа, Ио. Видна засветка от Юпитера. Показано расположение апертур при фотометрировании изображений объектов.

Посчитанная указанным выше способом средняя разность блеска между исследуемым объектом и объектами сравнения  $\overline{\Delta m}$  определялась для каждого кадра. Кривая зависимости её от времени приводилась к нулю: по участкам кривой до и после явления определялось среднее значение этой величины, которое вычиталось из значений,



определённых для каждого кадра. Полученная таким образом кривая и использовалась в моделировании явления.

При покрытиях покрываемый и покрывающий спутники задолго до начала явления подходили друг к другу настолько близко, что их изображения сливались. Поэтому в процессе наблюдений определялось изменение их суммарного блеска.

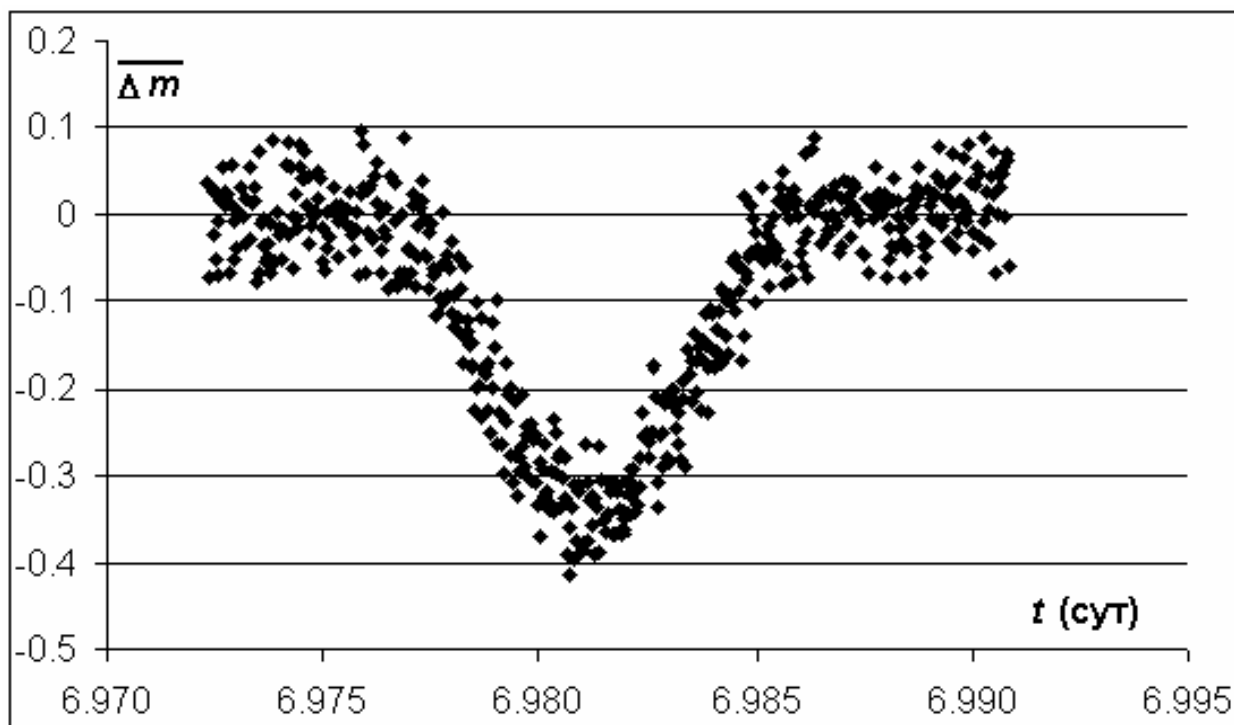
### Результаты наблюдений

На рисунках 2 и 3 представлены графики относительного изменения блеска объектов при явлениях, полученные в удачные наблюдательные ночи.

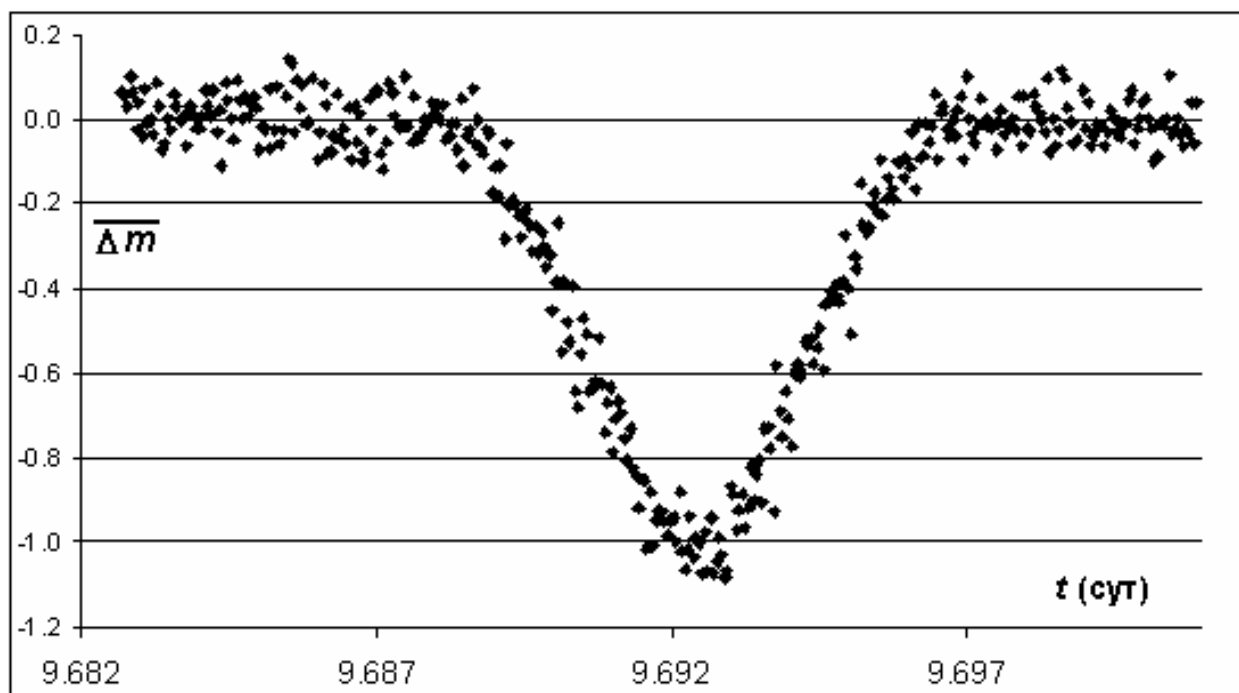
На рис.4 показан интересный случай, когда вблизи наблюдаемого объекта не оказалось объектов сравнения, и вместо них пришлось использовать фон неба. В силу удачного стечения обстоятельств, хотя объект был довольно низко (восходил), прозрачность атмосферы в этот момент была весьма стабильной (но невысокой — дымка). Поэтому удалось провести тренд по участкам кривой до и после явления и затем вычесть его.

Интерпретация наблюдений выполнена в соответствии с работами (Девяткин, 1997; Девяткин, 1998; Девяткин, 1988; Девяткин, 1991a; Девяткин, 1991; Devyatkin A.V., 1999). При этом было учтено влияние закона отражения света поверхностью спутников Юпитера, фотометрической неоднородности их поверхности, эффекта фазы и распределения освещенности в полутени спутника (с учетом распределения яркости по диску Солнца) на фотометрическую кривую покрытия или затмения одного спутника другим.

В таблице 1 представлено сравнение результатов наших наблюдений с эфемеридами, рассчитанными Ж.-Е.Арло (Arlot J.-E., 2002) и Н.В.Емельяновым (Емельянов, 2000). В первом столбце указаны дата события и особенности погоды во время наблюдений, которые могли повлиять на их точность. Во втором столбце приводится тип явления: затмение (E – eclipse) или покрытие (O – occultation). Цифрами указаны спутники, участвующие в явлении: 1 – Ио, 2 – Европа, 3 – Ганимед, 4 – Каллисто. Первая цифра обозначает затмевающий (покрывающий) спутник, вторая – затмеваемый (покрываемый). Под типом явления указано имя объекта, блеск которого определялся. Ещё ниже указаны имена объектов, использовавшихся в качестве опорных. Если таких объектов несколько, то они указываются через запятую. В случае, когда фотометрировалось слившееся изображение двух спутников, между их именами стоит знак «+». В третьем столбце указаны источники данных, которые приводятся в следующих столбцах. Это либо эфемериды, рассчитанные Ж.-Е.Арло или Н.В.Емельяновым, либо результаты нашей работы (наблюдения и моделирование на их основе). В следующем столбце приводятся моменты времени по шкале UTC, соответствующие наибольшей фазе явления: эфемеридные, либо полученные в данной работе. Для последних указана точность в секундах времени. Пятый столбец содержит величину максимального падения блеска объекта в звёздных величинах. Она получена путём сопоставления модельной кривой явления с кривой, полученной из наблюдений. В шестом столбце приведено максимальное падение объединённого блеска объектов, участвующих в явлении. Именно эта величина приводится в эфемеридах. В строке «Наблюдения» она указана только в том случае, когда измерялся блеск слившегося изображения двух объектов. Если по наблюдениям не удалось обнаружить никакого падения блеска, то в этой графе стоит словосочетание «НЕТ» (явление не произошло). В последнем столбце приведены значения наименьшего расстояния между центрами спутников в случае покрытия, либо между центром затмеваемого спутника и центром тени в случае затмения. Значения без скобок выражены в километрах, значения, стоящие в скобках, – в секундах дуги. Для значений, полученных в настоящей работе, также указана точность.



**Рис.2.** Пример удачного наблюдения затмения (Европа затмевает Ио) 6-7 января 2003 г.



**Рис.3.** Пример удачного наблюдения покрытия (Каллисто покрывает Европу) 9 марта 2003 г.

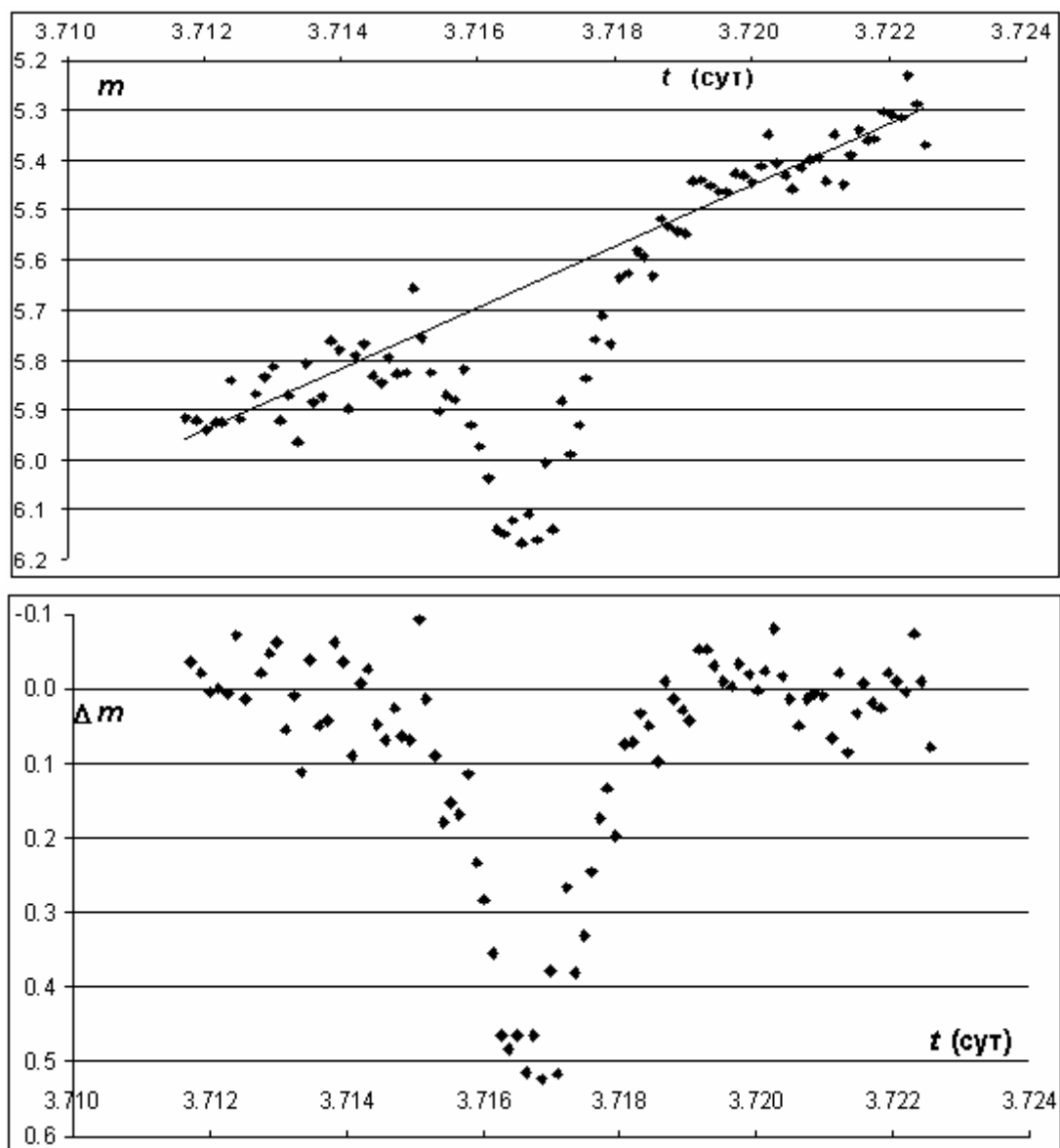


Рис.4. Покрытие (Каллисто покрывает Ио), наблюдавшееся 3 февраля 2003 г. без объектов сравнения.

Таблица 1. Результаты интерпретации наблюдений.

Дата события Условия наблюдений	Тип явления Объект Объекты сравн.	Автор	$t_{\min}$ (UTC) h m s	$\Delta m$ (mag)	$\Delta m_{\text{Общ.}}$ (mag)	$\Delta R$ км (")
2002-10-28	2 O 1	Arlot J.-E.	01 10 59.0		0.410	(0.102)
Плотные облака	Io + Europe	Емельянов Н.В.	01 10 56.0		0.546	
	Ganymede	Наблюдения	01 10 53.4 $\pm 11.1$	1.559 $\pm 0.041$	0.580	109 (0.028) $\pm 1492 (\pm 0.38)$
2002-12-07	1 O 4	Arlot J.-E.	22 17 31.0		0.343	(0.247)
Облака	Io + Callisto	Емельянов Н.В.	22 16 34.0		0.231	
	star (10 mag)	Наблюдения	22 16 46.3 $\pm 33.8$	0.774 $\pm 0.008$	0.240	1450 (0.418) $\pm 40 (\pm 0.011)$

Таблица 1 (продолжение)

Дата события Условия наблюдений	Тип явления Объект Объекты сравн.	Автор	$t_{\min}$ (UTC) h m s	$\Delta m$ (mag)	$\Delta m_{\text{Общ.}}$ (mag)	$\Delta R$ км (")
<b>2002-12-13</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	02 22 57.0		0.624	(0."164)
Облака	Io	Емельянов Н.В.	02 22 54.0		0.490	
	Europe	Наблюдения	02 22 48.4 $\pm 1.8$	1.207 $\pm 0.031$		364 (0.106) $\pm 204 (\pm 0.059)$
<b>2002-12-28</b>	<b>2 O 1</b>	Arlot J.-E.	03 03 23.0		0.083	(0.745)
Облака	Io + Europe	Емельянов Н.В.	03 03 38.0		0.075	
	Ganymede	Наблюдения	03 03 56.4 $\pm 26.1$	0.047 $\pm 0.004$	0.070	2984 (0.908) $\pm 47 (\pm 0.014)$
<b>2002-12-30</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	20 44 54.0		0.584	(0.212)
Дымка	Io	Емельянов Н.В.	20 44 56.0		0.451	
	Europe	Наблюдения	20 44 59.0 $\pm 2.0$	1.088 $\pm 0.004$		509 (0.156) $\pm 11 (\pm 0.003)$
<b>2002-12-30</b>	<b>2 O 1</b>	Arlot J.-E.	22 33 55.0		0.000	
Дымка	Io+Europe	Емельянов Н.В.				
	Ganymede + + Callisto	Наблюдения			НЕТ	
<b>2002-12-30</b>	<b>4 O 3</b>	Arlot J.-E.	21 19 27.0		0.205	(0.747)
Дымка	Ganymede+ +Callisto	Емельянов Н.В.	21 19 04.0		0.336	
	Io+Europe	Наблюдения	21 19 09.8 $\pm 7.0$	0.524 $\pm 0.003$	0.370	2793 (0.855) $\pm 15 (\pm 0.005)$
<b>2003-01-06</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	23 32 47.0		0.449	(0.343)
Ясно	Io + Europe	Емельянов Н.В.	23 32 50.0		0.323	
	Ganymede	Наблюдения	23 32 45.3 $\pm 2.8$	0.733 $\pm 0.004$	0.370	1073 (0.333) $\pm 14 (\pm 0.004)$
<b>2003-01-07</b>	<b>2 O 1</b>	Arlot J.-E.	01 21 40.0		0.000	
Ясно	Io + Europe	Емельянов Н.В.				
	Ganymede	Наблюдения			НЕТ	
<b>2003-01-14</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	02 45 57.0		0.329	(0.451)
Ясно	Io + Europe	Емельянов Н.В.	02 46 08.0		0.231	
	Ganymede	Наблюдения	02 46 07.8 $\pm 7.8$	0.435 $\pm 0.004$	0.240	1619 (0.508) $\pm 14 (\pm 0.005)$
<b>2003-02-03</b>	<b>4 O 1</b>	Arlot J.-E.	17 12 08.0		0.361	(0.070)
Дымка	Io + Callisto	Емельянов Н.В.	17 11 43.0		1.113	
	Фон неба	Наблюдения	17 12 06.1 $\pm 41.0$	0.779 $\pm 0.030$	0.500	2475 (0.786) $\pm 70 (\pm 0.022)$
<b>2003-03-09</b>	<b>4 O 2</b>	Arlot J.-E.	16 37 10.0		0.293	(0.278)
Облака	Europe + Callisto	Емельянов Н.В.	16 36 32.0		0.930	
	Ganymede	Наблюдения	16 37 09.6 $\pm 3.6$	1.307 $\pm 0.008$	1.210	2085 (0.635) $\pm 31 (\pm 0.009)$
<b>2003-03-15</b>	<b>3 E 4</b>	Arlot J.-E.	22 14 49.0		0.649	(0.354)
Облака	Callisto	Емельянов Н.В.	22 14 20.0		0.237	
	Ganymede, Io	Наблюдения	22 14 44.9 $\pm 4.8$	1.039 $\pm 0.002$		1675 (0.502) $\pm 10 (\pm 0.003)$

Таблица 1 (продолжение)

Дата события Условия наблюдений	Тип явления Объект Объекты сравн.	Автор	$t_{\min}$ (UTC) h m s	$\Delta m$ (mag)	$\Delta m_{\text{Общ.}}$ (mag)	$\Delta R$ км (")
<b>2003-03-18</b>	<b>2 E 3</b>	Arlot J.-E.	20 46 53.0		0.353	(0.236)
Облака	Ganymede	Емельянов Н.В.	20 47 00.0		0.282	
	Io, Europe, Callisto	Наблюдения	20 46 55.0 $\pm 7.9$	0.451 $\pm 0.005$		843 (0.251) $\pm 210 (\pm 0.630)$
<b>2003-03-18</b>	<b>2 O 3</b>	Arlot J.-E.	17 42 28.0		0.157	(0.661)
Облака	Io+Ganymede	Емельянов Н.В.	17 42 35.0		0.165	
	Europe, Callisto	Наблюдения	17 43 06.1 $\pm 48.4$	0.165 $\pm 0.030$	0.220	2740 (0.815) $\pm 188 (\pm 0.056)$
<b>2003-03-24</b>	<b>1 E 3</b>	Arlot J.-E.	22 01 32.0		0.136	(0.815)
Тонкие Облака	Ganymede	Емельянов Н.В.	20 01 56.0		0.084	
	Io, Europe, Callisto	Наблюдения	22 01 48.4 $\pm 6.0$	0.134 $\pm 0.003$		3188 (0.935) $\pm 29 (\pm 0.008)$
<b>2003-03-25</b>	<b>1 E 3</b>	Arlot J.-E.	20 08 28.0		0.118	(0.852)
Ясно	Ganymede + + Europe	Емельянов Н.В.	20 08 39.0		0.075	
	Io	Наблюдения	20 08 29.9 $\pm 17.4$	0.139 $\pm 0.004$	0.080	3162 (0.922) $\pm 26 (\pm 0.008)$
<b>2003-03-25</b>	<b>2 O 3</b>	Arlot J.-E.	20 48 10.0		0.102	(0.804)
Ясно	Ganymede + + Europe	Емельянов Н.В.	20 48 14.0		0.104	
	Io	Наблюдения	20 48 09.0 $\pm 37.5$	0.183 $\pm 0.011$	0.120	2635 (0.768) $\pm 82 (\pm 0.024)$
<b>2003-03-26</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	20 40 56.0		0.181	(0.599)
Ясно	Io	Емельянов Н.В.	20 40 48.0		0.100	
	Europe, Callisto	Наблюдения	20 40 38.0 $\pm 16.0$	0.163 $\pm 0.003$		2420 (0.706) $\pm 20 (\pm 0.006)$
<b>2003-03-26</b>	<b>2 E 3</b>	Arlot J.-E.	00 09 26.0		0.314	(0.362)
Ясно	Ganymede	Емельянов Н.В.	00 09 32.0		0.257	
	Io, Europe	Наблюдения	00 09 26.7 $\pm 1.9$	0.406 $\pm 0.003$		1396 (0.408) $\pm 12 (\pm 0.004)$
<b>2003-04-01</b>	<b>1 E 3</b>	Arlot J.-E.	23 30 41.0		0.193	(0.714)
Ясно	Ganymede + + Europe	Емельянов Н.В.	23 30 46.0		0.131	
	Io	Наблюдения	23 30 22.1 $\pm 13.6$	0.122 $\pm 0.018$	0.160	3267 (0.933) $\pm 137 (\pm 0.039)$
<b>2003-04-02</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	22 58 01.0		0.296	(0.477)
Облака	Io	Емельянов Н.В.	22 57 52.0		0.182	
	Europe	Наблюдения	22 57 55.6 $\pm 7.9$	0.414 $\pm 0.012$		1656 (0.473) $\pm 40 (\pm 0.011)$
<b>2003-04-21</b>	<b>1 O 2</b>	Arlot J.-E.	21 29 23.0		0.247	(0.477)
Облака	Io + Europe	Емельянов Н.В.	21 29 07.0		0.104	
	Ganymede	Наблюдения	21 29 33.9 $\pm 22.3$	0.215 $\pm 0.027$	0.290	2505 (0.673) $\pm 206 (\pm 0.056)$
<b>2003-04-27</b>	<b>2 E 1</b>	Arlot J.-E.	18 53 40.0		0.662	(0.005)
Ясно	Io	Емельянов Н.В.	18 53 31.0		0.584	
	Europe, Ganymede	Наблюдения	18 53 25.6 $\pm 2.4$	0.718 $\pm 0.008$		1073 (0.284) $\pm 15 (\pm 0.004)$

Авторы выражают свою благодарность В.В. Куприянову за участие в наблюдениях.

### Литература

1. **Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Грицук А.Н., Кулиш А.П., Свидунович А.Г., Шумахер А.В., 1998**, Зеркальный астрограф ЗА-320 // Изв. ГАО, № 213, с.249–258.
2. **Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Куприянов В.В., Корнилов Э.В., 2002**, Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320 // Изв. ГАО, № 216, с.128–156.
3. **Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Куприянов В.В., Бехтева А.С., 2004**, Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II. // Изв. ГАО, данный сборник.
4. **Аллен К.У., 1977**, Астрофизические величины // М., Мир, 446 с.
5. **Arlot J.-E., 2002**, Circular BDL, NN 2–4.
6. **Девяткин А.В., Грицук А.Н., Свидунович А.Г., 1998**, Наблюдения взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1997 г. // Изв. ГАО, № 213, с.108–121.
7. **Девяткин А.В., Бобылев В.В., 1988**, Влияние фазы и неоднородности отражательной поверхности галилеевых спутников Юпитера на их координаты // Астрон. циркул., N 1533, с.23–24.
8. **Девяткин А.В., Бобылев В.В., 1991**, Фазовые эффекты в системе галилеевых спутников Юпитера // Изв. ГАО, № 207, с.67–72, (а).
9. **Девяткин А.В., 1991**, Учет эффекта фазы при обработке меридианных и фотографических наблюдений больших планет и их спутников // Автореф. канд. диссерт., Л., 11 с.
10. **Devyatkin A.V., 1999**, Influence of reflecting surface inhomogeneity of the Jupiter's and of the Saturn's satellites on determinations of their mutual distances// Proceedings of the 5<sup>th</sup> workshop PHEMU97, Italy, Catania, March 2-9, 1999, P.83-88.
11. **Емельянов Н.В., 1996**, Взаимные покрытия и затмения в системе галилеевых спутников Юпитера в 1997–1998 гг. // Астрон. вестник, т.30, N 5, с.413–421.
12. **Михайлов А.А., 1954**, Теория затмений // М., ГИТТЛ, 272 с.

### OBSERVATIONS OF MUTUAL EVENTS IN THE SYSTEM OF JUPITER'S GALLEAN SATELLITES WITH THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2002-2003

**Devyatkin A.V., Gorshanov D.L.**

#### *Summary*

*Observations of mutual events in the Jupiter's satellites system were made in Pulkovo Observatory with Kassegren mirror telescope ZA-320 ( $D = 320$  mm,  $F = 2700$  mm) equipped with SBIG ST-6 CCD camera. Minimum distances between centers of satellites or distances between center of satellite and center of penumbra and corresponding to the time moments were determined.*

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ  
УРАНА И СИСТЕМЫ ПЛУТОН–ХАРОН  
НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320 В 2002–2004 гг.**

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С.,  
Батурина Г.Д., Сидоров М.Ю.**

*Проведены астрометрические наблюдения планеты Уран и системы Плутон–Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в Пулкове. Получено 86 положений в системе каталогов USNO-A2.0 и USNO-B1.0. Обработка наблюдений проведена с использованием программной системы АПЕКС с учетом хроматической рефракции. В полученные положения системы Плутон–Харон введены поправки за переход от положения фотоцентра к барицентру. Точность наблюдений для системы Плутон–Харон оценивается величинами:  $\sigma_\alpha = 0.014'' \cos \delta$ ,  $\sigma_\delta = 0.15''$ , а для Урана:  $\sigma_\alpha = 0.028'' \cos \delta$ ,  $\sigma_\delta = 0.31''$ .*

На автоматическом комплексе зеркальном астрографе ЗА-320 с ПЗС-приемником ST-6 с 1999 г. ведутся астрометрические наблюдения системы Плутон–Харон (Девяткин, 2000; Девяткин, 2002) и с 2002 г. – Урана. Наблюдения проводились на зенитных расстояниях до  $76^\circ$ . При наблюдениях использовались экспозиции от  $60^s$  до  $200^s$  для системы Плутон–Харон и  $2^s$ – $10^s$  для Урана. Обработка наблюдений выполнена в среде программной системы АПЕКС (Девяткин, Грицук, 2000). Редукция наблюдений производилась методом 6 или 8 постоянных. На ПЗС-кадре выбирались от 4 до 60 опорных звезд из каталогов USNO-A2.0 или USNO-B1.0. Обработка наблюдений, полученных в 2003 г., была проведена в системе каталога USNO-A2.0, а в 2004 г. – в системе каталога USNO-B1.0. Для учета хроматической рефракции в положении системы Плутон–Харон использовалось значение показателя цвета  $B-V = 0.79$ , а для Урана –  $0.55$  (Аллен, 1977). 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 (Девяткин, 2000).

Ниже в таблицах 1–3 представлены результаты наблюдений системы Плутон–Харон. Прямые восхождения и склонения даны как топоцентрические координаты. Сравнение наблюдений произведено с теориями DE200 и DE405. Для вычисления эфемеридных положений и значений  $O-C$  использовалась программная система EPOS (Львов, Цекмейстер, Смехачева, 2000). В координаты системы Плутон–Харон введены поправки за приведение наблюдений к барицентру системы: в прямые восхождения –  $\Delta\alpha_f$  и склонения –  $\Delta\delta_f$ . В таблице 2 приведены данные о наблюдениях, полученных на ЗА-320 в 1999–2004 гг. Как видно из таблицы, средние значения  $(O-C)_\alpha$  при сравнении наблюдений с теорией DE200, достигли значения  $+4.6''$  и наблюдается лучшая сходимость при сравнении с теорией DE405. Оценка точности наблюдений (среднеквадратичные ошибки) сделана по отклонениям значений  $(O-C)$  от средних значений. В таблице 3 представлены результаты наблюдений планеты Уран.

**Таблица 1.** Топоцентрические астрометрические координаты системы Плутон–Харон, полученные в 2003–2004 гг.  
 (Н – наблюдатель: Gor – Горшанов Д.Л., Dev – Девяткин А.В., Kou – Куприянов В.В., Sid – Сидоров М.Ю.,  
 Ale – Алешкина Е.Ю., Век – Бехтева А.С., Lem – Лемесева А., Mik – Михайлова Н.)

Дата наблюдения, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$\Delta\alpha_f$ s	$\Delta\delta_f$ "	DE200 (O–C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE200 (O–C) $_{\delta}$ "	DE405 (O–C) $_{\alpha\cos\delta}$ "	DE405 (O–C) $_{\delta}$ "	Н
2002 08 15.823569	16 58 55.868	-12 49 27.66	-0.001	+0.03	+4.27	-0.10	+0.33	+0.75	Sid
2002 09 11.763008	16 59 01.857	-13 00 47.97	+0.001	+0.03	+4.18	-0.19	+0.27	+0.66	Sid
2003 02 03.175629	17 16 26.128	-13 47 03.30	-0.001	-0.01	+4.38	-0.14	+0.21	+0.68	Kou
2003 02 04.193960	17 16 32.366	-13 47 00.59	-0.001	+0.03	+4.44	-0.13	+0.26	+0.69	Gor
2003 02 16.140946	17 17 36.803	-13 46 05.72	-0.002	0.00	+4.75	-0.74	+0.54	+0.08	Gor
2003 03 03.150301	17 18 32.889	-13 44 01.45	0.000	+0.03	+4.43	-0.43	+0.16	+0.39	Dev
2003 03 04.133549	17 18 35.532	-13 43 51.43	+0.002	0.00	+4.40	-0.32	+0.13	+0.50	Gor
2003 03 09.133423	17 18 46.952	-13 42 58.13	0.000	+0.04	+4.46	-0.24	+0.17	+0.58	Dev
2003 03 22.121268	17 19 00.693	-13 40 21.96	0.000	+0.03	+4.65	-0.05	+0.30	+0.78	Sid
2003 03 26.101283	17 19 00.301	-13 39 30.73	-0.001	-0.01	+4.39	-0.32	+0.06	+0.51	Dev
2003 03 27.089426	17 18 59.885	-13 39 17.54	-0.002	+0.02	+4.51	-0.11	+0.18	+0.72	Lem,Mik
2003 03 29.084877	17 18 58.623	-13 38 51.38	+0.001	+0.02	+4.45	-0.33	+0.12	+0.50	Sid
2003 04 02.084090	17 18 54.514	-13 37 57.94	-0.002	+0.01	+4.53	-0.35	+0.18	+0.48	Dev
2003 04 09.047714	17 18 42.423	-13 36 24.18	-0.001	+0.03	+4.81	-0.38	+0.45	+0.45	Dev
2003 04 11.034099	17 18 37.831	-13 35 57.46	+0.001	+0.01	+4.49	-0.33	+0.12	+0.50	Sid
2003 04 20.056173	17 18 11.203	-13 33 59.01	-0.001	-0.03	+4.33	-0.67	-0.04	+0.17	Kou
2003 04 22.035856	17 18 04.158	-13 33 33.52	-0.001	+0.03	+4.63	-0.47	+0.25	+0.36	Gor
2003 04 25.011151	17 17 52.737	-13 32 56.18	+0.001	-0.03	+4.41	-0.44	+0.03	+0.40	Sid
2003 04 26.029989	17 17 48.610	-13 32 43.49	0.000	-0.04	+4.28	-0.31	-0.10	+0.53	Sid
2003 04 27.002088	17 17 44.599	-13 32 31.67	-0.001	-0.01	+4.47	-0.35	+0.09	+0.49	Dev
2003 05 02.999075	17 17 17.746	-13 31 21.36	-0.001	-0.02	+4.47	-0.42	+0.08	+0.42	Sid
2003 05 09.982474	17 16 42.524	-13 30 06.66	-0.002	0.00	+4.55	-0.31	+0.16	+0.54	Sid
2003 05 11.996405	17 16 31.643	-13 29 46.83	0.000	0.04	+4.19	-0.26	-0.19	+0.59	Kou



Таблица 1 (продолжение)

Дата наблюдения, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$\Delta\alpha_f$ s	$\Delta\delta_f$ "	DE200 (O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ s	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	DE405 (O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ s	DE405 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2003 05 13.986323	17 16 20.646	-13 29 28.14	+0.002	-0.02	+4.24	-0.29	-0.15	+0.56	Dev
2003 05 19.958831	17 15 46.150	-13 28 37.22	+0.002	-0.01	+4.13	-0.26	-0.26	+0.59	Gor
2003 05 25.913272	17 15 09.907	-13 27 54.99	+0.001	+0.01	+4.10	-0.19	-0.28	+0.66	Kou
2003 05 27.938447	17 14 57.291	-13 27 43.00	0.000	-0.04	+4.83	-0.42	+0.45	+0.43	Dev
2003 05 31.866571	17 14 32.327	-13 27 22.48	+0.001	+0.02	+4.44	-0.34	+0.07	+0.52	Dev
2004 03 05.107556	17 27 41.004	-14 27 55.47	-0.002	-0.01	+4.62	-0.55	+0.13	+0.30	Dev
2004 03 05.109877	17 27 40.987	-14 27 55.28	-0.002	-0.01	+4.29	-0.38	-0.20	+0.47	Dev
2004 03 10.142071	17 27 52.743	-14 27 06.45	0.000	-0.04	+4.63	-0.54	+0.12	+0.31	Sid
2004 03 10.144327	17 27 52.758	-14 27 06.24	0.000	-0.04	+4.78	-0.35	+0.27	+0.50	Sid
2004 03 13.120467	17 27 58.115	-14 26 35.74	-0.001	+0.04	+5.14	-0.51	+0.62	+0.34	Dev
2004 03 14.119009	17 27 59.582	-14 26 25.18	+0.001	+0.03	+4.40	-0.48	-0.12	+0.37	Gor
2004 03 30.100299	17 28 05.380	-14 23 24.38	-0.001	-0.03	+4.91	-0.47	+0.34	+0.39	Ale
2004 04 01.096991	17 28 03.663	-14 23 01.07	-0.001	+0.03	+4.65	-0.68	+0.08	+0.18	Sid
2004 04 07.076237	17 27 55.480	-14 21 50.29	-0.002	+0.03	+4.66	-0.47	+0.08	+0.39	Sid
2004 04 07.083388	17 27 55.475	-14 21 50.08	-0.002	+0.03	+4.78	-0.35	+0.20	+0.51	Sid
2004 04 08.088113	17 27 53.661	-14 21 38.49	0.000	+0.04	+4.92	-0.59	+0.34	+0.27	Sid
2004 04 08.089130	17 27 53.645	-14 21 38.25	0.000	+0.04	+4.72	-0.36	+0.13	+0.50	Sid
2004 04 09.059649	17 27 51.741	-14 21 27.00	+0.001	+0.02	+4.38	-0.51	-0.21	+0.35	Kou
2004 04 11.062063	17 27 47.503	-14 21 03.84	0.000	-0.04	+4.59	-0.80	0.00	+0.07	Dev
2004 04 13.073748	17 27 42.739	-14 20 40.49	-0.002	+0.02	+4.68	-0.85	+0.08	+0.02	Dev
2004 04 13.076094	17 27 42.737	-14 20 40.25	-0.002	+0.02	+4.73	-0.62	+0.14	+0.23	Dev
2004 04 14.062915	17 27 40.216	-14 20 28.69	-0.001	+0.04	+4.70	-0.48	+0.10	+0.38	Sid
2004 04 14.065118	17 27 40.219	-14 20 28.49	-0.001	+0.04	+4.83	-0.31	+0.23	+0.55	Sid
2004 04 16.049688	17 27 34.775	-14 20 05.80	+0.002	-0.01	+4.48	-0.40	-0.12	+0.46	Ale
2004 04 17.038965	17 27 31.897	-14 19 54.60	+0.001	-0.03	+4.44	-0.46	-0.16	+0.40	Bek

Таблица 1 (продолжение)

Дата наблюдения, UTC	$\alpha_{2000}$ h m s	$\delta_{2000}$ ° ' "	$\Delta\alpha_f$ s	$\Delta\delta_f$ "	DE200 (O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ "	DE200 (O-C) $_{\delta}$ "	DE405 (O-C) $_{\alpha}\cos\delta$ s	DE405 (O-C) $_{\delta}$ "	H
2004 04 18.037370	17 27 28.882	-14 19 43.75	-0.001	-0.03	+4.47	-0.91	-0.13	-0.04	Gor
2004 04 19.040000	17 27 25.719	-14 19 32.05	-0.002	0.00	+4.23	-0.47	-0.37	+0.39	Kou
2004 04 23.022623	17 27 12.127	-14 18 48.16	+0.002	-0.03	+4.49	-0.43	-0.12	+0.43	Dev
2004 04 24.030531	17 27 08.405	-14 18 37.62	0.000	-0.04	+4.45	-0.74	-0.16	+0.13	Bek
2004 04 25.029372	17 27 04.602	-14 18 27.17	-0.001	-0.02	+4.27	-0.92	-0.34	-0.05	Gor
2004 04 27.024596	17 26 56.728	-14 18 05.62	0.000	+0.04	+4.40	-0.26	-0.22	+0.61	Ale
2004 05 08.971555	17 26 01.683	-14 16 12.87	-0.002	+0.03	+4.65	-0.64	+0.03	+0.24	Kou
2004 05 09.965019	17 25 56.549	-14 16 04.64	0.000	+0.04	+4.58	-0.76	-0.04	+0.12	Dev
2004 05 12.969450	17 25 40.580	-14 15 40.44	0.000	-0.04	+4.59	-0.68	-0.03	+0.19	Sid
2004 05 13.956636	17 25 35.198	-14 15 32.81	-0.001	-0.02	+4.69	-0.60	+0.07	+0.28	Dev
2004 05 14.947960	17 25 29.709	-14 15 25.48	-0.002	+0.01	+4.57	-0.64	-0.05	+0.24	Bek
2004 05 14.941356	17 25 29.742	-14 15 25.50	-0.002	+0.01	+4.51	-0.61	-0.11	+0.26	Bek
2004 05 16.970308	17 25 18.328	-14 15 10.99	0.000	+0.03	+4.63	-0.56	+0.01	+0.32	Kou
2004 05 17.936635	17 25 12.805	-14 15 04.39	+0.002	-0.01	+4.71	-0.53	+0.09	+0.35	Ale
2004 05 20.941159	17 24 55.273	-14 14 45.57	-0.002	0.00	+4.91	-0.81	+0.29	+0.07	Dev
2004 05 21.919383	17 24 49.452	-14 14 39.43	-0.001	+0.03	+4.85	-0.44	+0.24	+0.45	Bek
2004 05 22.941606	17 24 43.301	-14 14 33.81	0.000	+0.04	+4.61	-0.60	0.00	+0.29	Gor
2004 05 23.940534	17 24 37.263	-14 14 28.40	+0.002	+0.01	+4.66	-0.59	+0.05	+0.29	Kou
2004 05 23.942589	17 24 37.251	-14 14 28.45	+0.002	+0.01	+4.67	-0.65	+0.05	+0.23	Kou
2004 05 24.933435	17 24 31.216	-14 14 23.30	+0.002	-0.03	+4.70	-0.62	+0.09	+0.26	Kou
2004 05 25.939001	17 24 25.021	-14 14 18.42	0.000	-0.04	+4.35	-0.69	-0.26	+0.20	Sid
2004 05 25.952913	17 24 24.924	-14 14 18.25	0.000	-0.04	+4.20	-0.58	-0.41	+0.30	Sid

**Таблица 2.** Наблюдения системы Плутон–Харон в 1999–2004 гг.

	N	DE405				DE200			
		$\overline{(O-C)_{\alpha}\cos\delta}$ s	$\overline{\sigma_{\alpha}\cos\delta}$ s	$\overline{(O-C)_{\delta}}$ "	$\overline{\sigma_{\delta}}$ "	$\overline{(O-C)_{\alpha}\cos\delta}$ s	$\overline{\sigma_{\alpha}\cos\delta}$ s	$\overline{(O-C)_{\delta}}$ "	$\overline{\sigma_{\delta}}$ "
1999 г.	18	+0.016	±0.014	+0.58	±0.11	+0.239	±0.014	-0.21	±0.11
2000 г.	21	+0.017	±0.014	+0.54	±0.16	+0.256	±0.014	-0.31	±0.16
2001 г.	20	+0.017	±0.012	+0.61	±0.19	+0.264	±0.012	-0.27	±0.19
2002 г.	32	+0.020	±0.013	+0.61	±0.19	+0.284	±0.012	-0.32	±0.19
2003 г.	28	+0.009	±0.014	+0.51	±0.15	+0.296	±0.013	-0.32	±0.15
2004 г.	42	+0.002	±0.014	+0.30	±0.15	+0.308	±0.014	-0.57	±0.15

N — количество наблюдений,

$(O-C)_{\alpha}\cos\delta$  и  $(O-C)_{\delta}$  — среднегодовые значения положений,

$\sigma$  — ошибка одного наблюдения

**Таблица 3.** Топоцентрические астрометрические координаты Урана, полученные в 2002-2004 гг.

Дата наблюдения, UTC	$\alpha_{2000}$	$\delta_{2000}$	DE200 $(O-C)_{\alpha}\cos\delta$	DE200 $(O-C)_{\delta}$	H
	h m s	° ' "	"	"	
2002 09 25.850272	21 52 03.687	-13 45 07.89	-0.29	+0.79	Sid
2002 10 03.777278	21 51 14.020	-13 49 14.44	-0.39	+0.74	Dev
2002 10 05.855743	21 51 02.530	-13 50 10.66	+0.01	+0.83	Sid
2002 10 07.806002	21 50 52.361	-13 51 00.87	+0.17	+0.13	Dev
2003 09 09.876220	22 10 02.207	-12 09 42.88	-0.58	+0.57	Sid
2003 09 17.920476	22 08 54.749	-12 15 48.77	+0.05	+0.38	Sid
2003 10 16.789937	22 05 51.356	-12 31 50.04	+0.61	+0.21	Bek
2003 10 22.791699	22 05 28.912	-12 33 39.49	+0.29	+0.60	Sid
2003 10 24.734007	22 05 23.038	-12 34 07.84	+0.43	+0.16	Dev
2003 11 01.739526	22 05 06.109	-12 35 21.54	-0.28	+0.46	Gor
2003 11 08.708820	22 05 01.363	-12 35 30.61	-0.57	+0.80	Gor
2003 12 08.686617	22 06 28.948	-12 26 23.07	+0.75	+0.17	Ale
2003 12 13.656017	22 06 59.711	-12 23 23.66	+0.01	0.00	Gor
2003 12 23.596388	22 08 13.935	-12 16 15.59	-0.14	+0.28	Sid
2004 01 01.616699	22 09 34.664	-12 08 34.90	+0.52	-0.18	Dev
2004 01 02.621234	22 09 44.296	-12 07 38.80	-0.41	+0.66	Bek

### Основные результаты

На зеркальном астрографе ЗА-320 в Пулковке в 2002–2004 гг. проведены астрометрические наблюдения системы Плутон–Харон (получено 70 положений) и планеты Уран (получено 16 положений). Обработка наблюдений проведена в системе каталогов USNO-A2.0 и USNO-B1.0. с использованием программной системы АПЕКС 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. Точность наблюдений оценивается для системы

Плутон–Харон в среднем величинами:  $\sigma_\alpha = 0.014^s \cos\delta$ ,  $\sigma_\delta = 0.15''$ , а для Урана:  $\sigma_\alpha = 0.028^s \cos\delta$ ,  $\sigma_\delta = 0.31''$ . Сравнение наблюдений для системы Плутон — Харон с теориями движения планет DE200 и DE405 показывает лучшую сходимость с теорией DE405.

Авторы выражают свою благодарность В.К. Абалакину за помощь в получении электронной копии каталога USNO B1.0, В.Н. Львову, С.Д. Цекмейстер и Р.И. Смехачевой за эфемеридную поддержку наблюдений, О.В. Кракосевичу за помощь в оформлении статьи.

### Литература

1. Аллен К.У. Астрофизические величины, 1977, М., Мир, 446 с.
2. Бекашев 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.
3. Девяткин А.В. Астрометрические наблюдения системы Плутон–Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1999 г. // Изв. ГАО, 2000, № 214, с.361-369.
4. Девяткин 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. Девяткин 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.
6. 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.
7. 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 ЗА-320 // Изв. ГАО, 2002, № 216, с.128-156.
8. 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.

### THE ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF URANUS AND PLUTO–CHARON SYSTEM BY THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2000–2002

Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu, Bekhteva A.S., Baturina G.D., Kornilov E.V., Sidorov M.Yu.

### Summary

*The astrometric observations of Pluto–Charon system and Uranus are made on the mirror astrograph ZA-320 in Pulkovo Observatory and 86 positions in the system of the USNO-A2.0 and USNO-B1.0 catalogues are obtained. The processing of the observations is executed with use of the program system APEX taking into account chromatic refraction. The reduction of the observations for transition from a position of photocentre of Pluto–Charon system to its barycentre is executed. The accuracy of the observations is evaluated as  $\sigma_\alpha = 0.013^s \cos\delta$ ,  $\sigma_\delta = 0.18''$ .*

## **НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА ТРЕХ СПУТНИКОВ САТУРНА**

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Мельников А.В., Шевченко И.И.**

*Приведены результаты наблюдений спутников Сатурна – Гипериона (S7), Япета (S8) и Фебы (S9) в течение 2000–2003 гг. Наблюдаемые кривые блеска Япета и Фебы имеют регулярный вид, согласующийся с регулярным характером их вращения – синхронного у Япета и очень быстрого у Фебы. Осуществлено моделирование наблюдаемой кривой блеска Гипериона. Найдены значения параметров и начальных условий, определяющих наблюдаемую кривую блеска. Путем вычисления показателей Ляпунова вращательного движения при найденных начальных условиях подтвержден хаотический характер вращения этого спутника.*

### **Введение**

В Пулковской обсерватории с 1999 г. осуществляется наблюдательно-теоретическая программа исследования вращательной динамики малых спутников планет Солнечной системы [1]. В рамках наблюдательной части программы получены ряды фотометрических наблюдений ряда спутников Юпитера и Сатурна. Наблюдения продолжаются в настоящее время.

Данная работа посвящена наблюдениям и анализу кривых блеска трех спутников Сатурна — Гипериона (S7), Япета (S8) и Фебы (S9).

Известно, что Япет вращается синхронно с орбитальным движением. Период его обращения по орбите составляет 79.3 сут. Период вращения Фебы был определен Крузе и др. [2] в 1986 г. Недавно он был уточнен Бауэром и др. [3] и сейчас известен с высокой точностью. В отличие от Япета, Феба вращается чрезвычайно быстро — с периодом 9.3 часа, что примерно в 1400 раз меньше периода обращения по орбите, который составляет 550.5 сут.

В 1984 г. Уиздом и др. [4] на основе численных экспериментов, а также теоретических оценок ширины хаотического слоя, предсказали, что Гиперион находится в хаотическом режиме вращения. Причинами хаоса являются, в конечном счете, сильно асимметричная форма этого спутника и относительно большой эксцентриситет орбиты. Уже в конце 1980-х – начале 1990-х годов из анализа кривых блеска Гипериона были получены данные, что он, действительно, вращается хаотически [5–8].

В работе [1] путем применения специально разработанного комплекса программ выполнено моделирование наблюдаемой кривой блеска Гипериона за период 1999–2000 гг. Результаты подтвердили на полученных в Пулкове данных вывод о том, что Гиперион находится в хаотическом режиме вращения. Накопленный с 2000 г. большой объем новых наблюдательных данных позволяет провести более тщательное и подробное моделирование кривой блеска Гипериона.

### **Наблюдения Гипериона, Япета и Фебы**

В наблюдательные сезоны 2000–2003 гг. на зеркальном астрографе ЗА-320 Пулковской обсерватории [9] продолжались наблюдения спутников Юпитера и Сатурна. У Юпитера наблюдались Гималия, Элара и Пасифе, у Сатурна – Гиперион, Япет и Феба.

Аппаратура и методика наблюдений и обработки в целом оставались такими же, как и в предыдущей нашей работе [1]. Наблюдения выполнялись при помощи ПЗС-камеры ST-6 в широкой интегральной полосе инструмента (300–900 нм). Каждую на-

блюдательную ночь для каждого спутника снималось различное количество кадров: как правило, 1–2, иногда больше. Но для Фебы и Пасифе с целью изучения быстрых изменений их блеска были проведены по две ночи, в которые получалось по 15–20 кадров, распределённых в течение нескольких часов.

Обработка наблюдений выполнялась, как и ранее, путём апертурной фотометрии с помощью программной системы «Апекс 1.1» [10]. Блеск спутников определялся путём сравнения с блеском звёзд, попадающих в кадр; звёздные величины в полосе нашего инструмента для этих звёзд определялись путём трансформации из величин  $B$  и  $R$ , взятых из каталога USNO–A 2.0. Фотометрическая точность этого каталога невысока (около  $0^m.15$ ), однако только он позволяет получить фотометрические и астрометрические характеристики звёзд, попадающих в небольшое поле зрения нашего инструмента ( $9'.5 \times 7'.5$ ) в любой области неба. Использование большого количества звёзд на кадре в качестве опорных (10–20) позволяет несколько скомпенсировать невысокую точность опорного каталога и ошибки трансформации системы.

Окончательная точность результатов зависела также от яркости наблюдаемого спутника, участка неба, на котором он находился, близости яркой планеты-гиганта, погодных условий. Средняя точность блеска, получаемого с каждого кадра, оценивается для самого яркого объекта – Япета в  $0^m.10$ , для остальных спутников –  $0^m.14$ .

На рис.1 представлены наблюдаемые кривые блеска Гипериона, Япета и Фебы. Результаты фотометрических измерений приведены к средней оппозиции Сатурна согласно формуле

$$m = m_{obs} - 5 \lg \frac{rR}{r_0 R_0}, \quad (1)$$

где  $m_{obs}$  – звездная величина, определенная из наблюдений,  $r$  – расстояние от Земли до Сатурна,  $R$  – расстояние от Солнца до Сатурна на момент наблюдений,  $r_0 = 8.53884$  а.е. и  $R_0 = 9.53884$  а.е. – те же расстояния для средней оппозиции.

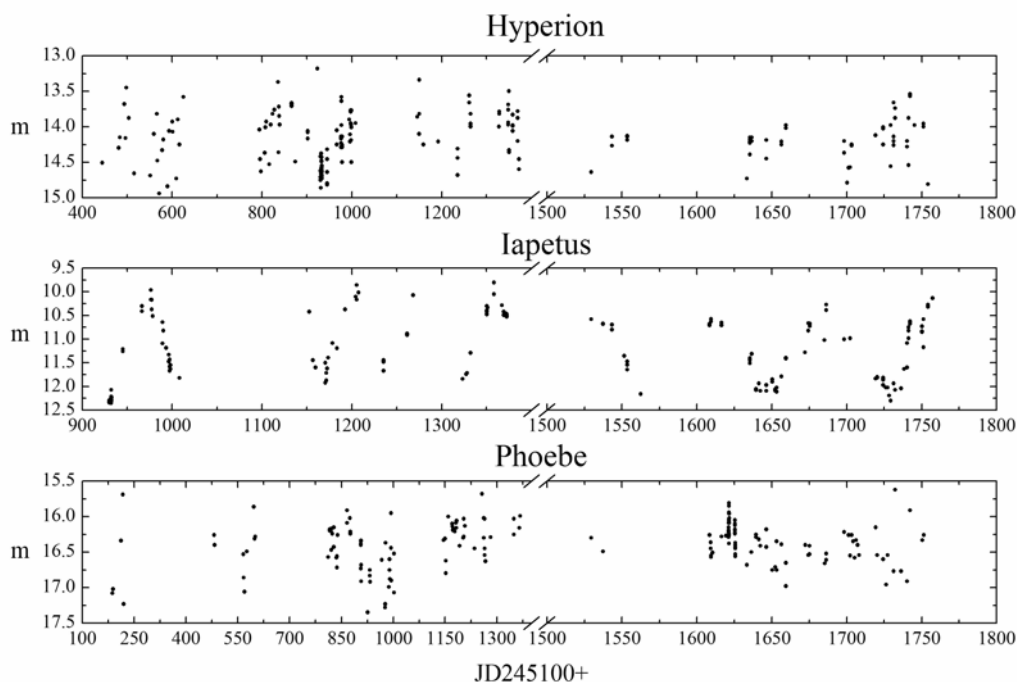
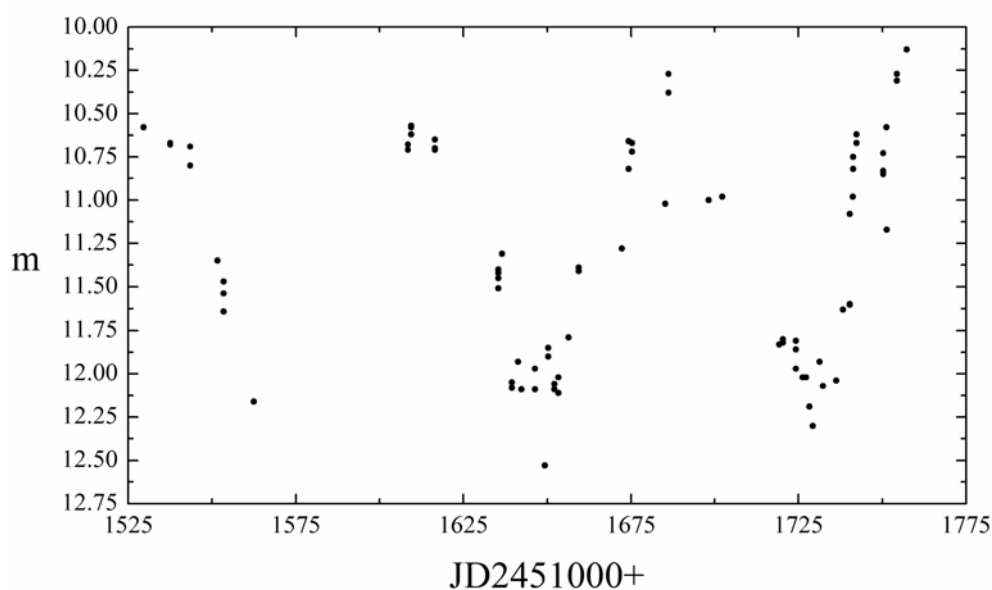


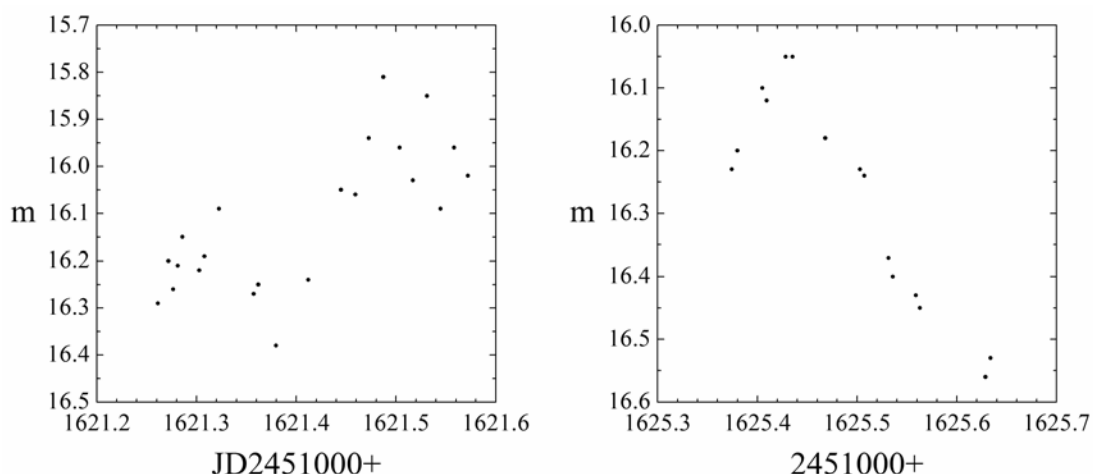
Рис.1. Наблюдаемые кривые блеска Гипериона, Япета и Фебы; 2000–2003 гг.

На рис.2 показан фрагмент кривой блеска Япета с более высоким разрешением во времени. На указанном рисунке отчетливо видно колебание блеска Япета с периодом равным периоду его обращения по орбите ( $\approx 79.33$  дня). На рис.3 приведены два фрагмента кривой блеска Фебы. На них четко проявляется волна с периодом примерно 9 часов, что хорошо согласуется со значением периода вращения Фебы  $9.2735 \pm 0.0006$  часа по данным [3], а также с результатами моделирования [11]. Таким образом, пулковские кривые блеска четко проявляют регулярный характер вращения этих двух спутников — синхронный с обращением по орбите у Япета и очень быстрый, в сравнении с орбитальным периодом, у Фебы.

Кривая блеска Гипериона в этом отношении имеет совсем иной характер. Она не обнаруживает каких-либо регулярных особенностей (рис.1).



**Рис.1.** Наблюдаемая кривая блеска Япета; сентябрь 2002 г. – май 2003 г.



**Рис.3.** Наблюдаемая кривая блеска Фебы; 12/13 декабря (слева) и 16/17 декабря 2002 г. (справа)

### Моделирование кривой блеска Гипериона

Вращательное состояние спутников планет и фотометрические свойства их поверхностей можно определить посредством моделирования наблюдаемых кривых блеска. Ранее [1] нами проводилось моделирование кривых Гипериона на основе пулковских наблюдений 1999–2000 гг. Здесь представлены результаты моделирования кривой

блеска Гипериона на основе новых наблюдательных данных 2001–2003 гг. Методика моделирования осталась прежней (см. подробнее [1]); изменился лишь массив наблюдательных данных.

Вращательная динамика Гипериона рассматривается в постановке задачи, описанной в работе [1]. В краткой формулировке, спутник представляет собой трехосное твердое тело, движущееся на реальной возмущенной орбите вокруг планеты. Его вращение описывается динамическими и кинематическими уравнениями Эйлера. Используемые системы координат описаны в [1].

Главные центральные моменты инерции обозначаем  $A < B < C$ , полуоси эллипсоида однородной плотности, описывающего спутник, через  $a > b > c$ .

В предположении, что поверхность спутника отражает падающий на него свет согласно закону Ламберта, наблюдаемая интегральная звездная величина спутника определяется площадью проекции на небесную сферу видимой освещенной части его фигуры. Задача моделирования кривых блеска, таким образом, сводится к нахождению этой площади [1,6]. Интегральная звездная величина спутника тогда выражается формулой [1]:

$$m_s = -2.5 \lg S + \tilde{A}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь наблюдаемой проекции освещенной части поверхности Гипериона, нормализованная на величину максимальной площади проекции фигуры спутника,  $\tilde{A}$  – некоторая постоянная.

При моделировании необходимо проводить коррекцию интегральной звездной величины за угол фазы «Солнце–Гиперион–Земля». Эта коррекция позволяет учесть физические свойства отражающей поверхности. Как и в работе [1], для коррекции за угол фазы используем фазовую функцию Боуэлла и др. (см. [12]). С учетом формулы (1) имеем

$$m = m_s - 5 \lg \frac{rR}{r_0R_0} + H - 2.5 \lg((1 - G)F_1(\alpha) + GF_2(\alpha)) + \tilde{B}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол фазы,  $\tilde{B}$  – константа, определяемая из моделирования наблюдаемой кривой блеска. Функции  $F_1$ ,  $F_2$  приведены в аналитическом виде в [1,12]. Параметры  $H$  и  $G$  имеют следующий физический смысл:  $H$  есть приведенная к средней оппозиции планеты звездная величина спутника при нулевом угле фазы;  $G$  характеризует градиент зависимости звездной величины спутника, приведенной к средней оппозиции планеты, от угла  $\alpha$ .

Для учета отличия закона отражения от ламбертовского, а также вариаций альбедо по поверхности спутника, используем понятие «фотометрического» эллипсоида [1]. При моделировании варьируем значения полуосей  $a$  и  $c$ , оставляя величину  $b$  постоянной.

Весь ряд наблюдений 2000–2003 гг. (рис.1) разделен нами на несколько отрезков, на которых и проводится моделирование. Разбиение обусловлено главным образом сезонными перерывами в наблюдениях. Дополнительным фактором для отбора промежутков, на которых проводилось моделирование, являлось условие, что количество наблюдений должно быть больше чем количество варьируемых параметров. В нашем случае варьировалось 12 параметров. После такого разбиения из всего массива наблюдательных данных было выбрано пять промежутков (далее промежутки (1) – (5)). Промежутки включают: (1) – 31, (2) – 26, (3) – 19, (4) – 15, (5) – 24 наблюдения.

Задача совпадения модельных и наблюдаемых кривых блеска решается варьированием значений начальных данных и параметров. Сначала находится первое грубое приближение к наблюдаемой кривой блеска. Вариация начальных данных и параметров на этом этапе проводится в пределах: начальные значения углов Эйлера, в принятой их



системе,  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$  – от 0 до  $\pi$  с шагом 0.01; производные углов Эйлера  $d\theta/dt$ ,  $d\varphi/dt$ ,  $d\psi/dt$  – от –5 до 5 с шагом 0.01; инерционные параметры:  $A/C$  – от 0.5 до 0.7,  $B/C$  – от 0.7 до 0.95 с шагом 0.01; полуоси эллипсоида:  $a$  – от 150 до 300 км,  $c$  – от 50 до 120 км с шагом 5 км; параметры фазовой функции:  $H$  – от 13 до 15 с шагом 0.01,  $G$  – от –3 до 3 с шагом 0.01. На втором этапе методом наискорейшего спуска (методом градиента) проводится уточнение найденных на первом этапе значений параметров и начальных данных.

В Табл.1 приведены полученные посредством моделирования итоговые значения  $A/C$ ,  $B/C$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $d\theta/dt$ ,  $d\varphi/dt$ ,  $d\psi/dt$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $H$ ,  $G$ . Значения углов Эйлера в системе [1,4] даны в радианах. Приведены также угловые скорости вращения Гипериона (нормированные на угловую скорость орбитального обращения) на указанный в таблице момент времени.

Пример модельной кривой блеска для значений параметров и начальных данных из Табл.1, участок моделирования (1), приведен на рис.4.

В Табл.2 приведены итоговые средние значения параметров. Средние брались по пяти участкам моделирования, по данным Табл.1.

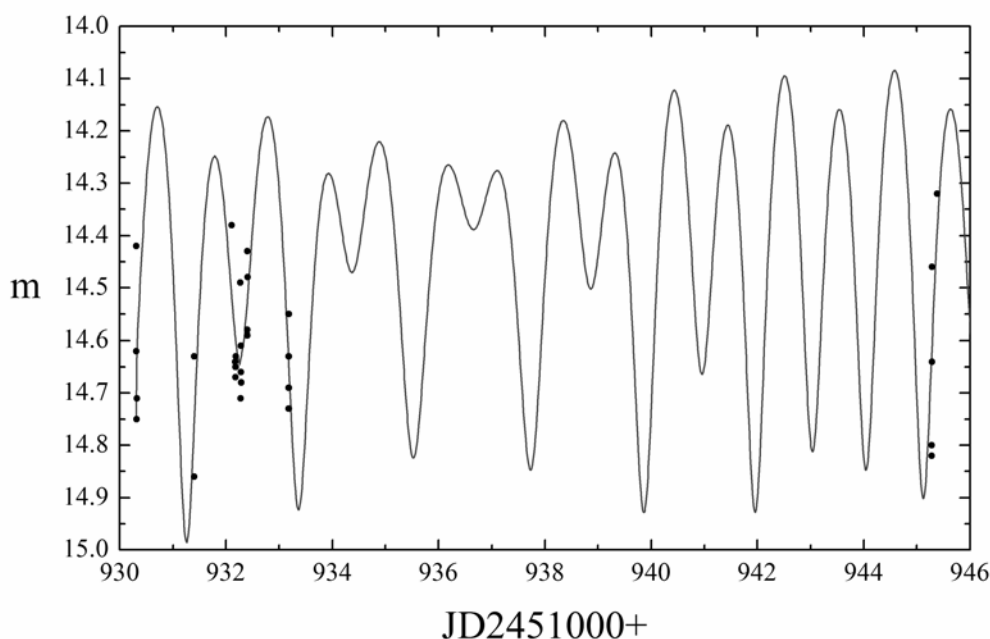
**Таблица 1.** Гиперион. Значения параметров, начальные условия, угловая скорость вращения.

Модель	1	2	3	4	5
$A/C$	0.8783	0.5695	0.5850	0.6043	0.5990
$B/C$	0.9499	0.8878	0.8526	0.8420	0.8801
$a$ , км	243	235	238	269	200
$b$ , км	130	130	130	130	130
$c$ , км	110	98	88	116	85
$\theta$	6.0438	0.3196	1.0399	6.0271	0.5501
$\varphi$	0.9185	0.3160	0.1989	–0.0042	0.0794
$\psi$	0.5753	0.8123	0.4289	6.0230	0.0000
$d\theta/dt$	2.9531	3.0366	0.4460	3.0127	2.7400
$d\varphi/dt$	0.5127	–0.0016	–1.0270	0.9485	–1.0499
$d\psi/dt$	–0.0233	–1.1100	–0.7461	–2.4144	0.0300
$H$	14.329	13.630	13.847	13.744	13.735
$G$	2.188	1.113	1.969	1.256	1.648
$\omega$	2.979	2.011	1.296	3.983	2.937
JD2451000+	930.308	966.269	1327.306	1633.407	1698.211

**Таблица 2.** Средние значения полученных из моделирования инерционных параметров, полуосей фотометрического эллипсоида, параметров фазовой функции и угловой скорости вращения Гипериона.

$A/C$	$0.647 \pm 0.058$
$B/C$	$0.882 \pm 0.019$
$a$ , км	$237 \pm 11$
$b$ , км	130
$c$ , км	$99 \pm 6$
$H$	$13.857 \pm 0.123$
$G$	$1.635 \pm 0.204$
$\omega$	$2.64 \pm 0.46$

Таким образом, для пяти наборов наблюдательных данных за 2001–2003 гг. нами получены, в частности, начальные условия вращательного движения и значения инерционных параметров Гипериона. Путем вычисления показателей Ляпунова вращательного движения при найденных начальных условиях далее выясняем качественный характер вращения спутника. Вычисление полных ляпуновских спектров вращательного движения проведено нами методом HQRB с использованием алгоритмов и программ, описанных в [13,14]. На всех пяти интервалах моделирования вычисленные показатели Ляпунова ненулевые; их значения удовлетворительно согласуются с полученными ранее [14–16] аналитическими и численными оценками, в частности, ляпуновское время (характерное время предсказуемой динамики) для пяти моделируемых серий наблюдений находится в пределах от 30 до 120 дней. Таким образом, хаотический характер вращения Гипериона подтверждается на новых наблюдательных данных.



**Рис.4.** Модельная кривая блеска Гипериона; январь–февраль 2001 г.

### Заключение

Итак, в настоящей работе приведены результаты наблюдений трех спутников Сатурна – Гипериона, Япета и Фебы. Наблюдения проводились в 2000–2003 гг. в Пулковке на зеркальном астрографе ЗА-320, оснащённом ПЗС-камерой ST-6.

Наблюдаемые кривые блеска Япета и Фебы имеют регулярный вид, согласующийся с регулярным характером их вращения – синхронного у Япета и очень быстрого у Фебы.

На основе полученных наблюдательных данных проведено моделирование кривой блеска Гипериона. Для пяти наборов наблюдательных данных за 2001–2003 гг. получены начальные условия вращательного движения, значения инерционных параметров, параметров, характеризующих отражательные свойства поверхности спутника. Путем вычисления показателей Ляпунова вращательного движения при найденных начальных условиях подтвержден хаотический характер вращения Гипериона.

Теоретическая часть работы поддержана РФФИ (проект 03-02-17356). А.В. Мельников благодарит Фонд содействия отечественной науке за оказанную финансовую поддержку.

## Литература

1. *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.
2. *Крузе и др.* (Kruse S., Klavetter J.J., and Dunham E.W.) Photometry of Phoebe // *Icarus*. 1986. V.68. P.167–175.
3. *Бауер и др.* (Bauer J.M., Buratti B.J., Simonelli D.P., and Owen W.M.) Recovering the rotational light curve of Phoebe // *Astrophys.J.* 2004. V.610. P.L57–L60.
4. *Уиздом и др.* (Wisdom J., Peale S.J., and Mignard F.) The chaotic rotation of Hyperion // *Icarus*. 1984. V.58. № 2. P.137–152.
5. *Клаветтер* (Klavetter J.J.) Rotation of Hyperion. I. Observations // *Astron.J.* 1989a. V.97. № 2. P.570–579.
6. *Клаветтер* (Klavetter J.J.) Rotation of Hyperion. II. Dynamics // *Astron.J.* 1989b. V.98. № 5. P.1855–1874.
7. *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.
8. *Блэк и др.* (Black G.J., Nicholson P.D., Thomas P.C.) Hyperion: rotational dynamics // *Icarus*. 1995. V.117. № 1. P.149–161.
9. *Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Десяткин А.В. и др.* Зеркальный астрограф ЗА-320 // *Изв. ГАО РАН*. 1998. № 213. С.249–258.
10. *Десяткин А.В., Грицук А.Н., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В.* АПЕКС — программная система для обработки ПЗС-изображений в астрометрии // *Изв. ГАО РАН*. 2000. № 214. С.455–468.
11. *Мельников* (Melnikov A.V.) Modelling of lightcurves of minor planetary satellites // *IAA Transactions*. 2002. № 8. P.131–132.
12. *Лагерквист, Уильямс* (Lagerkvist C.-I., Williams I.P.) Physical studies of asteroids. XV. Determination of slope parameters and absolute magnitudes for 51 asteroids // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1987. V.68. P.295–315.
13. *Шевченко и Куприянов* (Shevchenko I.I., Kouprianov V.V.) On the chaotic rotation of planetary satellites: the Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents // *Astron. Astrophys.* 2002. V.394. P.663–674.
14. *Куприянов и Шевченко* (Kouprianov V.V., Shevchenko I.I.) On the chaotic rotation of planetary satellites: The Lyapunov exponents and the energy // *Astron. Astrophys.* 2003. V.410. P.749–757.
15. *Шевченко И.И.* О динамической энтропии вращения Гипериона // *Изв. ГАО РАН*. 2000. № 214. С.153–160.
16. *Шевченко И.И.* О максимальных показателях Ляпунова хаотического вращения естественных спутников планет // *Космич. Исслед.* 2002. Т.40. С.317–326.

## OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF LIGHTCURVES OF THREE SATELLITES OF SATURN

Devyatkin A. V., Gorshanov D. L., Kouprianov V. V., Melnikov A. V., Shevchenko I. I.

### Summary

*Results of observations of three satellites of Saturn (Hyperion S7, Iapetus S8, and Phoebe S9) for the time period 2000–2003 are presented. The observed lightcurves of Iapetus and Phoebe have regular pattern conforming to the regular character of their rotation, synchronous for Iapetus and very fast for Phoebe. Modelling of Hyperion's lightcurve has been performed. The values of the parameters and the initial conditions determining the observed lightcurve have been found. By means of computation of the Lyapunov exponents of the rotational motion for the derived initial conditions, the chaotic character of the rotation of this satellite has been confirmed.*

## **АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320 В 2002-2004 гг.**

**Девяткин А.В., Львов В.Н., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Алешкина Е.Ю., Бехтева А.С., Батурина Г.Д., Корнилов Э.В., Сидоров М.Ю.**

*Проведены астрометрические наблюдения астероидов и комет. Получено 3331 положение для 223 астероидов и 244 положения для 16 комет в системе каталогов USNO-A2.0 и USNO-B1.0. Обработка наблюдений выполнена с использованием программной системы АПЕКС с учетом хроматической рефракции. Средняя точность наблюдений по прямому восхождению и склонению составляет 0".3.*

С 1998 г. на телескопе ЗА-320 (Бекашев, 1998; Канаев, 2000, 2002) проводятся наблюдения малых планет. С 2002 на телескопе была начата программа наблюдений объектов сближающихся с Землей, которая осуществляется в рамках темы "Пулковская программа изучения объектов, сближающихся с Землей" (Девяткин, 2002; Львов, 2002). 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 основном, в автоматическом режиме (Канаев, Девяткин, 2002; Девяткин, 2004). Обработка ПЗС наблюдений была выполнена при помощи программных систем АПЕКС (Девяткин, 2000) и ЭПОС (Львов, 1999). Редукция наблюдений производилась методом 8 постоянных. Обработка наблюдений, полученных до октября 2003 г., была проведена в системе каталога USNO-A2.0, а позднее – в системе каталога USNO-B1.0. С помощью системы АПЕКС были получены величины "O". Для учета хроматической рефракции использовались значения показателя цвета  $B-V$ , если они были известны (Matson, 1986), а для остальных объектов было принято значение  $B-V = 0.80$ . Эфемеридные значения "C" вычислялись с использованием программы ЭПОС.

Ниже, в таблицах 2-7, 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,  $\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$  - ошибка одного наблюдения по прямому восхождению (оценка по разностям (O-C)),  $\overline{(O-C)}_{\delta}$  - среднее значение разностей (O-C) по склонению за весь период наблюдений,  $\sigma_{\delta}''$  - ошибка одного наблюдения по склонению (оценка по разностям (O-C)), "Z диапазон" - диапазон наблюдений объекта по зенитному расстоянию, "m диапазон" - диапазон наблюдений объекта по звездной величине.

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.

Среди интересных объектов отметим следующие. К астероиду 25143 Itokawa летит космический аппарат, который должен взять пробы грунта и вернуться на Землю. Астероид 3200 Phaethon является бывшей кометой. В 2000 г. на ЗА-320 были проведены фотометрические наблюдения явления покрытия звезды из каталога Hipparcos 2559 астероидом 111 Ate (Девяткин, 2001). Из анализа фотометрической кривой были получены следующие результаты: длина хорды астероида, участвующей в покрытии  $125.6 \text{ км} \pm 7.2 \text{ км}$ ,  $(O - C)_\alpha = -0^s.025 \pm 0^s.0003$ ,  $(O - C)_\delta = +0''.16 \pm 0''.02$  для момента 2000, сентябрь 10,  $0^h 37^m 56^s.99 \text{ UT}$ .

В 2000-2003 гг. на ЗА-320 были продолжены наблюдения тесных сближений малых планет (Девяткин, 2000) из списков (Hilton, 1998; Lopez Garsia, 1997). В таблице 1 для малых планет ( $N_1$  и  $N_2$ ) приведены даты тесных сближений, а в табл. 6 результаты наблюдений в период сближений, а также наблюдения малых планет, которые имели сближения в 1998-1999 гг. (Девяткин, 2000).

Топоцентрические астрометрические положения астероидов и комет на эпоху J2000 были опубликованы в Minor Planet Circular (см. список публикаций).

**Таблица 1.** Тесные сближения малых планет.

Дата сближения Г М Д	$N_1$	$N_2$
2000 03 04	107	6254
2000 04 01	107	1882
2002 02 08	451	2081
2002 05 11	4	2190
2003 01 14	45	294
2003 06 05	39	6770

**Таблица 2.** Результаты обработки наблюдений малых планет и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O - C)_\alpha} \cos \delta$	$\sigma_\alpha'' \cos \delta$	$\overline{(O - C)_\delta}$	$\sigma_\delta''$	Z диапазон	m диапазон
63 Ausonia	17	+0''.48	$\pm 0''.36$	+0''.22	$\pm 0''.38$	61°-68°	10.3-11.6
111 Ate	29	-0.08	0.41	+0.31	0.43	50-69	11.5-13.3
1036 Ganymed	14	+0.12	0.18	+0.15	0.16	71-74	14.8-15.6
1362 Grigua	14	-0.07	0.32	+0.26	0.21	50-61	17.6-18.1
1627 Ivar	18	-0.09	0.30	+0.13	0.14	51-72	15.1-16.1
1951 Lick	20	+0.01	0.29	0.00	0.32	06-40	16.4-16.7
2797 Teuser	30	-0.26	0.34	-0.01	0.48	24-54	15.1-15.8
2938 Hopi	13	-0.17	0.22	+0.03	0.31	47-74	15.2-16.8
3040 Kozai	20	-0.21	0.22	+0.21	0.23	12-66	16.4-17.8
3688 Navajo	22	+0.07	0.38	+0.02	0.34	34-75	16.1-17.8

Таблица 2 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
3800 Karayusuf	23	-0".17	$\pm 0".13$	-0".02	$\pm 0".23$	16°-50°	16.2-17.0
5066 Garradd	22	-0.05	0.45	-0.04	0.46	11-29	17.8-18.3
7467 1989 WQ1	25	+0.02	0.26	-0.03	0.41	25-51	16.3-17.3
8373 Stephengould	25	-0.03	0.24	+0.15	0.33	7-55	14.7-16.8
41434 2000 GB82	7	+0.18	0.42	-0.19	0.38	26-65	17.8-18.7
82097 2001 FD7	10	-0.24	0.51	-0.16	0.46	63-73	18.1-18.4
90467 2004 CU97	6	+0.08	0.41	+0.13	0.23	57-60	18.9-19.0
90470 2004 CH97	20	+0.08	0.40	+0.23	0.28	54-74	18.2-19.2
90481 2004 DA	12	-0.01	0.28	-0.13	0.47	64-69	17.9-18.5
90482 2004 DW	2	-	-	-	-	74-75	18.6-18.6
1999 UJ7	11	+0.05	0.39	+0.05	0.49	47-73	16.9-18.5
1999 US3	2	-	-	-	-	71-71	18,3-18,5
2001 CB21	6	+0.82	0.32	-0.20	0.24	06-48	14.3-15.2
2001 QF327	8	+0.14	0.22	-0.44	0.30	68-71	17.3-17.5
2001 SK162	5	-0.30	0.43	+0.36	0.34	48-52	16.7-17.7
2002 CE10	15	0.00	0.59	+0.17	0.44	37-71	15.4-17.6
2002 VQ94	28	-0.04	0.40	+0.27	0.38	01-59	18.3-18.6
2003 SB85	3	+0.22	0.52	+0.12	0.63	31-49	18.4-18.5
2003 SB220	2	-	-	-	-	36-40	18.1-18.1
2003 WN188	17	-0.21	0.30	-0.20	0.36	23-58	17.0-17.8
2004 CB95	5	+0.14	0.17	-0.54	0.08	50-67	18.0-18.4
2004 DF	4	-0.42	0.75	+0.31	0.38	66-72	18.1-18.2
2004 DY	28	-0.01	0.35	+0.09	0.32	50-76	15.6-17.5
2004 FB32	13	-0.13	0.46	-0.53	0.53	28-31	18.2-18.3
2004 FF30	11	+0.26	0.20	-0.22	0.37	38-40	18.1-18.2
2004 FJ32	9	+0.01	0.49	+0.33	0.53	32-34	18.3-18.3
2004 FO30	20	+0.06	0.66	0.00	0.52	50-65	17.5-17.9
2004 FU31	18	+0.12	0.58	0.00	0.40	38-45	18.0-18.1
2004 FY30	9	-0.64	0.45	-0.08	0.43	44-49	18.1-18.2
2004 GA14	3	+0.08	0.18	-0.34	0.41	65-66	18.1-18.1
2004 GK15	3	+0.19	0.54	+0.29	0.14	41-42	18.9-18.9
2004 GL15	4	-0.46	0.30	+0.09	0.47	36-39	18.3-18.3
2004 GP15	2	-	-	-	-	49-50	18.0-18.0
2004 GQ19	3	-0.42	0.60	-0.07	0.50	58-58	17.9-17.9
2004 GR24	4	-0.12	0.63	+0.26	0.49	66-66	18.1-18.1
2004 GS19	2	-	-	-	-	45-46	18.6-18.6
2004 GT5	6	+0.61	0.30	-0.53	0.29	60-61	18.2-18.2
2004 GT19	2	-	-	-	-	43-43	17.9-17.9
2004 GU5	5	-0.22	0.52	+0.30	0.18	59-60	18.5-18.5
2004 GZ4	4	+0.42	0.32	+0.23	0.29	64-65	18.4-18.4

**Таблица 3.** Результаты обработки наблюдений астероидов, сближающихся с Землей и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
9 Metis	46	+0".38	±0".18	+0".42	±0".24	30°-73°	08.6-10.9
433 Eros	65	+0.14	0.27	+0.43	0.28	44-67	11.4-12.6
1864 Daedalus	3	-0.06	0.35	-0.10	0.54	22-30	18.5-18.5
1866 Sisyphus	24	0.00	0.24	+0.19	0.29	39-50	15.1-17.7
2212 Hephaisto	1	-	-	-	-	35-35	17.0-17.0
3103 Eger	34	-0.10	0.30	0.00	0.33	31-43	17.8-18.2
3122 Florence	18	-0.12	0.23	+0.19	0.25	16-73	15.9-17.7
3199 Nefertiti	27	+0.14	0.40	+0.18	0.35	34-77	15.5-17.9
3200 Phaethon	18	0.00	0.40	+0.03	0.37	44-67	16.3-18.4
3554 Amun	13	+0.31	0.85	+0.50	0.42	58-70	18.0-18.3
3691 Bede	12	-0.08	0.40	+0.47	0.34	13-51	17.8-18.1
3752 Camillo	15	0.00	0.36	+0.09	0.36	09-45	17.3-18.4
4179 Toutatis	10	-0.17	0.42	+0.39	0.24	42-53	14.8-16.8
4660 Nereus	5	+0.23	0.40	+0.53	0.60	69-75	15.6-17.0
5143 Heracles	3	-0.41	0.12	+0.20	0.70	47-50	18.3-18.6
5332 1990 DA	17	+0.22	0.68	+0.09	0.40	32-51	17.1-17.7
5381 Sekhmet	1	-	-	-	-	71-71	18.3-18.3
5626 1991 FE	10	-0.13	0.36	+0.20	0.33	55-68	17.6-18.6
5645 1990 SP	6	-0.24	0.31	+0.13	0.35	48-51	16.3-16.7
5646 1990 TR	5	-0.14	0.39	-0.03	0.30	33-51	18.2-18.7
5751 Zao	16	+0.01	0.34	+0.30	0.42	54-69	17.6-17.7
5863 Tara	6	+0.08	0.58	+0.10	0.39	62-74	17.3-17.5
6063 Jason	3	-0.23	0.69	+0.19	0.84	65-73	16.5-16.7
6239 Minos	3	-0.57	0.39	+0.29	0.22	13-61	14.1-16.9
6455 1992 HE	22	-0.17	0.42	+0.60	0.32	37-69	13.4-18.2
7092 Cadmus	30	+0.15	0.45	+0.13	0.42	52-70	16.2-17.7
7822 1991 CS	9	-0.08	0.54	-0.05	0.51	13-41	17.8-18.3
8013 Gardonmoore	23	+0.12	0.54	+0.09	0.32	39-60	16.8-18.0
8037 1993 HO1	19	-0.10	0.40	-0.04	0.30	41-73	17.0-18.5
20460 Robwhiteley	2	-	-	-	-	69-69	16.4-16.4
21088 1992 BL2	29	+0.04	0.39	+0.41	0.38	08-56	16.5-18.5
21374 1997 WS22	9	+0.31	0.39	-0.29	0.39	39-64	17.5-18.5
22771 1999 CU3	13	-0.40	0.28	+0.03	0.30	12-62	14.2-17.5
24445 2000 PM8	23	+0.07	0.40	+0.15	0.43	35-74	16.0-17.8
25143 Itokawa	2	-	-	-	-	37-39	17.8-18.3
25330 1999 KV4	29	+0.10	0.41	+0.35	0.45	10-73	15.1-17.1
31669 1999 JT6	12	-0.06	0.64	-0.10	0.51	06-49	14.9-16.5
33342 1998 WT24	5	+0.26	0.46	+0.42	0.23	58-74	09.3-16.1
35107 1991 VH	16	-0.47	0.35	+0.14	0.35	25-60	16.7-18.1
35396 1997 XF11	9	+0.03	0.30	+0.61	0.37	53-66	16.0-17.9
36284 2000 DM8	13	+0.15	0.45	-0.02	0.39	21-42	17.8-18.5

Таблица 3 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
40267 1999 GJ4	47	-0".13	$\pm 0".38$	-0".04	$\pm 0".37$	03°-52°	16.0-18.6
52340 1992 SY	14	-0.07	0.38	-0.04	0.66	43-71	15.1-17.2
53789 2000 D104	5	-0.13	0.18	+0.05	0.16	43-63	15.8-16.1
54071 2000 Q146	20	+0.42	1.01	+0.07	0.64	01-61	16.5-18.2
54690 2001 EB	14	+0.03	0.44	+0.10	0.33	06-59	18.1-18.7
54789 2001 MZ7	27	-0.03	0.34	+0.08	0.34	16-52	16.2-17.0
65679 1989 UQ	2	-	-	-	-	61-65	16.8-17.1
65706 1992 NA	5	-0.23	0.34	-0.19	0.52	43-72	17.6-18.0
65803 Didymos	7	-0.21	0.39	+0.03	0.27	28-64	14.3-16.3
66063 1998 RO1	10	+0.53	0.40	+0.31	0.39	46-63	15.8-16.6
66391 1999 KW4	5	+0.16	0.84	+0.18	0.64	36-40	12.2-14.0
68216 2001 CV26	2	-	-	-	-	71-73	17.7-17.8
68548 2001 XR31	3	+0.67	0.21	-0.09	0.09	04-42	18.4-18.7
68950 2002 QF15	11	-0.19	0.35	+0.10	0.30	12-51	16.2-17.5
85585 1998 FG2	6	+0.21	0.33	-0.38	0.43	07-46	16.7-18.4
85709 1998 SG36	30	+0.05	0.37	+0.35	0.42	45-72	16.7-17.5
85713 1998 SS49	2	-	-	-	-	74-75	17.8-18.5
85938 1998 DJ4	18	+0.19	0.49	+0.20	0.34	09-68	16.8-17.4
85953 1999 FK21	26	+0.18	0.46	-0.17	0.38	42-74	16.0-18.4
88188 2000 XH44	20	-0.07	0.29	+0.08	0.25	34-74	14.3-15.4
88710 2001 SL9	4	-0.07	0.53	+0.05	0.33	32-53	17.8-18.3
89136 2001 US16	60	-0.10	0.32	+0.18	0.35	15-70	14.7-17.6
89355 2001 VS78	17	-0.02	0.42	+0.10	0.35	22-47	16.0-16.7
90416 2003 YK118	1	-	-	-	-	48-48	16.5-16.5
1989 VA	1	-	-	-	-	65-65	18.4-18.4
1990 OS	2	-	-	-	-	36-43	16.2-17.9
1991 VE	6	-0.15	0.43	-0.01	0.37	21-46	17.2-18.3
1997 AE12	14	-0.11	0.36	+0.16	0.26	11-46	17.3-18.3
1998 VO33	9	+0.18	0.44	+0.15	0.50	06-68	17.9-18.5
1998 XB	13	-0.16	0.48	-0.06	0.29	38-66	15.3-18.5
1998 XS16	17	-0.02	0.52	-0.21	0.41	10-56	16.9-18.4
1999 HF1	29	+0.26	0.47	+0.04	0.45	09-50	14.2-15.9
1999 OP3	9	-0.15	0.36	+0.11	0.47	31-59	18.0-18.1
1999 TF211	37	-0.04	0.32	+0.09	0.33	01-73	15.9-18.2
2000 BJ19	1	-	-	-	-	59-59	18.0-18.0
2000 EE104	4	-2.04	0.34	-0.54	0.46	37-54	17.9-18.3
2000 EV70	1	-	-	-	-	67-67	18.4-18.4
2000 GD2	5	+0.13	0.58	+0.10	0.49	37-60	14.6-15.7
2000 NL10	3	-0.28	0.22	+0.23	0.34	34-53	16.7-17.1
2000 VJ61	13	-0.15	0.51	+0.09	0.40	37-75	17.6-18.0
2001 BE10	2	-	-	-	-	68-74	17.8-18.2
2001 CC21	8	0.00	0.31	+0.27	0.36	49-66	17.6-18.1
2001 CL42	20	+0.12	0.42	+0.15	0.32	42-70	16.9-18.0
2001 RY11	1	-	-	-	-	60-60	18.1-18.1



Таблица 3 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
2001 SK162	5	-0".30	±0".43	+0".36	±0".34	48°-52°	16.7-17.7
2001 VK5	27	0.00	0.42	-0.02	0.39	15-56	17.1-18.1
2001 XU10	18	+0.06	0.47	+0.16	0.40	11-47	17.4-17.8
2002 AL14	22	-0.17	0.44	+0.09	0.31	01-69	15.6-18.7
2002 CD	5	+0.42	0.19	+0.12	0.15	35-59	17.6-18.5
2002 CQ11	3	+0.19	0.43	+0.07	0.03	40-44	17.3-17.7
2002 HK12	9	-0.07	0.21	+0.34	0.20	32-45	15.8-17.0
2002 KH3	7	-0.19	0.51	+0.16	0.46	32-53	18.0-18.7
2002 OS4	4	-0.26	0.33	-0.68	0.25	25-30	17.5-18.1
2002 QE15	4	-0.14	0.38	+0.05	0.58	61-62	14.6-14.6
2002 RH52	19	-0.11	0.46	+0.16	0.33	03-50	16.1-17.2
2002 TD60	10	-0.19	0.23	+0.16	0.27	14-40	15.4-18.1
2002 TP69	3	+0.11	0.55	+0.08	0.67	40-47	17.8-18.1
2002 TS67	4	-0.07	0.35	+0.80	0.50	34-50	16.8-18.1
2002 UN	7	-0.17	0.43	+1.13	0.88	22-49	18.0-18.6
2002 VC92	2	-	-	-	-	68-68	17.6-17.6
2002 VR94	3	-0.09	0.14	-0.14	0.20	37-42	18.2-18.7
2002 WP	2	-	-	-	-	30-30	18.1-18.3
2002 WW17	3	0.00	0.47	+0.28	0.46	28-50	18.3-18.5
2002 WZ2	3	+0.21	0.50	+0.36	0.35	45-51	16.5-18.0
2002 XA	17	-0.26	0.37	+0.06	0.47	17-41	16.9-18.2
2002 XG4	1	-	-	-	-	58-58	17.1-17.1
2002 XK4	12	+0.24	0.76	+0.59	0.72	27-47	16.9-18.8
2002 XM90	19	-0.01	0.60	+0.16	0.59	02-30	18.0-18.2
2002 XO14	1	-	-	-	-	06-06	15.8-15.8
2002 XP40	11	+0.10	0.58	-0.19	0.45	20-46	17.4-18.5
2002 YN2	1	-	-	-	-	15-15	17.9-17.9
2003 AD1	13	+0.04	0.34	+0.18	0.48	11-56	17.8-19.3
2003 AJ73	18	-0.24	0.46	+0.02	0.44	23-69	15.9-17.6
2003 AK18	5	+0.17	0.45	-0.36	0.47	38-45	16.0-18.7
2003 AL18	2	-	-	-	-	44-44	16.5-17.4
2003 AO4	2	-	-	-	-	44-63	18.5-18.5
2003 BB43	8	+0.45	0.84	+0.10	0.63	17-31	17.7-18.4
2003 BH	2	-	-	-	-	22-22	17.9-17.9
2003 BQ64	3	-0.39	0.56	-0.65	0.41	45-45	19.1-19.1
2003 BR47	1	-	-	-	-	44-44	18.0-18.0
2003 BT35	1	-	-	-	-	42-42	18.0-18.0
2003 CA	3	-0.31	0.83	+0.15	0.46	31-33	17.3-17.5
2003 CJ11	12	+0.11	0.45	-0.13	0.36	44-51	18.0-18.4
2003 CP20	13	-0.12	0.41	-0.16	0.30	29-62	17.4-17.9
2003 CQ20	2	-	-	-	-	68-68	16.7-16.7
2003 DA16	2	-	-	-	-	43-49	18.1-18.2
2003 DF16	1	-	-	-	-	56-56	18.7-18.7
2003 DX10	2	-	-	-	-	34-38	18.4-18.4

Таблица 3 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
2003 EO16	1	-	-	-	-	46°-46°	18.3-18.3
2003 FH1	10	-0".16	±0".47	+0".08	±1".06	25-53	16.8-18.4
2003 FS2	11	-0.08	0.47	+0.29	0.50	33-70	16.8-17.7
2003 FT3	8	-0.18	0.33	+0.20	0.27	56-67	17.6-17.9
2003 GY	5	+0.31	0.42	+0.09	0.57	27-36	17.5-18.6
2003 HM16	10	+0.35	0.33	+0.02	0.49	15-47	16.9-17.5
2003 KP2	9	-0.01	0.43	+0.13	0.58	34-59	16.4-16.6
2003 KR18	14	-0.24	0.33	-0.01	0.30	30-49	16.9-17.8
2003 MT2	1	-	-	-	-	41-41	18.3-18.3
2003 ND	6	-0.06	0.44	-0.07	0.41	34-43	18.1-18.4
2003 QZ29	1	-	-	-	-	72-72	16.4-16.8
2003 QZ30	4	-0.34	0.65	+0.39	0.37	53-71	18.4-18.4
2003 QN47	4	+0.21	0.37	+0.32	0.58	06-37	17.5-18.4
2003 RB	17	-0.16	0.41	-0.17	0.37	10-58	16.4-17.7
2003 RL10	3	-0.15	0.64	-0.64	0.12	41-45	16.9-16.9
2003 RM10	2	-	-	-	-	48-49	17.5-18.2
2003 RN10	2	-	-	-	-	59-65	18.1-18.1
2003 RS1	1	-	-	-	-	49-49	18.5-18.5
2003 SL5	5	-0.19	0.18	+0.13	0.52	57-65	17.6-18.4
2003 SS214	2	-	-	-	-	46-46	17.9-17.9
2003 SU214	2	-	-	-	-	46-49	17.9-18.1
2003 UB5	5	-0.39	0.24	+0.20	0.18	17-47	15.9-17.3
2003 UY19	3	-0.57	0.31	-0.03	0.60	26-39	18.7-19.4
2003 VF1	14	+0.19	0.44	+0.38	0.40	30-63	16.8-18.8
2003 VG1	7	-0.07	0.52	-0.13	0.41	54-69	17.8-18.5
2003 WB25	1	-	-	-	-	41-41	16.9-16.9
2003 WC158	1	-	-	-	-	51-51	17.7-17.7
2003 WX153	1	-	-	-	-	72-72	17.0-17.0
2003 WY25	2	-	-	-	-	30-35	15.3-15.3
2003 YG118	5	+0.11	0.38	+0.15	0.35	26-74	18.0-18.2
2003 YL	1	-	-	-	-	39-39	18.4-18.4
2003 YM137	2	-	-	-	-	37-41	16.7-16.8
2003 YR70	3	+0.04	0.60	-0.11	0.60	48-65	16.5-17.3
2003 YS17	3	+0.12	0.54	-0.41	0.06	38-45	17.6-18.3
2003 YS117	1	-	-	-	-	48-48	17.8-17.8
2003 YT1	37	-0.07	0.39	+0.05	0.46	31-69	14.3-17.8
2003 YX1	3	-0.20	0.27	-0.72	0.23	36-51	16.2-17.6
2004 AF	3	-0.01	0.57	-0.26	0.28	06-43	17.2-18.2
2004 AS1	4	-0.83	1.61	+0.13	0.66	24-60	17.4-18.3
2004 BE86	18	+0.06	0.49	+0.06	0.32	54-62	18.2-18.5
2004 BV18	1	-	-	-	-	54-54	16.6-16.6
2004 BW18	2	-	-	-	-	41-72	17.6-17.9
2004 CB	3	+0.61	0.30	+0.47	0.15	45-70	17.1-17.4
2004 CD39	3	-0.59	0.36	+0.11	0.36	72-74	18.1-18.6

Таблица 3 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
2004 CE39	1	-	-	-	-	08°-08°	17.9-17.9
2004 CP49	1	-	-	-	-	14-14	18.8-18.8
2004 DK1	21	-0".08	±0".34	+0".10	±0".48	51-73	16.2-17.8
2004 DV24	6	+0.50	0.30	-0.08	0.34	60-69	18.1-18.4
2004 EC	24	+0.18	0.45	0.00	0.46	02-50	16.1-17.9
2004 EJ1	1	-	-	-	-	49-49	17.7-17.7
2004 EK1	1	-	-	-	-	36-36	18.4-18.4
2004 EP20	6	+0.28	0.21	+0.15	0.40	36-46	18.6-18.7
2004 EU22	7	+0.42	0.39	-0.28	0.37	26-38	16.1-18.7
2004 FA	1	-	-	-	-	63-63	17.5-17.5
2004 FE5	1	-	-	-	-	61-61	18.6-18.6
2004 FF29	29	-0.01	0.52	+0.14	0.56	42-55	16.7-17.8
2004 FJ11	13	+0.54	0.50	-0.09	0.46	57-74	17.9-18.8
2004 FX31	22	+0.05	0.46	-0.02	0.50	05-31	17.3-18.9
2004 HC39	3	-0.23	0.44	+0.41	0.18	47-47	17.1-17.1
2004 JA	33	-0.01	0.21	-0.09	0.17	25-73	15.6-16.8
2004 JP1	5	+0.07	1.50	+0.38	0.85	75-78	14.2-14.2

Таблица 4. Результаты обработки наблюдений малых планет, названных именами пулковских астрономов и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
762 Pulkova	23	-0".17	±0".24	+0".29	±0".28	41°-69°	12.3-12.5
768 Struveana	12	-0.19	0.23	+0.06	0.17	21-55	13.3-14.3
786 Bredichina	7	-0.09	0.25	-0.03	0.14	36-56	12.9-14.5
1074 Beljawska	8	+0.16	0.22	+0.12	0.34	52-69	14.3-15.4
1129 Neujmina	19	-0.01	0.34	+0.12	0.21	45-64	14.4-15.9
1783 Albitskij	14	-0.13	0.25	+0.18	0.26	52-63	15.0-16.0
1910 Mikhailov	9	-0.03	0.40	+0.17	0.34	64-73	16.0-16.7
2046 Leningrad	4	-0.33	0.20	-0.13	0.18	44-69	16.9-17.1
2386 Nikonov	14	+0.02	0.39	+0.16	0.19	27-60	16.5-18.1
2416 Sharonov	13	-0.25	0.15	+0.13	0.29	64-67	15.9-16.6
2536 Kozyrev	10	0.01	0.31	+0.21	0.28	52-63	16.8-17.5
2721 Vsekhsvyatskij	15	-0.23	0.21	+0.01	0.31	37-59	16.4-17.8
2722 Abalakin	14	+0.17	0.31	0.00	0.41	48-72	16.6-17.7
2724 Orlov	10	+0.09	0.30	+0.08	0.43	56-67	17.0-17.2
2792 Ponomarev	12	-0.16	0.30	+0.06	0.19	19-46	15.5-16.9
3036 Krat	6	+0.20	0.15	+0.07	0.13	65-68	15.2-15.3
3100 Zimmerman	5	-0.17	0.38	-0.19	0.31	49-73	16.1-16.4
3385 Bronnina	14	-0.22	0.17	-0.07	0.33	52-72	15.5-17.5
3493 Stepanov	6	+0.15	0.60	+0.03	0.36	67-70	17.8-18.4

Таблица 4 (продолжение)

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
3761 Romanskaya	9	+0".01	$\pm 0".22$	+0".29	$\pm 0".20$	55°-67°	15.6-16.8
4590 Dimaschegolev	5	+0.01	0.37	+0.17	0.14	62-67	15.4-15.7
4592 Alkissia	8	-0.22	0.37	+0.26	0.23	43-58	17.4-18.1
5084 Gnedin	8	-0.23	0.28	-0.10	0.41	30-40	16.4-16.8
5303 Parijskij	18	-0.05	0.37	+0.11	0.42	34-60	16.3-18.0
5319 Petrovskaya	13	-0.12	0.39	+0.06	0.37	49-66	16.6-18.3
5414 Sokolov	6	-0.20	0.49	-0.06	0.52	49-62	17.4-17.9
7008 Pavlov	20	-0.08	0.40	+0.09	0.31	39-74	15.8-17.9
9932 Kopylov	12	-0.12	0.33	-0.28	0.35	53-61	16.9-17.6

Таблица 5. Результаты обработки наблюдений двойных астероидов и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
87 Sylvia	22	+0".36	$\pm 0".27$	+0".37	$\pm 0".28$	57°-65°	12.2-13.3
423 Diotima	28	+0.36	0.29	+0.31	0.30	54-73	11.6-13.2
1620 Geographos	6	+0.20	0.39	+0.19	0.20	23-45	15.1-16.5
4179 Toutatis	10	-0.17	0.42	+0.39	0.24	42-53	14.8-16.8
5407 1992 AX	32	+0.01	0.32	+0.16	0.33	32-71	16.0-17.2

Таблица 6. Результаты обработки наблюдений тесных сближений малых планет и данные по наблюдаемым объектам.

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{\alpha}'' \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma_{\delta}''$	Z диапазон	m диапазон
4 Vesta	27	-0".07	$\pm 0".34$	+0".33	$\pm 0".29$	45°-67°	06.6-08.4
9 Metis	46	+0".38	0.18	+0".42	0.24	30-73	08.6-10.9
39 Laetitia	22	+0.33	0.25	+0.43	0.24	44-69	11.1-11.9
42 Isis	6	+0.21	0.29	+0.27	0.17	35-39	11.8-12.7
45 Eugenia	30	-0.11	0.33	+0.43	0.31	53-70	11.6-13.0
107 Camilla	32	-0.06	0.27	+0.39	0.27	47-77	11.8-12.9
294 Felicia	28	-0.13	0.40	+0.47	0.30	54-70	13.4-15.0
451 Patientia	37	+0.02	0.22	+0.45	0.20	37-68	10.4-12.5
704 Interamnia	24	-0.18	0.24	+0.51	0.25	26-55	10.0-11.7
1882 Rauma	29	+0.06	0.36	+0.32	0.34	47-73	15.8-17.4
2081 Sazava	12	-0.10	0.49	+0.54	0.20	36-60	16.4-17.4
3546 Atanasoff	36	+0.07	0.37	+0.40	0.38	40-57	16.5-18.2
6254 1993 UM3	18	-0.08	0.43	+0.53	0.26	47-73	16.5-17.2
6770 Fugate	13	+0.03	0.40	+0.12	0.41	47-62	17.2-17.7

**Таблица 7. Результаты обработки наблюдений комет  
и данные по наблюдаемым объектам.**

Объект	N	$\overline{(O-C)}_{\alpha} \cos \delta$	$\sigma''_{\alpha} \cos \delta$	$\overline{(O-C)}_{\delta}$	$\sigma''_{\delta}$	Z диапазон	m диапазон
2P Encke	7	+0".33	±0".51	+0".72	±0".24	15°-65°	14.5-16.3
29P Schwassmann- Wachmann 1	14	+0.11	0.35	+0.11	0.50	63-69	12.1-12.4
40P Vaisala 1	3	-0.18	0.19	+0.34	0.33	59-60	08.3-08.4
43P Wolf-Harrington	25	+1.85	1.27	+0.70	0.92	38-76	10.4-11.2
116P Wild 4	4	-0.15	0.28	+0.32	0.58	72-73	10.8-10.9
153P Ikeya-Zhang	30	*	0.68	*	0.63	11-73	04.9-06.5
154P Brewington	12	+0.11	0.60	+0.60	0.82	65-69	09.1-09.2
C/2001 HT50	33	*	0.61	*	0.56	45-74	09.6-09.9
C/2001 OG108	20	-0.83	0.65	-0.07	0.66	22-61	12.6-13.6
C/2001 RX14	32	*	0.68	*	0.62	15-69	10.1-11.9
C/2002 O7	30	*	1.24	*	0.46	18-48	12.2-14.7
C/2002 T7	3	-3.78	0.49	-1.37	0.23	58-67	09.3-09.5
C/2002 V1	9	+3.90	1.07	+0.94	0.79	46-55	07.2-07.4
C/2002 VQ92	27	-0.04	0.41	+0.24	0.35	01-59	18.3-18.6
C/2003 WT42	20	-1.80	0.84	-2.34	0.70	27-68	18.1-18.2
C/2004 DZ61	2	-	-	-	-	29-29	19.0-19.0

Авторы выражают свою благодарность В.К. Абалакину за помощь в получении электронной копии каталога USNO B1.0, С.Д. Цекмейстер и Р.И. Смехачевой за эфемеридную поддержку наблюдений, О.В. Кракосевичу за помощь в оформлении статьи.

#### Литература

1. **Бекяшев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин 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.
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, данный сборник.
3. **Девяткин А.В., Львов В.Н., Сидоров М.Ю., Смехачева Р.И.** 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., Свидунович 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. Куприянов, В.Б. Рафальский, М.Ю. Сидоров* Пулковская программа изучения объектов, сближающихся с Землей // Изв. ГАО, № 216, с.218–222.
11. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M47449, 16 Feb., 2003.
12. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V.; Kornilov E.V.; Sidorov M.Yu.; Marsden B.G. et al.* Observations of Minor Planets, Minor Planet Circ., M47506, 16 Feb., 2003.
13. *Devyatkin A.V.; Gorshanov D.L.; Kouprianov V.V.; Kornilov E.V.; Sidorov M.Yu.; Baturina G.D.; Lemeseva A.V.; Mikhailova N.V.; Marsden B.G. et al.* Observations of Minor Planets, Minor Planet Circ., M47994, 18 Mar., 2003.
14. *Devyatkin A.V.; Gorshanov D.L.; Kouprianov V.V.; Sidorov M.Yu.; Baturina G.D.; Lemeseva A.V.; Mikhailova N.V.; Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M48317, 1 May, 2003.
15. *Devyatkin A.V.; Gorshanov D.L.; Kouprianov V.V.; Kornilov E.V.; Sidorov M.Yu.; Baturina G.D.; Lemeseva A.V.; Mikhailova N.V.; Marsden B.G. et al.* Observations of Minor Planets, Minor Planet Circ., M48619, 14 Jun., 2003.
16. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Lemeseva A.V., Mikhailova N.V., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M49222, 6 Aug., 2003.
17. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Lemeseva A.V., Mikhailova N.V., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M49389, 10 Sep., 2003.
18. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Kornilov E.V., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Lemeseva A.V., Mikhailova N.V., Marsden B.G. et al.* Observations of Minor Planets, Minor Planet Circ., M49426, 10 Sep., 2003.
19. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M50321, 8 Dec., 2003.
20. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M50564, 6 Feb., 2004.
21. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.* Observations of minor planets, Minor Planet Circ., M50596, 6 Feb., 2004.
22. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M51155, 6 Mar., 2004.
23. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M51329, 15 Apr., 2004.
24. *Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.* Observations of comets, Minor Planet Circ., M51469, 4 May, 2004.

25. **Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.** Observations of minor planets, Minor Planet Circ., M51499, 4 May, 2004.
26. **Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu., Sidorov M.Yu., Baturina G.D., Bekhteva A.S., Marsden B.G. et al.** Observations of minor planets, Minor Planet Circ., M52494, 30 Aug., 2004.
27. **Hilton J.L., Middour J., Seidemann P.K.** Prospects for finding asteroid masses.// U.S. Naval Observatory, 1998, 13 p.
28. **A. Lopez Garsia, Yu.D. Medvedev, J.A. Morano Fernandez.** Using close encounters of minor planets for the improvement of their masses // Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies, 1997, p.199-204.
29. **D. Matson,** Ed. IRAS Asteroid and Comet Survey: Preprint Version No.1 (1986). (JPL internal document No. 3698).

### **ASTROMETRIC OBSERVATION OF MINOR BODIES OF SOLAR SYSTEM ON MIRROR ASTROGRAPH ZA-320 IN 2002-2004**

**Devyatkin A.V., L'vov V.N., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Aleshkina E.Yu,  
Bekhteva A.S., Baturina G.D., Kornilov E.V., Sidorov M.Yu.**

#### **Summary**

*Observations of minor bodies of solar systems were made. Positions were obtained for 239 of such objects in USNO–A2.0 and USNO–B1.0 reference frame. To process the observations the APEX program was used. Chromatic refraction was taken into account. Accuracy of the positions was estimated. The mean error is about 0".3 for right ascension and declination.*

**КАС ГЕОБС  
КОСМИЧЕСКАЯ АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
«ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ»**

**Канаев И.И., Сочилина А.С., Буткевич А.Г., Вершков А.Н., Горшанов Д.Л.,  
Григорьев К.В., Девяткин А.В.**

*Представлена концепция Космической астрометрической системы, предназначенной для непрерывного наблюдения за объектами размером от 7–11 см, находящимися на геостационарной орбите, определения их характеристик и орбит. Система состоит из спутника, находящегося вблизи геостационарной орбиты на высоте 38 000 км, и комплекса наземной поддержки. Приведено обоснование выбора орбиты и даны оценки точности определения положений и блеска объектов различного размера.*

**Введение**

После успешного завершения европейской астрометрической космической программы HIPPARCOS несовершенство программ наземных наблюдений объектов геостационарной орбиты (ГСО) стало более ясным. Появившиеся предложения о создании специализированных спутников (Япония, 1995 г., Россия, 1998 г.) свидетельствуют об этом.

Наблюдения из космоса имеют ряд очевидных преимуществ. К ним относятся:

1. Возможность обзора всей зоны геостационарной орбиты (360°);
2. Оперативность и полнота обзора;
3. Высокая точность определяемых координат;
4. Наблюдение мелкоразмерных объектов, невидимых с поверхности земли;
5. Независимость от погодных условий;
6. Быстрое определение орбиты всех наблюдаемых объектов;
7. Возможность оценки формы крупных объектов.

**1. Задачи КАС ГЕОБС**

В Главной (Пулковской) астрономической обсерватории в 1999 году разработана концепция **Космической астрометрической системы ГЕОБС (КАС ГЕОБС)**, состоящей из космического аппарата Геостационарная Обсерватория (ГЕОБС) и наземных астрономических и иных средств поддержки работы ГЕОБС. Работа велась с опорой на опыт разработки концепции Космической астрометрической системы «Струве», ранее выполненной в Пулковской обсерватории (см. *Еришов и др., 1995*).

Задачами проекта КАС ГЕОБС является:

1. Проведение наблюдений из космоса в зоне ГСО спутников и сопровождающих объектов малого размера, недоступных для наземных исследований.
2. Составление и поддержание каталога орбит всех наблюдаемых объектов в системе ICRS.
3. Проведение с периодом 5–14 суток контроля параметров орбит, обнаружение появления новых объектов в зоне ГСО и их каталогизация.
4. Измерение блеска объектов в зоне ГСО в интегральном свете.
5. Оценка конфигурации объектов большого размера.

Для осуществления задачи предлагается выполнить запуск спутника-обсерватории (ГЕОБС) на орбиту с размером большой полуоси 38 000 км и осуществлять сканирова-



ние зоны ГСО путём вращения аппарата вокруг двух осей. При этом определяются положения объектов зоны ГСО относительно звёзд, что даёт возможность определения их орбит в системе ICRS. Наблюдённые данные после предварительной обработки передаются на Землю в центры обработки данных.

Результаты расчётов показали, что при наблюдениях с борта КА ГЕОБС:

1. В зоне ГСО регистрируются положения объектов диаметром от 7 – 11 см (в зависимости от расстояния до КА), что соответствует предельной звёздной величине 17.8 при наблюдениях с Земли.
2. Точность определения с борта КА единичного положения объекта диаметром 10 см, приведённая к наблюдениям с поверхности Земли, составляет 0"6 – 3"3 в зависимости от расстояния до него, что соответствует точности определения его положения на орбите не хуже 0"1.

## **2. Состав КАС ГЕОБС**

### **2.1. Космический аппарат ГЕОБС**

Космический аппарат ГЕОБС с общим весом научной аппаратуры менее 1000 кг, работает на орбите, близкой к геостационарной. На КА размещены 8 телескопов с микрометрами на основе приборов с зарядовой связью, вычислительная техника и система для передачи информации на Землю с минимально допустимой мощностью 0.6 Мбод в секунду.

### **2.2. Бортовая ЭВМ и блок памяти**

Бортовая ЭВМ и блок памяти, необходимые для обработки и хранения в течение 5 суток результатов наблюдений всех четырех телескопов, по своим возможностям должны соответствовать двум РС Р4-1400 с оперативной памятью 256 Мбайт каждый и суммарным объемом дисковых накопителей не менее 1 Тбайт.

Общий вес бортовой ЭВМ и блока памяти не превышают 25 кг.

### **2.3. Наземный комплекс приема информации**

Бортовая система передачи научной информации на Землю имеет мощность канала около 36 Мбод. Передача осуществляется в условиях прямой видимости приемных станций, отчего в ней возникают регулярные перерывы длительностью 6 суток. Поэтому для оптимальной работы КА требуется наличие не менее двух станций, расположенных в местах с хорошим астроклиматом в восточных и западных районах России.

### **2.4. Центры обработки информации**

Целесообразно создать два центра обработки информации, получающих весь наблюдательный и иной материал, но работающих по различным методикам, как это было сделано в проекте HIPPARCOS. Одним из таких центров должна быть ГАО РАН, вторым – НПО ПМ.

Центры должны быть оснащены на современном уровне вычислительной техникой и средствами связи между собой и станциями сбора информации. Основным инструментом центра обработки астрономической информации должен быть комплекс современных скоростных ЭВМ с большим объемом оперативной и внешней памяти. В настоящее время существуют следующие модели вычислительных систем, которые могут быть предложены в качестве основы для использования в центре обработки астрономической информации:

- Сетевой сервер, работающий в операционной системе UNIX и имеющий тактовую частоту не ниже 600 МГц, оперативную память до 1 Гбайт и суммарный объем дисковых накопителей не менее 10 Тбайт.
- РС-совместимый компьютер с одним или двумя центральными процессорами класса Pentium 4 или K7 Athlon, работающий под управлением операционной системы

LINUX или Windows 2000 Professional, и обладающий теми же параметрами по быстродействию и объему запоминающих устройств, что и сетевой сервер.

Первый вариант является более предпочтительным с точки зрения производительности, а по стоимости не намного превосходит второй вариант.

Кроме центрального компьютера в центре обработки информации должны быть несколько компьютеров более низкого класса для проведения первичной обработки поступающей информации, промежуточной и вспомогательной работы. Все компьютеры должны быть объединены в локальную сеть для оперативного обмена информацией. Локальная сеть также позволит в случае необходимости организовать параллельную обработку информации на нескольких рабочих станциях и разгрузить центральную ЭВМ. Локальная сеть через сервер должна быть подключена к Internet для оперативного обмена информацией с другими участниками эксперимента.

Из периферийных устройств, необходимых для успешной работы центра, следует назвать устройства чтения/записи магнитных лент высокой плотности и оптических дисков и несколько скоростных модемов.

Примерная численность штата такого центра составит около 10 сотрудников.

### 3. Ожидаемые результаты

В течение всего срока работы (7 лет) Космическая астрометрическая система ГЕОБС будет выполнять следующие задачи:

1. Составление и поддержание каталога орбит в системе ICRS всех ИСЗ и всех сопровождающих объектов размером более 15 см в зоне геостационарной орбиты, т.е. в пределах  $\pm 2700$  км по вертикали и горизонтали от нее.
2. Определение положения в экваториальной системе координат ICRS любого наблюдаемого объекта зоны геостационарной орбиты с ошибкой не более  $0''1$ .
3. Проведение с периодом не более 14 суток контроля параметров орбит известных объектов, выявление новых объектов и их каталогизация.
4. Наблюдение и определение поправок к орбитам высокоорбитальных спутников.
5. Измерение блеска наблюдаемых объектов с ошибкой не более 7%.
6. Оценка конфигурации объектов с угловым размером более  $10''$ .
7. Систематическое определение наземными оптическими средствами координат КА ГЕОБС с результирующей ошибкой менее  $0''03$ .

### 4. Сравнительные данные

В Таблице 1 приведены основные характеристики существующих служб наблюдения объектов зоны геостационарной орбиты и ожидаемые результаты проекта ГЕОБС.

**Таблица 1.** Основные характеристики существующих служб наблюдения объектов зоны геостационарной орбиты и ожидаемые результаты проекта ГЕОБС

Наблюдения объектов зоны ГСО	РОССИЯ (ЦККИ)	США (NASA)	РОССИЯ (КАС ГЕОБС)
Количество объектов (каталог)	~ 650	878 (на 30.12.00)	2000
Диапазон подспутниковых долгот	$180^\circ$	$360^\circ$	$360^\circ$
Периодичность контроля	2–3 мес.	более $7^d$	$5\text{--}14^d$
Размеры объектов	от 1 м	от 0.8 м	от 0.07 м
Предельная звездная величина	10–12	15–16	17–18
Ошибка единичного измерения координат	1–5''	3–5''	$0''6\text{--}3''3$

## 5. Выбор орбиты и движение КА ГЕОБС

Орбиту Геостационарной обсерватории (ГЕОБС) будем называть опорной. Её выбор зависит от поставленной задачи. Для глобального мониторинга геостационарной области определим параметры этой области и особенности эволюции орбит. В качестве исходных данных будем использовать каталог орбит геостационарных объектов на начало 1999 года для 676 объектов, контролируемых наземными станциями.

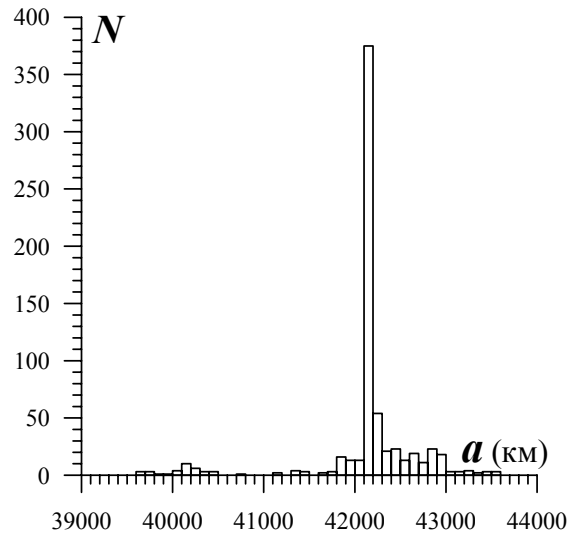


Рис.1. Распределение больших полуосей каталогизированных ГС.

Основными параметрами, определяющими траекторию движения геостационарного спутника, являются:  $a$  – большая полуось орбиты,  $e$  – эксцентриситет, наклон орбиты  $i$ , долгота восходящего узла  $\Omega$ ,  $\omega$  – аргумент перигея. Гистограммы орбитальных параметров объектов каталога приведены на рис. 1. Для большинства геостационарных объектов значения полуоси находятся в интервале от 39600 до 43600 км (что соответствует суточному движению от  $324^\circ$  до  $380^\circ$ ), а наклонение не превышает  $15^\circ$ – $17^\circ$ . В геоцентрической экваториальной системе координат область движения ГСО представляет собой кольцо, шириной в несколько тысяч километров, наклоненное к плоскости экватора под углом примерно  $7^\circ 3'$  (рис 2). Это объясняется особенностью запусков и эволюции орбит геостационарных объектов (См. *Kiladze et al, 1997, Kiladze, Sochilina, 2003.*)

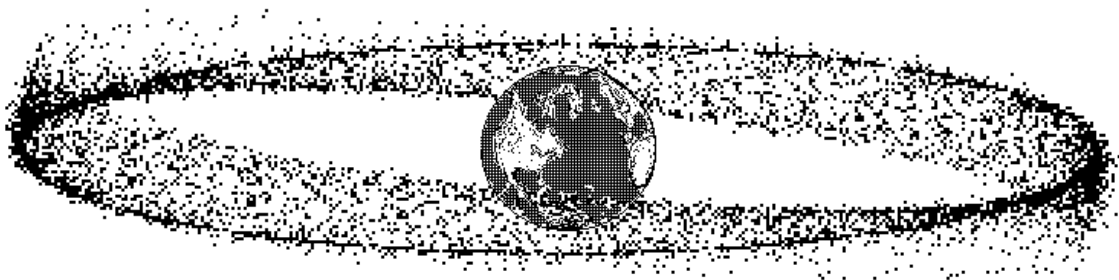


Рис.2. Зона ГСО (положения каталогизированных геостационарных спутников на фиксированный момент времени).

Дело в том, что для «неподвижности» ГСО в системе координат, связанных с вращающейся Землей, запуски производятся, как правило, в близэкваториальную плоскость с  $a = 42165$  км и  $i \cong 0^\circ$ . Под влиянием лунно-солнечных возмущений наклон ор-

бит изменяется от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ , а долготы их узлов от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Заметим, что эволюция области движения одного ГСО за 55 лет совпадает с областью движения всех объектов. Эта так называемая либрация в фазовой плоскости долготы узла и наклона орбиты существенно усложняет теорию движения ГСО. Поэтому при исследовании их движения вводится новая координатная плоскость, относительно этой плоскости наклон орбиты ГСО мало меняется, а долгота узла орбиты прецессирует практически линейно и за 54 года изменяется на  $360^\circ$ . В небесной механике эту плоскость называют плоскостью Лапласа. Она определяется из условия исключения из возмущающей функции члена, вызывающего максимальные долгопериодические изменения в наклоне орбиты к плоскости Лапласа  $i_\Lambda$ . Соответственно для каждого небесного тела существует своя плоскость, относительно которой наклон орбиты мало изменяется.

Переход от экваториальных элементов  $i, \Omega, \omega$  к элементам орбиты  $i_\Lambda, \Omega_\Lambda, \omega_\Lambda$ , отнесенным к плоскости Лапласа совершается по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sin i_\Lambda \sin \Omega_\Lambda &= \sin i \sin \Omega \\ \sin i_\Lambda \cos \Omega_\Lambda &= -\cos i \sin \Lambda + \sin i \cos \Lambda \cos \Omega \\ \cos i_\Lambda &= \cos i \cos \Lambda + \sin i \sin \Lambda \cos \Omega \\ \sin i_\Lambda \sin d &= -\sin \Lambda \sin \Omega \\ \sin i_\Lambda \cos d &= \sin i \sin \Lambda - \cos i \sin \Lambda \cos \Omega \\ \omega_\Lambda &= \omega + d \end{aligned} \right\} \quad (5.01)$$

Для нахождения угла  $\Lambda$  необходимо получить лунно-солнечную возмущающую функцию и разложение геопотенциала, выраженные через элементы орбиты спутника, отнесенные к плоскости Лапласа. Техника этого перехода достаточно хорошо разработана и выполняется с помощью формул вращения сферических функций. Представим возмущающую функцию от гравитационного поля Земли, притяжения Луны и Солнца в виде суммы:

$$R = U + R_L + R_S. \quad (5.02)$$

Разложение возмущающей функции для геопотенциала в элементах орбиты, отнесенных к плоскости Лапласа имеет следующий вид (Сочилина, 1985):

$$U = \operatorname{Re} \frac{GM}{a} \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{k=-l}^l \sum_{p=0}^l \sum_{q=-\infty}^{\infty} (-1)^m (\sqrt{-1})^{l+m} G_{lm} \left( \frac{a_e}{a} \right) E_{lmk}(\Lambda) \times \quad (5.03)$$

$$\times D_{lkp}(i_\Lambda) X_{l-2p+q}^{-l-1, l-2p}(e) \exp \sqrt{-1} [(l-2p)\omega_\Lambda + (l-2p+q)M + k\Omega_\Lambda - mS],$$

где  $G$  – постоянная тяготения,

$M$  – масса Земли,

$G_{lm} = C_{lm} - \sqrt{-1} S_{lm}$ ,  $a_e$  – экваториальный радиус Земли,

$C_{lm}, S_{lm}$  – нормированные параметры геопотенциала,

$D_{lkp}(i_\Lambda), E_{lmk}(\Lambda)$  – функции наклона,

$X_{l-2p+q}^{-l-1, l-2p}(e)$  – коэффициенты Ганзена.

Пертурбационная функция от Луны  $R_L$  имеет вид:

$$R_L = \frac{Gm_L}{a} \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_k^l \sum_p^l \sum_{p'}^l \sum_q^{\infty} \sum_{q'}^{\infty} (-1)^{l-k} \left( \frac{a}{a_L} \right)^{l+1} E_{lmk}^*(\varepsilon - \Lambda) \times \quad (5.04)$$

$$\times D_{lpk}(i_\Lambda) D_{l-mp'}(i_L) X_{l-2p+q}^{l, l-2p}(e) X_{l-2p'+q'}^{-l-1, l-2p'}(e_L) \exp \sqrt{-1} [(l-2p)\omega_\Lambda +$$

$$+(l-2p+q)M + k\Omega_\Lambda + (l-2p')\omega_L + (l-2p'+q')M_L - m\Omega_L],$$

где элементы орбиты с индексом  $L$  соответствуют орбите Луны,  
 $\varepsilon$  – наклон эклиптики к экватору,  
 $m_L$  – масса Луны,

$$E_{lmk}^*(\Lambda) = E_{lmk}(\Lambda) / \varepsilon_m(2l+1),$$

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases}.$$

Для вывода возмущающей функции от Солнца  $R_S$  в (4.04) вместо  $m_L$  подставляем  $m_S$  - массу Солнца, а элементы орбиты Луны заменяем элементами орбиты Солнца. Для нахождения  $a_L$  и  $n_L$ , а также  $a_S$  и  $n_S$  служат уравнения:

$$G(M + m_L) = n_L^2 a_L^3, \quad G(M + m_S + m_L) = n_S^2 a_S^3.$$

Теперь, собирая все члены функции  $R$  с  $\cos\Omega$  и приравнивая этот коэффициент нулю, получим уравнение для определения угла  $\Lambda$ :

$$\frac{\kappa}{2} \left(1 + \frac{3}{2} e^2\right) \sin(\varepsilon - \Lambda) \cos(\varepsilon - \Lambda) + J_{20} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 n^2 (1 - e^2)^{-3/2} \sin \Lambda \cos \Lambda = 0, \quad (5.05)$$

где

$$\kappa = n_L^2 \mu_L (1 - e_L^2)^{-3/2} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i_L\right) + n_S^2 \mu_S (1 - e_S^2)^{-3/2},$$

$$\mu_L = \frac{m_L}{M + m_L}, \quad \mu_S = \frac{m_S}{M + m_S + m_L},$$

$$\mu_L = 1 / 82.3006, \quad \mu_S = 1 / 1.00000304.$$

Из (4.05) получаем, что

$$\operatorname{tg} 2\Lambda = \frac{\kappa \sin 2\varepsilon \left(1 + \frac{3}{2} e^2\right)}{2J_{20} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 n^2 (1 - e^2)^{-3/2} + \kappa \cos 2\varepsilon \left(1 + \frac{3}{2} e^2\right)}. \quad (5.06)$$

Нетрудно показать, что переход к плоскости Лапласа эффективен только для орбит с малыми  $e$ . В Таблице 2 приведены значения угла  $\Lambda$  для круговых орбит при различных значениях большой полуоси орбиты.

**Таблица 2.** Угол  $\Lambda$  (в градусах) для круговых орбит при различных значениях большой полуоси орбиты.

$a / a_e$	$\Lambda$	$a / a_e$	$\Lambda$
4.16	0.94	19.3	23.1
6.61	7.27	21.8	23.2
10.30	19.50	55.0	23.3

Из Таблицы 2 видно, что плоскость Лапласа для Луны ( $a \approx 60.3 a_e$ ), как уже отмечалось, примерно соответствует плоскости эклиптики.

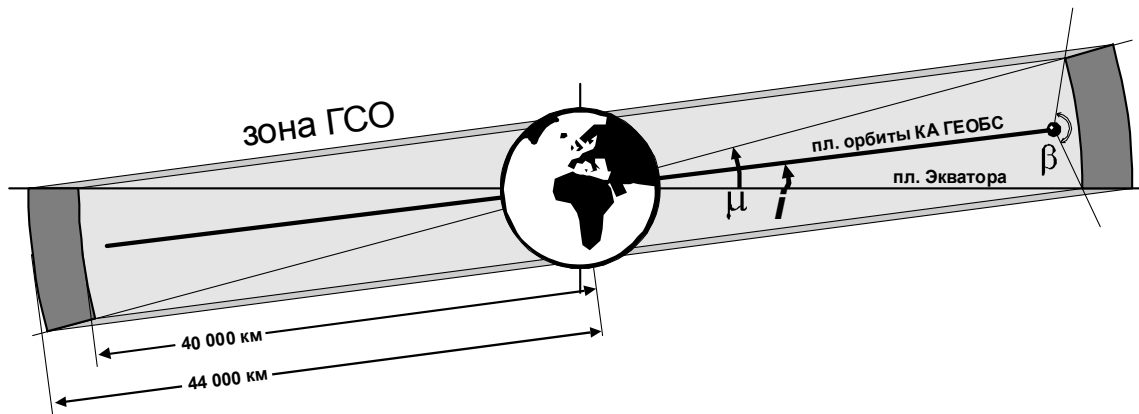
Плоскость Лапласа представляется наиболее удобной и для построения новой координатной системы теории движения и в качестве окрестности орбиты ГЕОБСа, для оптимизации области сканирования (рис.3). В объектоцентрической системе координат область движения ГСО будет иметь вид полосы, ширина которой определяется как

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{r_{\text{ГСО}} \sin i_{\text{ГСО}}}{r_{\text{ГСО}} \cos i_{\text{ГСО}} - r_{\text{ГЕОБС}}}$$

В Таблице 3 приведены максимальные значения высоты ГСО в поле зрения ГЕОБСа в зависимости от наклона

**Таблица 3.** Максимальная высота (в градусах) объектов ГСО над плоскостью орбиты ГЕОБС в зависимости от наклона орбиты объекта ГСО к плоскости орбиты ГЕОБС  $i_{\text{ГСО}}$  и радиуса-вектора  $r_{\text{ГСО}}$  ( $r_{\text{ГЕОБС}}$  — радиус-вектор ГЕОБС = 38000 км).

$i_{\text{ГСО}}$	39600	42195	43600
5	67.22	42.54	34.96
7	74.87	53.15	45.21
8	77.57	57.39	49.54
9	79.82	61.07	53.41
15	88.60	75.96	69.97



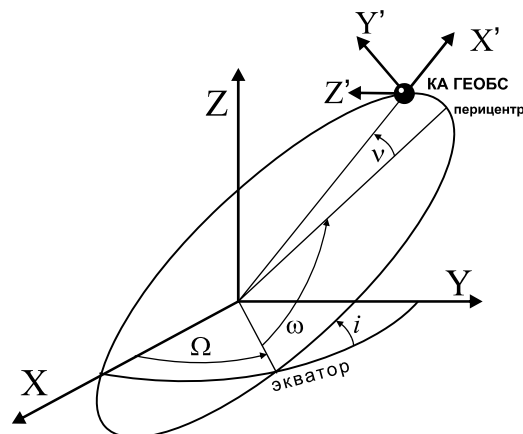
**Рис.3.** Зона ГСО и орбита КА ГЕОБС.  $i$  – наклон орбиты КА к плоскости земного экватора ( $\sim 7^\circ$ ),  $\mu$  – угловой размер ГСО из центра Земли ( $\sim 15^\circ$ ),  $\beta$  – видимый угловой размер ГСО с борта КА ГЕОБС ( $\sim 177^\circ$ ).

Таким образом, область видимого движения объектов на ГСО относительно ГЕОБСа становится осесимметричной (рис. 3), значение максимальной дальности до объектов наблюдений уменьшается, уравниваются условия наблюдений объектов различных типов. Кроме того, выбор начальных орбитальных элементов орбиты на эпоху запуска позволит получить устойчивую плоскость орбиты ГЕОБСа, которая в течении 5–7 лет будет сохранять наклон к плоскости экватора от  $7.5$  до  $8^\circ$ , а долгота восходящего узла  $\Omega$  будет меняться в пределах  $[-7^\circ, 7^\circ]$  (рис. 4).

Выбор значения большой полуоси спутника, определяющей плоскость Лапласа для орбиты ГЕОБСа и соответственные значения наклона и восходящего узла орбиты, отнесенные к этой плоскости, осуществляется в зависимости от требований оперативности обзора геостационарной области (таблица 4), средней дальности объектов и соответствующих минимальных значений блеска фрагментов размером порядка 10 см.

Начальные элементы орбиты КАС ГЕОБС были выбраны следующие:

$$a = 38\,000 \text{ км}, e = 0.00005, i_{\Lambda} = 3.2 \text{ град}, \Omega_{\Lambda} = 20 \text{ град}, \omega = 0.$$



**Рис.4.** Параметры движения и вращения КА ГЕОБС.

**Таблица 4.** Периодичность обзора различных типов объектов ГСО с помощью КАС ГЕОБС.

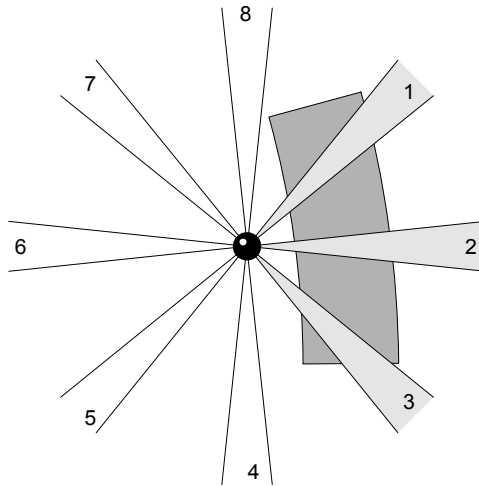
$a_{\text{ГСО}}$	39600	42195	43600
37 000	8.46	4.61	3.76
38 000	14.22	5.91	4.58
38 500	21.03	6.82	5.11
39 000	39.18	8.03	5.76

КА осуществляет следующие заданные вращения (рис. 4):

- вокруг оси  $Y'$  перпендикулярной плоскости его орбиты (период вращения равен 20 часам – т.е. периоду обращения КА вокруг Земли);
- вокруг оси  $Z'$  (касательной к орбите КА) – период вращения равен 90 минутам (это вращение обеспечивает сканирование наблюдаемой области оптическими системами)

Исследования взаимного движения КА ГЕОБС и объектов ГСО показали:

- скорость движения геостационарных спутников (ГСС) в поле зрения сканирующих телескопов находится в пределах от 190"/сек до 290"/сек;
- отклонения треков в фокальной плоскости телескопов от вертикали составляют от 1° до 9°
- горизонтальная скорость движения изображения ГСС по фокальной плоскости не превышает 30"/сек
- при данных скоростях движения ГСС в поле зрения необходимо иметь не менее 8 телескопов, равномерно распределенных в вертикальной плоскости (Рис. 5), чтобы исключить пропуск проходящих объектов

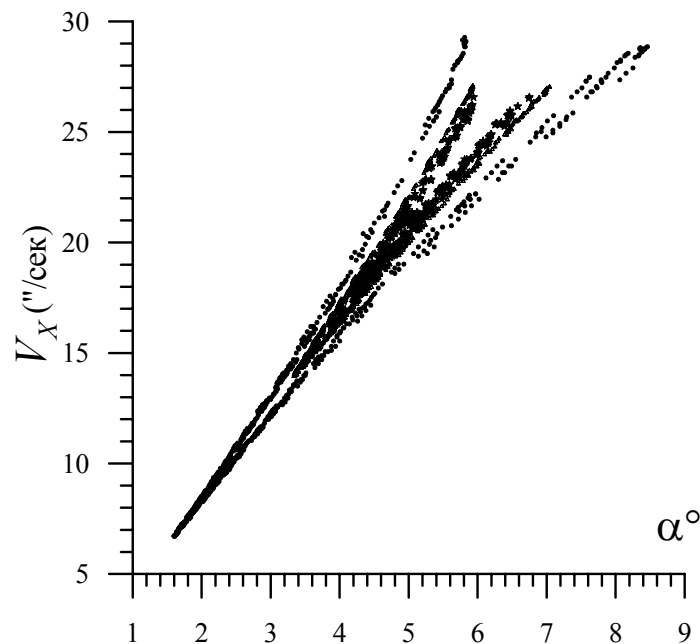


**Рис.5.** Система из 8 телескопов.

### 6. Работа КА ГЕОБС

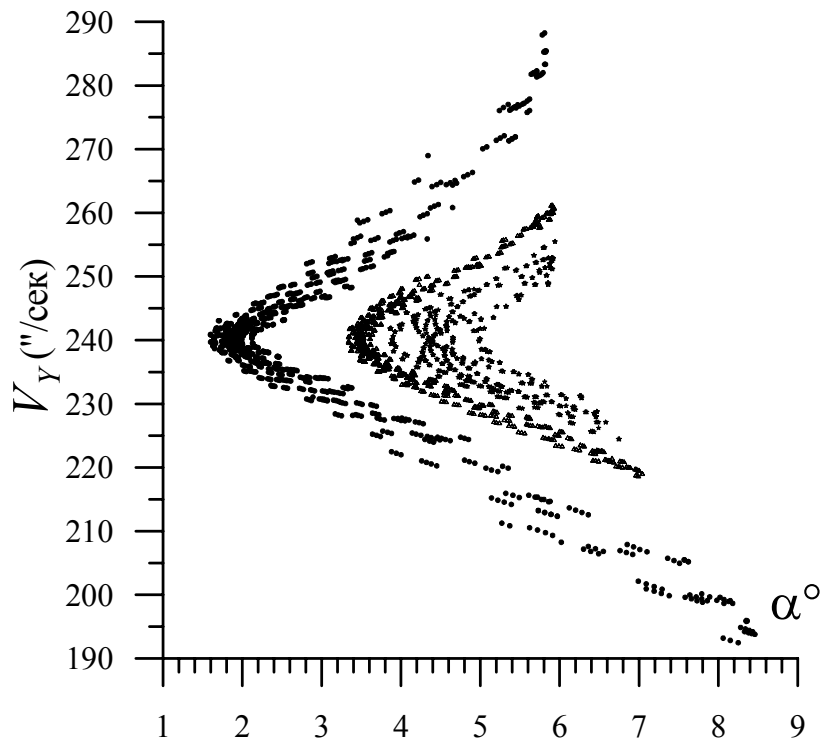
Движение КА по орбите и вращение его вокруг оси  $Y'$  (рис. 4) обеспечивает постоянное направление телескопов ГЕОБС к ГСО, а вращение его вокруг оси  $Z'$  – сканирование этой зоны. При этом угол, под которым ГСО видна с борта КА составляет около  $177^\circ$ . Это позволяет использовать в каждый момент информацию только тех трех камер, которые сканируют ГСО (Рис. 5).

#### 6.1. Параметры прохождения объектов через поле зрения с учетом вертикального сканирования ( $240''/\text{сек}$ ) (см. Рис. 6–8).

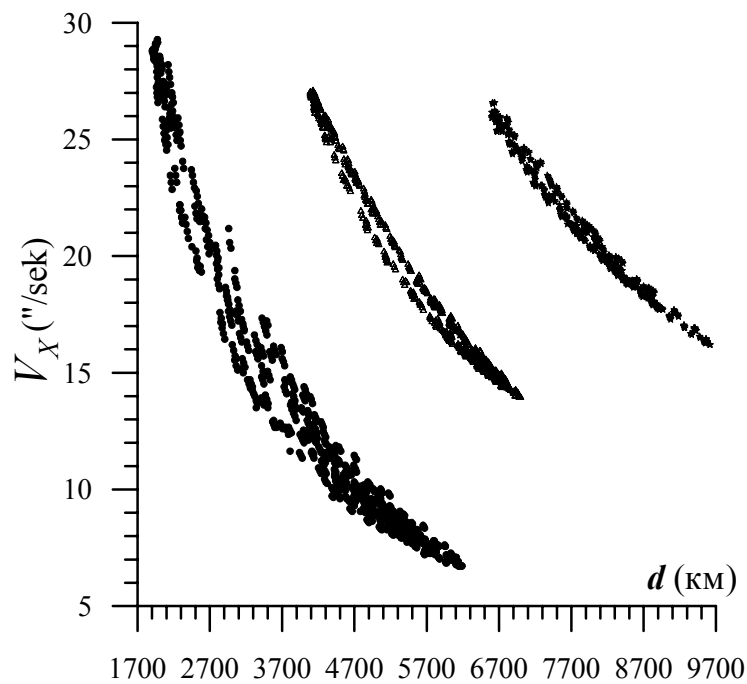


**Рис.6.** Зависимость горизонтальной скорости ( $V_x$ ) прохождения объекта через поле зрения от угла ( $\alpha$ ) наклона трека к вертикали (● – близкий объект, Δ – ГС объект, \* – далекий объект).

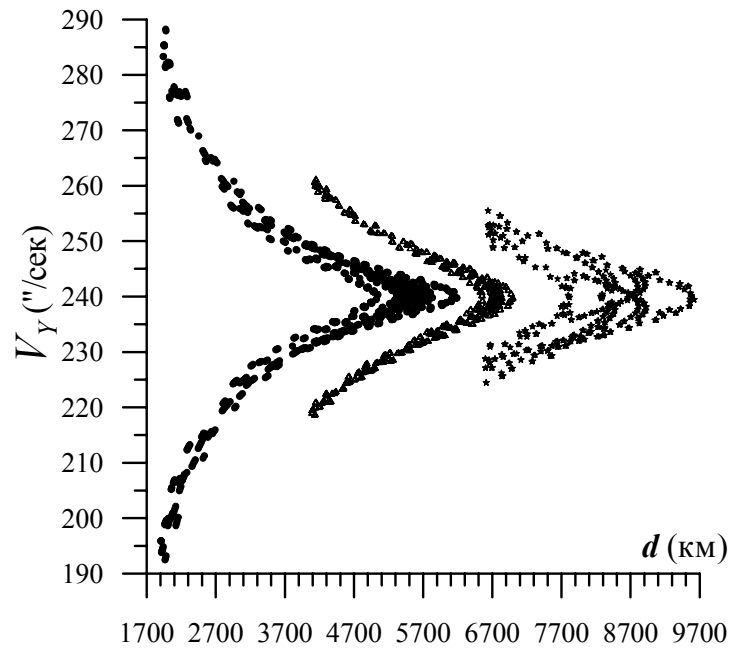




**Рис.7.** Зависимость вертикальной скорости ( $V_Y$ ) прохождения объекта через поле зрения от угла ( $\alpha$ ) наклона трека к вертикали ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).



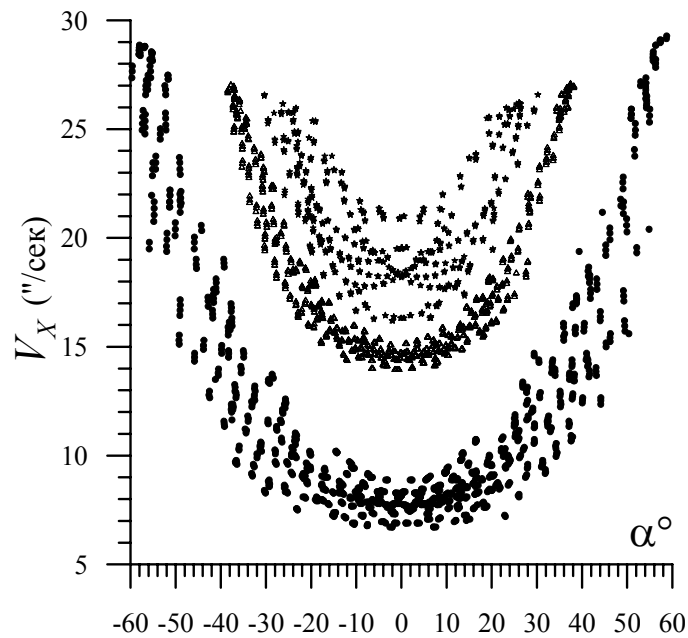
**Рис.8.** Зависимость горизонтальной скорости ( $V_X$ ) прохождения объекта через поле зрения от дальности до объекта ( $d$ ) в момент наблюдения ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).



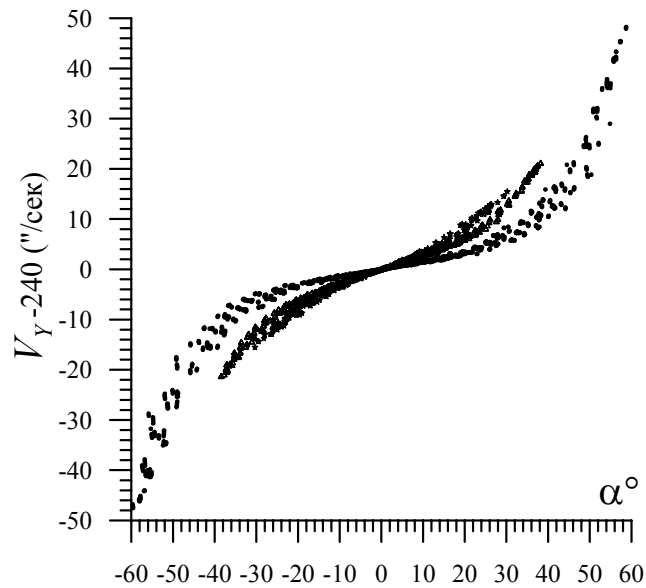
**Рис.9.** Зависимость вертикальной горизонтальной скорости ( $V_Y$ ) прохождения объекта через поле зрения от дальности до объекта ( $d$ ) в момент наблюдения ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).

### 6.2. Прохождение объектов через поле зрения с учетом взаимного движения

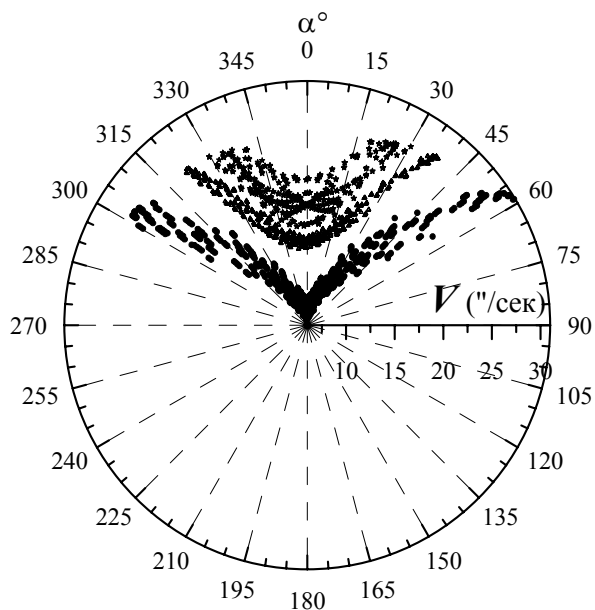
На рисунках 10–13 приведены параметры прохождения объектов через поле зрения, обусловленные взаимным движением.



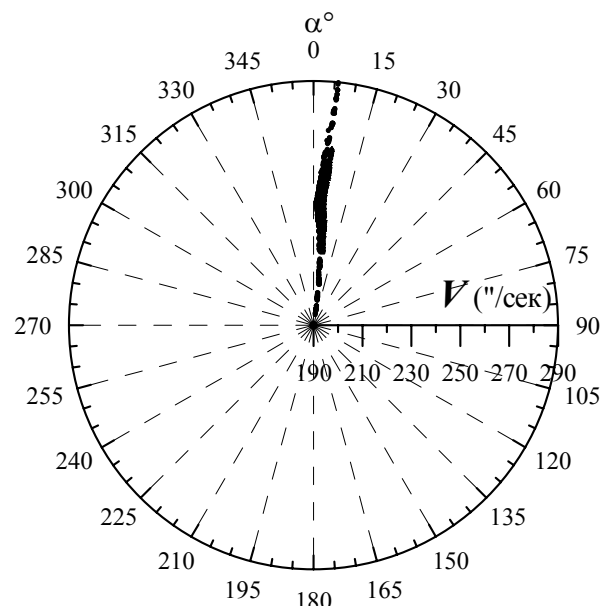
**Рис.10.** Зависимость горизонтальной скорости ( $V_X$ ) прохождения объекта через поле зрения от угла ( $\alpha$ ) наклона трека к вертикали ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).



**Рис.11.** Зависимость вертикальной скорости ( $V_Y$ ) прохождения объекта через поле зрения от угла ( $\alpha$ ) наклона трека к вертикали ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).



**Рис.12.**  $V$  – полная скорость прохождения объекта через поле зрения,  $\alpha$  – угол наклона трека к вертикали ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).



**Рис.13.**  $V$  – полная скорость прохождения объекта через поле зрения,  $\alpha$  – угол наклона трека к вертикали с учетом скорости сканирования ( $\bullet$  – близкий объект,  $\Delta$  – ГС объект,  $*$  – далекий объект).

## 7. Оценка точности работы микрометра

В основу алгоритма положен аналитико-имитационный подход к моделированию процессов функционирования оптико-электронной системы. Процесс регистрации сигнала можно разбить на следующие этапы. Поток фотонов  $\Phi(\nu)$ , пройдя через оптическую систему, создает поле освещенности в фокусе телескопа  $E(x, y)$ . Собранная в дифракционном пятне энергия потока преобразуется на поверхности фотоприемника в заряд  $Q(x, y)$ , который, после усиления и аналого-цифрового преобразования, превра-

щается в массив чисел в оперативной памяти бортового процессора. Массив чисел, соответствующих отсчетам каждого фоточувствительного элемента, привязан к шкале времени с точностью до 1 такта процессора и соответствует изображению области неба. Полученное изображение содержит поле координат  $x_m, y_n$  астрономических объектов – точечных и протяженных, и помех – шумов фотопреобразующей матрицы и шумов, возникших при аппаратной и машинной обработке сигнала.

В излагаемой модели решается ограниченная задача – определить погрешность измерения координат изображения объекта, сигнал от которого накоплен в режиме ВЗН, с учетом всех возможных источников шумов. Аналитико-численное решение модели со случайными компонентами подразумевает вычисление корреляционных функций или спектральных плотностей дискретных случайных процессов, которыми представимы как помехи, так и полезный сигнал.

Алгоритм моделирования содержит следующую последовательность операций.

- Формирование дифракционного изображения звезды путем вычисления плотности распределения энергии по известным формулам для входной апертуры и генерации потока фотонов, распределенного случайным образом в соответствии с этой функцией.
- Формирование полезного сигнала в пикселах ПЗС в режиме ВЗН.
- Формирование смеси полезного сигнала с шумами на выходе ПЗС-матрицы (фон неба, шумы считывающего устройства ПЗС и т.д.).
- Оценка координат полученного изображения с использованием различных алгоритмов определения геометрического центра изображения (взвешивание, оценка по медиане, аппроксимация гауссианой по методу наименьших квадратов и т.п.).

Предполагается, что плоский фронт излучения спектрального состава  $(\lambda_1, \lambda_2)$  от объекта яркостью  $m_v$  с фотонной плотностью потока излучения  $N_e(\lambda)$ , пройдя оптическую систему с эффективной апертурой  $D$ , создает изображение с симметричным радиальным распределением интенсивности в кружке радиусом  $r = 1.22(\lambda_2/D)f$ . Распределение амплитуды полезного сигнала можно приближенно представить в виде гауссианы:

$$N_f(x, y, \lambda) = \frac{N_{e0}(\lambda)}{2\pi r^2} \exp\left[-\left\{\frac{(x-x_0)^2}{2r^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2r^2}\right\}\right],$$

где  $N_{e0}$  – освещенность в точке максимума (выраженная числом фотонов),  $x_0$  и  $y_0$  – координаты точки максимума,  $r$  – линейный радиус изображения.

Потери за счет отражения и поглощения в оптической системе учитываются с помощью коэффициента спектрального пропускания  $T(\lambda)$ . Фотонная освещенность на фотоприемнике  $N_f(x, y, \lambda)$  определена теперь соотношением:

$$N_f(x, y, \lambda) = \frac{N_{e0}(\lambda)T(\lambda)D^2}{8r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r^2}\right).$$

Освещенность на элементе ПЗС-матрицы, попавшем в кружок рассеяния, определится из соотношения:

$$N_{je}(x, y, \lambda) = \int_{n\Delta x}^{(n+1)\Delta x} \int_{l\Delta y}^{(l+1)\Delta y} N_f(x', y', \lambda) dx' dy',$$

где  $n$  – номер строки,  $l$  – номер столбца пикселей. Предполагается, что пиксели имеют квадратную форму. Получим выражение для числа фотонов (или величины сигнала) на одном пикселе в единицу времени:

$N_{fe}(x, y, \lambda) = \frac{N_{e0}(\lambda)T(\lambda)D^2\pi}{16} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(n+1)\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{n\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(l+1)\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{l\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] \right\}$  где интеграл ошибок  $\operatorname{erf} x$  определяется как

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi.$$

Для перевода величины сигнала из фотонной меры в электронную  $Q(x, y, \lambda, t)$  необходимо знать распределение интенсивности излучения от источника по длине волны, квантовую эффективность приемника  $\eta(\lambda)$  и время накопления  $t$ . Тогда заряд на текущем элементе матрицы в электронах вычислится по формуле:

$$Q(x, y, \lambda, t) = t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{fe}(x, y, \lambda) \eta(\lambda) d\lambda,$$

которая для удобства вычислений приведена к окончательной форме

$$Q(x, y, \lambda, t) = \frac{t\pi D^2}{16} \kappa J,$$

где

$$\kappa = \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(n+1)\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{n\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left[ \frac{(l+1)\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] - \operatorname{erf} \left[ \frac{l\Delta x}{r\sqrt{2}} \right] \right\},$$

$$J = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_{e0}(\lambda) T(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda.$$

Интеграл  $J$  вычисляется численно с использованием стандартных кривых заатмосферного распределения фотонной освещенности, создаваемой излучением звезд нулевой величины спектральных классов  $B1 - K5$ , а также излучением Солнца.

Для построения более детальной модели необходимо также учесть внутрипиксельную структуру ПЗС. Калибровки ПЗС с учетом внутрипиксельной структуры в настоящее время уже использовались в ряде работ. Такое исследование улучшит приблизительно на 3% используемую модель функции рассеяния точки.

Рассмотрим в первом приближении реалистичную модель прохождения одиночной звезды по ПЗС-матрице. Для этой модели используем параметры существующего прибора, серийно выпускаемого ЦНИИ “Электрон” и работающего в режиме ВЗН. В наземных условиях такой режим успешно применяется для астрометрических измерений во многих обсерваториях.

ПЗС-матрица, выпускаемая ЦНИИ “Электрон”, является обычным трехфазным прибором с квадратными пикселями размером  $27 \times 27$  мкм. Размер фоточувствительной области составляет  $768 \times 580$  пикселей или  $20.7 \times 15.7$  мм. Кривая спектральной чувствительности является обычной для ПЗС, полностью покрытого поликремниевыми фазовыми электродами, и имеет максимум в области длин волн 0.8 мкм (квантовая эффективность в максимуме – около 38%). Для покрытия всего рабочего поля зрения инструмента размером  $10.8^\circ \times 10.8^\circ$  необходимо 18 таких приемников.

Существуют большие ПЗС-матрицы, такие как прибор Tektronix 2048 $\times$ 2048 с 21-микронными пикселями, или даже 4096 $\times$ 4096 производства Ford Aerospace, которые могут покрыть все рабочее поле с использованием сборки из четырех приемников. Однако вряд ли является обоснованным использование таких больших приемников в проекте ГеОБС с его быстро движущимся по полю изображением, поскольку строки ПЗС должны считываться со скоростью, синхронизированной с движением изображения. Поскольку аналоговые сигналы, получаемые при считывании каждого пикселя, должны обрабатываться в течение некоторого ограниченного времени (обычно 4–10 мкс на

пиксел), то большие ПЗС находятся с этой точки зрения в неблагоприятных условиях. Так как бортовой телескоп имеет фокусное расстояние 850 мм, то изображение будет двигаться по полю с очень большой линейной скоростью, и считывание информации с ПЗС станет невозможным.

Небольшие ПЗС могут дать существенно больше времени для обработки аналогового сигнала. В этом случае появятся дополнительные возможности использования усложненных режимов обработки аналогового сигнала, например, многократного неразрушающего считывания, позволяющего существенно подавлять шумы считывающего устройства ПЗС (до одного электрона и меньше).

Центральная часть микрометра с угловым полем зрения  $10.8^\circ \times 10.8^\circ$  предназначена для астрометрических измерений и состоит из набора фотоприемных модулей. Каждый модуль представляет собой ПЗС-матрицу, укрепленную на регулируемом основании (с целью юстировки модулей друг относительно друга). Модули располагаются с минимальными зазорами между фоточувствительными областями. Ряды модулей несколько сдвинуты один относительно другого в направлении, перпендикулярном направлению движения изображений, с целью исключить возможные мертвые зоны в микрометре. Каждая из ПЗС-матриц имеет свой собственный электронный блок обработки, включающий в себя три специальных процессора и кадровую память. Один из процессоров предназначен для анализа изображения, в то время как два других управляют входными (от ПЗС) и выходными (к бортовому компьютеру) потоками данных. Память (ориентировочным объемом около 5 Мбайт) используется для хранения текущих данных, поступающих от ПЗС, для обработки изображения предыдущего кадра, для калибровочных данных ПЗС и для программ процессоров.

Предполагается, что периферийная часть поля зрения (вне астрометрического поля) будет использоваться для фотометрических целей. Фотометрические данные будут включены в уравнения для учета координатных искажений поля зрения, обусловленных различными цветами объектов. ПЗС-матрицы, предназначенные для фотометрирования изображений, должны закрываться цветными фильтрами, обеспечивающими получение яркостей звезд в выбранной фотометрической системе. Причем размеры фильтров для каждой из фотометрических полос подбираются в соответствии со спектральной чувствительностью ПЗС и шириной данной фотометрической полосы таким образом, чтобы получать примерно равные точности фотометрирования во всех этих полосах.

Во время астрометрических наблюдений, выполняемых с помощью ПЗС на борту космического аппарата, возникает трудность, связанная с низкой разрешающей способностью ПЗС (относительно дифракционного изображения звезды). Предполагается, что бортовой телескоп будет иметь дифракционное качество изображения по всему рабочему полю  $10.8^\circ \times 10.8^\circ$ . Эти изображения достаточно малы. Соответственно, их линейные размеры сравнимы с линейными размерами пиксела ПЗС. Следовательно, параметры оптики бортового телескопа должны быть согласованы с разрешающей способностью ПЗС, или должны применяться специальные приемы регистрации для достижения высокой точности при имеющейся разрешающей способности.

Для увеличения времени накопления сигнала и, следовательно, проникающей способности инструмента целесообразно использовать так называемый режим временной задержки и накопления (ВЗН), позволяющий перемещать накопленные зарядовые пакеты вдоль столбцов ПЗС-матрицы синхронно с перемещающимся изображением. С точки зрения наблюдателя этот режим аналогичен механическому смещению фотоприемника или гидированию телескопа с целью получить неподвижное изображение участка небесной сферы на фотоприемнике. Отличием от механического гидирования является дискретный характер перемещения зарядовых пакетов. В промежутках между

циклами переноса зарядовых пакетов изображение продолжает перемещаться со скоростью  $v$  вдоль столбцов ПЗС (координата  $x$ ), и за время, соответствующее  $K$  циклам накопления/сдвига, каждый из которых длится  $p_x / v$  секунд ( $p_x$  – ширина пиксела в направлении  $x$ ), в зарядовом пакете  $\{n, m\}$  будет накоплен сигнал

$$Q_{nm} = K \int_0^{p_x/v} \int_{y_1}^{y_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(x - vt - \varphi, y, \lambda) S_{nm}(x, y, \lambda) d\lambda dx dy dt,$$

где  $E$  – распределение освещенности в изображении,  $S_{nm}$  – спектральная чувствительность пиксела с координатами  $(n, m)$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы рабочего спектрального диапазона,  $\varphi$  – начальная фаза положения изображения в пределах одного пиксела в момент времени  $t = 0$ , а величины  $x_1, x_2$  и  $y_1, y_2$  определяются равенствами

$$\begin{aligned} x_1 &= x_n - \frac{p_x}{2}, & x_2 &= x_n + \frac{p_x}{2}, \\ y_1 &= y_n - \frac{p_y}{2}, & y_2 &= y_n + \frac{p_y}{2}. \end{aligned}$$

В процессе накопления информация из ПЗС в виде зарядовых пакетов строка за строкой выводится и запоминается в кадровой памяти измерительного устройства. Скорость перемещения изображения по полю измеряется специализированным ПЗС-приемником или помощью дополнительного режима регистрации рабочего приемника и передается бортовому процессору для корректировки частоты фазовых управляющих импульсов, задающих режим ВЗН. Представляется необходимой такая точность отслеживания скорости перемещения изображения, чтобы от момента начала накопления (первая строка ПЗС) до его окончания (последняя строка) рассогласование положения изображения и зарядовых пакетов не вносило существенной ошибки в измеряемую величину  $\varphi$ . Несущественной можно считать величину ошибки, на порядок меньшую, чем ошибка, обусловленная статистикой фотонов, фоном неба и шумами считывания сигнала.

В результате процесса накопления и цифровой обработки сигналов в памяти бортового процессора, формируются группы отсчетов  $\{Q_n\}_m$ , соответствующие строкам ПЗС-матрицы ( $n$  – номер строки,  $m$  – номер пиксела в строке,  $Q$  – величина сигнала в данном пикселе). Момент вывода каждой из строк регистрируется по бортовым часам с точностью не хуже  $10^{-5}$  с. Таким образом, получают массивы данных  $\{n, t_n, Q_n\}$ . Координаты  $x_n$  строк ПЗС (центров пикселов) определяются номерами  $n$  этих строк ( $x_n$  известны с точностью 0.5 мкм и лучше после изготовления фотоприемника, а, кроме того, они должны быть определены с более высокой точностью в процессе калибровки фотоприемника перед полетом). Поэтому фактически в памяти бортового процессора формируются данные  $\{n, t_n, Q_n\}$ , которые должны быть использованы при определении координаты  $x$  изображения объекта в системе координат, связанной с фотоприемником. Координаты  $y$  по условиям задачи могут определяться с меньшей точностью, чем координаты  $x$ , хотя принцип определения обеих координат одинаков. Алгоритм определения координат изображения выбирается в ходе разработки микрометра; наиболее простым таким алгоритмом может быть, например, алгоритм определения геометрического центра тяжести изображения по формуле:

$$x = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n x_n}{\sum_{n=1}^N Q_n},$$

где  $Q_n = \sum_{m=y_1}^{y_2} Q_{nm}$  – просуммированные по столбцам отсчеты ПЗС, относящиеся к изо-

бражению данного объекта,  $\{y_1, y_2\}$  – границы изображения объекта по  $y$ . Разумеется, перед вычислением координат данный объект должен быть выделен из шумов и определены его границы по  $x$  и по  $y$ ;  $N$  – количество обрабатываемых пикселей в пределах границ изображения по  $x$ .

Если накопление сигнала от изображения  $i$ -го объекта было начато в момент времени  $t_i$ , а закончено в момент  $t_i + t_a$ , то в кадровой памяти будет получено изображение участка небесной сферы (кадр), относящееся к среднему моменту времени  $t_i + t_a/2$  и слегка “размазанное” вдоль направления смещения зарядовых пакетов (на два – три пикселя ПЗС) из-за дискретного характера сдвигов зарядовых пакетов.

При осреднении координат  $i$ -го и  $j$ -го объектов за время накопления  $t_a$  и вычислении разности этих координат  $x_i - x_j$  следует учитывать моменты времени начала накопления сигнала для каждого из объектов.

Обозначим через  $l_i$  и  $l_j$  неискаженные координаты изображений двух объектов. При вращении космического аппарата и соответствующем перемещении изображения по полю зрения со скоростью  $v$  получим координаты изображений в системе координат, связанной с фотоприемником:  $\xi_i(t) = l_i - vt$ . При использовании режима временной задержки и накопления, при котором зарядовые пакеты под управляющими электродами ПЗС перемещаются со скоростью  $v_0$ , получим координаты изображения в системе координат, связанной с перемещающимися зарядовыми пакетами:  $x_i = \xi_i(t) + v_0t$  (скорости  $v_0$  и  $v$  противоположны по направлению).

Усредненные за время  $t_a$  координаты будут равны

$$x_i = \frac{x_i(t_i) + x_i(t_i + t_a)}{2} = l_i - V \left( t_i + \frac{t_a}{2} \right),$$

где  $V = v - v_0$ .

Соответствующая разность координат двух изображений будет равна

$$X_{ij} = \Lambda_{ij} + VT_{ji},$$

где

$$X_{ij} = x_i - x_j,$$

$$\Lambda_{ij} = l_i - l_j,$$

$$T_{ji} = t_j - t_i.$$

Таким образом, если  $V$  отлична от нуля, то поправка в измеренную разность координат, обусловленная несовпадением абсолютных значений скоростей  $v$  и  $v_0$ , зависит только от разности моментов начала наблюдения объектов  $i$  и  $j$  (моментов появления каждого изображения в поле зрения фотоприемника) и не зависит от времени накопления сигнала.

### 7.1. Оценка блеска наблюдаемых предельно слабых объектов

Таблица 5 дает блеск наблюдаемых предельно слабых объектов в полосах  $B$ ,  $V$  и в интегральном свете для звезд спектральных классов  $B-M$ .

**Таблица 5.** Блеск наблюдаемых предельно слабых объектов в полосах  $B$ ,  $V$  и в интегральном свете для звезд спектральных классов  $B-M$ .

Полоса	$B$	$A$	$F$	$G$	$K$	$M$
$B$	13	13	13	12	12	12
$V$	13	13	12	13	13	13
Интегральный свет	15	14	14	14	14	15



## 7.2. Оценка точности определения положений точечных объектов

### 7.2.1. В поле матрицы

Таблица 6 дает зависимость точности определения положения точечного объекта в поле матрицы от эффективной длины волны  $\lambda_{eff}$ , определяемой выражением

$$\lambda_{eff} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_e(\lambda)\eta(\lambda)T(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda)T(\lambda)d\lambda}.$$

### 7.2.2. В поле микрометра

Редукция наблюдений, выполненных на отдельных матрицах, в систему микрометра позволяет повысить точность определения положения точечного объекта. Штатные условия работы микрометра предполагают, что один и тот же объект наблюдается на четырех матрицах. Таблица 6 дает зависимость точности определения положения точечного объекта в поле микрометра от эффективной длины.

**Таблица 6.** Зависимость точности определения положения точечного объекта в поле матрицы и в микрометра от эффективной длины.

Эффективная длина волны (Å)	Точность определения положения (")		Эффективная длина волны (Å)	Точность определения положения (")	
	В поле матрицы	В поле мик- рометра		В поле мат- рицы	В поле мик- рометра
4000	4.0	2.0	6500	3.2	1.6
4500	3.8	1.9	7000	3.0	1.5
5000	3.6	1.8	7500	2.9	1.5
5500	3.4	1.7	8000	2.9	1.4
6000	3.3	1.6			

## 7.3. Точность определения положений протяженных объектов

### 7.3.1. В поле матрицы

Таблица 7 дает зависимость точности определения положения протяженного объекта в поле матрицы от его углового размера.

### 7.3.2. В поле микрометра

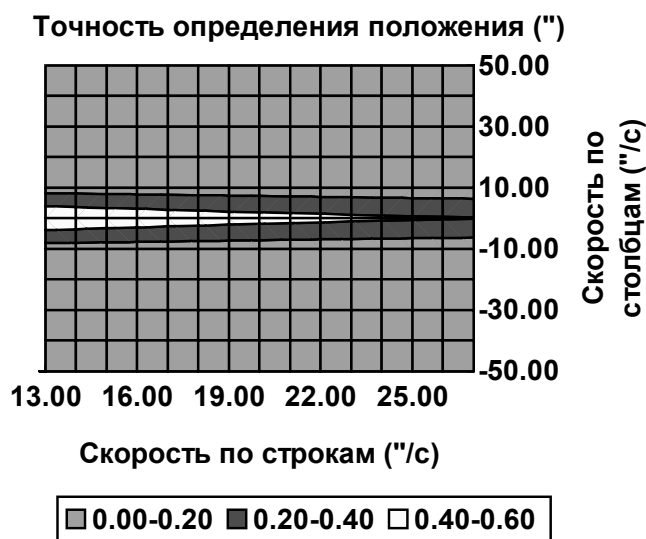
Как и в случае точечного объекта, редукция наблюдений, выполненных на отдельных матрицах, в систему микрометра позволяет повысить точность определения положения протяженного объекта. Таблица 7 дает зависимость точности определения положения в поле микрометра от его углового размера в условиях штатной работы микрометра, когда один и тот же объект наблюдается на четырех матрицах.

**Таблица 7.** Зависимость точности определения положения протяжённого объекта в поле матрицы и в поле микрометра от его углового размера.

Угловой размер объекта	Точность определения положения (")		Угловой размер объекта	Точность определения положения (")	
	В поле матрицы	В поле микрометра		В поле матрицы	В поле микрометра
10"	4.9	2.5	40"	1.2	0.6
20"	2.5	1.2	50"	1.0	0.5
30"	1.6	0.8	1°	0.8	0.4

#### 7.4. Влияние движения изображений объектов в поле микрометра

Рис.14 дает зависимость точность определения положения объекта от скорости движения его изображения.



**Рис.14.** Зависимость точности определения положения объекта от скорости движения его изображения.

#### 7.5. Суммарная оценка точности определения положения и блеска

Таблица 8 дает зависимость точности определения положения и блеска объекта от скорости движения его изображения и яркости. Представлены данные для самых медленных ( $V_x=13"/с$ ,  $V_y=0$ ) и самых быстрых ( $V_x=27"/с$ ,  $V_y=50"/с$ ) объектов.

**Таблица 8.** Зависимость точности определения положения и блеска объекта от скорости движения его изображения и яркости.

$m$	$V_x=13"/с, V_y=0$		$V_x=27"/с, V_y=50"/с$	
	$\sigma_p$ (")	$\sigma_m$ ( $m$ )	$\sigma_p$ (")	$\sigma_m$ ( $m$ )
4	0.6	0.001	0.2	0.34
5	0.6	0.003	0.3	0.86

$m$	$V_x=13''/с, V_y=0$		$V_x=27''/с, V_y=50''/с$	
	$\sigma_p (")$	$\sigma_m (m)$	$\sigma_p (")$	$\sigma_m (m)$
6	0.6	0.009	0.5	2.2
7	0.6	0.022	0.8	5.4
8	0.7	0.055		
9	0.7	0.14		
10	0.9	0.35		
11	1.4	0.87		
12	2.7	2.2		
13	5.8	5.5		
14	13.6	14		

7.5.1. Точность определения положений и размеры объектов

В таблице 9 приведена зависимость точности определения положений и размеров наблюдаемых объектов от их яркости.

**Таблица 9.** Точность определения положений и размеры наблюдаемых объектов.

Звездная величина, видимая со спутника	Звездная величина, отнесенная к поверхности Земли	Позиционная точность (сек. дуги)	Размер объекта (см)
5	9.8	0.3	286
6	10.8	0.3	181
7	11.8	0.3	114
8	12.8	0.3	72
9	13.8	0.4	45
10	14.8	0.5	29
11	15.8	0.7	18
12	16.8	1.3	11
13	17.8	2.9	7

7.5.2. Точность определения положений для объекта размером 10 см

В таблице 10 приведена зависимость точности определения положений объектов размером 10 см в зависимости от радиуса орбиты.

**Таблица 6.** Зависимость точности определения положений объектов размером 10 см в зависимости от радиуса орбиты.

Радиус орбиты (тыс.км)	Звездная величина, видимая со спутника	Звездная величина, отнесенная к поверхности Земли	Позиционная точность (сек. дуги)
40	10.8	16.9	0.6
41	11.7	17.0	1.0
42	12.3	17.1	1.6
43	12.8	17.1	2.4
44	13.2	17.2	3.3

## 8. Заключение

Реализация КАС ГЕОБС силами космической, оптической и электронной промышленности России

1. Позволит на принципиально новом уровне осуществлять полный контроль всей зоны геостационарной орбиты и высокоорбитальных спутников.
2. Повысит обороноспособность СНГ.
3. Осуществит прорыв русской науки в исследовании ближнего космического пространства и подтвердит авторитет России как ведущей космической державы.

## Литература

1. *Ершов В.Н., Чубей М.С., Ильин А.Е., Копылов И.М., Горшанов Д.Л., Канаев И.И., Кирьян Т.Р., 1995.* КАС «Струве». Научное обоснование проекта. // СПб., «Глаголь», 269 с.
2. *Kiladze R.I., A.S. Sochilina, K.V. Grigoriev, A.N. Vershkov, 1997.* On investigation of long-term orbital evolution of geostationary satellite. Proceedings of 12th Symposium on 'Space Flight Dynamics', ESOC, Darmstadt, Germany, 2–6 June 1997, pp.53–57.
3. *Kiladze R.I., A.S. Sochilina, 2003.* On the new theory of Geostationary satellite motion. Astronomical and Astrophysical Transactions, Vol. 22, Nos. 4–5, August–October 2003, pp.525-528.

## SPACE ASTROMETRIC SYSTEM “GEOSTATIONARY OBSERVATORY” (GEOBS)

**Kanaev I.I., Sochilina A.S., Butkevich A.G., Vershkov A.N., Gorshanov D.L.,  
Grigoriev K.V., Devyatkin A.V.**

### Summary

*The concept of Space astrometric system intended for observation of geostationary orbit objects (sizes are down to 7–11 cm) and for determination of their characteristics and orbits is presented. The system consists of the satellite situated near the geostationary orbit (altitude is 38,000 km) and Earth-based complex. The motivation of the choice of the orbit and estimations of determination accuracy of positions and magnitudes of the objects of different sizes are given.*

## **ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ МЕРКУРИЯ ПО ДИСКУ СОЛНЦА 7 МАЯ 2003 года В ПУЛКОВЕ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ**

**Киселев А.А., Киселева Т.П., Измайлов И.С., Можаяев М.А., Калиниченко О.А.,  
Ховричева М.Л.**

*Приводятся результаты фотографических наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца 7 мая 2003 г., выполненные в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе. Определены величины момента -  $t_0$  и  $\rho_0$  - максимального сближения, а также средняя скорость относительно-го движения. Результаты совпадают с данными эфемериды DE405 с точностью до ошибок  $\pm 0.12''$  по  $\rho_0$  и  $\pm 2.7^s$  по  $t_0$ .*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Гранты № 04-02-16157, 04-07-90081.*

### **Введение**

7 мая 2003 г. в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе были выполнены фотографические наблюдения прохождения Меркурия по диску Солнца. Научная задача наблюдений заключалась в определении ключевых параметров явления:  $t_0$  и  $\rho_0$  - момента и величины максимального сближения и относительной скорости  $\mu$  изображений Меркурия и Солнца вблизи  $t_0$  - на основе методики наблюдений и их редукции, использующих ряд прямых измерений расстояний Меркурия от центра Солнца, полученных в течение прохождения. Эти параметры, коль скоро они определяются непосредственно из наблюдений, могут служить хорошим контролем существующим теориям движения Меркурия.

### **1. Наблюдения**

При организации наблюдений прохождения Меркурия мы воспользовались опытом подобных наблюдений, полученным в ноябре 1973 г [1]. Наблюдения производились фотографическим методом с помощью 26-дюймового рефрактора Zeiss'a (D/F = 650/10400 mm), при диафрагме, сокращающей диаметр объектива до 200 мм. Использовались пластинки формата 13 × 18 см типа ORWO NP-27, WO-1, WO-3, сохранившиеся в небольшом количестве после программ наблюдений 80-90-х годов. Вуаль на этих пластинках вследствие долгого хранения оказалась неравномерной плотности, неодинаково распределенной по краям разных пластинок. Поэтому для наблюдений мы использовали пластинки названных типов попеременно, применяя экспозиции 0.5, 1 и 2 сек., соответственно сортам эмульсии. В кассетах, дополнительно к постоянным фильтрам ЖС-18, мы поместили темно-синие пленочные фильтры, позволявшие рассматривать изображение Солнца диаметром 96 мм невооруженным глазом. Погода, в общем, благоприятствовала наблюдениям, лишь изредка проходили легкие облака. В целом за время наблюдений с 9 часов утра до 14 часов 30 минут по Московскому летнему декретному времени удалось получить 55 пластинок. В начале наблюдений зенитное расстояние Солнца составляло почти 66 градусов, в конце наблюдений 43 градуса, причем Солнце только что прошло через меридиан.

### **2. Измерения**

После проявления и просмотра пластинок годными к измерениям пришлось признать только 32 пластинки, остальные забраковать ввиду крайне неблагоприятного рас-

пределения вуали. Измерения производились визуально на измерительной машине Ас-корекорд с автоматической регистрацией отсчетов шкал. На каждой из пластинок делалось от 100 до 150 наведений (с поворотом призмы) на край изображений Солнца и повторные измерения изображений Меркурия в начале и в конце измерений. В результате этих измерений для каждой пластинки определялись измеренные координаты центра изображения Солнца, и вычислялось расстояние Меркурия от этого центра. Положение центра Солнца определялось как положение центра симметрии наивероятнейшего эллипса, наилучшим образом представлявшего фигуру измеренного изображения Солнца. Соответствующие вычисления были выполнены с помощью итерационного процесса, использующего способ наименьших квадратов на каждом шаге. В итоге этого процесса координаты центра изображения Солнца ( $x_S$ ,  $y_S$ ) определялись с ошибкой порядка 10-20 микрон (0.2" - 0.4") с большим разбросом для отдельных пластинок, а координаты Меркурия ( $x$ ,  $y$ ) с ошибкой порядка 3 - 5 микрон (0.06' - 0.10"). Побочным результатом измерений можно считать величины больших полуосей эллипсов изображений Солнца и их сжатия  $\alpha = (a-b)/a$ , полученные для каждой из пластинок. Эти величины оказались в следующих пределах. Полуось  $a$ : 950" - 954", сжатие  $\alpha$ :  $(1.8 - 0.3)10^{-3}$ . В дальнейших исследованиях эти оценки не использовались.

### 3. Астрометрическая редукция

В итоге выполнения этапов наблюдений и измерений для всех 32-х пластинок были определены величины расстояний Меркурия от центра Солнца.

$$r_j = \sqrt{(x_j - x_{0j})^2 + (y_j - y_{0j})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

а также соответствующие им моменты мирового и звездного времени  $UT_j$  и  $S_j$ . Переход от измеренных расстояний  $r_j$  к истинным  $\rho_j$ , отнесенным к небесной сфере, был выполнен по стандартной методике [2]:

$$\rho_j = M_0 \left[ 1 + \beta (1 + tg^2 \zeta_j \cos^2 \theta_j) \right] r_j \quad (2)$$

Здесь  $M_0 = 19.8078$  "/мм - геометрический масштаб 26-дюймового рефрактора,  
 $\zeta$  - зенитное расстояние Солнца в момент наблюдения  $j$ -ой пластинки,  
 $\theta$  - позиционный угол направления SM (от Солнца -S к Меркурию - M) относительно направления на зенит (Z).

$$\theta = \psi - \chi \quad (3)$$

где  $\psi$  и  $\chi$  - позиционные углы направлений SM и SZ в экваториальной системе на момент наблюдений. В нашей задаче угол  $\psi$  вычислялся приближенно согласно эфемериде DE405.

$$tg \psi = \frac{15(\alpha_M - \alpha_S)^s \cos \delta_S}{(\delta_M - \delta_S)^n} \quad (4)$$

а угол  $\chi$  и зенитное расстояние  $\zeta$  вычислялись согласно векторным формулам тангенциальных координат [2]

$$tg \chi = \frac{K_1}{K_2}; \quad tg \zeta = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad (5)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - тангенциальные координаты зенита (как звезды с координатами S и  $\phi$ , отнесенные к системе с началом в Солнце ( $\alpha_S$ ,  $\delta_S$ ) на момент наблюдений.

$\beta = \beta(\zeta, T, V, \lambda)$  - коэффициент рефракции, зависящий от условий наблюдений и эффективной длины волны астрографа. В наших условиях при  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ ,  $T = 273+10^\circ$ ,  $V = 1013 \text{ мб}$ ,  $\beta$  - было принято равным

$$\beta = 58.217'' - 0.087'' \text{tg}^2 \zeta \quad (6)$$

Результаты вычислений согласно формулам (2) - (6) отражены в таблице 1, где для каждой пластинки приведены  $\rho_j$  и соответствующие им  $(UT)_j$ , зенитные расстояния  $\zeta$ , а также невязки выравнивания  $(O-C)_j$ , полученные при определении параметров прохождения  $\mu$ ,  $\rho_0$  и  $t_0$  согласно модели (7) (см. раздел 4).

**Таблица 1.** Исходные данные для вычисления параметров сближения.

№ пластинки	Момент сближения h m s (UT)	$\zeta^\circ$	$\rho''$	$(O-C)''$
21438	5 13 29.7	65.81	952.24	0.42
21439	5 22 23.3	64.70	928.13	0.20
21440	5 29 30.4	63.94	909.14	-0.26
21442	5 39 22.7	62.62	884.14	-0.45
21443	5 47 33.2	61.62	864.15	-0.77
21445	5 57 37.0	60.41	840.41	- *)
21447	6 15 55.3	58.25	802.79	-0.72
21448	6 25 41.4	57.12	785.83	0.69
21450	6 49 23.4	54.48	747.84	0.41
21451	6 54 39.7	53.94	741.04	0.57
21452	6 59 11.9	53.46	734.96	0.03
21454	7 15 58.2	51.78	718.55	0.40
21455	7 17 24.1	51.62	717.55	0.54
21457	7 28 13.1	50.58	709.62	-0.14
21458	7 29 28.8	50.46	709.29	0.19
21459	7 31 16.2	50.30	708.09	-0.12
21461	7 43 53.0	49.17	703.99	-0.02
21463	8 04 19.1	47.51	704.77	-0.27
21464	8 18 39.8	46.47	711.27	-0.27
21467	8 32 05.1	45.61	721.75	-0.06
21469	8 36 44.8	45.34	725.65	-0.65
21470	8 50 34.2	44.61	742.12	-0.15
21472	9 02 23.6	44.10	759.25	0.32
21474	9 14 03.5	43.68	761.04	-
21477	9 29 36.4	43.28	806.11	-0.72
21479	9 50 27.5	43.04	851.11	-0.30
21482	10 01 28.0	43.04	877.94	0.64
21483	10 02 01.1	43.04	878.77	0.13
21484	10 11 24.9	43.13	902.41	0.45
21485	10 12 39.5	43.15	904.96	-0.16
21489	10 21 44.4	43.30	926.77	0.06
21492	10 31 22.0	43.53	950.49	-

\*) Пластинки № 21445, 21474, 21492 - отброшены при итерациях.

#### 4. Результаты наблюдений

Для определения геометрических параметров наблюдаемого прохождения Меркурия по диску Солнца, т.е. величин  $t_0$  - момента сближения,  $\rho_0$  - минимального расстояния и  $\mu$  - скорости относительного движения, мы воспользовались кинематической моделью, в которой точка М (Меркурий) движется прямолинейно с постоянной скоростью  $\mu$  около точки S (Солнце), причем наблюдаемыми величинами в этой модели являются только расстояния  $\rho$ , изменяющиеся со временем  $t$ . Искомые параметры в этой модели связаны следующей простой формулой:

$$\rho_j = \sqrt{\rho_0^2 + \mu^2 (t_j - t_0)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Чтобы определить наиболее вероятные значения параметров, удовлетворяющих (7), мы использовали следующие условные уравнения поправок

$$\rho_j - \rho_j^* = \frac{-\tau_j \mu^2}{\rho_j} \Delta t_0 + \frac{\mu \tau_j^2}{\rho_j} \Delta \mu + \frac{\rho_0}{\rho_j} \Delta \rho_0 \quad (8)$$

Здесь  $\tau_j = t_j - t_0^*$ , а  $\Delta t_0$ ,  $\Delta \mu$  и  $\Delta \rho_0$  - поправки к принятым значениям  $t_0^*$ ,  $\mu^*$ ,  $\rho_0^*$  в первом (нулевом) приближении. Приближенные величины этих параметров легко определяются из условий симметрии процесса:  $t_0$  соответствует  $\rho_{\min} = \rho^*$ ,

$$\mu^* = \frac{\sqrt{\rho_j^2 - \rho_0^{*2}}}{t_j - t_0^*}, \quad (9)$$

причем  $\mu^*$  желательно вычислять дважды при  $t_j > t_0^*$  и при  $t_0^* > t_j$ . В условиях нашей задачи мы использовали следующие нулевые приближения для искомым параметров:

$$t_0^* = 7^h 44^m .00, \quad \rho_0^* = 704", \quad \mu^* = 0.07200"/\text{sec} . \quad (10)$$

Далее для определения наиболее вероятных величин параметров мы воспользовались итерационным процессом, включающим решение систем уравнений (8), причем на каждом шагу определялись поправки и новые значения параметров по способу наименьших квадратов. В условиях нашей задачи этот итерационный процесс закончился на 4-м шаге после отсева трех из 32 пластинок. Были получены следующие величины параметров.

$$\begin{aligned} t_0 &= 7^h 51^m 55.^s 1 \pm 2.^s 7 \\ \rho_0 &= 703."25 \pm 0."12 \\ \mu &= 0.067477 \pm 0.000033 \quad ("/\text{sec}) \\ \sigma_1 &= \pm 0.44", \quad n = 29 \end{aligned} \quad (11)$$

Эфемерида DE405 дает следующие значения тех же величин для Пулковы:

$$\begin{aligned} t_0 &= 7^h 52^m 06.^s 9 \\ \rho_0 &= 703".177 \\ \mu &= 0.067470 \quad ("/\text{sec}) \end{aligned} \quad (12)$$

Как видим, существенное расхождение имеет место только в определении  $t_0$

$$\Delta t_0 = t_{0Pu} - t_{0eph} = - 11^s .8 \quad (\pm 2^s .7) \quad (13)$$

Анализ данных сравнения подсказал нам, что  $\Delta t_0$  может зависеть от неучета в нашей модели ускорения в относительном движении Меркурия и Солнца. В этой модели полный отрезок трассы прохождения Меркурий проходит со средней скоростью  $\bar{\mu}$

$$\sigma = \bar{\mu}(t_k - t_n) = \bar{\mu}\tau_{нк} \quad (\tau_{нк} = 18500^s), \quad (14)$$



но тот же путь и за то же время  $\tau_{нк}$ , но, двигаясь с ускорением, Меркурий проходит согласно (15):

$$\sigma = \mu\tau_{нк} + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк}^2 \quad (15)$$

Таким образом, имеем:

$$\bar{\mu} = \mu + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк} = 0.067477 \quad (16)$$

и

$$\mu = \bar{\mu} - \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк} = 0.067343 \quad (17)$$

Здесь величина  $\bar{\mu}$  получена из наблюдений согласно (11), а величина ускорения

$$\dot{\mu} = 1.34'' \cdot 10^{-8} \quad (1/\text{сек}^2) \quad (18)$$

оценена согласно данным эфемериды DE405, как среднее ускорение в относительном движении Меркурия и Солнца за время наблюдений  $5^h 08^m 20^s = 18500$  сек.

Сравнивая (16) и (17) заключаем, что скорость Меркурия согласно принятой модели в начале прохождения - больше "истинной" (с учетом ускорения) и меньше - в конце. За одно и то же время  $\tau_1 = \frac{\tau_{нк}}{2} = 9250$ сек Меркурий пройдет дугу

$$\sigma_1 = \bar{\mu}\tau_1 = 624.16'' \quad (19)$$

в первом случае и дугу

$$\sigma_2 = \mu\tau_1 + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_1^2 = 623.54'' \quad (20)$$

во втором случае. Отметим, что величина  $\mu$  согласно (17) соответствует относительной скорости Меркурия в начале наблюдений и положение Меркурия на трассе прохождения с учетом ускорения вычисляется по формуле (20). Таким образом, в одну и ту же точку трассы (вблизи середины прохождения) согласно принятой модели Меркурий придет раньше на

$$\Delta t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\bar{\mu}} = -9^s.2 \quad (21)$$

Этот результат в пределах ошибок наблюдений практически совпадает с данными эфемериды.

$$t_{0Pu} - t_{0eph} = -11^s.8 \pm 2^s.7 \quad (22)$$

Таким образом, результаты пулковских наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца подтверждают - по крайней мере, с точностью до ошибок  $\pm 0.12''$  по  $\rho_0$  и  $\pm 2^s.7$  по  $t_0$  - принятую в настоящее время теорию движения Меркурия.

### Литература

1. *А.А. Киселев, Н.Ф. Быстров.* Известия ГАО, 1974, № 194, с.139-148.
2. *А.А. Киселев.* Теоретические основания фотографической астрометрии. Москва, Наука, 1989, 264 с.

# THE PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF MERCURY TRANSIT IN FRONT OF THE SUN AT 7 OF MAY 2003 IN PULKOVO WITH 26-INCH REFRACTOR

**Kiselev A.A., Kiseleva T.P., Izmailov I.S., Mozhaev M A., Kalinichenko O.A., Khovritcheva M.L.**

## *Summary*

*The results of photographic observations of Mercury transit in front of the Sun at 7 of May 2003 in Pulkovo Observatory by 26-inch Refractor are discussed. Parameters of transit: the time -  $t_0$ , the value of minimum distances -  $\rho_0$  and the relative velocity of Mercury to the Sun during the transit have been determined. These parameters obtained by observations showed good agreement to the Ephemerides DE405: the corresponding errors are  $\pm 2.7^s$  for  $t_0$  and  $\pm 0.12''$  for  $\rho_0$ .*

*The works have been carried out with the support of RFBR (№ 04-02-16157, 04-07-90081).*

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКРЫТОЙ МАССЫ В СИСТЕМАХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Киселев А.А., Кияева О.В.

*Предлагаются формулы для оценки минимальной суммы масс, которая возможна для двойных звезд, обращающихся по эллиптической орбите согласно закону Ньютона при заданном параллаксе. Для применения формул необходимо из наблюдений определить параметры видимого относительного движения (ПВД) двойной звезды, включая кривизну короткой дуги наблюдаемой орбиты, и тригонометрический параллакс. Если кривизна не определяется, то для уверенно физической пары минимальная масса оценивается, если известна относительная лучевая скорость компонентов. Исследованы 30 звезд пулковской программы. Для 7 звезд минимальные массы оказались больше на 1.5-3.0 масс Солнца, чем массы, соответствующие соотношению «масса- светимость», в том числе для 4-х звезд, компоненты которых спектрально-двойные. Для трех звезд – ADS 8450, 9346 и 10329 – избытки масс обнаружены впервые.*

В Пулковской обсерватории накоплены 40-летние ряды фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе визуально-двойных звезд (Киселев, Калиниченко, Кияева и др.). Для определения орбит и масс этих звезд используется метод параметров видимого движения (ПВД), также разработанный нами в Пулкове (Киселев, Кияева, 1980). Для среднего момента  $T_0$  из фотографических наблюдений определяются следующие ПВД:

$\rho$  – видимое расстояние между компонентами (секунды дуги)

$\theta$  – позиционный угол (градусы)

$\mu$  – видимая угловая скорость (секунды дуги в год)

$\psi$  – позиционный угол направления видимого движения (градусы)

$\rho_c$  – радиус кривизны (секунды дуги).

Ключевая формула метода ПВД связывает эти параметры и пространственное расстояние между компонентами  $r$ , выраженное в АЕ, на момент времени  $T_0$ :

$$r^3 = k^2 (\rho \rho_c / \mu^2) |\sin(\psi - \theta)| \quad (1)$$

Здесь  $k^2$  – динамическая постоянная астроцентрического движения, определяемая согласно законам Ньютона.

$$k^2 = 4\pi^2 (M_A + M_B) \quad (2)$$

Размерность  $k^2$  – (АЕ)<sup>3</sup>/(год)<sup>2</sup>, если массы компонентов двойной звезды  $M_A$  и  $M_B$  выражены в единицах массы Солнца.

Если предположить, что пара устойчива и орбита эллиптическая, то выполняется неравенство

$$\rho / \pi_t = r_t \leq r < r_{\max} = 2k^2 / V^2 \quad (3)$$

Здесь  $r_t$  – проекция  $r$  на картинную плоскость (минимальное расстояние),  $r_{\max}$  – расстояние, соответствующее параболической орбите,  $\pi_t$  – тригонометрический параллакс,  $V$  – скорость орбитального движения в АЕ/год. Левая часть неравенства (3) отражает геометрическое условие: проекция вектора не превосходит его истинной величины; правая часть – динамическое условие: наблюдаемая пространственная скорость не превышает соответствующей скорости при условии параболической орбиты. Вектор  $\mathbf{V}$  в тангенциальной системе координат имеет следующие составляющие:

$$\mathbf{V} = \{ (\mu / \pi_t) \sin \psi, (\mu / \pi_t) \cos \psi, \Delta V_t \}$$

где  $\Delta V_r$  - относительная лучевая скорость, которая получается из спектроскопических наблюдений.

Преобразуя (3) с помощью (1) и (2), получаем формулы для оценки суммарной массы системы:

$$M_A + M_B > (\rho V^2) / (8\pi^2 \pi_t) = M_{01} \quad (4)$$

$$M_A + M_B \geq (\rho^2 \mu^2) / (4\pi^2 \rho_c \pi_t^3 |\sin(\psi - \theta)|) = M_{02} \quad (5)$$

Знание параллакса необходимо для оценки минимального значения массы по обеим формулам. Именно сейчас, когда благодаря миссии Hipparcos (ЕКА, 1997) определены с высокой точностью параллаксы большого количества двойных звезд, появилась возможность оценить массы у медленно движущихся звезд с периодами более 1000 лет, для которых трудно получить хорошую орбиту. Мы считаем, что система имеет избыток массы, если минимальное значение массы  $M_{01}$  или  $M_{02}$  превосходит сумму масс, соответствующую соотношению «масса-светимость»  $M_{Sp-L}$  на 1-2 массы Солнца.

Формулу (4) можно использовать, если из фотографических наблюдений невозможно определить радиус кривизны, но известно, что пара физическая, и определено значение относительной лучевой скорости (Киселев, Романенко, 1996). Для оценки по формуле (5) не требуется знания лучевой скорости, но необходимо знать значение радиуса кривизны. (Киселев, Кияева, 2003).

Из 30-ти исследованных двойных звезд Пулковской программы для 7-ми звезд обнаружена избыточная масса. Результаты для этих семи звезд представлены в таблицах 1 и 2. В таблице 1 приведены ПВД, вычисленные на основе наблюдений длительностью  $\Delta T$  на эпоху  $T_0$ . Мы дополнили Пулковские наблюдения положениями из каталога WDS (Worley and Douglass, 1997), чтобы дуга, охваченная наблюдениями, была не меньше  $10^\circ$ , что важно для уверенного определения радиуса кривизны. Общее число наблюдений для каждой звезды  $N_{Pul} + N_{WDS}$ . Наиболее трудоемкой оказалась работа по анализу разнородных наблюдений, собранных в WDS: отсеивание промахов и сглаживание. При этом учитывались апертура телескопа, способ наблюдения, число ночей и т.д.

В таблице 2 – сравнение минимальной массы  $M_0$  с ожидаемой  $M_{Sp-L}$ . Для звезды ADS 11061 значение  $M_0$  вычислено по формуле (4), для остальных звезд – по формуле (5). Звездные величины и спектры взяты из каталога WDS, параллакс – из каталога Hipparcos. Значения  $M_{Sp-L}$  согласованы с данными из монографии (Куликовский, 1985). Вычисленные ошибки значений  $M_0$  зависят только от ошибок параллакса и радиуса кривизны, влияние ошибок остальных параметров видимого движения несущественны.

Причиной избыточной массы может быть как присутствие невидимого спутника, так и особенности в физической природе звезды, приводящие к нарушению соотношения «масса-светимость». И в том, и в другом случае такие звезды представляют интерес для дальнейших исследований.

Для четырех звезд – ADS 497, 3353, 11061 и 15600 – превышение массы объясняется наличием спектроскопических спутников. Наши исследования подтверждают это независимо, причем для ADS 11061 избыток масс был получен прежде, чем были открыты спектроскопические спутники (Киселев, Романенко, 1996). В таблицах эти звезды помечены \*.

Для звезды ADS 15600Aa имеется спекл-интерферометрическая орбита (McAlister, 1980). Звезда ADS 497A имеет спектроскопический спутник, а у ADS 11061 оба компонента являются спектроскопическими двойными (Токовинин и Смехов, 2002). Ожидаемое значение  $M_{Sp-L}$  с учетом всех известных компонентов в таблице 2 поставлено в скобки.

Для звезды ADS 3353 избыток массы определяется неуверенно из-за большой ошибки минимальной массы, но в каталоге WDS отмечено, что один из компонентов – спектроскопическая двойная.

Для звезд ADS 8450 и 10329 также наблюдались лучевые скорости (Токовинин, Смахов, 2002). Переменность лучевой скорости для ADS 8450 пока остается под вопросом, для ADS 10329 – не обнаружена.

Итак, в результате выполненных исследований тридцати звезд пулковской программы для семи звезд обнаружены избытки масс, причем для трех звезд - ADS 8450, 9346 и 10329 – избытки масс обнаружены нами впервые. Природа этих аномалий пока неясна. Желательно обратить особое внимание на эти звезды и исследовать их всеми доступными методами.

**Таблица 1.** Параметры видимого относительного движения компонентов визуально-двойных звезд.

ADS	WDS		$\Delta T$ $T_0$	$\rho$ ["]	$\theta$ [°]	$\mu$ ["/год]	$\psi$ [°]	$\rho_c$ ["]
	$N_{WDS}$	$N_{Pul}$						
497*	00360+2959 72	87	1832-2000 1915.0	5.865 $\pm 0.016$	28.27 $\pm 0.09$	0.0094 $\pm 0.0002$	329.6 $\pm 1.7$	3.3 $\pm 0.7$
3353*	04385+2656 207	48	1830-1997 1909	3.732 $\pm 0.012$	20.54 $\pm 0.07$	0.0103 $\pm 0.0002$	328.0 $\pm 2.0$	3.0 $\pm 0.5$
8450	12115+5325 64	35	1831-1991 1910	12.085 $\pm 0.041$	222.34 $\pm 0.07$	0.0168 $\pm 0.0006$	208.8 $\pm 1.1$	15.1 $\pm 3.0$
9346	14410+5757 44	19	1830-1991 1910	7.618 $\pm 0.020$	41.97 $\pm 0.11$	0.0087 $\pm 0.0003$	129.8 $\pm 2.7$	2.6 $\pm 0.5$
10329	17033+5935 35	22	1830-1995 1915	12.028 $\pm 0.042$	49.41 $\pm 0.14$	0.0140 $\pm 0.0005$	331.9 $\pm 3.9$	2.9 $\pm 0.1$
11061**	18002+8000 90	18	1970-1992 1985.0	19.050 $\pm 0.010$	231.46 $\pm 0.03$	0.0107 $\pm 0.0009$	19 $\pm 10$	-
15600*	22038+6438 169	87	1832-1999 1916.0	7.026 $\pm 0.010$	281.15 $\pm 0.06$	0.0165 $\pm 0.0003$	247.0 $\pm 1.0$	4.0 $\pm 0.2$

**Таблица 2.** Сравнение минимальной массы  $M_0$  с ожидаемым значением  $M_{Sp-L}$ , вычисленным по спектральному классу и светимости.

ADS	WDS	SP		m		$\pi_{Hip}$ ["]	$M_{Sp-L}$ [ $M_{\odot}$ ]	$M_0$ [ $M_{\odot}$ ]
		A	B	A	B			
497*	00360+2959	G2	-	7.96	8.81	0.019 $\pm 0.002$	1.7 (2.5)	4.0 $\pm 1.6$
3353*	04385+2656	F2V	F2V	6.68	6.68	0.014 $\pm 0.002$	3.3	5.4 $\pm 2.0$
8450	12115+5325	K2	G9	7.96	8.14	0.038 $\pm 0.004$	1.7	5.4 $\pm 1.3$
9346	14410+5757	K0	-	7.03	7.9	0.019 $\pm 0.001$	2.7	6.3 $\pm 1.5$
10329	17033+5935	K5	M0	8.61	10.34	0.040 $\pm 0.001$	1.3	4.0 $\pm 0.5$
11061**	18002+8000	F5	F5	5.8	6.2	0.021 $\pm 0.004$	2.6 (4.8)	5.0
15600*	22038+6438	A3m	F7V	4.26	6.34	0.0320 $\pm 0.007$	3.3 (4.0)	4.6 $\pm 0.4$

\* Двойные звезды, имеющие спектроскопические спутники.

\*\* Для ADS 11061 тригонометрический параллакс определен в Пулковской обсерватории (Киселев, Калиниченко, Быков, 1994), все остальные результаты взяты из статьи (Киселев, Романенко, 1996).

Авторы благодарны всем наблюдателям 26-дюймового рефрактора, особенно О.А. Калиниченко и Л.Г. Романенко, которые принимали активное участие в измерении пластинок.

#### Литература

1. *Европейское Космическое Агентство* (ЕСА), SP-1200 (1997).
2. *Киселев А.А., Кияева О.В.* //Астрон. ж. **57**, 1227(1980).
3. *Киселев А.А., Кияева О.В.* // Письма в Астрон. ж., **29**, 46(2003).
4. *Киселев А.А., Романенко Л.Г.*, Астрон. ж., **73**, 875(1996).
5. *Киселев А.А., Калиниченко О.А., Быков О.П.* //Известия ГАО в Пулкове, № 208, 9(1994).
6. *Киселев А.А., Калиниченко О.А., Кияева О.В., Шахт Н.А., Романенко Л.Г., Измайлов И.С., Быков О.П., Масленников К.Л.* Каталог относительных положений визуально-двойных звезд, полученных по наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове, начиная с 1960г. // Электр. версия, Страсбург, рег. номер I/292(2004).
7. *Куликовский П.Г.* Звездная астрономия. (М.: Наука, 1985)
8. *McAlister H.A.*// Astrophys.J., **263**, 522 (1980).
9. *Токовинин А.А., Смехов М.Г.* // Astron.Astrophys., **382**, 118(2002).
10. *Worley C.E., Douglass G.G.* *The Washington Visual Double Star Catalog, 1996.0.* //Astron.Astrophys.Suppl. **125**, 523(1997).

### ON THE POSSIBILITY TO DETERMINE HIDDEN MASS IN THE SYSTEMS OF BINARY STARS

Kiselev A.A., Kiyayeva O.V.

#### Summary

*There are the formulae to estimate minimum sum of mass for visual double star components. To use these formulae one has to determine from observations the apparent motion parameters including the curvature of the short arc of apparent orbit and the trigonometric parallax. If the curvature of the observed short orbit arc cannot be determined, then for the surely physical pair we can also estimate the minimum mass, if the relative radial velocity of the components is known. We considered 30 binaries of the Pulkovo programme. For 7 stars the value of minimum sum of masses is more than the mass according to mass-luminosity relation. It is already known that 4 of them are multiple systems, but for 3 stars – ADS 8450, 9346 and 10329 – the surplus of mass is discovered firstly.*

## **НОВЫЕ ОРБИТЫ 7 ШИРОКИХ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ПУЛКОВСКОЙ ПРОГРАММЫ**

**Киселев А.А., Романенко Л.Г., Калиниченко О.А.**

*Впервые получены орбиты 7 широких визуально-двойных звезд: ADS 497, 2427 (GL130.1), 3593, 6646, 10329, 10759 ( $\psi$ Dra) и 15229. Для определения орбитальных элементов применен метод параметров видимого движения (ПВД). Наблюдательной основой являются 20-40-летние ряды фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове, тригонометрические параллаксы (HIPPARCOS) и лучевые скорости компонент, измеренные А.А. Токовининым (ГАИШ). Получены периоды обращения этих звезд от 500 до 50000 лет. Определена также ориентация орбит в галактической системе координат. Приведены оценки суммы масс компонент. Для звезд ADS 497 и ADS 10329 обнаружены избытки масс систем относительно соотношения "масса-светимость", составляющие одну и три массы Солнца соответственно. Соотношению "масса-светимость" не удовлетворяет также далекая пара ADS 3593. Устойчивая орбита этой звезды возможна при заданном параллаксе ( $\pi_i = 0.010''$ ) только если принять сумму масс компонент не менее 46 масс Солнца. Отмечается возмущение в орбитальном движении яркой пары ADS 10759 ( $\psi$ Dra) с периодом около 40 лет и амплитудой около  $0.3''$ . Возможно, это проявление невидимого спутника с массой порядка 0.4 массы Солнца. Необходимы специальные исследования этой системы.*

Настоящая статья является продолжением цикла работ [1-4], посвященных очередным результатам Пулковской программы исследований визуально-двойных звезд (ВДЗ) в окрестности Солнца. Научная задача программы состоит в определении основных кинематических и динамических характеристик двойных и кратных звездных систем непосредственно из наблюдений. Наблюдательной основой программы являются 20-40-летние ряды фотографических позиционных наблюдений на 26" рефракторе ГАО РАН. В настоящее время в программу входит около 420 ВДЗ до 10 звездной величины.

Фотографический метод предполагает, что угловое разделение между компонентами пары должно быть больше 3-4". По сравнению с двойными, наблюдаемыми другими методами (ПЗС-наблюдения, спекл-интерферометрия, спектро- и фотометрия), фотопары являются более широкими. Периоды обращения таких пар a priori более 300-500 лет. В большинстве случаев пулковские наблюдения охватывают не более 5-10° видимой дуги орбиты. Классические методы определения орбит ВДЗ в таких условиях не работают.

Метод параметров видимого движения (ПВД), разработанный А.А. Киселевым и О.В. Кияевой в 1980 г. в применении к двойным звездам [5], решает этот вопрос, если результаты позиционных наблюдений дополнить данными о тригонометрических параллаксах и лучевых скоростях компонент пары. Оказалось, что для многих наблюдаемых нами звездных пар эти данные отсутствуют. В 1985-1998 гг. компоненты 70 ВДЗ нашей программы наблюдались А.А. Токовининым (ГАИШ) с помощью прибора - Измерителя лучевых скоростей (ИЛС) [11] - по нашей просьбе.

После опубликования результатов наблюдений космическим спутником HIPPARCOS в 1997 г. [6] выяснилось, что около половины ВДЗ нашей программы обеспечены тригонометрическими параллаксами высокого качества. Две трети из них оказались на расстоянии более 50 парсек от Солнца и, по-видимому, ПВД-орбиты этих звезд получить не удастся. Однако, для звезд, обеспеченных надежным параллаксом, в

случае, когда надежно определяется кривизна наблюдаемой короткой дуги орбиты, можно оценить минимальную сумму масс компонент звездной системы, допускающей наблюдаемое орбитальное движение [7].

В таблице 1 приведена характеристика 7 ВДЗ, исследуемых в данной работе. Это, в основном, карлики поздних спектральных классов от F до M. Отметим, что 3 из них находятся в околполярной области, одна -  $\psi$  Dra – довольно яркая широкая пара. Две из 7 ВДЗ имеют спектрально-двойную компоненту и оценки суммы масс компонент согласно А.А. Токовину [8,9]. Таблица 1 показывает, что исследуемые нами звезды имеют значительное общее движение компонент. Не вызывает сомнения, что эти пары – физические.

В основе наших исследований - данные измерений более 400 пластинок Пулковских рядов, охватывающих от  $0.2^\circ$  до  $10^\circ$  дуги видимой орбиты. Таблица 2 характеризует полученный нами наблюдательный материал. Здесь приведены также 4 параметра видимого движения I-го порядка, или ПВД-I, на момент  $T_0$  – середину используемого ряда, а именно:  $\rho$  и  $\theta$  – полярные координаты спутника В относительно главной звезды А,  $\mu$  и  $\psi$  – величина и позиционный угол видимого движения В относительно А. Позиционные углы  $\theta$  и  $\psi$  даны на эпоху 2000.0. Численные значения ПВД-I для 4 из 7 ВДЗ определены путем выравнивания только пулковских фотографических наблюдений. В трех случаях использованы также наблюдения из каталога WDS [13]. Таблица 2 показывает, что ПВД-I исследуемых звезд определены достаточно надежно. Точность относительных движений компонент сохраняется на уровне  $\pm 0.6$  mas/год.

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

ADS Name	$(\alpha, \delta)_{2000.0}$	$m_v A$ $m_v B$	SpA SpB	$M_{SpA}$ $M_{SpB}$	$\pi_t$ $\pm \epsilon \pi$	$\mu_x$ mas	$\mu_y$ mas	$VrA \pm \epsilon A$ $VrB \pm \epsilon B$
497	$00^h 36.0^m$	7.9	G4Y	1.7*	.019	+186	-408	-60.9 $\pm$ 0.1
	$30^\circ 00'$	8.7	G7Y	0.8	$\pm 2$	+181	-399	-60.0 $\pm$ 0.4
2427 GL130.1	$03^h 16.1^m$	9.5	M2Y	0.4	.074	+431	-325	+21.2 $\pm$ 0.3
	$58^\circ 10'$	9.8	M2Y	0.4	$\pm 1$	+431	-325	+21.6 $\pm$ 0.4
3593	$05^h 01.3^m$	8.7	G5	0.9	.010**	+017	-016	-7.3 $\pm$ 0.7
	$50^\circ 15'$	8.7	--	(0.9)	$\pm 4$	-008	-025	-7.0 $\pm$ 0.3
6646	$08^h 16.5^m$	7.6	F4Y	1.8*	.014	-054	-068	-6.7 $\pm$ 0.2
	$79^\circ 30'$	7.9	F7Y	1.3	$\pm 3$	-052	-068	-6.6 $\pm$ 0.1
10329	$17^h 03.4^m$	8.0	K5Y	0.8	.040	-357	+241	-72.0 $\pm$ 0.2
	$59^\circ 34'$	9.2	M0Y	0.5	$\pm 2$	-365	+255	-71.1 $\pm$ 0.3
10759 $\psi$ Dra	$17^h 42.0^m$	4.0	F5IY	1.8	.045	+027	-270	-12.9 $\pm$ 0.2
	$72^\circ 10'$	5.2	F8Y	1.2	$\pm 1$	+035	-274	-11.2 $\pm$ 0.2
15229	$21^h 36.9^m$	8.5	G5	0.9	.040**	-007	-058	-61.6 $\pm$ 0.4
	$82^\circ 55'$	9.0	--	(0.9)	$\pm 6$	-008	-068	-59.0 $\pm$ 0.2

Примечания:  $m_v$  – визуальная звездная величина компоненты,  $M_{Sp}$  – масса компоненты согласно соотношению “масса-светимость” в единицах массы Солнца, \* - компонента является спектрально-двойной звездой [8,9], \*\* - тригонометрический параллакс и собственные движения компонент определены в Пулковско [10], для остальных звезд приведены параллаксы и собственные движения компонент – результаты наблюдений HIPPARCOS [6],  $Vr$  – лучевые скорости компонент в км/с, полученные А.А. Токовининым [8,9,11,12].



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

ADS	T <sub>н</sub> T <sub>к</sub>	n <sub>pl</sub> T <sub>0</sub>	ИЗМ	Δθ <sub>WDS</sub> Δθ <sub>Pul</sub>	ρ 1"	θ 1°	μ 1"/год	ψ 1°	ρ <sub>c</sub> 1"	ΔV <sub>г</sub> км/с
497	1971 2000	58 1986.9	P	13.° 2.	6.131 ± 02	22.94 ± 03	.0091 ± 03	319. ± 1.	3.7 ±0.8	0.9 ±.4
2427	1971 1999	100 1982.9	K	25. 9.	4.820 ± 05	13.53 ± 02	.0313 ± 06	301. ± 2.	5.0 ±1.1	0.3* ±.4
3593	1970 1999	75 1986.0	K	47. 10.	4.189 ± 08	149.65 ± 06	.0239 ± 06	243. ± 2.	16.0 ±5.8	0.2* ±.8
6646	1858 2003	47+41 1913.3	K	0.8 0.2	20.792 ± 13	14.46 ± 06	.0032 ± 04	123. ± 6.	13.5	0.1 ±.3
10329	1830 1999	20+22 1915.0	K	11. 2.	12.029 ± 42	49.55 ± 15	.0149 ± 05	332. ± 4.	2.9	1.0 ±.3
10759	1834 2001	56+55 1992.6	P	3. 0.3	30.078 ± 04	15.46 ± 01	.0126 ± 06	133. ± 2.	13.2	1.7 ±.2
15229	1971 2001	54 1980.8	K	44. 5.	3.042 ± 13	274.67 ± 09	.0110 ± 10	198. ±10.	1.0	2.3* ±.4

Примечания: T<sub>н</sub> и T<sub>к</sub> – начальная и конечная эпохи используемого ряда позиционных наблюдений, T<sub>0</sub> – средняя эпоха наблюдений, n<sub>pl</sub> – количество пластинок (или наблюдений по каталогу WDS [13]), ИЗМ – измеритель (P – Л.Г. Романенко, K – О.А. Калиниченко) ; Δθ<sub>Pul</sub> и Δθ<sub>WDS</sub> - величина наблюдаемой дуги (в градусах) по наблюдениям в Пулкове и по данным каталога WDS, ρ<sub>c</sub> – радиус кривизны наблюдаемой дуги орбиты, ΔV<sub>г</sub> – относительная лучевая скорость компонент, приведенная на момент T<sub>0</sub>. Звездочкой отмечены величины, отличающиеся от наблюдаемых А.А. Токовининым в моменты T ≠ T<sub>0</sub>. Для звезды ADS 2427 приведен вариант ΔV<sub>г</sub>, соответствующий орбите при β<0, для β>0 ΔV<sub>г</sub> = 0.5 ± 0.4 км/с (T = 1991.7).

Радиус кривизны наблюдаемой дуги орбиты ρ<sub>c</sub> (или ПВД-II) определялся по приближенной формуле (1), соответствующей геометрическому смыслу кривизны:

$$\rho_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\psi} = \frac{(\mu_1 + \mu_2)}{2} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{(\psi_1^\circ - \psi_2^\circ)} \cdot 57.296 \quad (1)$$

где ψ<sub>1</sub> и ψ<sub>2</sub> - позиционные углы в орбитальном движении на начальном и конечном участках орбиты, полученные линейным выравниванием, μ<sub>1</sub> и μ<sub>2</sub> - средние движения на участках выравнивания, t<sub>1</sub> и t<sub>2</sub> – средние моменты. Точные формулы, использующие вторые производные от ρ и θ, не применялись, поскольку в наших условиях (короткая дуга и медленное орбитальное движение) эти производные из наблюдений не определяются.

По формуле (1) ρ<sub>c</sub> определен для ADS 497, 2427 и 3593, графически - для ADS 10329. Для остальных звезд ρ<sub>c</sub> получен подбором с учетом далеких наблюдений (главным образом, наблюдений В.Я.Струве). В последнем столбце таблицы 2 приведены относительные лучевые скорости компонент согласно наблюдениям А.А. Токовинина.

Результаты определения орбит исследуемых звезд методом ПВД представлены таблицей 3. Элементы орбит приведены с ошибками, вычисленными на основе вариаций исходных независимых величин – ПВД-I, ρ<sub>c</sub>, ΔV<sub>г</sub> и π<sub>t</sub> – в пределах их ошибок.

Алгоритм вычисления орбиты ВДЗ методом ПВД подробно описан в статьях [1,3,5]. Здесь мы напомним, что в этом методе, как правило, определяются две равнове-

роятные орбиты, соответствующие расположению спутника В относительно главной звезды А в некоторый момент  $T_0$  над картинной плоскостью ( $\beta > 0$ ) или под ней ( $\beta < 0$ ). Выявить реальную орбиту можно лишь с использованием наблюдений, достаточно удаленных по времени от основного ряда. В связи с тем, что таких наблюдений для ADS 2427 не оказалось (эта двойная открыта только в 1914 г.), получены две орбиты ( $\beta = -44^\circ$  и  $\beta = +44^\circ$ ), одинаковые в динамическом отношении, но различные в геометрическом (см. табл.3).

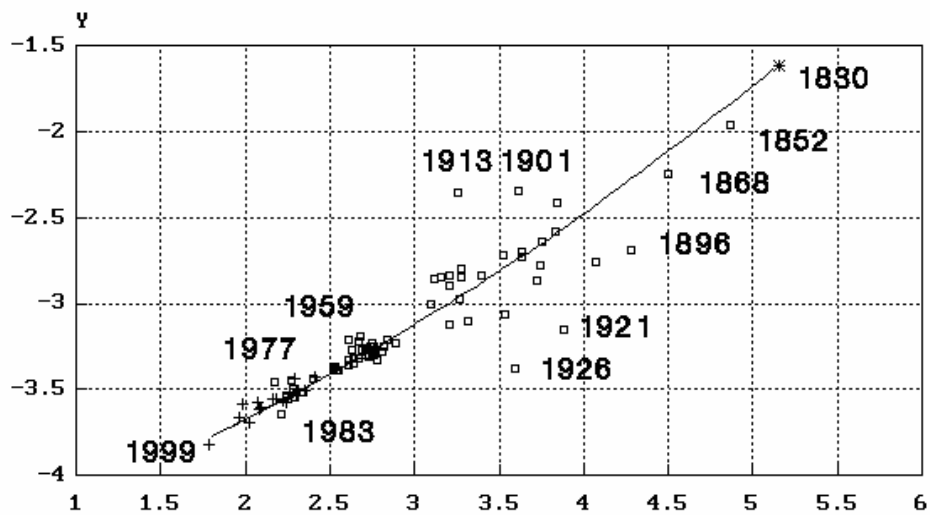
Для далекой пары ADS 3593 приведены также две орбиты, соответствующие  $\beta = -46^\circ$  и  $\beta = +46^\circ$ . Элементы этих орбит вычислены при параллаксе  $\pi_1 = 0.010''$ , определенном в Пулковке [10], и сумме масс, равной 46 массам Солнца, - наименьшей массе, обеспечивающей устойчивое орбитальное движение в системе при данном параллаксе. Как следует из примечания к работе [10], данный параллакс определен неуверенно. Однако эквивалентные орбиты могут быть получены при сумме масс 2.0 (соответствующей соотношению «масса-светимость») только в случае увеличения параллакса в три раза ( $\pi_1 = 0.030''$ ). Эти орбиты, как и первые, одинаково хорошо удовлетворяют наблюдениям от В.Я.Струве до наших дней с точностью до  $0.1''$  в орбитальном движении. На рисунке 1 показан участок орбиты и распределение наблюдений в период от 1830 до 1999 гг.

Для четырех звезд, а именно: ADS 497, 6646, 10329 и 10759 - оказалось, что орбита, наилучшим образом удовлетворяющая наблюдениям, соответствует положению спутника в картинной плоскости на момент  $T_0$  ( $\beta = 0$ ), получены однозначные орбиты. В случае ADS 15229 однозначная орбита получена при  $\beta = -52^\circ$ , поскольку при  $\beta = +52^\circ$  орбита не удовлетворяет далеким наблюдениям ( $(O-C)_0 = 10^\circ$  в 1832 г.).

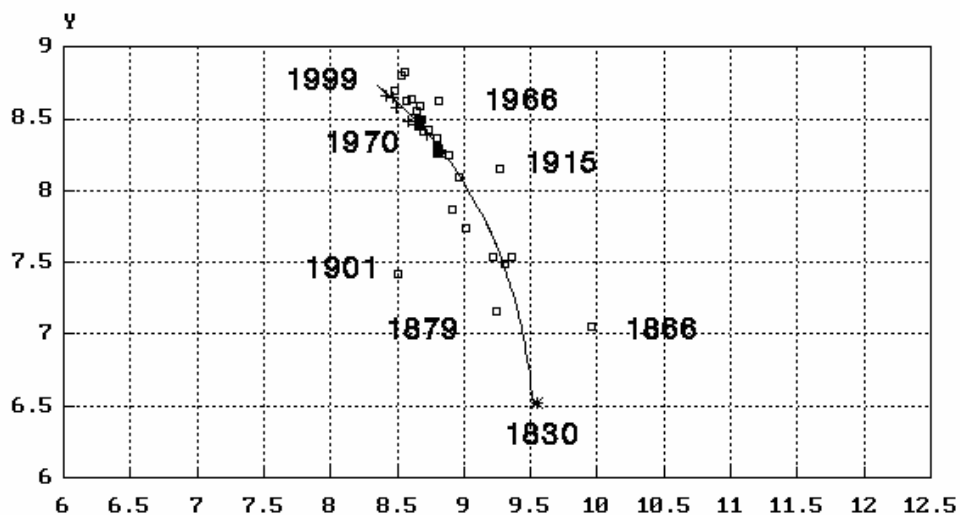
**Таблица 3.** Элементы ПВД-орбит.

ADS	$\beta$	a"	P, лет	e	$\omega$	i	$\Omega$	$T_{\Pi}$	$l_Q$	$b_Q$	M
497	$0.0^0$ $\pm 1.$	4.5 $\pm .3$	1900. $\pm 190.$	.53 $\pm 7$	$206^0$ $\pm 8$	$155^0$ $\pm 9$	$23^0$ $\pm 2$	1384. $\pm 32.$	$148^0$	$-41^0$	3.5*
2427	-44. $\pm 5.$	4.5 $\pm .4$	540. $\pm 60.$	.49 $\pm 9$	115 $\pm 8$	133 $\pm 6$	308 $\pm 9$	1745. $\pm 40.$	148	+47	0.8
	+44. $\pm 5.$	4.6 $\pm .4$	550. $\pm 70.$	.57 $\pm 7$	292 $\pm 6$	136 $\pm 5$	107 $\pm 11$	1793. $\pm 22.$	155	-42	0.8
3593	-46	48.	49000	.88	275	45	242	2014.	23	+ 2	46.*
	+46	48.	49000	.88	90	46	64	1999.	292	-15	46.*
6646	0. $\pm 1.$	15. $\pm 2.$	20000 $\pm 3600$	.48 $\pm 12$	157 $\pm 85$	3 $\pm 10$	15 $\pm 78$	8800. $\pm 800.$	314	-27	3.2
10329	0. $\pm 1.$	7.1 $\pm .3$	1200. $\pm 60.$	.71 $\pm 5$	185 $\pm 21$	151 $\pm 8$	50 $\pm 18$	1416. $\pm 3.$	63	+19	4.5*
10759	0. $\pm 1.$	31. $\pm 7.$	10000 $\pm 3300$	.28 $\pm 7$	99 $\pm 36$	55 $\pm 4$	16 $\pm 1$	3817. $\pm 500.$	356	-70	3.4
15229	-52. $\pm 7.$	3.3 $\pm .3$	530. $\pm 80.$	.74 $\pm 10$	103 $\pm 8$	112 $\pm 5$	244 $\pm 6$	2133. $\pm 20.$	205	+72	2.0

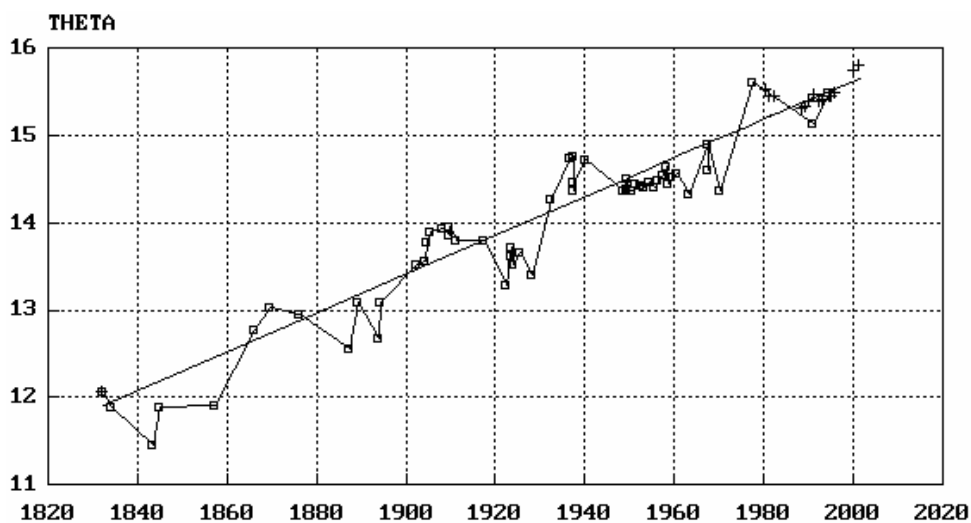
Примечание:  $\beta$  – угол наклона вектора АВ к картинной плоскости на средний момент  $T_0$ , для которого определены ПВД согласно табл.2, a, P, e,  $\omega$ , i,  $\Omega$  и  $T_{\Pi}$  – элементы орбиты,  $l_Q$  и  $b_Q$  – галактические координаты направления на полюс орбиты, M – сумма масс компонент в единицах массы Солнца, соответствующая динамике движения. Звездочкой отмечены три случая, когда найденная масса превышает ожидаемую согласно соотношению «масса-светимость» (см. табл.1).



**Рис.1.** ADS 3593 XY 1830-2000. Масштаб: 1 клетка = 0.5" x 0.5".  
 Обозначения: — Эфемерида + PUL □WDS \*STRUVE



**Рис.2.** ADS 10329 XY 1830-1999. Масштаб: 1 клетка = 0.5" x 0.5".  
 Обозначения: — Эфемерида + PUL □WDS \*STRUVE



**Рис.3.** ADS 10759 ТНЕТА 1832-2003. Масштаб: 1 клетка = 0.5" x 10 лет  
 Обозначения: — Эфемерида + PUL □WDS \*STRUVE

Отметим результат исследования, связанный с оценкой суммы масс звездных пар. В двух случаях, а именно для звезд ADS 497 и 10329, параллаксы которых достаточно надежны, выявлены избытки масс, составляющие 1 и 3 массы Солнца соответственно. Здесь мы, по-видимому, имеем дело с особенностью зависимости “масса-светимость” для этой звезды или с наличием скрытой массы в системе. Для обеих звезд необходимы дальнейшие исследования. Рис.2 показывает, насколько хорошо найденная орбита для ADS 10329 удовлетворяет наблюдениям.

Особое внимание вызывает детальное исследование орбитального движения яркой широкой пары  $\psi$  Dra. На рис.3 показано изменение угла  $\theta$  (в градусах) со временем. В нашем случае ( $\rho = 30''$ ) одной клетке соответствует смещение  $0.5''$  в направлении движения. Вычисления показывают, что имеет место возмущение с периодом 40 лет и амплитудой  $0.3''$  в орбитальном движении компоненты В относительно А. Этот факт можно объяснить наличием невидимого спутника с массой порядка 0.4 массы Солнца.

Представляет большой звездно-динамический интерес рассмотреть ориентацию орбит широких пар – физических двойных звезд – в галактической системе координат. В табл.3 приведены галактические координаты направления на полюс орбиты 7 исследуемых звезд. Данные об ориентации ПВД-орбит, полученных к настоящему времени для 30 ВДЗ, включая 7 исследуемых в данной работе, приведена в статье [14]. Авторы надеются продолжить исследования широких двойных звезд пулковской программы, включая такие особенные пары как ADS 3593 и 10759.

#### Литература

1. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко.* // Астрон.журн., 1996, т.73, № 6, с.875.
2. *О.В. Кияева, А.А. Токовинин, О.А. Калиниченко.* // Письма в Астрон. журн., 1998, т.24, № 11, с.868-873.
3. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко.* // Изв. ГАО в Пулкове, 1998, № 213, с.155-170.
4. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко, И.С. Измайлов, Е.А. Грошева.* // Изв. ГАО в Пулкове, 2000, № 214, с.239-254.
5. *А.А. Киселев, О.В. Кияева.* // Астрон. журн., 1980, т. 57, № 6, с.1227-1341.
6. *М.А.С. Perryman, E. Hoeg et al.* The Hipparcos and Tycho Catalogs. / Noordwijk, ESA, 1997, v. 1.
7. *А.А. Киселев, О.В. Кияева* // Письма в Астрон. журн., 2003, т.29, № 1, с.46-49.
8. *А.А. Tokovinin* // Astron.&Astroph. Suppl.Ser., 1997, v.121, № 1, p.71-76.
9. *А.А. Tokovinin* // Astron.& Astroph. Suppl.Ser., 1999, v.136, p.373.
10. *А.А. Киселев, О.А. Калиниченко, О.П. Быков.* // Изв. ГАО в Пулкове, 1994, № 208, с.9.
11. *А.А. Токовинин.* // Астрон. Журн., 1994, т.71, n 2, с.293-296.
12. *А.А. Tokovinin, M.G.Smekhov.* // Astron.and Astrophys.,2002, v.382, p.118-123.
13. *C.E. Worley, G.G. Douglass.* The Washington Visual Double Star Catalog. / U.S.Naval Obs., Washington, 1996.
14. *А.А. Kisselev, L.G. Romanenko.* // Astron. Soc. of the Pacific, Conf. Ser., v.316, 2004, p.250-254.

## THE NEW ORBITS OF 7 WIDE VISUAL DOUBLE STARS OF THE PULKOVO PROGRAMME

by Kisselev A.A., Romanenko L.G., Kalinichenko O.A.

### *Summary*

*The orbits of 7 wide visual double stars: ADS 497, 2427 (GL130.1), 3593, 6646, 10329, 10759 ( $\psi$ Dra) and 15229 are determined for the first time. The orbital elements are obtained by the Apparent Motion Parameter method (AMP-method) on the basis of photographic observations with the 26-inch refractor at Pulkovo added by trigonometric parallaxes (HIPPARCOS) and radial velocities of components measured by A.A. Tokovinin (Moscow university). The revolution periods of these binaries spread all over 500 to 50000 years. The orientation of the orbital planes in the Galaxy frame is also determined. The mass sums of the components are estimated. It is found that the real masses of the binaries ADS 497 and 10329 surpass the mass corresponding to the mass-luminosity relation (MLR) by about 1 and 3 solar masses. Also the distant binary ADS 3593 seems not satisfy the MLR, - the possible stable orbits in these case ( $\pi_i = 0.010''$ ) may be determined only if we adopte the mass of the system 46 solar masses or more. For the binary ADS 10759 ( $\psi$  Dra) the perturbation in orbital motion with the period of about 40 years and amplitude 0.3'' are revealed. The special investigations of the orbital motion of this star are needed.*

## **АНАЛИЗ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК МАСШТАБА И ОРИЕНТИРОВКИ ПРИ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ И ПЗС НАБЛЮДЕНИЯХ ГЛАВНЫХ СПУТНИКОВ САТУРНА, ПОЛУЧЕННЫХ В ПУЛКОВЕ В 1995-2003 гг. НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ**

**Киселева Т.П.**

*На основе анализа рядов наблюдений спутников Сатурна 1995-2003 гг, выполненных в Пулковке на 26-дюймовом рефракторе с помощью фотографии и ПЗС, исследованы и определены систематические ошибки масштаба и ориентировки, возникающие в результате астрометрической редукции относительных наблюдений спутников методом "след-масштаб". Показано, что при фотографических наблюдениях эти ошибки малы, а при ПЗС-наблюдениях - значительны и отрицательно влияют на точность результатов наблюдений. Приводится список результатов всех ПЗС-наблюдений 1995-2003 гг, исправленных за ошибки масштаба и ориентировки.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081).*

### **1. Методика наблюдений**

Наблюдения спутников больших планет с целью определения их точных координат, пригодных для улучшения теорий движения этих тел до 1995 г. производились исключительно фотографическим методом. В 1995 г. на рефракторе была установлена ПЗС-матрица ST6, и с этого времени наблюдения производятся двумя методами: фотографическим и с помощью ПЗС. Характеристики ПЗС-матрицы ST6 таковы: линейные размеры  $8.6 \times 6.5$  мм; число пиксел  $375 \times 242$ ; размеры пиксел  $23 \times 27$  микрон ( $0.46'' \times 0.52''$ ); угловое поле матрицы  $172'' \times 125''$ . Были выполнены исследования и калибровка ПЗС матрицы, разработана методика определения центра ПЗС-изображений, методика астрометрической редукции измерений в поле ПЗС-матрицы и учета систематических ошибок, возникающих при ПЗС-наблюдениях вследствие дифференциальной рефракции и неоднородности фона вблизи яркой планеты [1,2].

Ввиду малого поля 26-дюймового рефрактора с ПЗС-матрицей (всего  $3' \times 2'$ ) одновременно в поле ПЗС удастся наблюдать два или три спутника на расстояниях немногим более  $100''$ . Поэтому было решено продолжать фотографические наблюдения, так как они позволяют на одной фотопластинке получать всю систему Сатурна. Преимуществом ПЗС наблюдений по сравнению с фотографическими является большая проникающая сила телескопа, позволяющая наблюдать все 8 главных спутников, включая слабый спутник Гиперион, который невозможно было наблюдать фотографическим методом с достаточной точностью из-за большого различия в яркости Гипериона и остальных спутников. Кроме того, как показали предыдущие исследования, внутренняя точность ПЗС-наблюдений примерно вчетверо выше, чем внутренняя точность фотографических наблюдений относительных координат спутников [2]:

внутренняя точность ПЗС наблюдений:  $\varepsilon_x = \pm 0.015''$ ,  $\varepsilon_y = \pm 0.014''$  ;  
внутренняя точность фотографических наблюдений:  $\varepsilon_x = \pm 0.054''$ ,  $\varepsilon_y = \pm 0.058''$  .

Как ПЗС, так и фотографические наблюдения и их обработка выполняются методом "след-масштаб" без использования опорных звезд, ввиду малого поля 26-дюймового рефрактора [3,4]. В результате получают относительные координаты

"спутник минус спутник", исправленные в результате астрометрической редукции за дифференциальную рефракцию. Всего с осени 1994 по осень 2003 г. нами получены 670 фотографических положений пар спутников и около 100 ПЗС-положений. Результаты наблюдений представляют собой разности координат в парах спутников, выведенные как средние по пластинке (по 6 изображениям системы спутников) или в серии ПЗС-кадров (более 10 кадров в каждой серии):  $X_{ij} = \Delta\alpha \cos \delta$ ,  $Y_{ij} = \Delta\delta$  (где  $X = X_i - X_j$ ,  $Y = Y_i - Y_j$ ;  $i, j$  - номера спутников).

## 2. Анализ точности и исследование систематических ошибок наблюдений

Было произведено сравнение всех наблюдений, как фотографических, так и ПЗС, с эфемеридами JPL, вычисленными на основе новейших теорий движения спутников Сатурна. [5]. Результаты сравнения существенно отличаются от прежних наших сравнений наблюдений с теорией Харпера-Тэйлора, особенно это заметно для 7-го и 8-го спутников, расхождения в (O-C) для которых достигали в некоторых случаях 0.7". На основе сравнения с эфемеридами JPL всех материалов ПЗС и фотографических наблюдений позволило исследовать точность полученных наблюдений и оценить систематические ошибки. Главными систематическими ошибками, возникающими при редукции измерений методом "след-масштаб", являются ошибки масштаба и ориентировки ПЗС-кадров или фотопластинок относительно экваториальных осей  $\alpha$ ,  $\delta$ . Масштаб вычисляется отдельно на основе специальных исследований и его постоянная величина  $M_0$  используется в формулах астрометрической редукции. Изменение масштаба вследствие рефракции учитывается при учете дифференциальной рефракции. Ориентировка фотопластинок и ПЗС кадров осуществляется при помощи следов самих спутников (преимущественно Титана), получающихся в начале и в конце серии наблюдений спутников в данную ночь. На фотопластинках следы получаются длиной 800" - 900", на ПЗС-кадрах - не более 172". Соответственно точность определения ориентировки на ПЗС-кадрах в несколько раз хуже, чем на фотографиях. Кроме того, на ПЗС-кадрах измеряется протяженный след, а на фотографиях - два изображения спутника на одной суточной параллели (движение спутника за время производства следа - учитывается) с достаточно большой выдержкой (1-2 минуты), что измеряется гораздо точнее. Ошибки угла ориентировки при фотографических наблюдениях обычно не превышают 0.015°, а при ПЗС-наблюдениях - на порядок хуже. Но при ПЗС-наблюдениях эти ошибки не так заметно влияют на результаты, поскольку сами расстояния между спутниками обычно меньше 100". На таких расстояниях ошибки из-за неточности угла ориентировки могут достигать 0.02" для фотографических наблюдений и 0.1" для ПЗС-наблюдений.

Исследование всего ряда ПЗС и фотографических наблюдений 1995-2003 гг. позволило уточнить значение систематических ошибок масштаба и ориентировки для фотографических и ПЗС-наблюдений. Материалом для исследования послужили разности (O-C)<sub>x</sub> и (O-C)<sub>y</sub> в зависимости от расстояний между спутниками по координате X. Представляя эту зависимость линейной функцией, мы определили значения поправок масштаба и ориентировки для обоих видов наблюдений, а также стандартные отклонения (ошибки одного наблюдения). Эти результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Поправки масштаба и ориентировки при ПЗС и фото наблюдениях.

	ПЗС	ФОТО
Поправка масштаба $\Delta M_0/M_0$	-0.00137	-0.00019
Поправка ориентировки $\Delta\gamma$	-0.00080 (-0.046°)	-0.00008 (-0.0046°)
SD (ошибка ед. веса)	$\pm 0.169''$	$\pm 0.120''$

Малые значения поправок масштаба и ориентировки для фотографических наблюдений свидетельствуют о том, что фотографические наблюдения практически свободны от вышеуказанных систематических ошибок, однако ПЗС наблюдения даже при расстояниях между спутниками в 100" могут быть искажены систематическими ошибками величиной до 0.14". Поэтому имеет смысл наблюдать с помощью ПЗС только тесные пары спутников с расстояниями < 50". Анализ точности ПЗС-наблюдений в зависимости от расстояния между спутниками показал существенное уменьшение внешней случайной ошибки при уменьшении расстояний.

При  $X_{ij} = 0'' - 120''$  (все наблюдения),  $SD = 0.169''$ ;  
 $0'' - 100''$   $0.160''$ ;  
 $0'' - 50''$   $0.120''$ .

Таким образом, если наблюдать только тесные пары спутников, с расстояниями не более 50", то точность таких наблюдений будет наиболее высокой, такой же, как при фотографических наблюдениях. Если же измерять расстояния между спутниками на всем поле ПЗС-матрицы ( $X = 120''$ ), то внешняя точность ПЗС-наблюдений будет примерно в полтора раза ниже, чем при фотографических наблюдениях. Таким образом, целесообразность фотографических наблюдений спутников планет на 26-дюймовом рефракторе не вызывает сомнения. ПЗС наблюдения также следует продолжать, но предпочтение следует отдать наблюдениям тесных сближений спутников друг с другом, а также со звездами.

В таблице 2 представлены результаты ПЗС-наблюдений за весь период 1995 - 2003 гг., исправленные за систематические ошибки масштаба и ориентировки. Результаты фотографических наблюдений опубликованы ранее в работах [6], [7]. В таблице 2 приводятся:  $X_{ij} = \Delta\alpha \cos \delta$ ,  $Y_{ij} = \Delta\delta$  (где  $X = X_i - X_j$ ,  $Y = Y_i - Y_j$ ;  $i, j$  - номера спутников в паре) на момент наблюдений по UTC в системе экватора на эпоху даты.  $(O-C)_{X,Y}$  в таблице 2 представляют сравнение результатов наблюдений с эфемеридами JPL.

**Таблица 2.** Результаты ПЗС-наблюдений спутников Сатурна 1995-2003 гг.

Дата	UTC	$S_i$	$S_j$	$X_{ij}$	$Y_{ij}$	$(O-C)_X$	$(O-C)_Y$
				<i>arcsec</i>		<i>arcsec</i>	
1995-08-05	23:46:00	6	5	-24.413	3.560	-0.046	0.038
1995-08-05	23:46:00	3	5	-35.949	4.411	0.190	0.192
1995-08-05	23:46:00	3	6	-11.536	0.851	0.236	0.154
1995-08-05	23:46:00	4	3	-103.321	7.687	-0.393	0.285
1995-08-21	00:14:18	4	6	-56.547	4.425	0.202	-0.044
1995-08-21	00:14:18	3	6	-69.415	6.495	0.264	0.021
1995-08-21	00:14:18	3	4	-12.868	2.070	0.062	0.065
1995-08-21	00:21:18	4	6	-56.808	4.815	-0.289	0.355
1995-08-21	00:21:18	3	6	-69.715	6.734	-0.362	0.288
1995-08-21	00:21:18	3	4	-12.908	1.920	-0.074	-0.076
1996-08-14	23:19:40	8	5	26.316	-66.749	0.191	0.145
1996-08-14	23:19:40	7	5	82.313	-13.634	0.087	0.049
1996-08-14	23:19:40	7	8	55.997	53.115	-0.105	-0.096
1996-08-15	00:09:48	4	6	7.100	17.270	-0.047	0.019
1996-08-18	23:31:55	4	6	-126.273	11.859	-0.256	0.305
1996-08-18	22:50:57	8	6	90.023	-14.178	0.089	-0.045
1996-08-18	23:04:17	8	6	90.073	-14.208	0.022	-0.130
1996-08-19	23:08:36	5	6	-117.811	7.816	-0.036	0.228
1996-08-19	23:08:36	7	6	-65.149	24.618	-0.238	0.111
1996-08-19	23:08:36	7	5	52.672	16.802	-0.192	-0.117
1996-08-19	23:34:27	5	6	-118.542	8.005	-0.083	0.306
1996-08-19	23:34:27	7	6	-65.950	24.537	-0.133	0.141
1996-08-19	23:39:09	7	5	52.592	16.642	-0.014	-0.130



1996-08-22 00:52:36	4	6	-81.361	-7.755	-0.063	-0.254
1996-08-25 01:12:48	7	6	-96.442	5.843	-0.021	-0.233
1996-09-26 21:19:58	5	6	61.023	-11.951	0.033	-0.161
1996-10-11 21:55:28	7	6	-128.376	-15.303	0.188	-0.137
1996-10-14 20:42:31	5	6	114.567	-3.248	0.082	0.027
1996-10-16 21:35:35	4	6	57.078	6.786	-0.007	0.070
1996-10-16 23:10:19	3	5	-23.032	5.192	-0.099	0.024
1997-09-05 00:28:37	7	6	89.302	28.331	0.032	-0.059
1997-09-14 23:37:23	7	6	-32.895	17.974	-0.116	-0.114
1997-09-14 23:47:24	7	6	-33.015	17.974	-0.102	-0.139
1997-09-22 22:36:53	7	6	-93.348	-29.475	-0.227	0.343
1997-09-22 22:36:53	7	4	54.525	-40.086	-0.161	-0.187
1998-09-03 00:53:12	5	6	126.864	6.081	0.122	-0.385
1998-11-10 20:27:35	5	6	-105.104	14.516	-0.090	-0.104
1998-11-11 20:36:37	5	6	-161.060	23.961	-0.318	-0.361
1998-11-17 20:01:51	7	6	-105.825	-50.125	0.173	-0.037
1998-11-17 20:26:51	5	6	36.840	-38.440	0.143	0.119
1998-11-17 20:26:51	3	6	75.894	-43.609	0.171	0.125
1998-11-17 20:26:51	3	5	39.043	-5.160	0.017	0.015
1998-11-18 18:15:49	7	6	-28.669	-53.093	0.398	0.273
1999-08-19 01:03:05	6	7	-5.978	-48.475	0.104	-0.052
1999-11-07 22:08:37	5	7	53.213	-81.627	0.164	0.076
1999-11-07 21:45:31	6	4	-104.082	-34.733	0.200	0.030
1999-11-07 21:45:31	6	3	-122.147	-29.808	0.214	0.021
1999-11-07 21:45:31	4	3	-18.065	4.926	0.015	0.008
1999-11-07 21:45:31	6	2	-138.820	-28.261	0.252	0.013
1999-11-07 21:45:31	4	2	-34.738	6.472	0.053	-0.017
1999-11-07 21:45:31	3	2	-16.663	1.547	0.048	-0.008
1999-11-07 21:45:27	4	1	-32.434	0.424	0.235	0.120
1999-11-07 21:45:27	3	1	-14.360	-4.491	0.232	0.139
2000-01-31 17:28:17	4	3	-11.896	-0.900	0.045	-0.003
2000-01-31 17:28:17	5	4	94.599	-21.124	0.109	0.034
2000-01-31 17:28:17	5	3	82.703	-22.024	0.144	0.031
2000-02-20 17:07:08	4	2	-2.400	-24.410	0.116	0.081
2000-02-20 17:07:08	4	3	-12.207	-25.060	0.153	0.022
2000-02-20 17:07:08	2	3	-9.794	-0.638	0.051	-0.047
2000-02-20 17:07:08	6	7	-21.880	-20.077	0.222	0.003
2000-10-19 00:18:08	3	4	-25.491	-5.388	0.097	-0.082
2001-01-22 19:20:25	4	5	13.970	21.624	-0.058	-0.107
2001-01-22 19:20:25	2	5	-12.838	36.501	-0.012	-0.122
2001-01-22 19:20:25	3	5	-76.246	14.419	0.223	0.067
2001-01-22 19:20:25	2	4	-26.809	14.877	0.045	-0.015
2001-01-22 19:20:25	3	4	-90.216	-7.205	0.280	0.175
2001-01-22 19:20:25	3	2	-63.408	-22.082	0.234	0.189
2001-03-07 18:10:14	7	6	56.036	9.869	-0.191	-0.197
2001-03-07 18:41:27	4	3	18.559	11.413	-0.017	-0.052
2001-09-17 01:38:58	7	6	67.484	3.653	-0.240	0.012
2001-12-23 20:15:33	3	5	-39.070	14.879	0.046	-0.122
2001-12-23 20:37:14	8	6	-77.521	51.143	-0.048	-0.392
2002-01-06 19:22:53	4	3	-9.263	4.778	-0.019	-0.106
2002-03-08 16:38:35	4	3	-14.173	-4.069	-0.002	-0.123
2002-03-08 16:38:35	5	3	-65.658	9.070	0.087	-0.279
2002-03-08 16:38:35	5	4	-51.484	13.139	0.080	-0.156
2002-03-08 17:05:12	7	8	14.977	-79.990	0.124	0.147
2002-03-10 16:59:40	7	8	-31.876	-59.673	-0.141	-0.142
2002-03-14 18:10:46	8	6	-52.907	38.222	0.200	0.088
2002-03-17 17:15:33	5	6	98.236	1.550	-0.284	-0.100
2002-03-17 17:15:33	7	6	51.021	-66.000	-0.019	0.003
2002-03-17 17:15:33	7	5	-47.213	-67.546	0.268	0.104
2002-03-24 17:36:53	7	6	56.833	-4.527	-0.118	0.180
2002-12-17 00:20:01	4	5	9.241	-14.761	-0.057	0.029

2003-03-03 17:22:45	4	5	-7.765	-10.742	0.078	0.002
2003-05-03 18:50:58	7	4	79.022	96.190	-0.370	-0.325
2003-03-05 19:39:21	3	5	2.683	31.376	-0.116	-0.145
2003-03-05 19:39:21	2	5	14.178	37.361	-0.163	-0.118
2003-03-09 18:21:02	3	4	4.507	-27.512	0.132	0.152
2003-03-09 18:21:02	5	4	-36.125	-25.275	0.239	0.000
2003-03-09 18:21:02	7	4	-93.774	38.678	0.033	-0.436
2003-03-24 18:23:55	5	6	-18.635	47.377	-0.210	-0.311
2003-03-26 18:24:59	4	3	-8.460	-4.225	0.014	0.188

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.

Результаты ПЗС-наблюдений, приведенные в данной работе, будут включены в астрометрическую базу данных по фотографическим и ПЗС-наблюдениям тел Солнечной системы, создаваемую в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН [8].

### Литература

1. **И.С. Измайлов, А.А. Киселев, Т.П. Киселева, Е.В. Хруцкая.** Применение ПЗС-камеры в Пулковских программах наблюдений двойных и кратных звезд и спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе. ПАЖ, 1998, т.24, N 10, с.772-779.
2. **Т.П. Киселева, И.С. Измайлов, О.А. Калиниченко.** Астрометрия спутников Сатурна на основе фотографических и ПЗС-наблюдений на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в 1995-2000 г. Известия ГАО в Пулкове, 2002, № 216, с.174.
3. **А.А. Киселев.** Теоретические основания фотографической астрометрии. // Москва, Наука, 1989, 260 с.
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. **Jacobson R.A.,** 2004."The orbits of the major Saturnian satellites and the gravity field of Saturn from spacecraft and Earthbased observations". Submitted to the *Astronomical Journal*.
6. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко.** Результаты фотографических наблюдений спутников Сатурна в Пулкове в 1994-1998 гг. Известия ГАО в Пулкове, 2000, № 214, с.344-355.
7. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко.** Результаты фотографических позиционных наблюдений спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове в 1999-2001гг.//Известия ГАО в Пулкове, 2002, № 216, с.185-190.
8. **Е.В. Хруцкая, М.Ю. Ховричев.** Каталог Pul-3 SE как часть астрометрической базы данных Пулковской обсерватории. Труды международной астрономической конференции "Основные направления развития астрономии в России", Казань, 2004, с.101-107.

**THE ANALYSIS OF SISTEMATIC ERRORS OF SCALE AND ORIENTATION  
IN PHOTOGRAPHIC AND CCD OBSERVATIONS OF THE MAJOR SATURNIAN  
SATELLITES WITH THE HELP OF 26-INCH REFRACTOR  
AT PULKOVO IN 1995-2003**

**Kiseleva T.P.**

***Summary***

*The investigations and determinations of systematic errors of scale and orientation in CCD and photo observations of Saturnian Satellites maden with 26-inch Refractor at Pulkovo in 1995-2003 were carried out. The method "scale-trale" have been used for the astrometric reduction. As it was shown the errors of scale and orientation are very small for the photographic observations but its considerable for the CCD ones. The list of CCD results 1995-2003 corrected by scale and orientation errors are presented.*

*The works have been carried out with the support of RFBR (№ 04-02-16157 and 04-07-90081).*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА В 2004 г. НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ**

**Киселева Т.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В.**

*Приводятся результаты ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера и главных спутников Сатурна в марте-апреле 2004 г. в Пулковской обсерватории на 26-дюймовом рефракторе. Всего получено 23 наблюдения в течение 10 ночей. По наблюдениям спутников определены координаты Сатурна с ошибкой менее 0.1". Сравнение наблюдений спутников с теориями движения L1 (для спутников Юпитера) и TASS1.7 (для спутников Сатурна) показало высокую точность пулковских наблюдений (около 0.01" по внутренней сходимости). Разработана новая методика астрометрической редукиции ПЗС-измерений, позволившая существенно увеличить точность относительных положений спутников. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.*

### **Введение**

Данная работа представляет результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна в рамках продолжающейся в Пулкове на автоматизированном 26-дюймовом рефракторе ( $D/F = 650/10413$  mm) программы наблюдений спутников планет, необходимых для уточнения теорий движения и предсказания покрытий, используемых для исследования физических параметров спутников, а также для поддержки космических исследований.

### **1. Наблюдения и обработка**

Наблюдения представляют собой измерения в поле ПЗС (камера ST6,  $375 \times 242$  пкс,  $23 \times 27$  мкм) расстояний между спутниками, образующими пары с расстояниями не более 50" для Юпитера и не более 150" - для Сатурна. В 2004 г. в марте-апреле удалось в течение 10 ночей наблюдать 16 пар галилеевых спутников Юпитера и 7 пар спутников Сатурна (спутники 3 - 8). Наблюдения выполнялись сериями, содержащими от 10 до 100 отдельных ПЗС-наблюдений, всего 330 отдельных наблюдений спутников Сатурна и 1035 - спутников Юпитера. Экспозиции при наблюдениях составляли от 0.1 - до 1 сек. для спутников Юпитера и от 2 сек до 45 сек. - для спутников Сатурна. Наблюдения выполнены вблизи оппозиции Юпитера (5 марта 2004) и после оппозиции Сатурна (31 декабря 2003 г.). Зенитные расстояния Юпитера при наблюдениях изменялись от  $51^\circ$  до  $61^\circ$ , зенитные расстояния Сатурна - от  $33^\circ$  до  $36^\circ$ , часовые углы от - 53min до + 76 min. В результате обработки ПЗС-наблюдений получены 23 относительных положений спутников. При обработке учитывался градиент яркости фона в поле ПЗС, обусловленный ореолом от планеты. Методика обработки измерений с целью определения центров изображений в поле ПЗС-кадра описана в ранее опубликованной работе [1].

### **2. Астрометрическая редукиция измерений**

Астрометрическая редукиция измерений выполнялась новым методом, разработанным И.С. Измайловым, использующим наблюдения в каждую ночь контрольных звезд из космического каталога Tycho-2 [2], расположенных по небу в непосредственной близости от наблюдаемых объектов. Для астрометрической редукиции измерений была вновь проведена калибровка ПЗС-матрицы. Для этого в одну из ночей были про-

ведены наблюдения 18 пар звезд из каталога Tycho-2, имеющие склонение от +15 до +88 градусов, при этом наблюдения велись близ кульминации данной пары. Измеренные координаты в системе ПЗС-матрицы, выраженные в пикселях сопоставлялись с экваториальными тангенциальными координатами, вычисленными на основании данных каталога, с помощью метода 6 постоянных. В результате были получены следующие значения параметров:

$$\begin{aligned}M_x &= 0.457202 \pm 0.000059 \text{ ''/px}, \\M_y &= 0.536476 \pm 0.000194 \text{ ''/px}, \\ \theta &= 4^{\circ}.030499 \pm 0^{\circ}.015946, \\ \nu &= 0^{\circ}.055023 \pm 0^{\circ}.018574,\end{aligned}$$

здесь  $M_x$ ,  $M_y$  - масштабы соответственно по  $X$  и по  $Y$ ,  $\theta$  - ориентировка,  $\nu$  - косоугольность. Ошибки единицы веса, при решении системы условных уравнений оказались равными:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 0''.059, \\ \sigma_y &= 0''.076.\end{aligned}$$

Заметим, что при подобном методе калибровки, по нашему мнению, необходимо учитывать изменение ориентировки ПЗС-матрицы, связанной с несовпадением полюса мира и точки неба, в которую направлена полярная ось инструмента (полюс телескопа). Для учета этого эффекта использовалось соотношение [3]:

$$\theta = (\gamma_x \sin t + \gamma_y \cos t) \sec \delta$$

где  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$  – координаты полюса,  $t$  – часовой угол и склонение соответствующей пары звезд. При калибровке мы получили следующие значения:

$$\begin{aligned}\gamma_x &= 0.154 \pm 0.095, \\ \gamma_y &= 0.095 \pm 0.013.\end{aligned}$$

В дальнейшем каждую ночь производились наблюдения двух-трех звездных пар для контроля ориентировки и масштаба, которые показали, что в пределах ошибок измерений (порядка 0.02 секунды дуги) ориентировка и масштаб не изменяются.

Имея в виду результаты калибровки, мы использовали следующую процедуру перехода от измеренных изображений объектов в поле ПЗС-матрицы к их относительным положениям на небесной сфере:

- 1) Преобразование матричных координат всех объектов в пикселях к тангенциальным координатам, выраженным в секундах, по формулам с шестью постоянными.
- 2) Учет ориентировки, зависящей от часового угла и склонения.
- 3) Редукция за дифференциальную рефракцию.

В предыдущие годы для астрометрической редукции ПЗС наблюдений использовался метод "след-масштаб", не использующий координат опорных звезд для редукции [4], который, однако, оказался недостаточно эффективным при обработке ПЗС-наблюдений ввиду малой точности определения угла ориентировки и ПЗС-масштаба в малых полях ПЗС. Все наблюдения с помощью ПЗС, выполненные с 1995 по 2003 гг. пришлось исправлять за ошибки масштаба и ориентировки [5]. Появление высокоточных космических каталогов, таким образом, позволило разрешить проблему ориентировки малых полей ПЗС-кадров. Кроме того, благодаря высокой плотности звезд в космических каталогах, в полях 26-дюймового рефрактора с ПЗС иногда наблюдаются звезды с высокой точностью координат. В таких случаях появляется возможность по измерениям расстояний между этими звездами и спутниками определять точные координаты самой планеты, не измеряя ее изображения. Возможность таких определений описана нами в работе [6], где приводится и список положений Сатурна, полученных по фотографическим наблюдениям его спутников на 26-дюймовом рефракторе. В 2004 г.

при ПЗС-наблюдениях спутников Сатурна удалось получить три положения Сатурна по наблюдениям его спутников и по звездам из каталога UCAC-2.

### 3. Результаты наблюдений

Результаты наблюдений приведены в таблицах 1, 2, 3 (в системе экватора 2000.0). В таблице 1 даются результаты наблюдений спутников Юпитера. Приводятся моменты наблюдений по всемирному времени (UTC), номера спутников в парах, число ПЗС-кадров каждой серии, относительные координаты спутников:  $X = \Delta\alpha \cos\delta$ ,  $Y = \Delta\delta$ , а также  $(O-C)_X$  и  $(O-C)_Y$  - результат сравнения наблюдений с эфемеридами, вычисленными Н.В. Емельяновым (<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/servicer.htm>) согласно теории L1 (V. Lainey in IMCCE) [7]. В таблице 2 даются результаты наблюдений спутников Сатурна, для сравнения наблюдений с теорией использовались эфемериды Н.В. Емельянова, вычисленные согласно теории TASS 1.7 [8]. Для Юпитера и Сатурна в этих теориях использована теория DE405. В таблице 3 приведены результаты определения координат Сатурна по наблюдениям его спутников. В ней приводятся номера спутников Сатурна и звезд, по которым определялись топоцентрические координаты планеты и  $(O-C)$  Сатурна по прямому восхождению и склонению. В данной задаче эфемерида спутников также TASS 1.7 и эфемерида Сатурна DE405.

**Таблица 1.** Результаты ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера.

Дата	UTC			$S_i-S_j$	N	X (arcsec)		Y (arcsec)		$(O-C)_X$	$(O-C)_Y$
2004	h	m	s								
03 05 00 15 01.0	4-3	28	37.034	$\pm 0.044$	-28.863	$\pm 0.039$	-0.008	-0.007			
03 05 00 42 25.0	1-2	31	29.342	0.035	-17.753	0.026	0.020	0.001			
03 09 23 18 25.5	3-2	50	40.666	0.013	-23.324	0.015	-0.011	-0.003			
03 10 22 28 10.5	4-2	100	5.980	0.015	19.036	0.021	0.019	0.041			
03 10 22 28 10.5	3-2	100	10.613	0.013	-10.000	0.015	-0.009	-0.008			
03 10 22 28 10.5	3-4	100	4.633	0.015	-29.036	0.022	-0.028	-0.049			
03 19 22 28 22.6	1-2	100	20.880	0.006	-11.965	0.007	0.004	0.020			
03 28 20 44 31.4	3-4	50	15.396	0.005	-14.813	0.012	-0.010	-0.027			
03 28 20 44 31.4	1-4	50	40.407	0.009	-35.002	0.018	-0.029	-0.054			
03 28 20 44 31.4	1-3	50	25.011	0.006	-20.190	0.016	-0.019	-0.028			
04 04 20 40 31.8	1-3	50	-14.178	0.008	-1.369	0.005	-0.029	0.019			
04 04 20 40 31.8	4-3	50	2.101	0.007	-25.225	0.007	-0.051	-0.044			
04 04 20 40 31.8	4-1	50	16.279	0.009	-23.857	0.007	-0.032	-0.064			
04 05 20 45 32.6	1-4	50	10.998	0.016	12.100	0.026	0.041	0.014			
04 07 21 22 32.6	2-3	26	9.120	0.019	-1.130	0.016	-0.043	-0.012			
05 07 20 07 34.2	2-1	50	25.991	0.014	-9.913	0.014	0.032	-0.037			

**Таблица 2.** Результаты ПЗС наблюдений спутников Сатурна.

Дата	UTC			$S_i-S_j$	N	X (arcsec)		Y (arcsec)		$(O-C)_X$	$(O-C)_Y$
2004	h	m	s								
03 04 18 50 30.3	8-6	30	31.478	$\pm 0.002$	75.789	$\pm 0.002$	0.009	0.109			
03 09 17 49 45.2	3-5	10	44.667	0.004	13.687	0.003	0.016	-0.014			
03 09 18 06 37.3	5-7	10	139.112	0.010	35.341	0.010	-0.247	0.340			
03 13 16 56 47.0	5-4	50	2.394	0.004	28.517	0.006	0.045	0.023			
03 13 16 56 47.0	3-4	50	12.933	0.004	1.726	0.003	-0.083	-0.018			
03 13 16 56 47.0	3-5	50	10.539	0.004	-26.791	0.007	-0.052	-0.042			
03 28 18 09 05.4	6-4	10	126.484	0.002	-13.875	0.004	-0.026	0.046			

**Таблица 3.** Гипоцентрические координаты Сатурна в системе экватора 2000.0, полученные по наблюдениям спутников.

	1					2					3				
Дата 2004 и момент наблюдений (UTC)	м	ч	h	m	s	м	ч	h	m	s	м	ч	h	m	s
	03	04	18	50	30.3	03	09	18	06	37.3	03	28	18	09	05.4
Спутники Сатурна	6, 8					5					4, 6				
Звезды UCAC-2	3982148 11,52					39821465 13,83					39822139 13,28				
№, зв.вел.						39821473 13,57 39821480 11,57									
$\alpha$ (h,m,s)	06 27 03.7659					06 27 03.0068					06 28 49.7134				
$\delta$ (°, ', ")	+22 46 17.049					+22 47 03.831					+22 48 44.520				
$(O-C)_\alpha^{(s)}$ , $(O-C)_\delta^{(")}$	+0.0102 +0.007					+0.0096 +0.048					+0.0035 -0.116				

#### 4. Анализ точности результатов

Сравнение результатов с теориями движений позволило оценить точность полученных относительных координат спутников Юпитера и Сатурна. В таблице 4 приведены результаты этих оценок. Внутренние ошибки наблюдений ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ), приведенных в таблицах 1 и 2, получены по сходимости результатов в сериях ПЗС-наблюдений. Внешние ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) - по сходимости O-C в ряде наблюдений.

**Таблица 4.** Средние O-C, внутренние и внешние ошибки положений спутников Юпитера и Сатурна.

Система спутников	$(O-C)_x$	$(O-C)_y$	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	n
	arcsec						
Спутники Юпитера	-0.010	-0.015	$\pm 0.016$	$\pm 0.017$	$\pm 0.027$	$\pm 0.030$	16
Спутники Сатурна	-0.015	+0.017	0.005	0.006	0.047	0.055	6

Оценка точности координат Сатурна по наблюдениям его спутников дает следующие результаты. Средние O-C для Сатурна равны (в секундах дуги): +0.109, -0.020 по трем определениям. Среднеквадратичная ошибка одного положения Сатурна по O-C равна:  $\pm 0.052$ ,  $\pm 0.085$  (arcsec). Точность определения координат Сатурна таким способом зависит от точности теории движения спутников, точности координат звезд в космических каталогах, точности измерений спутников и звезд. Сравнивая координаты Сатурна, полученные по разным звездам и разным спутникам, можно оценить некоторые из этих ошибок. Так, по нашим оценкам, ошибка положения Сатурна, зависящая только от каталожного положения звезды и измерений, равна  $\pm 0.009''$  и  $\pm 0.031''$  (по прямому восхождению и склонению соответственно). К сожалению, ввиду малого числа наблюдений, невозможно оценить из наблюдений ошибку теории движения спутников, но по данным, приведенным на сайте JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>), ошибки современных эфемерид восьми главных спутников Сатурна не превышают 0.083'' (для Гипериона, а для остальных спутников - меньше). Следует напомнить, что координаты Сатурна, полученные таким образом, свободны от ошибок, связанных с фазой планеты, наличием колец и других ошибок, обусловленных фигурой планеты.

Таким образом, результат определения координат Сатурна по наблюдениям с ПЗС на 26-дюймовом рефракторе представляется перспективным в смысле дальнейших наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.

Результаты, приведенные в данной работе, будут включены в астрометрическую базу данных по фотографическим и ПЗС-наблюдениям тел Солнечной системы, создаваемую в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН [9].

### Литература

1. **И.С. Измайлов, А.А. Киселев, Т.П. Киселева, Е.В. Хруцкая.**, 1998, ПАЖ, т.24, № 10, с.772-779.
2. **Sinachopoulos D. et al.**, // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., v.136, p.564, 1999.
3. **Михельсон Н.Н.** Оптические телескопы. Теория и конструкция. М. Наука, 1976.
4. **А.А. Kisselev.** Satellite astrometry with a long-focus astrograph. Galactic and Solar System Optical Astrometry. Proceedings of the Royal Greenwich Observatory and the Institute of Astronomy Workshop, Cambridge, 1993. p.325-328.
5. **Т.П. Киселева.** Анализ систематических ошибок масштаба и ориентировки при фотографических и ПЗС наблюдениях главных спутников Сатурна, полученных в Пулковке в 1995-2003 гг. на 26-дюймовом рефракторе. Данный сборник Известий ГАО, 2004.
6. **Т.П. Киселева, О.А. Калиниченко, М.А. Можяев.** Фотографические наблюдения спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в 2001-2003 гг. в Пулковке. Определение координат Сатурна по наблюдениям его спутников. Данный сборник.
7. **Lainey V., Vienne A., Duriez L.** New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. Astronomy and Astrophysics, 2004, v.420, p.1171-1183.
8. **A. Vienne, L.Duriez,** 1995, Astronomy and Astrophysics, v.297, p.588.
9. **Е.В. Хруцкая, М.Ю. Ховричев.** Каталог Pul-3 SE как часть астрометрической базы данных Пулковской обсерватории. Труды международной астрономической конференции "Основные направления развития астрономии в России", Казань, 2004, с.101-107.

## THE RESULTS OF CCD OBSERVATIONS OF SATELLITES OF JUPITER AND SATURN IN 2004 AT PULKOVO WITH THE 26-INCH REFRACTOR

**Kiseleva T.P., Izmailov I.S., Khovrichev V.J., Khrutskaya E.V.**

### Summary

*The results of CCD observations of Galilean Satellites of Jupiter and the Main Satellites of Saturn during March-April 2004 at Pulkovo observatory with the 26-inch Refractor are presented. 23 observations during 10 nights have been carried out. The coordinates of Saturn by observations of their satellites with the error less 0.1" have been obtained. The comparison of observations with theories of motion LI (for satellites of Jupiter) and TASS 1.7 (for Saturnian satellites) showed high accuracy of Pulkovo observations. The new method of astrometric reduction of CCD-observations has been worked out. It made possible the essential increasing of accuracy of satellites positions.*

*The works have been carried out with the support of RFBR (N 04-02-16157 and 04-07-90081).*



**ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ САТУРНА  
НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В 2001-2003 гг. В ПУЛКОВЕ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ САТУРНА  
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЕГО СПУТНИКОВ**

**Киселева Т.П., Калиниченко О.А., Можаяев М.А.**

*В работе представлены результаты определения относительных координат 1-6-го и 8-го спутников Сатурна по фотографическим наблюдениям в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе в 2001-2003 гг. (таблица 1). При наблюдениях применялся метод "след-масштаб". Полученные 190 наблюдений относительных координат спутников характеризуются высокой внутренней и внешней точностями ( $\pm 0.065''$  по внутренней сходимости и  $\pm 0.12''$  по внешней сходимости с эфемеридами). Наблюдения сравнивались с эфемеридами Лаборатории Реактивного Движения (JPL). По наблюдениям спутников определены 25 точных положений Сатурна без измерения его изображений на фотографиях. Показано, что этот метод дает результаты высокой точности: ошибки положения Сатурна не превосходят  $\pm 0.16''$ . Положения Сатурна, полученные этим методом, свободны от систематических ошибок, связанных со сложным качеством изображений планеты.*

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081).*

### **1. Наблюдения**

Продолжается программа позиционных наблюдений спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе с использованием фотографического метода и ПЗС, очередной этап которой был начат в 1994 г. В данной работе представлены результаты фотографических наблюдений 2001-2003 гг., результаты наблюдений 1994-2000 гг. опубликованы в работах [1-3].

Наблюдения охватывают период 28 августа 2001 г.- 21 марта 2003 г. Всего получено 25 фотографических пластинок, на каждой пластинке - по 6 изображений системы спутников Сатурна 1 - 8-го с экспозициями по 2 минуты, а также по 2 следа (изображения спутников на одной суточной параллели - для редукиции методом "след-масштаб") в соответствии с принятой методикой наблюдений и их обработки, описанной в работах [1-5]. В наблюдениях спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе принимали участие следующие научные сотрудники лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН: Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко, К.Л. Масленников, О.В. Кияева, О.П. Быков, М.А. Можаяев.

Измерения фотопластинок производились О.А. Калиниченко на полуавтоматическом измерительном приборе Аскорекорд с записью измеренных координат в память персонального компьютера и последующей оперативной обработкой по программе астрометрической редукиции методом "след-масштаб", составленной О.В. Кияевой. Измерения самой планеты Сатурн не производились ввиду плохого качества ее изображений. В результате редукиции получены взаимные относительные координаты спутников в смысле "спутник - спутник". Напомним, что при редукиции методом "след-масштаб" не используются координаты опорных звезд [4]. Результаты наблюдений сравнивались с двумя эфемеридами: вычисленными по программе Н.В.Емельянова на основе теории движения Харпера и Тэйлора [6], а также по теории, разработанной в JPL [7].

## 2. Результаты

В таблице 1 представлены результаты фотографических наблюдений спутников Сатурна. В первой колонке приведены моменты наблюдений в системе (UTC), во второй - номера спутников в паре ( $S_i - S_j$ ), в третьей и четвертой колонках - разности координат спутников в парах:  $\Delta X = X_i - X_j = \Delta\alpha \cos\delta$ ,  $\Delta Y = Y_i - Y_j = \Delta\delta$ , в пятой и шестой - (O-C) по X и Y, вычисленные по эфемеридам JPL.

**Таблица 1.** Список положений спутников Сатурна, полученных по фотографическим наблюдениям в 2001-2003 гг. на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке (на эпоху даты).

Data	(UTC)	$Sp_i-sp_j$		X	Y	(O-C) <sub>x</sub>	(O-C) <sub>y</sub>
				arcsec		arcsec	
2001-08-28	23:03:57	5	6	-82,150	57,321	-0,008	0,042
2001-08-28	23:03:57	3	6	-122,698	53,124	0,051	-0,024
2001-08-28	23:03:57	4	6	-199,250	20,964	-0,137	0,185
2001-08-28	23:03:57	3	5	-40,548	-4,197	0,059	-0,067
2001-08-28	23:03:57	4	5	-117,100	-36,357	-0,129	0,142
2001-08-28	23:03:57	4	3	-76,552	-32,160	-0,188	0,209
2001-09-01	00:39:28	2	6	-198,233	-52,199	0,105	-0,130
2001-09-01	00:39:28	3	6	-162,494	-70,599	0,004	0,072
2001-09-01	00:39:28	4	6	-171,942	-76,511	-0,044	-0,008
2001-09-01	00:39:28	5	6	-163,355	-86,618	-0,003	0,014
2001-09-01	00:39:28	3	2	35,739	-18,400	-0,101	0,202
2001-09-01	00:39:28	4	2	26,291	-24,312	-0,149	0,122
2001-09-01	00:39:28	5	2	34,878	-34,419	-0,108	0,144
2001-09-01	00:39:28	4	3	-9,448	-5,912	-0,048	-0,080
2001-09-01	00:39:28	5	3	-0,861	-16,019	-0,007	-0,058
2001-09-01	00:39:28	5	4	8,587	-10,107	0,042	0,022
2001-09-01	01:16:33	3	6	-157,756	-71,069	-0,020	0,018
2001-09-01	01:16:33	4	6	-167,601	-77,027	0,005	0,129
2001-09-01	01:16:33	5	6	-159,577	-87,009	-0,023	0,078
2001-09-01	01:16:33	2	6	-197,321	-54,465	0,104	0,100
2001-09-01	01:16:33	4	3	-9,845	-5,958	0,026	0,111
2001-09-01	01:16:33	5	3	-1,821	-15,940	-0,003	0,060
2001-09-01	01:16:33	2	3	-39,565	16,604	0,125	0,082
2001-09-01	01:16:33	5	4	8,024	-9,982	-0,028	-0,051
2001-09-01	01:16:33	2	4	-29,720	22,562	0,099	-0,029
2001-09-01	01:16:33	2	5	-37,744	32,544	0,127	0,022
2001-09-20	02:25:23	2	6	0,005	-72,456	0,081	0,147
2001-09-20	02:25:23	3	6	59,154	-94,728	0,123	0,108
2001-09-20	02:25:23	4	6	10,196	-104,984	0,111	0,185
2001-09-20	02:25:23	5	6	112,343	-81,914	0,142	0,184
2001-09-20	02:25:23	3	2	59,149	-22,272	0,043	-0,039
2001-09-20	02:25:23	4	2	10,191	-32,528	0,031	0,038
2001-09-20	02:25:23	5	2	112,338	-9,458	0,061	0,037
2001-09-20	02:25:23	4	3	-48,958	-10,256	-0,012	0,077
2001-09-20	02:25:23	5	3	53,189	12,814	0,019	0,076
2001-09-20	02:25:23	5	4	102,147	23,070	0,031	-0,001
2001-10-23	00:38:09	4	6	101,292	-92,300	0,048	0,126
2001-10-23	00:38:09	2	6	74,570	-60,626	0,085	0,086
2001-10-23	00:38:09	3	6	97,334	-44,804	0,034	0,145
2001-10-23	00:38:09	5	6	106,620	-26,473	0,051	0,165
2001-10-23	00:38:09	2	4	-26,722	31,674	0,036	-0,040
2001-10-23	00:38:09	3	4	-3,958	47,496	-0,014	0,020
2001-10-23	00:38:09	5	4	5,328	65,827	0,002	0,039
2001-10-23	00:38:09	3	2	22,764	15,822	-0,050	0,060
2001-10-23	00:38:09	5	2	32,050	34,153	-0,034	0,079
2001-10-23	00:38:09	5	3	9,286	18,331	0,016	0,019

2001-12-17	23:16:05	5	6	-202,704	20,279	0,017	-0,052
2001-12-17	23:16:05	2	6	-161,000	71,815	0,126	-0,466
2001-12-17	23:16:05	3	6	-105,652	49,196	0,069	-0,087
2001-12-17	23:16:05	4	6	-123,712	81,695	0,133	-0,199
2001-12-17	23:16:05	2	5	41,704	51,536	0,108	-0,414
2001-12-17	23:16:05	3	5	97,052	28,917	0,052	-0,035
2001-12-17	23:16:05	4	5	78,992	61,416	0,116	-0,147
2001-12-17	23:16:05	4	2	37,288	9,880	0,007	0,267
2001-12-17	23:16:05	4	3	-18,060	32,499	0,064	-0,111
2002-02-01	18:28:01	3	6	-0,280	103,890	0,179	-0,144
2002-02-01	18:28:01	4	6	40,020	72,697	0,062	-0,154
2002-02-01	18:28:01	5	6	13,588	49,566	0,059	-0,170
2002-02-01	18:28:01	4	3	40,300	-31,193	-0,117	-0,009
2002-02-01	18:28:01	5	3	13,868	-54,324	-0,120	-0,026
2002-02-01	18:28:01	5	4	-26,432	-23,131	-0,003	-0,017
2002-02-26	17:45:59	2	6	98,689	-76,750	-0,018	0,180
2002-02-26	17:45:59	3	6	24,105	-64,918	-0,033	0,135
2002-02-26	17:45:59	4	6	121,706	-63,156	-0,031	0,068
2002-02-26	17:45:59	5	6	28,840	-41,864	0,004	0,125
2002-02-26	17:45:59	3	2	-74,584	11,832	-0,014	-0,045
2002-02-26	17:45:59	4	2	23,017	13,594	-0,012	-0,112
2002-02-26	17:45:59	5	2	-69,849	34,886	0,022	-0,055
2002-02-26	17:45:59	4	3	97,601	1,762	0,002	-0,068
2002-02-26	17:45:59	5	3	4,735	23,054	0,037	-0,011
2002-02-26	17:45:59	5	4	-92,866	21,292	0,034	0,057
2002-03-12	17:38:01	5	6	-144,222	-63,941	0,011	-0,033
2002-03-12	17:38:01	3	6	-50,281	-92,458	-0,008	-0,067
2002-03-12	17:38:01	4	6	-41,680	-55,524	-0,038	-0,063
2002-03-12	17:38:01	3	5	93,941	-28,517	-0,019	-0,034
2002-03-12	17:38:01	4	5	102,542	8,417	-0,048	-0,030
2002-03-12	17:38:01	4	3	8,601	36,934	-0,029	0,004
2002-03-12	18:00:20	5	6	-143,817	-64,810	0,184	-0,069
2002-03-12	18:00:20	3	6	-47,219	-91,852	0,196	0,024
2002-03-12	18:00:20	4	6	-42,243	-55,139	0,010	0,019
2002-03-12	18:00:20	5	3	-96,598	27,042	-0,011	-0,093
2002-03-12	18:00:20	5	4	-101,574	-9,671	0,174	-0,087
2002-03-12	18:00:20	4	3	4,976	36,713	-0,185	-0,005
2002-03-19	18:16:46	3	6	74,410	55,664	-0,076	0,096
2002-03-19	18:16:46	4	6	102,050	40,271	-0,011	0,111
2002-03-19	18:16:46	5	6	191,102	63,358	-0,006	0,178
2002-03-19	18:16:46	4	3	27,590	-15,482	0,015	-0,074
2002-03-19	18:16:46	5	3	116,716	7,314	0,094	-0,298
2002-03-19	18:16:46	5	4	89,126	22,796	0,079	-0,224
2002-03-30	18:51:44	3	6	31,188	-57,454	0,094	0,197
2002-03-30	18:51:44	5	6	1,110	-53,112	0,098	0,121
2002-03-30	18:51:44	4	6	62,762	-91,578	0,066	0,187
2002-03-30	18:51:44	5	3	-30,078	4,342	0,004	-0,076
2002-03-30	18:51:44	4	3	31,574	-34,124	-0,028	-0,010
2002-03-30	18:51:44	4	5	61,652	-38,466	-0,031	0,066
2002-04-02	19:06:11	2	6	136,884	10,350	0,340	-0,110
2002-04-02	19:06:11	4	6	200,062	-6,030	0,252	-0,127
2002-04-02	19:06:11	4	2	63,178	-16,380	-0,088	-0,017
2002-04-02	19:06:11	3	2	76,950	3,770	0,087	0,214
2002-04-02	19:06:11	3	4	13,772	20,150	0,175	0,231
2002-12-10	22:41:37	3	6	-27,329	-96,012	-0,070	0,047
2002-12-10	22:41:37	2	6	-18,000	-91,042	-0,062	-0,059
2002-12-10	22:41:37	5	6	75,366	-117,582	-0,168	0,134
2002-12-10	22:41:37	4	6	79,682	-98,055	-0,210	0,021
2002-12-10	22:41:37	2	3	9,329	4,970	0,007	-0,106
2002-12-10	22:41:37	5	3	102,695	-21,570	-0,099	0,087
2002-12-10	22:41:37	4	3	107,011	-2,043	-0,140	-0,027

2002-12-10	22:41:37	5	2	93,366	-26,540	-0,106	0,193
2002-12-10	22:41:37	4	2	97,682	-7,013	-0,147	0,079
2002-12-10	22:41:37	4	5	4,316	19,527	-0,041	-0,114
2002-12-12	21:43:38	2	6	196,941	-49,104	0,019	0,045
2002-12-12	21:43:38	3	6	114,600	-54,943	-0,081	0,037
2002-12-12	21:43:38	4	6	120,574	-67,992	-0,044	0,106
2002-12-12	21:43:38	5	6	141,909	-4,679	-0,086	0,114
2002-12-12	21:43:38	4	1	-9,086	-23,813	-0,098	-0,116
2002-12-12	21:43:38	5	1	12,249	39,500	-0,139	-0,108
2002-12-12	21:43:38	3	2	-82,341	-5,839	-0,100	-0,008
2002-12-12	21:43:38	4	2	-76,367	-18,888	-0,063	0,061
2002-12-12	21:43:38	5	2	-55,032	44,425	-0,105	0,069
2002-12-12	21:43:38	4	3	5,974	-13,049	0,036	0,069
2002-12-12	21:43:38	5	3	27,309	50,264	-0,005	0,078
2003-02-01	19:50:24	5	6	73,074	45,148	0,159	-0,078
2003-02-01	19:50:24	3	6	105,601	57,262	0,183	-0,119
2003-02-01	19:50:24	4	6	149,578	94,724	0,247	-0,125
2003-02-01	19:50:24	2	6	185,148	78,444	0,294	-0,231
2003-02-01	19:50:24	3	5	32,532	12,114	0,029	-0,041
2003-02-01	19:50:24	4	5	76,504	49,576	0,088	-0,047
2003-02-01	19:50:24	2	5	112,074	33,296	0,135	-0,153
2003-02-01	19:50:24	4	3	43,972	37,462	0,059	-0,006
2003-02-01	19:50:24	2	3	79,542	21,182	0,106	-0,112
2003-02-01	19:50:24	2	4	35,570	-16,280	0,047	-0,106
2003-02-04	22:12:49	4	6	-115,906	95,633	-0,122	-0,200
2003-02-04	22:12:49	5	6	-69,993	119,790	-0,106	-0,152
2003-02-04	22:12:49	3	6	-49,932	102,934	-0,006	-0,129
2003-02-04	22:12:49	5	4	45,973	24,157	0,076	0,048
2003-02-04	22:12:49	3	4	65,974	7,301	0,116	0,072
2003-02-04	22:12:49	3	5	20,001	-16,856	0,039	0,023
2003-02-15	17:56:09	3	6	230,282	-6,934	0,096	0,045
2003-02-15	17:56:09	4	6	155,324	21,833	0,086	0,018
2003-02-15	17:56:09	5	6	138,697	-33,508	-0,040	0,020
2003-02-15	17:56:09	4	3	-74,958	28,767	-0,010	-0,027
2003-02-15	17:56:09	5	3	-91,584	-26,574	-0,135	-0,025
2003-02-15	17:56:09	5	4	-16,624	-55,341	-0,123	0,002
2003-02-20	18:03:17	4	6	-30,759	106,559	0,099	0,024
2003-02-20	18:03:17	5	6	-55,274	42,518	0,014	-0,138
2003-02-20	18:03:17	4	3	70,440	38,412	-0,080	0,042
2003-02-20	18:03:17	5	3	45,925	-25,629	-0,165	-0,120
2003-02-20	18:03:17	5	4	-24,515	-64,041	-0,085	-0,162
2003-02-21	17:48:59	2	6	-150,852	46,792	-0,012	0,019
2003-02-21	17:48:59	3	6	-85,952	75,862	0,050	-0,043
2003-02-21	17:48:59	4	6	-183,384	51,402	-0,067	0,017
2003-02-21	17:48:59	5	6	-41,812	60,943	0,047	-0,059
2003-02-21	17:48:59	3	2	64,900	29,070	0,063	-0,062
2003-02-21	17:48:59	4	2	-32,532	4,610	-0,055	-0,002
2003-02-21	17:48:59	5	2	109,040	14,151	0,059	-0,078
2003-02-21	17:48:59	4	3	-97,432	-24,460	-0,118	0,060
2003-02-21	17:48:59	5	3	44,140	-14,919	-0,004	-0,016
2003-02-21	17:48:59	5	4	141,572	9,541	0,114	-0,076
2003-03-02	17:04:01	3	6	184,492	-48,996	0,159	0,029
2003-03-02	17:04:01	4	6	180,366	-56,143	0,136	0,116
2003-03-02	17:04:01	5	6	238,214	-36,234	-0,069	0,057
2003-03-02	17:04:01	4	3	-4,126	-7,147	-0,023	0,087
2003-03-02	17:04:01	5	3	53,722	12,762	-0,228	0,028
2003-03-02	17:04:01	5	4	57,848	19,909	-0,205	-0,059
2003-03-02	17:04:14	3	6	184,384	-49,121	0,026	-0,109
2003-03-02	17:04:14	4	6	180,310	-56,265	0,055	-0,016
2003-03-02	17:04:14	5	6	238,171	-36,382	-0,122	-0,104
2003-03-02	17:04:14	4	3	-4,074	-7,144	0,029	0,093

2003-03-02 17:04:14	5	3	53,787	12,739	-0,148	0,005
2003-03-02 17:04:14	5	4	57,861	19,883	-0,177	-0,089
2003-03-04 19:03:12	2	6	163,116	21,654	-0,148	0,211
2003-03-04 19:03:12	3	6	219,756	34,312	-0,028	0,151
2003-03-04 19:03:12	4	6	123,345	23,278	0,063	0,119
2003-03-04 19:03:12	5	6	104,126	50,685	0,059	0,081
2003-03-04 19:03:12	3	2	56,640	12,658	0,119	-0,060
2003-03-04 19:03:12	4	2	-39,771	1,624	0,211	-0,092
2003-03-04 19:03:12	5	2	-58,990	29,031	0,207	-0,130
2003-03-04 19:03:12	4	3	-96,411	-11,035	0,092	-0,033
2003-03-04 19:03:12	5	3	-115,630	16,372	0,087	-0,071
2003-03-04 19:03:12	5	4	-19,219	27,407	-0,004	-0,038
2003-03-07 17:10:35	4	5	-111,994	-43,330	0,041	0,123
2003-03-07 17:10:35	3	5	-119,950	-23,272	-0,073	0,031
2003-03-07 17:10:35	3	4	-7,956	20,058	-0,114	-0,093
2003-03-21 18:08:50	2	6	168,888	72,365	-0,028	0,055
2003-03-21 18:08:50	3	6	176,372	57,536	0,054	0,098
2003-03-21 18:08:50	4	6	141,820	38,127	-0,028	0,051
2003-03-21 18:08:50	5	6	172,470	98,381	0,019	0,067
2003-03-21 18:08:50	3	2	7,484	-14,829	0,082	0,042
2003-03-21 18:08:50	4	2	-27,068	-34,238	0,000	-0,004
2003-03-21 18:08:50	5	2	3,582	26,016	0,047	0,012
2003-03-21 18:08:50	4	3	-34,552	-19,409	-0,082	-0,046
2003-03-21 18:08:50	5	3	-3,902	40,845	-0,035	-0,031
2003-03-21 18:08:50	5	4	30,650	60,254	0,047	0,015
2001-09-01 00:39:28	8	6	99,868	-104,430	0,029	-0,081
2001-09-01 00:39:28	8	2	298,101	-52,231	-0,076	0,048
2001-09-01 00:39:28	8	3	262,362	-33,831	0,024	-0,153
2001-09-01 00:39:28	8	4	271,810	-27,919	0,073	-0,073
2001-09-01 00:39:28	8	5	263,223	-17,812	0,031	-0,095
2001-09-01 01:16:33	8	6	101,563	-104,563	-0,169	0,072
2001-09-01 01:16:33	8	3	259,319	-33,494	-0,148	0,053
2001-09-01 01:16:33	8	4	269,164	-27,536	-0,174	-0,057
2001-09-01 01:16:33	8	5	261,140	-17,554	-0,146	-0,006
2001-09-01 01:16:33	8	2	298,884	-50,098	-0,273	-0,028
2001-10-23 00:38:09	8	6	-441,304	-172,123	0,114	0,064
2001-10-23 00:38:09	8	4	-542,596	-79,823	0,065	-0,062
2001-10-23 00:38:09	8	2	-515,874	-111,497	0,029	-0,022
2001-10-23 00:38:09	8	3	-538,638	-127,319	0,080	-0,082
2001-10-23 00:38:09	8	5	-547,924	-145,650	0,063	-0,101
2001-12-17 23:16:05	8	6	61,528	253,854	-0,062	-0,008
2001-12-17 23:16:05	8	5	264,232	233,575	-0,079	0,044
2001-12-17 23:16:05	8	2	222,528	182,039	-0,188	0,458
2001-12-17 23:16:05	8	3	167,180	204,658	-0,131	0,079
2001-12-17 23:16:05	8	4	185,240	172,159	-0,195	0,191
2002-03-12 17:38:01	8	6	-115,130	54,210	0,104	-0,047
2002-03-12 17:38:01	8	5	29,092	118,151	0,093	-0,013
2002-03-12 17:38:01	8	3	-64,849	146,668	0,112	0,021
2002-03-12 17:38:01	8	4	-73,450	109,734	0,141	0,016
2002-03-12 18:00:20	8	6	-114,675	53,782	0,154	-0,175
2002-03-12 18:00:20	8	5	29,142	118,592	-0,031	-0,106
2002-03-12 18:00:20	8	3	-67,456	145,634	-0,042	-0,199
2002-03-19 18:16:46	8	6	-181,287	104,871	0,132	0,057
2002-03-19 18:16:46	8	6	-181,287	104,871	0,132	0,057
2002-12-10 22:41:37	8	6	-262,694	-261,410	-0,253	0,274
2002-12-10 22:41:37	8	3	-235,365	-165,398	-0,183	0,227
2002-12-10 22:41:37	8	2	-244,694	-170,368	-0,191	0,333
2002-12-10 22:41:37	8	5	-338,060	-143,828	-0,085	0,140
2002-12-10 22:41:37	8	4	-342,376	-163,355	-0,044	0,254
2002-12-12 21:43:38	8	6	-37,578	-207,596	-0,002	-0,068
2002-12-12 21:43:38	8	1	-167,238	-163,417	-0,055	-0,290

2002-12-12	21:43:38	8	2	-234,519	-158,492	-0,021	-0,113
2002-12-12	21:43:38	8	3	-152,178	-152,653	0,079	-0,105
2002-12-12	21:43:38	8	4	-158,152	-139,604	0,042	-0,174
2002-12-12	21:43:38	8	5	-179,487	-202,917	0,084	-0,182
2003-02-01	19:50:24	8	6	-127,003	126,338	0,191	0,120
2003-02-01	19:50:24	8	5	-200,077	81,190	0,031	0,198
2003-02-01	19:50:24	8	5	-200,077	81,190	0,031	0,198
2003-02-01	19:50:24	8	4	-276,581	31,614	-0,056	0,245
2003-02-01	19:50:24	8	2	-312,151	47,894	-0,103	0,351
2003-02-04	22:12:49	8	6	-458,395	94,555	-0,131	-0,413
2003-02-04	22:12:49	8	4	-342,489	-1,078	-0,009	-0,213
2003-02-04	22:12:49	8	5	-388,462	-25,235	-0,086	-0,261
2003-02-04	22:12:49	8	3	-408,463	-8,379	-0,125	-0,284
2003-02-15	17:56:09	8	6	-353,398	-127,778	0,053	0,047
2003-02-15	17:56:09	8	3	-583,680	-120,844	-0,043	0,002
2003-02-15	17:56:09	8	4	-508,722	-149,611	-0,033	0,030
2003-02-15	17:56:09	8	5	-492,096	-94,270	0,092	0,027
2003-02-20	18:03:17	8	6	-529,077	-84,791	0,052	-0,204
2003-02-20	18:03:17	8	3	-427,878	-152,938	-0,127	-0,186
2003-02-20	18:03:17	8	4	-498,318	-191,350	-0,048	-0,228
2003-02-21	17:48:59	8	6	-570,786	-108,174	-0,104	-0,039
2003-02-21	17:48:59	8	2	-419,934	-154,966	-0,092	-0,058
2003-02-21	17:48:59	8	3	-484,834	-184,030	-0,155	0,009
2003-02-21	17:48:59	8	4	-387,402	-159,576	-0,037	-0,056
2003-02-21	17:48:59	8	5	-528,974	-169,117	-0,151	0,019
2003-03-02	17:04:01	8	6	33,396	-185,689	0,081	0,011
2003-03-02	17:04:01	8	4	-146,970	-129,546	-0,055	-0,106
2003-03-02	17:04:01	8	5	-204,818	-149,455	0,150	-0,046
2003-03-04	19:03:12	8	6	140,337	-98,806	-0,041	0,111
2003-03-04	19:03:12	8	2	-22,779	-120,460	0,107	-0,100
2003-03-04	19:03:12	8	3	-79,419	-133,119	-0,012	-0,041
2003-03-04	19:03:12	8	4	16,992	-122,084	-0,104	-0,008
2003-03-04	19:03:12	8	5	36,211	-149,491	-0,099	0,030
2003-03-07	17:10:35	8	5	14,661	-129,638	-0,004	-0,121
2003-03-07	17:10:35	8	4	126,655	-86,308	-0,046	-0,244
2003-03-07	17:10:35	8	3	134,611	-106,366	0,068	-0,151

### 3. Сравнение с теориями движений и анализ результатов

Результаты наблюдений сравнивались с эфемеридами, вычисленными по двум теориям движения спутников Сатурна: Харпера-Тэйлора и JPL. Эфемериды 1-6-го спутников Харпера-Тэйлора и JPL отличаются мало, но результаты наблюдений 8-го спутника существенно ближе к эфемеридам JPL, чем к эфемеридам Харпера-Тэйлора. В таблице 2 приводятся значения  $O-C$  для пар спутников, в которых обязательно присутствует 8-й спутник (пары  $8-S_j$ , где  $j = 1, \dots, 6$ ), вычисленные по теориям Харпера-Тэйлора и JPL.  $O-C$  вычислены как средние по всем парам спутников на каждой пластинке. В таблице 2 приводятся: дата и момент наблюдений для каждой пластинки (UTC), число пар спутников, где участвует 8-й спутник (Япет) на данной пластинке и средние по пластинкам  $(O-C)_{X,Y}$  по двум теориям.

**Таблица 2.** Сравнение наблюдений Япета с двумя теориями.

Data (UTC)	n	Harper & Taylor		JPL	
		(O-C) <sub>X</sub>	(O-C) <sub>Y</sub>	(O-C) <sub>X</sub>	(O-C) <sub>Y</sub>
		<i>arcsec</i>		<i>arcsec</i>	
2001 09 01.027415	5	-0.528	-0.236	+0.016	-0.071
2001 09 01.053163	5	-0.723	-0.160	-0.182	+0.007
2001 10 23.026501	5	+0.146	+0.017	+0.070	-0.041
2001 12 17.969503	5	+0.161	+0.209	-0.131	+0.076
2002 03 12.734735	4	+0.348	+0.068	+0.112	-0.006
2002 03 12.750236	3	+0.271	-0.094	+0.027	-0.160
2002 03 19.761645	4	+0.384	+0.013	+0.132	+0.057
2002 12 10.945572	5	-0.653	+0.184	-0.151	+0.246
2002 12 12.905310	6	-0.573	-0.232	+0.021	-0.155
2003 02 01.826670	4	+0.252	+0.308	+0.016	+0.228
2003 02 04.925570	4	+0.166	-0.182	-0.087	-0.293
2003 02 15.747327	4	-0.123	+0.021	+0.017	+0.026
2003 02 20.752281	3	-0.385	-0.045	-0.041	-0.206
2003 02 21.742356	5	-0.410	-0.061	-0.108	-0.025
2003 03 02.711134	4	-0.516	-0.084	+0.024	-0.040
2003 03 04.793896	5	-0.615	-0.149	-0.030	-0.002
2003 03 07.715689	3	-0.601	-0.301	+0.006	-0.172

Как видно из таблицы, систематическое различие O-C по двум теориям достигает 0.7". Случайные ошибки наблюдений, вычисленные по сравнению с разными теориями, оказались практически одинаковыми.

В таблице 3 приводятся значения внутренних и внешних ошибок одного наблюдения пары спутников. Внутренние ошибки вычислялись по сходимости измерений каждой пары внутри одной пластинки, т.е. по 6 изображениям. Внешние ошибки вычислены по уклонениям наблюдений от эфемериды, т.е. по O-C.

**Таблица 3.** Внешние и внутренние случайные ошибки наблюдений пар спутников.

Спутники	n (число пар)	Внутренние ошибки		Внешние ошибки	
		S <sub>Y</sub>	S <sub>X</sub>	σ <sub>IX</sub>	σ <sub>IY</sub>
1 - 6	190	±0.065"	± 0.065"	±0.117"	±0.116"
8	63	0.067	0.063	0.114	0.139

#### 4. Определение координат Сатурна

Метод "след-масштаб" не требует опорных звезд для определения относительных координат спутников. Однако наличие в малом поле телескопа хотя бы одной звезды с координатами высокой точности позволяет определить координаты самой планеты без измерения ее изображений на пластинках. Для этого необходимо, кроме точного положения одной или нескольких звезд на фотографиях, иметь также кривоцентрические координаты спутников достаточно высокой точности. Точность координат Сатурна в этом случае будет определяться точностью теории движения спутников, точностью координат звезды в каталоге и точностью измерений. Ошибки теории движения играют главную роль, так как ошибки звезд в современных космических каталогах чрезвычайно малы (не более 100 mas). Ошибки современных теорий движения спутников - не превышают 0.1". Таким образом, можно ожидать точность координат Сатурна порядка 0.1 - 0.2". Такой метод определения координат Сатурна без измерения его изображений на фотографиях имеет существенное преимущество перед обычным прямым методом - по измерениям самой планеты, так как он свободен от ошибок изображения планеты,

обусловленных неправильностью формы изображения из-за фазы, колец, неравномерности яркости, а также атмосферными и аппаратными эффектами. Как показал опыт нашей работы по измерениям Сатурна, систематические ошибки его положения могут достигать 0.4" [3]. В этой работе мы представляем результаты определения положений Сатурна по ряду фотографических наблюдений, полученных в 1994-2003 гг. По 25 фотопластинкам получено 25 положений Сатурна, определенных по наблюдениям его спутников с использованием звезд HIPPARCOS или TYCHO-2 в количестве от 1 до 6 (на разных пластинках). Для определения положения планеты использовались измерения 1-6-го спутников. 5 пластинок были редуцированы с помощью метода 6 постоянных, так как на этих пластинках имелось достаточное число опорных звезд (больше 3-х) для редукиции, на остальных 20 пластинках астрометрическая редукиция выполнялась методом "след-масштаб". При этом определялась разность координат спутников и звезд. Кронцентрические координаты спутников были взяты из эфемерид, вычисленных по теории Харпера-Тэйлора. В результате вычислены топоцентрические координаты Сатурна (прямые восхождения и склонения) на эпоху J2000, представленные в таблице 4.

**Таблица 4.** Топоцентрические координаты Сатурна.

Дата (UTC)	RA (2000)			Decl (2000)			(O-C) RA s	(O-C) D "
	h	m	s	o	'	"		
1994 08 09.007930	22	52	04.650	-09	18	24.26	-0.005	-0.12
1995 08 27.986915	23	36	55.330	-05	01	25.64	-0.015	-0.35
1995 10 15.809035	23	23	55.805	-06	25	29.56	+0.016	+0.05
1995 10 15.830485	23	23	55.516	-06	25	31.02	+0.010	+0.23
1995 10 21.855919	23	22	41.950	-06	32	36.20	-0.008	-0.03
1995 10 21.878699	23	22	41.690	-06	32	37.46	-0.010	-0.23
1998 11 10.803692	01	50	54.728	+08	28	23.58	-0.002	+0.06
1998 11 10.826522	01	50	54.322	+08	28	21.86	-0.022	+0.28
1999 11 18.864532	02	44	20.014	+13	10	34.77	+0.010	-0.23
2000 02 10.692300	02	37	31.753	+13	01	02.36	+0.009	+0.04
2001 02 16.756527	03	30	41.797	+16	58	52.99	-0.002	+0.15
2001 08 28.961833	04	52	18.131	+20	45	09.33	-0.006	+0.06
2001 09 01.027415	04	52	56.053	+20	45	48.50	0.000	0.00
2001 09 01.053163	04	52	56.351	+20	45	48.95	0.000	+0.13
2001 09 20.100971	04	55	20.425	+20	47	12.48	+0.008	+0.06
2001 10 23.026501	04	52	57.741	+20	39	46.39	+0.020	-0.10
2002 02 01.769459	04	26	15.323	+19	59	15.03	+0.021	-0.04
2002 12 10.945572	05	43	13.787	+22	03	34.60	+0.018	-0.32
2003 02 01.826670	05	27	32.908	+22	02	10.32	+0.015	+0.04
2003 02 04.925570	05	27	04.880	+22	02	26.10	+0.002	-0.19
2003 02 15.747327	05	26	02.192	+22	03	52.56	+0.014	-0.01
2003 02 20.752281	05	25	52.109	+22	04	48.43	+0.005	+0.04
2003 02 21.742356	05	25	51.545	+22	05	00.53	-0.006	-0.11
2003 03 02.711277	05	26	08.312	+22	07	09.02	+0.010	-0.08
2003 03 04.793896	05	26	17.779	+22	07	43.26	+0.002	-0.01

Сравнение координат Сатурна с теорией DE 405 приведено в двух последних столбцах таблицы. Средние (O-C) по прямому восхождению и склонению (по всем наблюдениям) равны: (O-C)RA = +0.003<sup>s</sup>, (O-C)Decl = -0.04". Средние квадратические ошибки одного наблюдения, вычисленные по (O-C), равны:

$$\sigma(\text{RA})\cos D = \pm 0.15", \quad \sigma(\text{Decl}) = \pm 0.16".$$

Этот метод определения координат планет может быть использован как для фотографических, так и для ПЗС-наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.

Результаты, приведенные в данной работе будут включены в астрометрическую базу данных по фотографическим и ПЗС-наблюдениям тел Солнечной системы, создаваемую в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН [8].



## 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, № 214, с.333-343.
2. **Т.П. Киселева, О.А. Калининченко.** 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. Калининченко.** 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. **А.А. Киселев.** Теоретические основания фотографической астрометрии. // Москва, Наука, 1989, 260 с.
6. **Harper D. and Taylor D.B.** // Astron. and Astrophys., 1993, v.268, N 1, p.326.
7. **Jacobson R.A.,** 2004. "The orbits of the major Saturnian satellites and the gravity field of Saturn from spacecraft and Earthbased observations". Submitted to the Astronomical Journal.
8. **Е.В. Хруцкая, М.Ю. Ховричев.** Каталог Pul-3 SE как часть астрометрической базы данных Пулковской обсерватории. Труды международной астрономической конференции "Основные направления развития астрономии в России", Казань, 2004, с.101-107.

## THE POSITIONAL OBSERVATIONS OF SATURNIAN SATELLITES WITH 26-INCH REFRACTOR IN 2001-2003 AT PULKOVO. THE DETERMINATION OF COORDINATES OF SATURN BY OBSERVATIONS OF ITS SATELLITES

**Kiseleva T.P., Kalinichenko O.A., Mozhaev M.A.**

### Summary

*The results of photographic astrometric observations of the main 1-8 Saturnian Satellites in - 2001-2003 at Pulkovo observatory with 26-inch Refractor are corresponded. The "scale-trail" method was used for observations. 190 relative positions of satellites ("satellite minus satellite") are characterized by high inner and external accuracy: the inner errors of one relative position are equal  $\pm 0.065''$ . The external errors were calculated by comparison of observations with the ephemerides of JPL are equal  $\pm 0.120''$ .*

*The results of determinations of coordinates of Saturn by the observations of Saturnian satellites without measurings of images of the planet are presented. 25 positions of Saturn have been determined by photographic observations with 26-inch Refractor at Pulkovo in 1994-2003. The accuracy of Saturnian coordinates estimated by comparison of the observation with the theories DE405 is about  $\pm 0.15''$  in RA and Decl.*

*The works have been carried out with the support of RFBR (N 04-02-16157 and 04-07-90081).*

## УТОЧНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ОРБИТЫ ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ ADS 9173 Aa НА ОСНОВЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ

Кияева О.В.

Компонент A визуально-двойной звезды ADS 9173 AB имеет спектроскопический спутник с периодом 1791.23 дня, что соответствует 4.90412 г. На основе анализа фотографических наблюдений широкой пары AB получена орбита фотоцентра тесной системы Aa, дополняющая спектроскопическую орбиту. В результате согласования астрофизических и астрометрических данных получены следующие элементы орбиты фотоцентра:  $P=4.904г.$ ,  $a=0.023''$ ,  $e=0.75$ ,  $\omega=43^\circ$ ,  $i=66^\circ$ ,  $\Omega=235^\circ$ ,  $T=1996.05$ . Согласно соотношению масса-светимость масса компонента A равна 2.2 массы Солнца, а тригонометрический параллакс из каталога Гиппаркос равен  $0.021''$ . Тогда масса невидимого спутника не менее 0.79 массы Солнца.

В программу фотографических наблюдений пулковского 26-дюймового рефрактора было включено несколько спектроскопических двойных звезд из каталога орбит SPB8 (Баттен и др., 1991) с целью определения 2-х орбитальных параметров, которые невозможно определить из наблюдений лучевых скоростей – угла наклона орбиты  $i$  и долготы восходящего узла  $\Omega$  (Кияева, 1997). Одной из таких звезд является ADS9173A $\equiv$ SPB 807. Она является компонентом широкой визуально-двойной звезды ADS 9173AB  $\equiv$ WDS 14135+5147 (2000.0). В таблице 1 приводятся данные об этой звезде. Звездные величины и спектральные классы взяты из каталога WDS (Ворли и Дуглас, 1997), параллакс – из каталога Гиппаркос (ЕКА, 1997), оценка масс компонентов согласована с данными из монографии (Куликовский, 1985).

**Таблица 1.** Данные о паре ADS 9173 AB.

Компонент	m	Sp	Параллакс	Масса [Солнце]
A	4.53	A7	$0.0210'' \pm 0.0008''$	2.2
B	6.62	F1	$0.0167 \pm 0.0048$	1.5

Визуально-двойная звезда ADS 9173AB наблюдается в Пулкове с 1982г. и вошла в каталог визуально-двойных звезд (Киселев, Калиниченко и др., 2004). Из фотографических наблюдений получаем относительные координаты компонента B относительно A ( $\rho$  и  $\theta$ ), соответствующие моментам  $t$  на эпоху равноденствия 2000.0. Ряд наблюдений 1982-2004гг. содержит 49 пластинок. Пластинки измерялись нами на сканере, специально приспособленном для измерения астронегативов с высокой точностью (Измайлов, 2000). Результаты представлены в таблице 2.

Для среднего момента наблюдений  $t_0$  вычислены параметры видимого движения (ПВД) первого порядка:

$$t_0 = 1993.0$$

$$\rho = 13.585 \pm 0.004 ['] \text{ – расстояние между компонентами;}$$

$$\theta = 235.551 \pm 0.016 [^\circ] \text{ – позиционный угол звезды B относительно звезды A;}$$

$$\mu = 0.0054 \pm 0.0006 ["/\text{год}] \text{ – скорость относительного движения;}$$

$$\psi = 221.3 \pm 6.1 [^\circ] \text{ – позиционный угол направления движения.}$$

Эти параметры характеризуют наблюдаемое орбитальное движение. Выравнивание выполнено по линейным формулам, невязки  $\Delta\rho$  и  $\Delta\tau$  также представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Координаты компонента В относительно А. Результаты измерений.

T	$\rho$ ["]	$\varepsilon_p$ ["]	$\theta_{2000}$ [°]	$\varepsilon_\theta$ [°]	$n_{\text{exp}}$	$\Delta\rho$ ["]	$\Delta\tau$ ["]
1982.400	13.502	.0086	235.617	.0225	18	-.026	.001
1983.260	13.565	.0067	235.786	.0293	16	.033	.042
1983.287	13.554	.0076	235.569	.0251	16	.022	-.009
1983.290	13.540	.0153	235.408	.0516	17	.008	-.047
1983.295	13.594	.0057	235.685	.0233	19	.062	.018
1984.371	13.573	.0052	235.532	.0220	24	.035	-.016
1984.374	13.556	.0052	235.605	.0259	21	.018	.001
1985.321	13.541	.0059	235.649	.0277	20	-.002	.013
1985.324	13.546	.0071	235.455	.0267	22	.003	-.033
1985.343	13.515	.0047	235.489	.0259	26	-.028	-.025
1985.349	13.505	.0094	235.622	.0270	19	-.038	.006
1986.203	13.510	.0057	235.732	.0389	22	-.037	.033
1986.209	13.544	.0083	235.545	.0321	16	-.004	-.011
1986.214	13.516	.0062	235.637	.0268	19	-.032	.011
1988.068	13.526	.0057	235.653	.0233	21	-.031	.017
1988.248	13.566	.0054	235.690	.0195	16	.008	.026
1988.265	13.576	.0058	235.554	.0249	17	.018	-.006
1988.276	13.570	.0052	235.564	.0238	19	.012	-.004
1990.346	13.573	.0052	235.521	.0280	20	.004	-.011
1990.356	13.563	.0085	235.443	.0305	20	-.006	-.030
1990.359	13.555	.0067	235.611	.0289	20	-.014	.010
1991.115	13.481	.0093	235.487	.0483	13	-.092	-.018
1991.161	13.535	.0056	235.648	.0214	23	-.038	.020
1991.164	13.550	.0076	235.748	.0263	21	-.023	.044
1991.167	13.540	.0053	235.700	.0184	21	-.033	.032
1993.275	13.578	.0119	235.557	.0584	10	-.006	.001
1993.289	13.606	.0135	235.515	.0689	8	.022	-.009
1993.292	13.588	.0093	235.517	.0324	09	.004	-.008
1993.311	13.604	.0054	235.500	.0214	19	.019	-.012
1993.316	13.606	.0064	235.604	.0318	19	.021	.012
1993.319	13.604	.0060	235.295	.0267	20	.019	-.061
1993.322	13.575	.0087	235.353	.0395	20	-.010	-.047
1993.324	13.588	.0072	235.430	.0294	23	.003	-.029
1996.227	13.608	.0048	235.298	.0277	21	.008	-.056
1996.268	13.595	.0076	235.420	.0335	21	-.005	-.027
1996.270	13.604	.0068	235.326	.0335	21	.004	-.050
1996.314	13.608	.0056	235.437	.0248	18	.008	-.023
1998.370	13.596	.0199	235.551	.0456	6	-.015	.007
2003.238	13.621	.0072	235.576	.0295	21	-.015	.019
2003.362	13.615	.0064	235.570	.0287	21	-.022	.018
2004.216	13.632	.0102	235.613	.0479	13	-.009	.029
2004.251	13.615	.0063	235.589	.0437	17	-.027	.023
2004.251	13.634	.0075	235.525	.0215	14	-.008	.008
2004.271	13.706	.0067	235.415	.0287	14	.064	-.018
2004.309	13.647	.0088	235.471	.0274	17	.005	-.005
2004.312	13.707	.0095	235.715	.0336	13	.065	.054
2004.284	13.645	.0088	235.623	.0555	14	.003	.032

Здесь  $\Delta\tau$  – невязка в позиционном угле  $\Delta\theta$ , выраженная в секундах дуги:

$$\Delta\tau = \rho(\Delta\theta) / 57.3$$

При выравнивании по внешней сходимости получены СКО 1 пластинки по координате  $\rho - 0.032''$  (в масштабе рефрактора соответствует 1.6 мкм) по  $\tau - 0.028''$  (1.4 мкм). Ход невязок показан на рис.1 и 2.

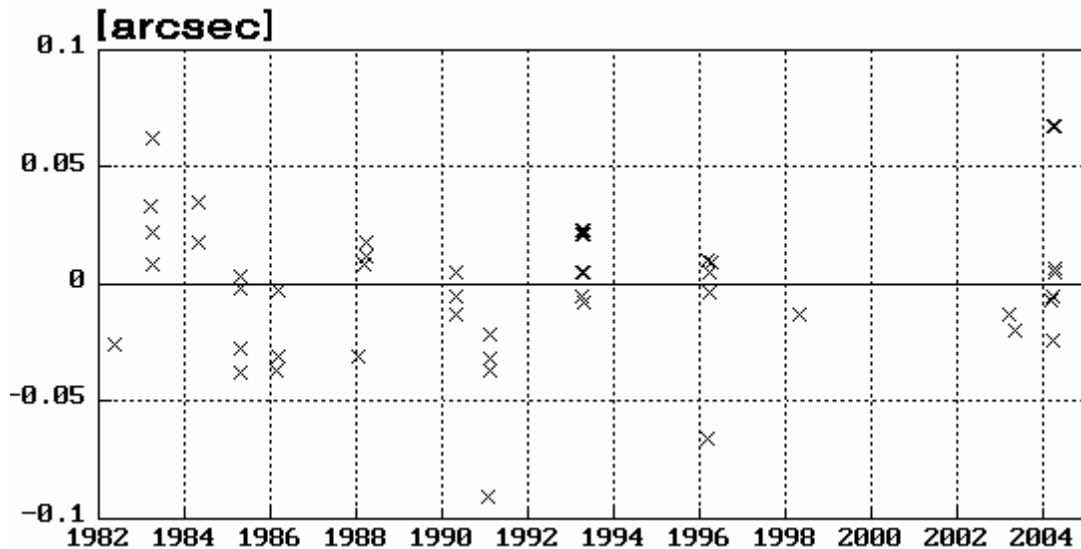


Рис.1. Невязки  $\Delta\rho(t)$  относительно орбитального движения широкой пары ADS 9173 AB.

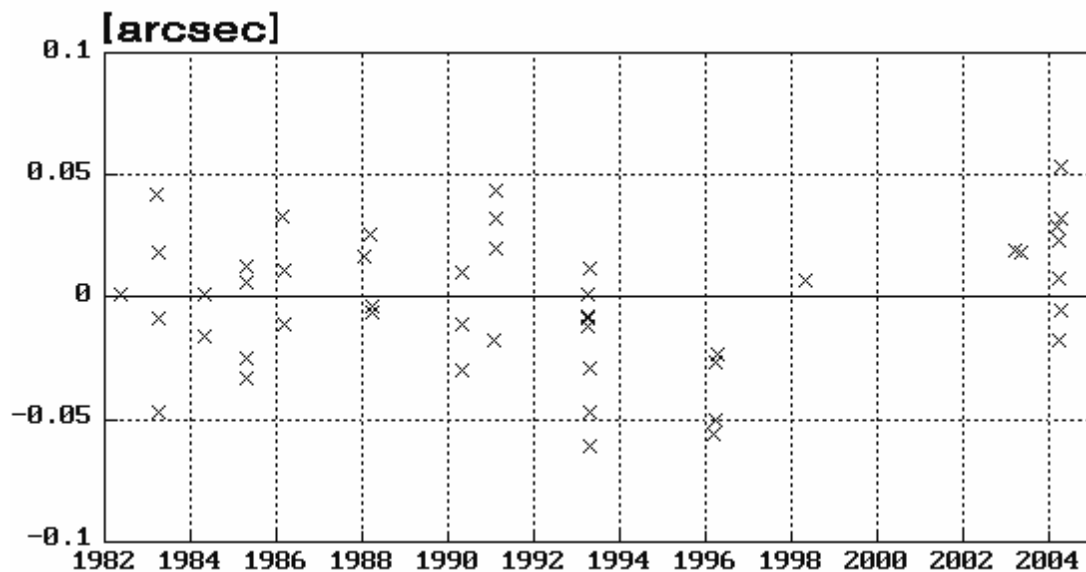


Рис.2. Невязки  $\Delta\tau(t)$  относительно орбитального движения широкой пары ADS 9173 AB.

Относительное движение компонентов широкой пары AB очень медленное, кривизна не определяется, поэтому мы не ставим задачу определения орбиты этой пары. Наша задача – проанализировать невязки относительно орбитального движения, проверить, проявляется ли в них влияние невидимого спутника с периодом  $P = 1791.23$  дня = 4.90412 года, который был обнаружен спектроскопистами, и определить орбиту фотоцентра

Анализ невязок выполнялся по разработанному нами алгоритму (Кияева, Калинин, 1998), который пригоден именно для выявления малых эффектов при больших ошибках.

Вкратце напомним его суть.

1) Для каждого наблюдения вычисляем фазовый момент  $t_p$  ( $0 < t_p < 1$ ), который равен дробной части значения выражения  $(t-t_0)/P$ .

2) Переходим от подвижной системы полярных координат  $(\rho, \theta)$  к фиксированной системе прямоугольных координат  $(x, y)$ .

$$x = (\Delta\rho)\sin(\theta - \alpha) + (\Delta\tau)\cos(\theta - \alpha) \quad (1)$$

$$y = (\Delta\rho)\cos(\theta - \alpha) - (\Delta\tau)\sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

Если  $\alpha = 0$ , то система  $(x, y)$  ориентирована по прямому восхождению и склонению, как это обычно принято в астрономии, если  $\alpha = \psi$ , то ось  $y$  направлена в сторону орбитального движения, а ось  $x$  – в перпендикулярном направлении.

3) Сглаживаем ряды  $x(t_p)$ ,  $y(t_p)$ .

4) Если искомый эффект проявляется в обеих координатах, то мы выбираем систему, соответствующую  $\alpha = \psi$ , тогда ход  $x(t_p)$  свободен от влияния движения пары АВ.

Если эффект проявляется только в одном направлении, то мы ищем такой угол  $\alpha$ , при котором максимальный эффект проявляется в  $x(t_p)$ . Считаем направление  $x$  направлением большой полуоси видимой орбиты и близким к направлению линии узлов. Наклон орбиты к картинной плоскости при этом близок к  $90^\circ$ .

5) Решаем систему уравнений

$$x(t_p) = x_0 + AX(t_p) + FY(t_p) \quad (3)$$

Здесь  $X$ ,  $Y$  – орбитальные элементы, которые вычисляются по известным динамическим элементам орбиты  $P, T$  и  $e$  на момент  $t_p$ .

6) Построение видимой орбиты.

На основе решения (3) вычисляем координаты  $x'(t_p)$  на всем интервале  $0 < t_p < 1$ .

Центр видимого эллипса  $c_x = (x'_{\max} + x'_{\min})/2$ , большая полуось  $a_x = (x'_{\max} - x'_{\min})/2$ .

Если гравитационный эффект проявляется в обеих координатах, то с ней поступаем аналогично. Если эффект в координате  $y$  настолько мал, что тонет в ошибках, то можно оценить размеры малой полуоси видимого эллипса  $b_y$  и  $c_y$  из разброса невязок  $y(t_p)$ . Вычислим  $y'(x', t_p)$ , пользуясь канонической формулой эллипса.

$$y' = c_y \pm b_y \sqrt{1 - (x' - c_x)^2 / a_x^2} \quad (4)$$

Решаем систему уравнений:

$$y' = y_0 + BX + GY \quad (5)$$

7) Вычисление орбиты фотоцентра. Решая системы (3) и (5), получаем  $x_0, y_0$  – координаты барицентра,  $A, B, F, G$  – элементы Тиле-Иннеса, по которым определяются геометрические элементы орбиты фотоцентра  $(a, i, \omega, \Omega)$ .

Период  $P$  мы всегда считаем определенным заранее, момент прохождения через периастр  $T$  и эксцентриситет  $e$  можно уточнить, подбирая таким образом, чтобы зависимость (3) наилучшим образом аппроксимировала наблюдения по координате  $x$ .

Наши исследования ADS 9173 подтвердили присутствие возмущений с периодом 4.90412г. в одном направлении, определяемом позиционным углом  $225^\circ$ , что соответствует  $\alpha = 135^\circ \pm 5^\circ$ . Сглаживание проводилось путем усреднения в скользящем окне  $\Delta t_p = 0.05P$ . Ход невязок  $x(t_p)$  и  $y(t_p)$  представлен в таблице 3 и на рис. 3 и 4 соответственно.

В таблице приводятся также ошибки  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$ , веса  $W_x$  и  $W_y$ , а также число усредненных наблюдений (пластинок)  $n_{pl}$ . Ошибки характеризуют внешнюю сходимость наблюдений, попавших в скользящее окно, а вес каждого положения определяется как сумма весов, зависящих от внутренней ошибки каждого наблюдения и, таким образом, характеризует качество наблюдений (пластинок) и их число. То, что при  $t_p \approx 0.62$  получились большие ошибки  $x(t_p)$  при большом весе объясняется тем, что звезда быстро движется вблизи периастра внутри заданного окна  $\Delta t_p$ . На рис.3 и 4 отдельно отмечено наблюдение 1982г. ( $t_p=0.84$ ), так как оно получено только по одной пластинке и имеет очень малый вес. По координате  $y$  эффект слишком мал по сравнению с ошибками, по разбросу мы определили пределы для малой полуоси видимого эллипса  $0 < b_y < 12 \text{mas}$ .

**Таблица 3.** Ход невязок  $x(t_p)$  и  $y(t_p)$ , сглаженных в окне  $\Delta t_p = 0.05P$ ,  $P=4.09412$  г.

$t_p$	$x$	$y$	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$W_x$	$W_y$	$n_{pl}$
.036	-20.3	8.5	5.2	6.5	13.4	14.8	11
.045	-19.0	-3.3	4.4	7.1	16.9	17.8	14
.067	-11.6	-14.1	5.1	8.2	9.4	9.5	10
.075	-7.1	-11.8	7.5	10.1	9.4	9.3	8
.246	-22.8	-.5	11.6	8.2	4.7	4.1	3
.298	-10.1	13.3	14.9	9.2	6.3	6.8	7
.446	8.7	-12.3	5.8	7.1	10.1	9.3	7
.627	26.9	7.4	10.4	10.5	11.9	11.5	8
.641	13.3	1.9	11.7	15.1	9.5	9.8	6
.654	-.2	-12.9	11.3	16.1	8.5	7.8	5
.839	25.4	-3.6	-	-	.8	1.9	1
1.022	-13.7	13.3	9.7	7.4	11.8	13.0	8

**Таблица 4.** Сравнение вычисленных орбит фотоцентра звезды ADS 9173 Аа.

	Спектроскопическая орбита	Астрометр. орбита 1	Астрометр. орбита 2	Результат
P	1791.23сут. (4.90412г.)	4.90412г.	4.90412г.	<b>4.90412г.</b>
T	5017252JD=1927 .58 (1996.245)	1996.245	1996.05	<b>1996.05±0.15</b>
e	0.53	0.53	0.75	<b>0.75±0.13</b>
$a_1$ [AE]	1.0/sin(i)	0.87	1.14	<b>1.10±0.19</b>
$a_1$ ["]	-	0.018	0.024	<b>0.023±0.004</b>
$\omega$ [°]	96	55	55	<b>43±19</b>
$i$ [°]	-	≥45	≥51	<b>66±9</b>
$\Omega$ [°]	-	220 - 239	220 - 249	<b>235±17</b>
Функция масс [масса Солнца]	0.042	-	-	-
Масса спутника [масса Солнца]	-	≥0.60	≥0.82	<b>≥0.79</b>

В таблице 4 приведены элементы спектроскопической орбиты и два набора орбитальных элементов, вычисленных нами при  $b_y = 0.012''$  (астрометрические орбиты 1 и 2). В первом случае мы приняли значения T и e, полученные спектроскопистами, во втором случае – значения T и e, при которых решение системы (3) наилучшим образом удовлетворяет зависимости  $x(t_p)$ . При решении системы (3) из 12 уравнений методом наименьших квадратов неизвестные  $x_0$ , A и F определяются достаточно уверенно.

Для орбиты 1:  $x_0=6.6\pm 3.8[\text{mas}]$ ,  $A=12.8\pm 3.5[\text{mas}]$ ,  $F=-12.6\pm 6.6[\text{mas}]$ .

Для орбиты 2:  $x_0=15.9\pm 3.7[\text{mas}]$ ,  $A=17.6\pm 2.6[\text{mas}]$ ,  $F=-14.4\pm 7.2[\text{mas}]$ .

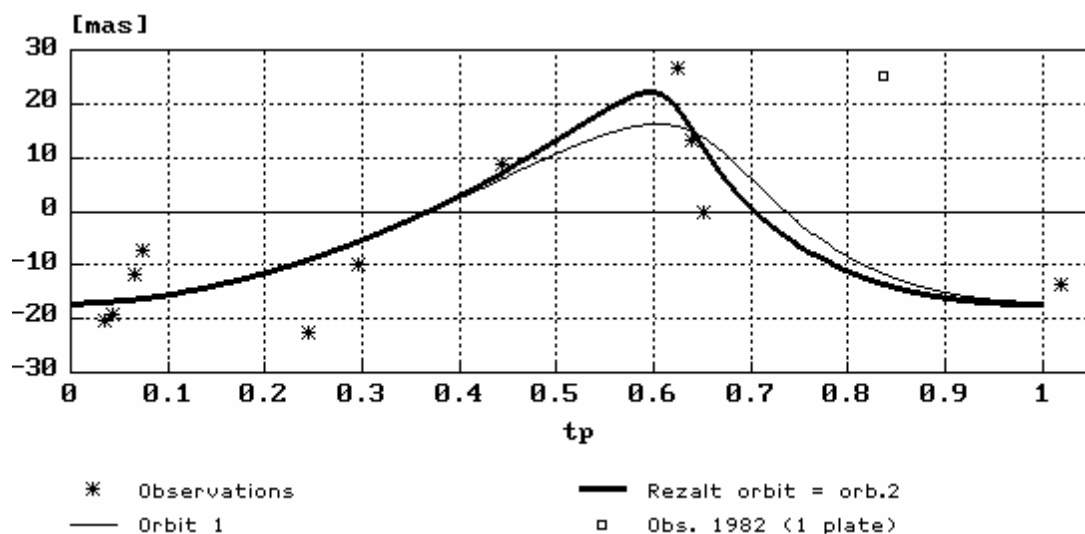
Угол наклона определяем в диапазоне  $0 < i < 90^\circ$ .

Проанализируем полученные результаты.

Спектроскопическая орбита была получена по одной кривой лучевых скоростей и в каталоге SPB8 отмечена как неуверенная. Отсюда следует, во-первых, что это орбита фотоцентра и что невидимый спутник темный или очень слабый, а во-вторых, что некоторые элементы вполне могут содержать ошибку. Чисто методически из наблюдений скорости элементы P и T, связанные с определением момента, определяются несравнимо точнее, чем это можем сделать мы из анализа невязок, но с 1927 по 1996 год прошло 14 периодов и ошибка T в 0.2 года могла накопиться.

Большая полуось астрометрической орбиты для каждого решения получается уверенно, так как ее значение мало зависит от выбранного нами значения малой оси видимой орбиты  $b_y$ . В основном, принятое значение  $b_y$  влияет на определения угла наклона истинной орбиты к картинной плоскости. Принятое значение эксцентриситета, в свою очередь, сильно влияет на то, какая в результате получится большая полуось. Очень важно, что для этой звезды уверенно определен параллакс в каталоге Гиппаркос (см. табл. 1). Предполагая массу звезды A, равной 2.2 массы Солнца, а параллакс 0.021", можно оценить массу невидимого спутника. Эти значения для астрометрических орбит представлены в таблице 4. Они не противоречат значению функции масс.

Зная параллакс, мы также можем сравнить значения больших полуосей орбит фотоцентра, полученные астрометрически и из наблюдений лучевых скоростей. Это позволяет точнее оценить угол наклона. С принятым значением параллакса 0.021" большая полуось орбиты 1 равна 0.87AE, то есть меньше, чем ее проекция, полученная из спектроскопической орбиты. Таким образом, орбита 1 не согласуется со спектроскопической орбитой. Чтобы получить значение  $a=1\text{AE}$  ( $i=90^\circ$ ), надо увеличить значение e до величины 0.65. Для орбиты 2 большая полуось равна 1.14AE, следовательно,  $\sin(i)=0.879$ , а  $i=62^\circ$ . Такой угол наклона соответствует  $b_y=8.3\text{mas}$ . Методом последовательных приближений мы получили при  $b_y=7\text{mas}$  согласованное решение, представленное как результат данной работы в последнем столбце таблицы 4. Сравнение всех орбит с наблюдениями представлено в виде графиков на рис.3, 4 и 5.



**Рис.3.** Ход усредненных невязок  $x(t_p)$  в направлении максимального эффекта. Сравнение орбит с наблюдениями.

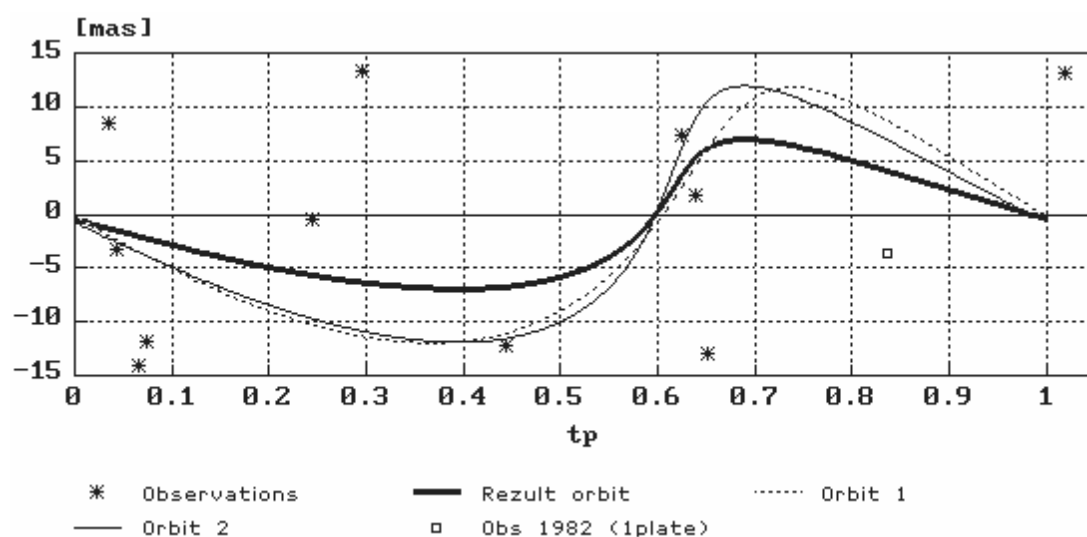


Рис.4. Ход усредненных невязок  $y(t_p)$ . Сравнение орбит с наблюдениями.

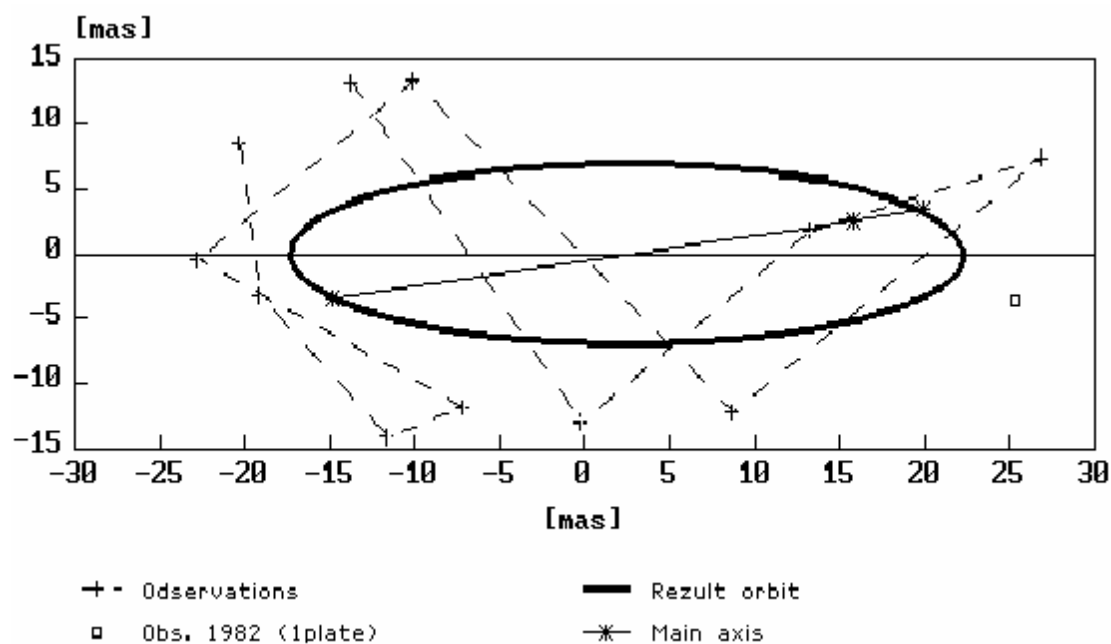


Рис.5. Проекция орбиты фотоцентра на картинную плоскость.

Ошибки элементов орбиты оценены с помощью моделирования из общей сходимости 20-ти вариантов решения, полученных при искажении сглаженных значений  $x'(t_p)$ ,  $y'(t_p)$  случайными ошибками с дисперсией 10mas.

### Выводы

1. В результате данного исследования из астрометрических наблюдений подтвердилось существование у звезды ADS 9173A невидимого спутника с периодом 4.9 года.
2. Получена полная орбита фотоцентра и нижний предел массы невидимого спутника, который равен 0.8 массы Солнца. Так как масса большая, а спутник невидимый, то можно предположить, что это белый карлик.



3. Спектроскопическая орбита дополнена данными об ориентации плоскости орбиты (элементы  $i$  и  $\Omega$ ), в соответствии с астрометрическими данными уточнены элементы орбиты  $T$ ,  $e$  и  $\omega$ .

### Литература

1. *A. Batten, J. Fletcher, D. MacCarthy. Eighth catalogue of the orbital elements of the spectroscopic binary systems.* //Электр. версия, Страсбург, рег. номер V/64(1989).
2. *Kiyaeva O.V.* //Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks, eds. J.A. Docobo et al., 1997, Kluwer Academic Publishers, p.95.
3. *Кияева О.В., Калиниченко О.А.* //Известия ГАО РАН, 1998, № 213, с. 233.
4. *Европейское Космическое Агентство (ЕСА), SP-1200 (1997).*
5. *Киселев А.А., Калиниченко О.А., Кияева О.В., Шахт Н.А., Романенко Л.Г., Измайлов И.С., Быков О.П., Масленников К.Л. Каталог относительных положений визуально-двойных звезд, полученных по наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове, начиная с 1960г.* // Электр. версия, Страсбург, рег. номер V/64(1989).
6. *Кузнецкий П.Г. Звездная астрономия.* М.: Наука, 1985.
7. *Worley C.E., Douglass G.G. The Washington Visual Double Star Catalog, 1996.0.* Astron. Astrophys. Suppl. **125**, 523(1997).
8. *Измайлов И.С.* // Известия ГАО РАН, с.533, № 214, СПб., 2000.

## THE IMPROVEMENT OF THE CLOSE BINARY SYSTEM ADS 9173 Aa SPECTROSCOPIC ORBIT ON THE BASIS OF PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS WITH 26-INCH REFRACTOR AT PULKOVO

Kiyaeva O.V.

### Summary

*The visual double star ADS 9173 AB is the triple system. The close system Aa is a spectroscopic binary with a period  $1791.23d = 4.90412yr$ . The orbit of the photocentre of the system Aa was received on the basis of the wide pair AB photographic observations 1982-2004 and by means of agreement of the astrophysical and astrometrical data. The elements of the photocentre orbit are following:  $P=4.904$  г.,  $a=0.023''$ ,  $e=0.75$ ,  $\omega=43^\circ$ ,  $i=66^\circ$ ,  $\Omega=235^\circ$ ,  $T=1996.05$ . According to mass-luminosity relation the mass of the component A is equal to 2.2 solar mass, the trigonometric parallax from the Hipparcos catalogue is equal to  $0.021''$ . Then the mass of the invisible component isn't less than 0.79 solar mass.*

## **РАЗМЕРЫ И ИНЕРЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ: СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЗАВИСИМОСТИ**

**Куприянов В.В., Шевченко И.И.**

*Проведен статистический анализ доступных данных о размерах и инерционных характеристиках всех известных к настоящему времени спутников планет Солнечной системы. Найдены аналитические аппроксимации для распределения спутников по размерам. Также получены эмпирические соотношения для приближенной оценки инерционных параметров спутника по его размерам. Данные соотношения могут быть полезны при статистических исследованиях возможности проявления различных нестандартных режимов вращения спутников планет.*

### **Введение**

В последние годы открыто много новых спутников планет (см., напр., данные в справочнике В.С. Уральской, <http://Infml.sai.msu.su/neb/rw/croixrw.htm>). Все они имеют малые размеры (не более нескольких десятков километров), большинство также — значительный эксцентриситет орбиты. Их геометрическая форма и инерционные параметры, как и у ряда других, известных ранее спутников, до сих пор не определены; таким образом, невозможно провести моделирование вращательной динамики этих спутников.

Настоящая работа посвящена выявлению возможных статистических связей между инерционными параметрами спутников с другими наблюдаемыми величинами. Такие связи представляют интерес как сами по себе, прежде всего с космогонической точки зрения, так и в прикладном плане, при статистических исследованиях возможности проявления различных нестандартных режимов вращения спутников планет. Под нестандартными режимами понимаются: бифуркационная мода удвоения периода синхронного вращения (Мельников и Шевченко, 1997; Мельников, 2001), альфа-мода и бета-мода синхронного вращения (Мельников и Шевченко, 1998, 2000), хаотические режимы вращения (Уиздом, 1987; Шевченко, 2002; Шевченко и Куприянов, 2002; Куприянов и Шевченко, 2003).

С целью проведения такого статистического анализа нами построена база данных инерционных и орбитальных характеристик всех известных к настоящему времени спутников. Размеры спутников взяты из работы Зейдельмана и др. (2002). В случае отсутствия их в указанном источнике, данные берутся из *Éphémérides Astronomiques 1999* (далее ЕА'99) и справочника В.С. Уральской. Орбитальные параметры — большая полуось  $a$  и эксцентриситет орбиты  $e$  — взяты нами из ЕА'99, а также из справочника В.С. Уральской. Всего база содержит данные о 127 спутниках. Из них для 105 известны размеры, для 34 — параметры асимметрии формы спутника и эксцентриситет орбиты.

В качестве инерционных параметров в данной работе мы берем отношения главных центральных моментов инерции спутника,  $A/C$  и  $B/C$ . В модели спутника как трехосного эллипсоида однородной плотности они связаны с полуосями эллипсоида  $a$ ,  $b$ ,  $c$  следующими соотношениями:

$$\frac{A}{C} = \frac{b^2 + c^2}{a^2 + b^2}, \quad \frac{B}{C} = \frac{a^2 + c^2}{a^2 + b^2}.$$

### **Размеры и инерционные параметры спутников**

На рис.1а приведено построенное нами дифференциальное распределение спутников по размерам. Оно включает все спутники с известными размерами. В указанных

выше источниках имеются данные о размерах четырех спутников планет земной группы и Плутона (Луна, Фобос, Деймос и Харон) и 101 спутника планет-гигантов: Юпитера (39), Сатурна (30), Урана (21) и Нептуна (11). Данных о размерах 20 недавно открытых спутников Юпитера (S/2003 J1–J20) и 2 спутников Урана и Нептуна (S/2001 U1 и S/2003 N1) к настоящему времени нет. Основную долю (89 из 105, то есть 85%) составляют относительно малые спутники с размерами менее 500 км, 57% из них (51 из 89) имеют размеры менее 25 км. Под размерами  $r$  понимается оценка радиуса спутника, либо, если известны параметры эллипсоида, аппроксимирующего спутник, большая полуось эллипсоида.

На рис.1а по горизонтальной оси отложена величина  $r$ . На рис.1б то же распределение показано отдельно для малых ( $r < 500$  км) спутников, соответственно с большим разрешением по  $r$ .

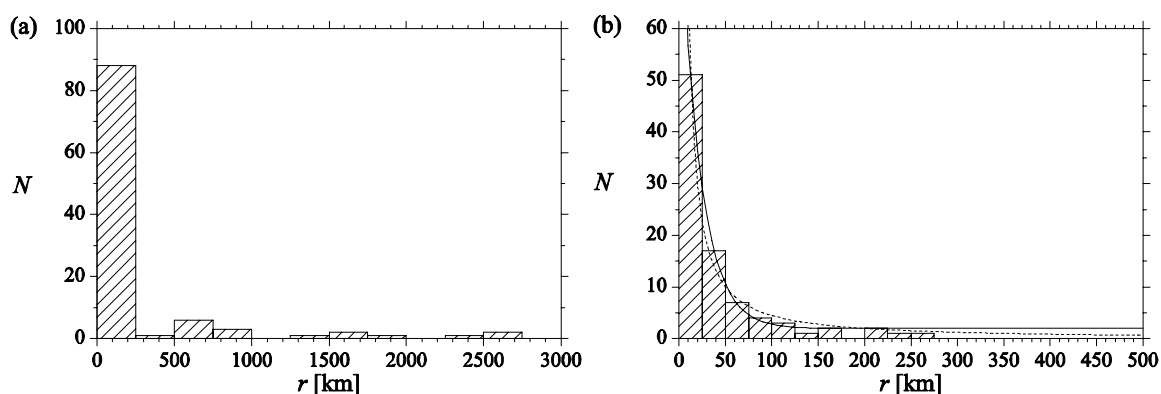
Сплошная кривая на рис.1б представляет собой экспоненциальную аппроксимацию

$$N(r) = N_0 + A \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right),$$

рассчитанную для  $0 < r < 150$  км. Параметры аппроксимации:  $N_0 = 1.94 \pm 0.54$ ,  $A = 87.5 \pm 2.9$ ,  $r_0 = 21.6 \pm 1.1$  (коэффициент корреляции  $R^2 = 0.999$ ). Пунктирная кривая — степенная аппроксимация

$$N(r) = \frac{N_0}{r^k},$$

где  $N_0 = 999 \pm 224$  и  $k = 1.17 \pm 0.083$  ( $R^2 = 0.991$ ). Доверительный уровень всюду принимается равным 95%.



**Рис.1.** Распределение спутников по размерам: (а) все спутники с известными размерами, (б)  $r < 500$  км

На рис.2 мы приводим статистическую зависимость инерционных параметров  $A/C$  и  $B/C$  от размеров  $r$ . Кривые представляют собой степенные аппроксимации.

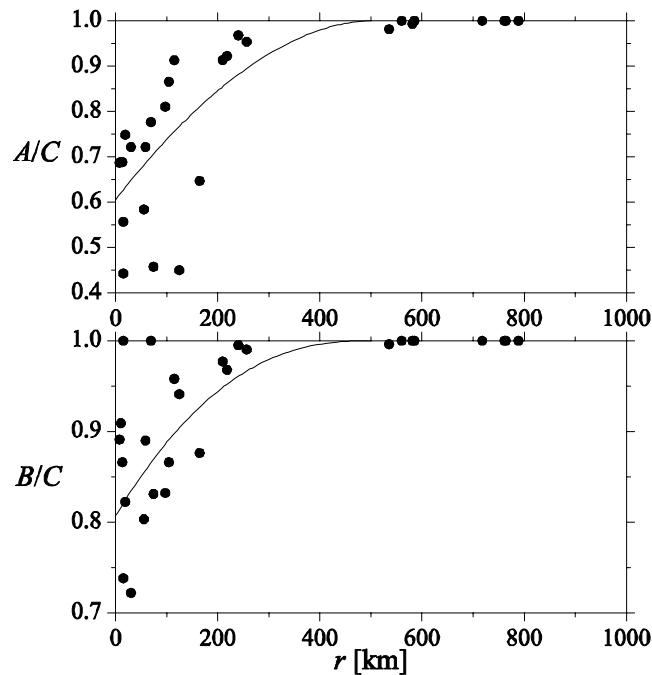
$$A/C = 1 - (0.394 \pm 0.055) \left(1 - \frac{r}{500 \text{ км}}\right)^{\frac{1}{0.543 \pm 0.23}},$$

$$B/C = 1 - (0.193 \pm 0.027) \left(1 - \frac{r}{500 \text{ км}}\right)^{\frac{1}{0.411 \pm 0.15}}.$$

Коэффициент корреляции  $R^2 = 0.364$  для  $A/C$ , и  $R^2 = 0.511$  для  $B/C$ . Следует отметить, что слабая корреляция отражает существо наблюдаемой зависимости; высокой степени корреляции здесь нельзя ожидать. Предложенная аппроксимация описывает

общий характер зависимости и может использоваться для грубых статистических оценок инерционных параметров спутников по их размерам.

Из рис.2 можно видеть, что все крупные ( $r > 500$  км) спутники практически симметричны, тогда как асимметричные спутники преобладают среди малых ( $r < 300$  км), причем степень асимметрии довольно резко растет с уменьшением размеров. Этот результат удовлетворительно согласуется с полученными ранее выводами Томаса и др. (1986); см. также рис.2 в работе Добровольскиса (1995). Отметим, что Томас и др. (1986) и Добровольскис (1995) исследовали не инерционные параметры, а параметры формы спутников. На материале меньшей статистики они определили пороговый радиус спутника не в 300 км, как найдено у нас, а в 200 км.



**Рис.2.** Инерционные параметры спутников: зависимость от размеров.

Спутников с размерами, находящимися в интервале  $r$  от 300 до 500 км, не известно (см. рис.1), поэтому пороговое значение  $r = 300$  км достаточно условно, но оно, по крайней мере, является нижней границей возможного порогового значения.

### Выводы

Построена база данных, содержащая характеристики всех известных на данный момент спутников. Для 105 спутников базы известны размеры  $r$  (оценка радиуса спутника либо величина большой полуоси трехосного эллипсоида, моделирующего спутник). По этим данным построено распределение  $N(r)$ . Распределение показывает значительное преобладание (85%) в Солнечной системе малых спутников ( $r < 300$  км). При этом 57% из них имеют размеры менее 25 км.

Исследована статистическая зависимость инерционных параметров спутников  $A/C$ ,  $B/C$  от их размеров  $r$ . Будучи выражена в количественной форме, она дает возможность грубой оценки ожидаемых значений инерционных параметров в тех случаях, когда известны только размеры спутника.

Что еще более важно, данная зависимость показывает, что среди малых ( $r < 300$  км) спутников преобладают несимметричные, причем степень асимметрии довольно резко растет с уменьшением размера. Асимметрия спутника и эксцентricность его орбиты обуславливают наличие хаотической компоненты в фазовом пространстве вращательного движения; чем они больше, тем больше эта компонента (см. Уиздом,

1987; Шевченко, 2002; Шевченко и Куприянов, 2002). Принимая во внимание, что малые спутники составляют абсолютное большинство в Солнечной системе (см. рис.1), можно высказать предположение, что динамический хаос во вращательной динамике вновь открываемых спутников может быть более распространенным явлением, чем среди давно известных объектов. Кроме того, орбиты вновь открываемых спутников часто имеют значительный эксцентриситет, что еще более увеличивает вероятность обнаружения динамического хаоса в их вращении.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 03-02-17356).

### Литература

- Добровольскис* (Dobrovolskis, A.R.) 1995. *Icarus*, 118, 181.
- Зейдельман и др.* (Seidemann, P.K., Abalakin, V.K., Burša, M., Davies, M.E., de Bergh, C., Lieske, J.H., Oberst, J., Simon, J.L., Standish, E.M., Stooke, P., Thomas, P.C.) 2002. *CMDA*, 82, 83.
- Мельников, А.В.* 2001. *Космич. Исслед.*, 39, 1, 74.
- Мельников, А.В., Шевченко, И.И.* 1997. Тез. докл. Всерос. конф. «Компьютерные методы небесной механики – 97», СПб.: ИТА РАН, с.113.
- Мельников, А.В., Шевченко, И.И.* 1998. *Астрон. Вестник*, 32, 6, 548.
- Мельников, А.В., Шевченко, И.И.* 2000. *Астрон. Вестник*, 34, 5, 478.
- Куприянов и Шевченко* (Kouprianov, V.V., Shevchenko, I.I.) 2003. *Astron. Astrophys.*, 410, 749.
- Томас и др.* (Thomas, P., Veverka, J., Dermott, S.) 1986. *Small satellites*. In *Satellites*, Ed. by J.A. Burns and M.S. Matthews, Univ. of Arizona Press, Tucson, p.802.
- Уиздом* (Wisdom, J.) 1987. *Astron. J.*, 94, 1350.
- Уральская, В.С.* Естественные спутники планет. Информационный справочник (<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/rw/croixrw.htm>)
- Шевченко, И.И.* 2002. *Космич. Исслед.*, 40, 3, 317.
- Шевченко и Куприянов* (Shevchenko, I.I., Kouprianov, V.V.) 2002. *Astron. Astrophys.*, 394, 663.
- Éphémérides Astronomiques* 1999 (Annuaire du Bureau des Longitudes) Masson, Paris.

## SIZES AND INERTIAL PARAMETERS OF PLANETARY SATELLITES: STATISTICAL PROPERTIES AND RELATIONS

**Kouprianov V.V., Shevchenko I.I.**

### *Summary*

*Statistical analysis of available data on the shapes and inertial parameters of all known planetary satellites of the Solar system is conducted. Analytical approximations for the satellites' size distribution are obtained. Also, empirical relations are derived for rough estimation of inertial parameters of a satellite based on its size. The relations may be useful in statistical studies of possible manifestations of various non-standard satellite spin modes.*

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ ГРУППЫ ГИЛЬДЫ**

**Львов В.Н., Смехачева Р.И., Смирнов С.С., Цекмейстер С.Д.**

*Описаны некоторые возможности программной системы ЭПОС в изучении тел Солнечной системы. Помимо уже известных найдены новые особенности движения астероидов группы Гильды.*

### **Введение**

Изучение астероидов группы Гильды имеет длительную историю и большое разнообразие в подходах к проблеме: аналитический и численный, статистический и астрофизический (см., например: Moons, 1997; Dahlgren and Lagerquist, 1995; Gil-Hutton and Brunini, 2000) и другие. Развитые средства программной системы ЭПОС позволили осуществить еще один подход – феноменологический. При этом выявлены некоторые новые особенности движения упомянутых объектов.

### **1. О программной системе ЭПОС**

В рамках ПС ЭПОС (авторы - В.Н. Львов, Р.И. Смехачева, С.Д. Цекмейстер), созданной в ГАО РАН и развиваемой в настоящее время как многофункциональное Windows-приложение, разработаны программные средства, позволяющие решать разнообразные задачи в исследовании объектов Солнечной системы. Например: работа с данными для многочисленных объектов и обсерваторий, вычисление разнообразных эфемерид для наблюдений, анализ точности позиционных наблюдений, моделирование множества объектов в кадре из числа звезд, планет, астероидов и комет, а также их видимого движения, получение списков потенциально опасных объектов и тесных сближений астероидов и комет с большими планетами и пр. В настоящей работе следует отметить возможность иллюстрации движения объектов Солнечной системы по их орбитам в пространстве. Гелиоцентрические прямоугольные координаты, полученные на основе численного интегрирования уравнений возмущенного движения объекта, в соответствии с алгоритмом, реализующим определенную проекцию, преобразуются в экранные координаты. Картина представляется в таком виде, как если бы она наблюдалась с помощью камеры с фиксированным полем зрения. Наблюдатель с камерой может перемещаться по долготе, широте и радиус-вектору. Для каждого момента получается кадр с изображениями всех заданных объектов. Разумеется, можно остановить показ или направить его вспять. Общий вид экрана программы "Орбиты" показан на рис.1. Последовательность кадров, полученных с некоторым шагом по времени, формирует основу компьютерного фильма. Если компьютер справляется с задачей, то этот фильм можно смотреть на экране в режиме работающей в реальном времени программы. Если объектов в кадре много, то сначала нужно записать кадр в файл (такая возможность предусмотрена), а затем из полученных файлов с помощью других программ построить требуемый фильм, чтобы просмотреть его отдельно.

Программа "Орбиты" может работать в двух режимах – режим "орбиты" и режим "роя". Первый из них иллюстрирует движение одного или многих объектов с использованием простейшей модели освещения для больших планет, идентификации объектов, с показом орбит и координатных осей, линий апсид и узлов, а также фрагментов плоскости эклиптики. В этом режиме программа вычисляет *только* точные координаты

объектов. Если орбита Юпитера полностью занимает экран, то одному пикселу будет соответствовать линейный размер от 0.01 до 0.02 а.е., в зависимости от используемого видеорежима. Понятно, что здесь требования к точности работы интегратора не слишком жесткие, по крайней мере, при вычислениях на коротких интервалах времени. Полезным свойством этого режима работы является возможность накопления изображений орбит и линий узлов и апсид, что позволяет отслеживать их эволюцию во времени.

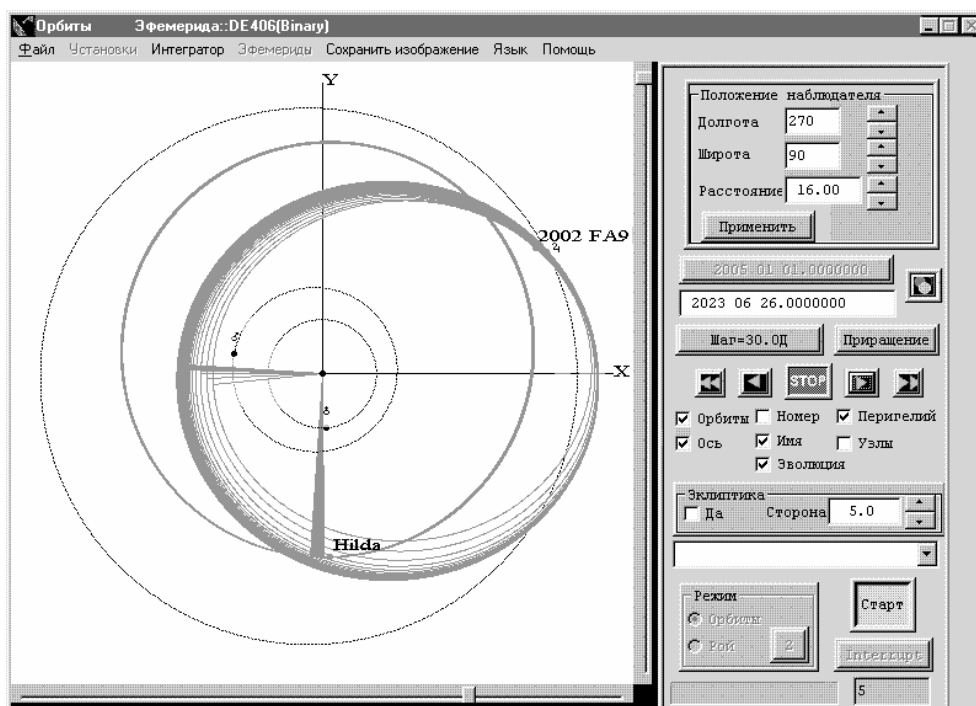


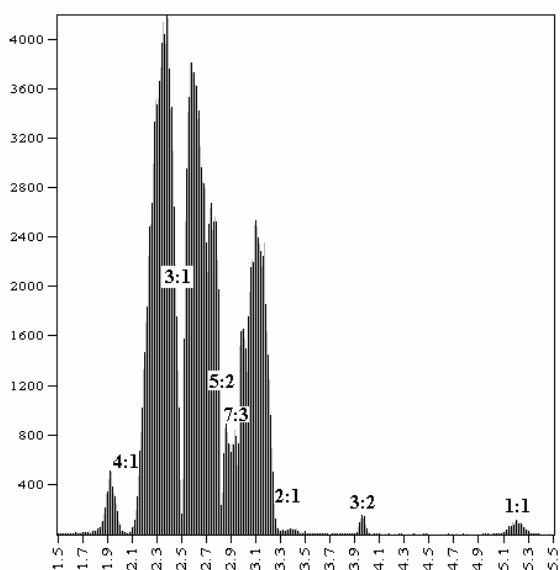
Рис.1. Экран программы “Орбиты”.

Второй режим показывает одновременно большое число объектов из одного или нескольких каталогов, каждый из которых соответствует множеству объектов с набором определенных свойств. Из-за значительных временных затрат на вычисления в этом режиме предусмотрен показ также и невозмущенного движения объектов. Показ линий и плоскостей (кроме координатных осей) здесь не предусмотрен, поскольку это загромождает и без того сложную картину. Сами объекты изображаются в виде точек или кружков предопределенного размера. Здесь можно, как и в первом режиме, выделить несколько объектов из каждой группы с целью лучшей иллюстрации их движения. Наконец, имеется возможность при наведении курсора на объект и нажатии правой клавиши мыши получить информацию об этом объекте. Именно второй режим работы программы “Орбиты” позволил проиллюстрировать движение астероидов разных групп, а в некоторых случаях и подметить *новые* закономерности.

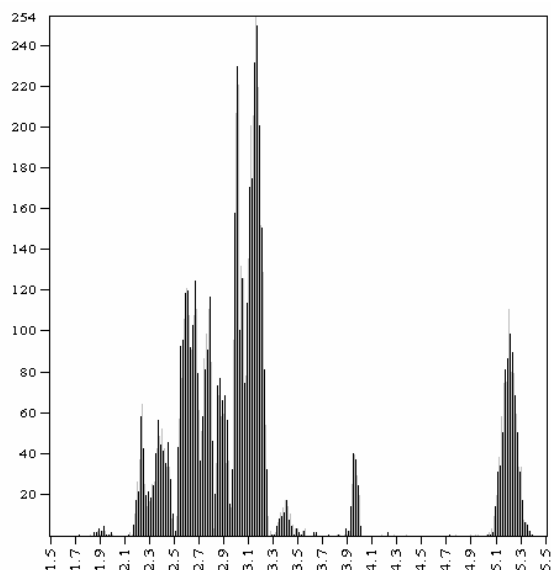
## 2. О резонансах в Солнечной системе

Как известно, значительная часть астероидов находится вблизи резонансов различной частоты по среднему движению с Юпитером (а именно такие резонансы более всего заметны в Солнечной системе). В большинстве случаев эти объекты “выметаются” Юпитером из резонансных областей, что влечет за собой наличие в главном поясе просветов, щелей (т.н. “люков Кирквуда”), где нет никаких астероидов. Другие резонансы, наоборот, способствуют существованию некоторых устойчивых групп, например: 1:1 – троянцы, 3:2 – группа Гильды. На рис.2 приведено распределение числа астероидов в зависимости от величины большой полуоси орбиты и отмечены главные ре-

зонансы. В правой части рисунка отражены две компактные устойчивые группы астероидов, каждая из которых, однако, ведет себя по-своему. Астероиды, находящиеся в резонансе 1:1 по среднему движению с Юпитером, именуются троянцами в честь героев Троянской войны. Эти объекты расположены в тригональных точках либрации  $L_4$  (греки) и  $L_5$  (собственно троянцы), которые вместе с точкой  $L_3$ , расположенной напротив Юпитера, с другой стороны Солнца, образуют равносторонний треугольник. Еще Лагранж доказал устойчивость движения материальной частицы, помещенной в одну из этих точек. Разумеется, такие точки существуют для каждой из больших планет, но для Юпитера их наличие проявляется заметнее всего. Хотя и греки, и троянцы совершают движения разной степени регулярности вокруг соответствующей либрационной точки, в целом можно сказать, что Юпитер при движении по орбите находится в окружении двух роев астероидов, один из которых опережает его на 60 градусов по долготе, другой на такую же величину отстает. Такая картина очень устойчива во времени.



**Рис.2.** Распределение числа астероидов по величине большой полуоси орбиты.



**Рис.3.** То же для крупных астероидов ( $H < 13.0$ ).

### 3. Особенности движения астероидов группы Гильды

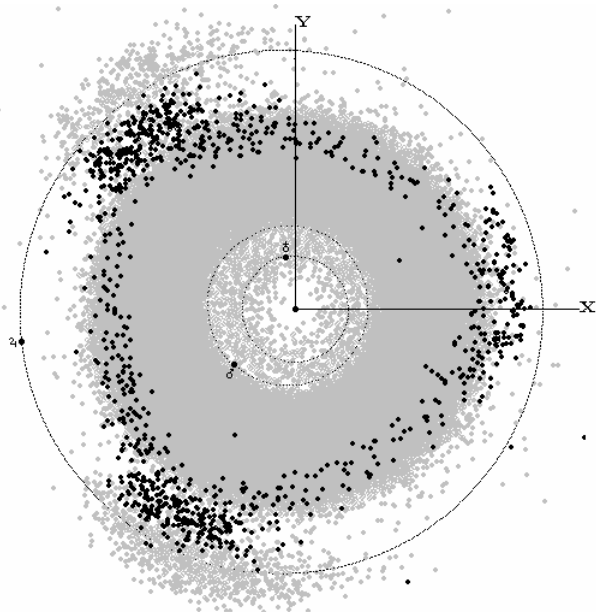
Иной характер устойчивости демонстрируют астероиды группы Гильды (далее просто Гильды). Это астероиды, находящиеся в резонансе 3:2 с Юпитером по среднему движению. Они движутся по орбитам, имеющим большую полуось около 4.0 а.е., а также умеренные величины эксцентриситета (до 0.3) и наклона (до  $20^\circ$ ). В отличие от троянцев, эти объекты могут иметь любую разность долгот с Юпитером, избегая, однако, опасных сближений с ним.

В настоящей работе использованы данные каталога ASTORB Э.Боуэлла (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>), по состоянию на 21 сентября 2004 года содержащего элементы орбит, физические и статистические характеристики для всех известных астероидов общим числом 260102. Распределение астероидов по величине большой полуоси орбиты, как уже отмечалось, показано на рис.2. Если же сделать выборку только для крупных астероидов (например, для таких, у которых абсолютная звездная величина  $H$  не превосходит 13.0, что соответствует среднему диаметру около 10 км), то получим картину, показанную на рис.3, где доля троянцев и Гильд в значительной степени увеличилась.

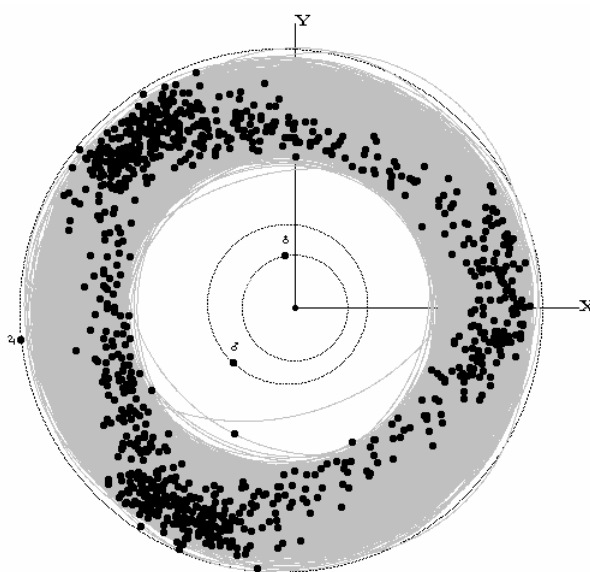


При задании интервала в среднем движении  $440''$ – $465''$  выявлено 1020 объектов, хотя и не все из них можно отнести к группе Гильды (см. далее). Численное интегрирование уравнений движения каждого из объектов производилось методом Эверхардта с учетом возмущений от всех больших планет. На основе полученных прямоугольных координат вычислялись их экранные положения, из которых и формировались рисунки, отображающие конфигурации астероидов на текущий момент. При этом были обнаружены следующие особенности движения:

**3.1.** Гильды, двигаясь по своим эллиптическим орбитам, все вместе образуют в плоскости эклиптики треугольник со слегка выпуклыми сторонами и с “обрезанными” вершинами в тригональных точках либрации Юпитера – “*треугольник Гильд*”. Толщина потока астероидов в пределах сторон треугольника составляет около 1 а.е., а в районах вершин на 20–40% больше. На рис.4 показаны положения Гильд (черный цвет) на фоне всех известных до орбиты Юпитера астероидов (серый цвет) для момента времени 1 января 2005 года.



**Рис.4.** Треугольник Гильд на фоне всех известных астероидов.



**Рис.5.** Положения Гильд на фоне их орбит.

**3.2.** Гильды в вершинах треугольника, соответствующих точкам  $L_4$  и  $L_5$ , частично перемешиваются с троянцами, а в пределах сторон треугольника – с астероидами внешней части главного пояса. В районе каждой из вершин треугольника Гильды проводят в среднем 5.0–5.5 лет, а каждую из сторон они проходят быстрее, в среднем за 2.5–3.0 года.

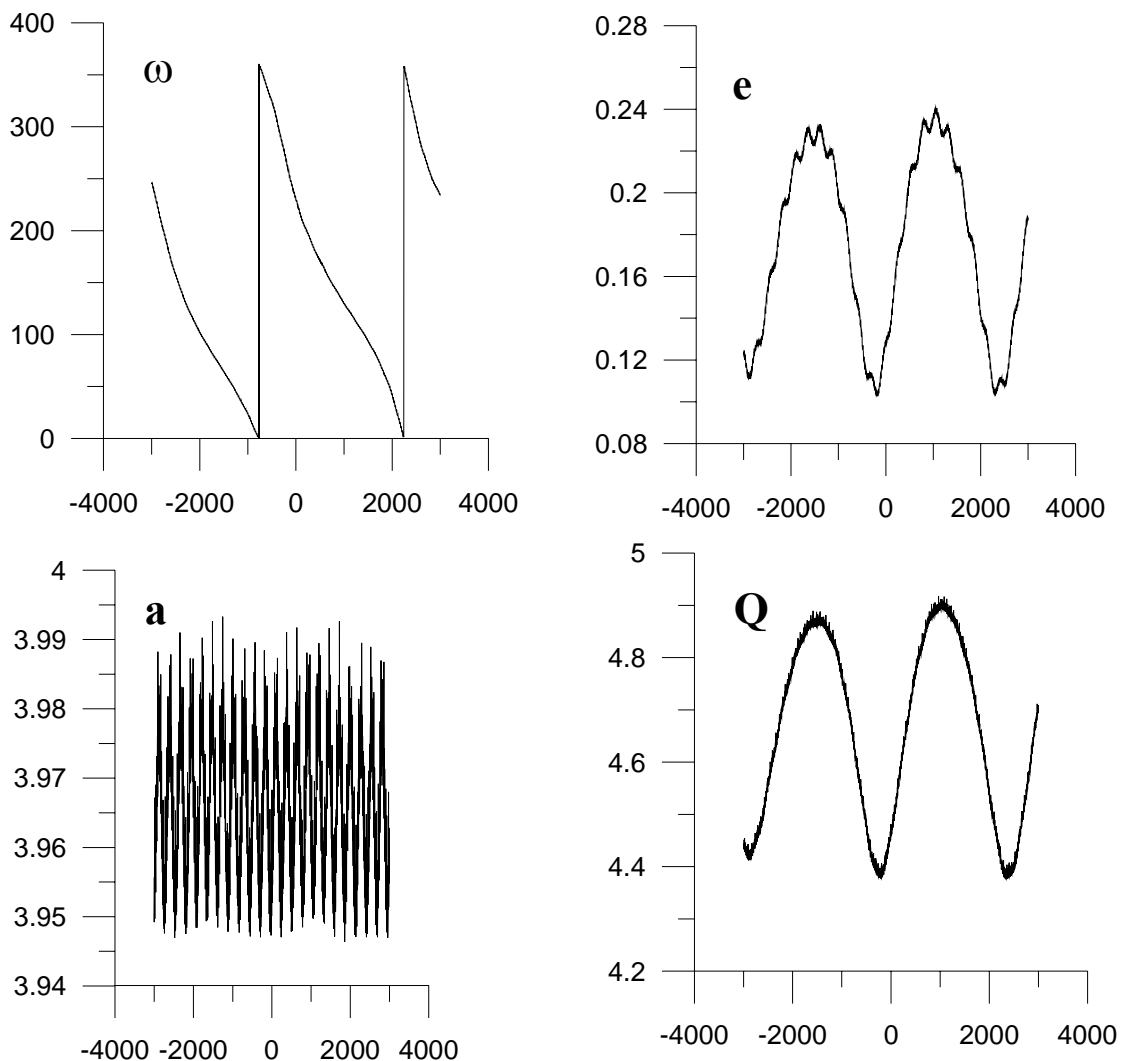
**3.3.** Еще раз подчеркнем: астероиды группы Гильды в любой момент образуют конфигурацию в виде упомянутого треугольника, хотя каждый из них движется по своей эллиптической орбите, а все вместе орбиты образуют вполне ожидаемое кольцо. Это иллюстрирует рисунок 5, на котором для той же даты положения астероидов группы Гильды отмечены черным цветом, а их орбиты – серым. Положение Гильд в орбите может быть произвольным, за исключением самых внешних участков вершин (объекты вблизи афелия) и середин сторон треугольника (объекты вблизи перигелия).

**3.4.** Помимо того, что треугольник Гильд вращается, будучи связанный с Юпитером, в нем еще замечены и квазипериодические волны плотности потока астероидов, в

этом смысле он как бы “дышит”. Но в любой момент в вершинах треугольника плотность объектов более чем вдвое выше по сравнению с его сторонами.

Такую же картину подтверждает численное интегрирование уравнений движения указанных объектов на интервале в 6 тыс. лет ( $\pm 3$  тыс. лет от Рождества Христова). Получается, что *треугольник Гильд динамически устойчив на достаточно длительных интервалах времени.*

**3.5.** Типичные объекты группы Гильды имеют обратное движение перигелия. Это проявляется в том, что имеет место линейный тренд этой величины с наложенными на него колебаниями разной амплитуды и частоты. В среднем, чем меньше эксцентриситет орбиты, тем меньше период обращения перигелия, и, следовательно, тем больше скорость изменения его долготы. При этом скорость движения линии узлов значительно меньше.



**Рис.6.** Графики изменений величин  $\omega$ ,  $e$ ,  $a$ ,  $Q$  для астероида Гильда.

**3.6.** Из изложенного в предыдущем пункте следует, что периодически все типичные объекты этой группы должны проходить в афелии близко к Юпитеру. Это может грозить им катастрофическими последствиями. Однако от опасной близости с Юпитером их спасает специфическая эволюция элементов орбиты: получается так, что соединения по долготе астероида с Юпитером происходят всегда вблизи перигелия астероида, причем линия, в эти моменты их соединяющая, совершает колебания относительно

линии апсид с разной амплитудой и с периодом 2.5–3 столетия. Последнее утверждение давно известно (Schubart, 1982) и подтверждено в настоящей работе. Типичный вид графиков изменения величин аргумента перигелия  $\omega$ , эксцентриситета  $e$ , большой полуоси  $a$  и афелийного расстояния  $Q$  приведен на рис. 6 для астероида Гильды.

3.7. Если проводить формальную выборку, задавшись некоторым интервалом величин среднего движения, то не все выбранные объекты, как уже указывалось, можно отнести к группе Гильды. У части из них орбиты выходят за пределы орбиты Юпитера. Доля таких объектов может составить до 25–30 % от общего числа. Поведение элементов у них резко отличается от типичного. На рис.7 показаны соответствующие графики для четырех астероидов с признаками хаотического движения. Многие из этих

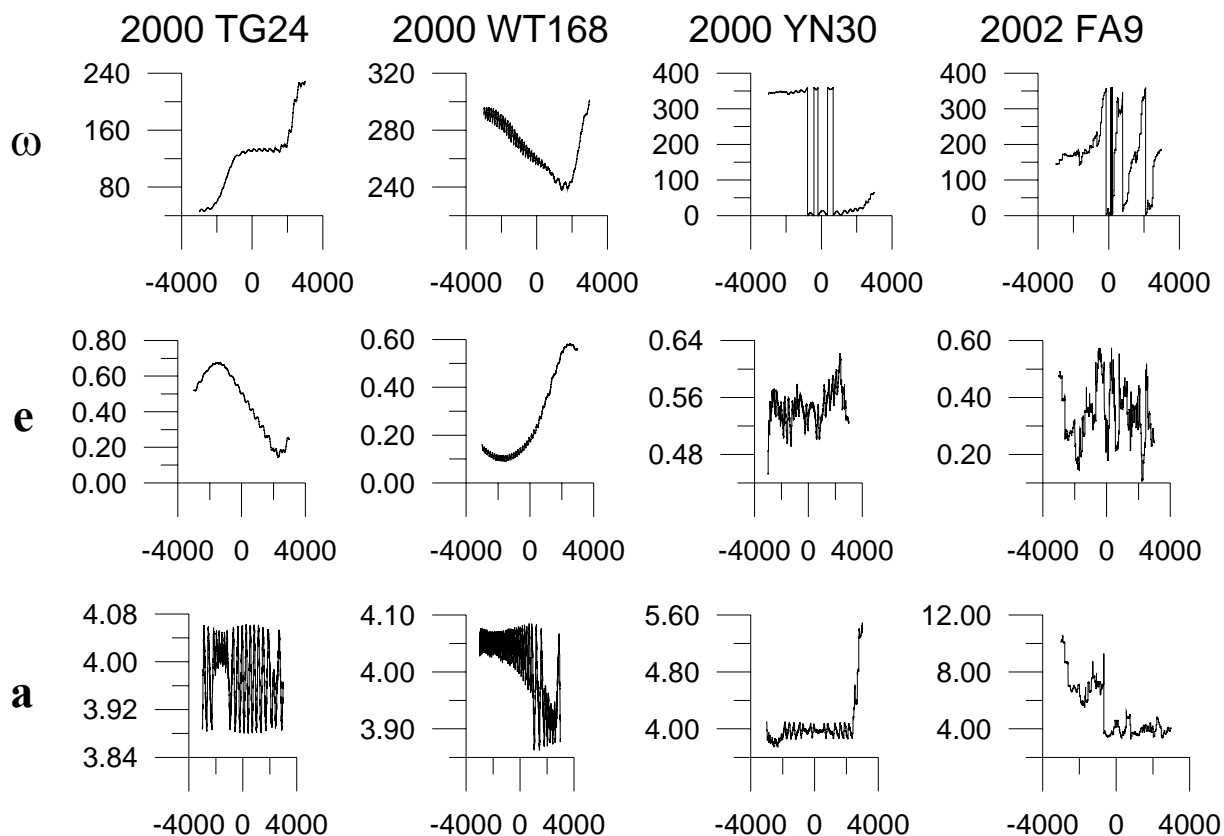


Рис.7. Графики изменений величин  $\omega$ ,  $e$ ,  $a$  для четырех нетипичных астероидов.

объектов прошли через тесные сближения с Юпитером. При этом их орбиты претерпели очень резкие изменения. Все ли они “выметаются” за пределы орбиты Юпитера или же для части из них уготовано иное будущее? Дать ответ на эти вопросы может только исследование движения указанных объектов на гораздо более длительном интервале времени.

#### 4. Заключение

Выявленные особенности движения астероидов группы Гильды порождают пока больше вопросов, чем ответов. Однако, ясно, что такие объекты могут посещать области Солнечной системы, расположенные в кольце шириной не менее 2 а.е. вплоть до орбиты Юпитера, что влечет за собой разнообразие физических условий и соседство с разными группами астероидов. А это может привести к пересмотру некоторых сложившихся представлений о природе таких объектов.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов ИНТАС 01-0669 и РФФИ 04-07-90254.

#### Литература

- Dahlgren M. and C.-I. Lagerquist**, 1995. A study of Hilda asteroids. I. CCD spectroscopy of Hilda asteroids. *Astron.Astrophys.*, 302, 907–914.
- Gil-Hutton R. and A. Brunini**, 2000. Collisional evolution of the outer asteroid belt. *Icarus*, 145, 382–390.
- Moons M.**, 1997. Review of the dynamics in the Kirkwood gaps. *Celest.Mech.Dyn.Astron.*, 65, 175–204.
- Schubart J.**, 1982. Three characteristic parameters of orbits of Hilda-type asteroids. *Astron.Astrophys.*, 114, 200–204.

### SOME PECULIARITIES IN THE HILDAS MOTION

**L'vov V.N., Smekhacheva R.I., Smirnov S.S., Tsekmejster S.D.**

#### Summary

*Some new peculiarities in the motion of the asteroids of the Hilda group are revealed with the help of the EPOS software package. The most interesting is the Hildas Triangle – the stable dynamical structure that specifically interacts with Jupiter, Trojans and with the external part of the Main Belt of asteroids.*

## О СТРУКТУРЕ ТРЕУГОЛЬНИКА ГИЛЬД

Смирнов С.С.

*В работе дается краткое описание структуры треугольника Гильд и обсуждаются вопросы взаимодействия его членов с троянцами и астероидами внешней части главного пояса. Приведены новые данные о подгруппах (семействах) группы Гильды, в частности о семействе Schubart.*

В начале ноября 1875 года Иоганн Пализа открыл три ранее неизвестных малых планеты. Среди них оказался астероид 153 Гильда, имевший рекордно большое среднее расстояние от Солнца, чуть менее 4 а.е. Спустя столетие было известно около двух десятков подобных объектов, движущихся вблизи соизмеримости  $3/2$  со средним движением Юпитера. Применение ПЗС-матриц в последние годы стремительно увеличило количество открытых малых планет, в том числе и группы Гильды. Стало возможным выделить в ней структурные детали.

В работе [1] найдено устойчивое динамическое образование – *треугольник Гильд*. Так названа конфигурация, которую образует множество одномоментных положений астероидов группы Гильды. На рис.1 на 1 января 2005 года приведен вид этого треугольника (черный цвет) на фоне всех известных на текущий момент астероидов (серый цвет) вплоть до орбиты Юпитера. На рис. 2 приведен тот же вид, но в плоскости эклиптики. Рисунки получены с помощью программной системы ЭПОС и основаны на данных каталога ASTORB [2] Э. Боуэлла по состоянию на 21 сентября 2004 года, из которого выбрано в интервале по среднему движению 440–465 секунд/сутки 1020 объектов, хотя, как отмечено там же, не все из них можно отнести к астероидам группы Гильды.

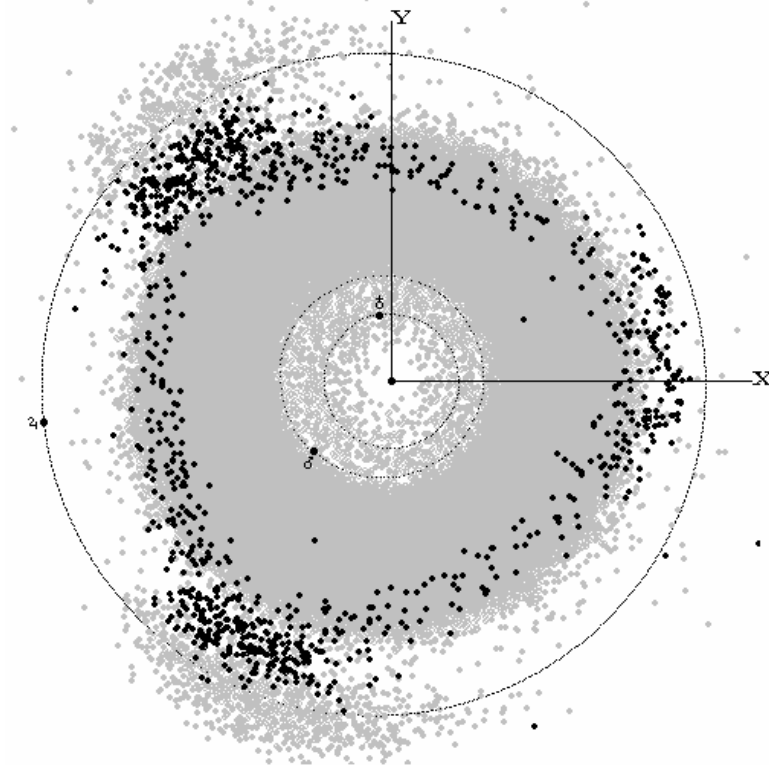
Повторим вкратце общее описание. Указанный треугольник имеет “обрезанные” вершины и слегка выпуклые стороны. Толщина роя Гильд в пределах сторон составляет около 1 а.е., а в районах вершин несколько более. Для всех астероидов треугольника Гильд положение в орбите может быть произвольным, за исключением самых внешних частей вершин (объекты вблизи афелия) и середин сторон (объекты вблизи перигелия). Астероиды группы Гильды в вершинах треугольника, соответствующих точкам  $L_4$  и  $L_5$ , частично перемешиваются с троянцами (почти достигая орбиты Юпитера), а в пределах сторон треугольника – с астероидами внешней части главного пояса.

Несмотря на то, что треугольник близок к равностороннему, все же в нем существует некоторая асимметрия. Из-за эксцентриситета орбиты Юпитера сторона  $L_4$ – $L_5$  слегка отличается от двух других сторон. Когда Юпитер находится в афелии, то средняя скорость объектов, проходящих вдоль упомянутой стороны несколько меньше, чем у объектов, относящихся к двум другим сторонам. Для положения Юпитера в перигелии картина противоположная.

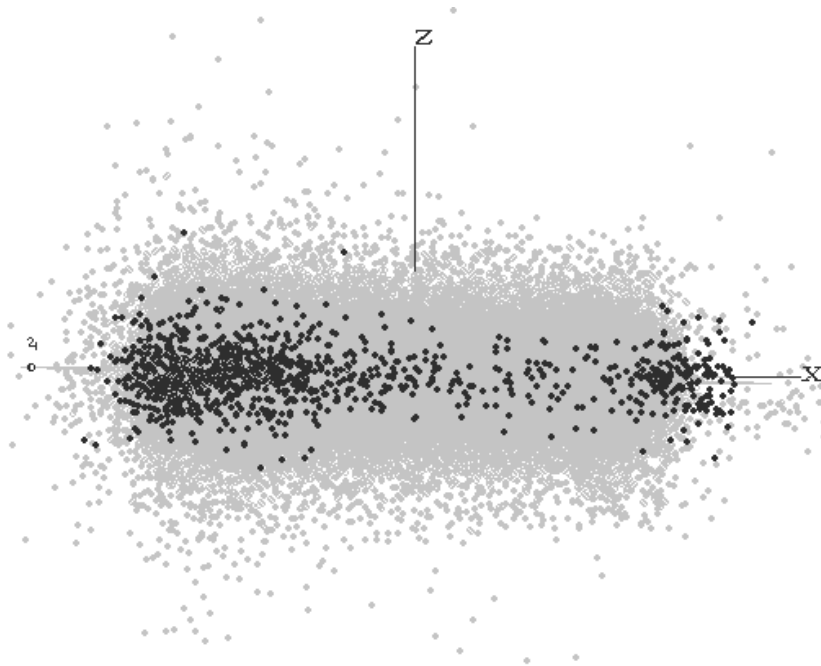
Для оценки плотности потоков для ряда моментов и для одинаковых объемов пространства в окрестности вершин и середин сторон треугольника Гильд были получены списки объектов с их прямоугольными координатами, гелиоцентрическими расстояниями и скоростями. Такой статистический подход дал следующие результаты.

В любой точке треугольника имеют место периодические волны плотности потока объектов. Но в вершинах треугольника плотность всегда в среднем более чем в два раза выше, чем в пределах сторон.

По соседству с каждым из двух роев троянцев Гильды проводят в среднем 5.0-5.5 лет. При этом имеет место заметная разница в скорости. Если вблизи орбиты Юпитера скорость объектов около 11-13 км/сек, то во внутренних областях треугольника – в полтора раза выше. Разброс скоростей троянцев вблизи областей пересечения их с



**Рис.1.** Треугольник Гильд на фоне известных к 1 января 2005 г. астероидов. Вид с северного полюса эклиптики.



**Рис.2.** То же. Вид в плоскости эклиптики.

Гильдами значительно меньше. Зато разброс троянцев по наклону орбиты вдвое больше, чем у Гильд. Из-за этого не менее четверти троянцев не могут пересекаться с Гиль-

дами, а значительная часть других находится за пределами орбиты Юпитера. Поэтому области пересечения троянцев и Гильд не могут быть слишком обширны. Картину иллюстрирует рис.3, на котором вместе с Юпитером на переднем плане изображены Гильды (черный цвет) и троянцы (серый цвет), видимые из точки, находящейся в плоскости эклиптики и имеющей долготу  $188^\circ$  на дату 1 января 2005 года. Заметно, что области, которые занимают греки и троянцы, являются частями некоторой сферической поверхности.

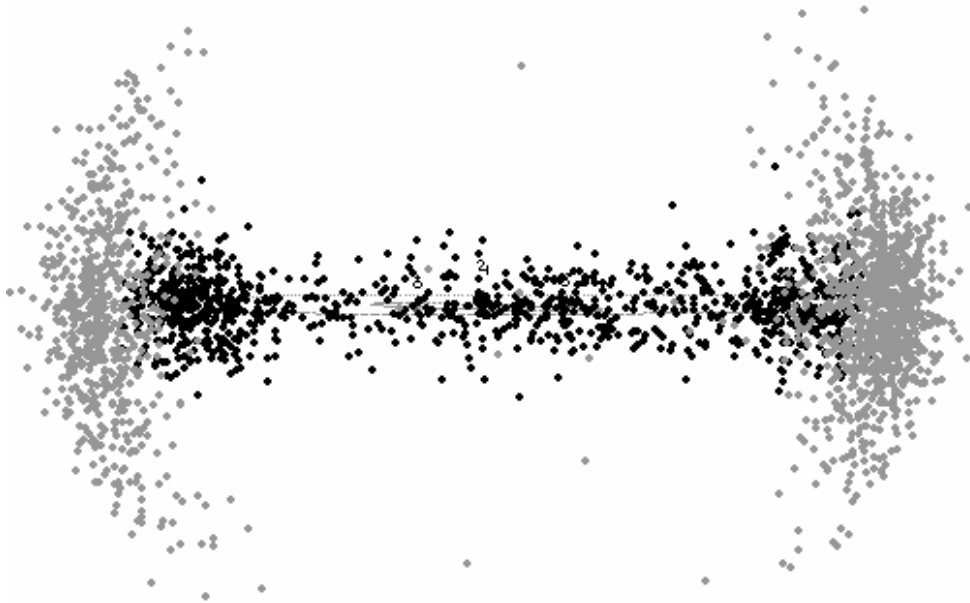


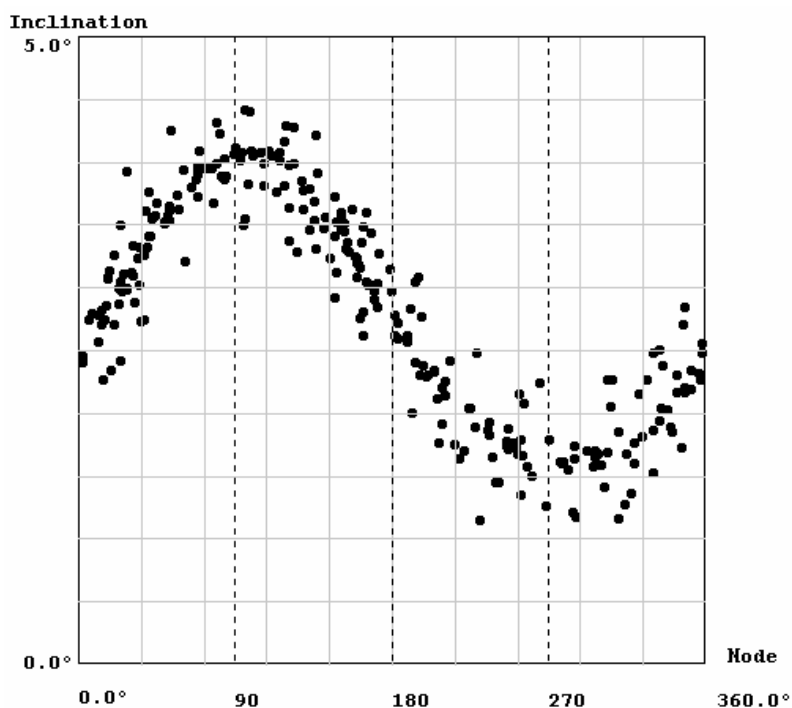
Рис.3. Вид Гильд и троянцев в плоскости эклиптики.

Каждую из сторон Гильды проходят быстрее, в среднем за 2.5-3.0 года. В этот период времени они перемешиваются с астероидами внешней части главного пояса. Здесь разброс скоростей у Гильд значительно меньше и приблизительно такой же, как у их временных соседей.

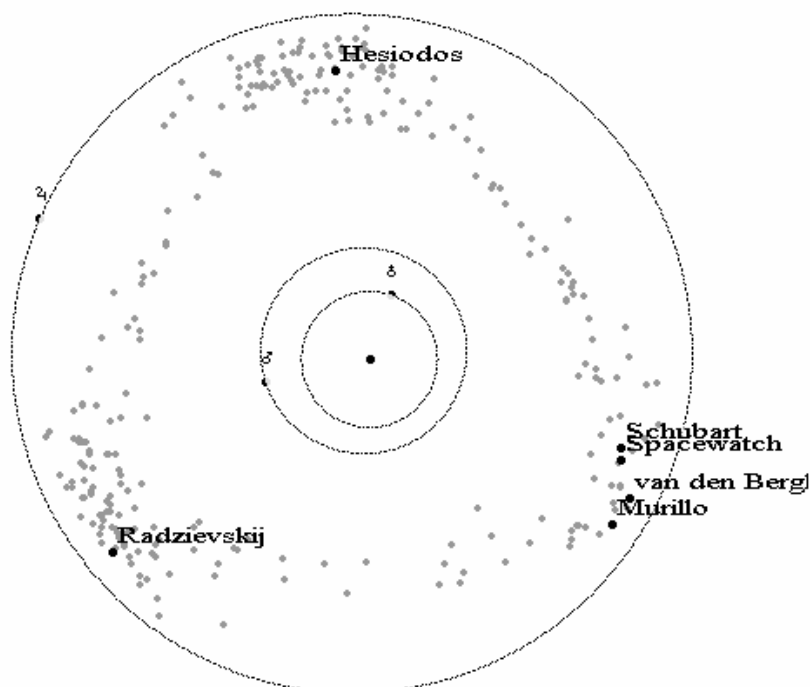
Анализ кумулятивного распределения малых планет по абсолютной звездной величине показывает, что должно существовать примерно 400 еще не открытых Гильд с  $H < 14^m$ . В наблюдательном аспекте выгоднее всего их искать при сближениях Земли с серединами сторон треугольника Гильд. Это бывает через каждые четыре с небольшим месяца. Выигрыш в блеске для объектов одинакового размера может достигать до 2.5 звездных величин. Такими периодами на ближайшее время будут апрель и август 2005 года, январь, май и сентябрь 2006 года. Можно подобрать наиболее благоприятные периоды наблюдений с учетом эллиптичности орбиты Юпитера и соответствующего сдвига сторон треугольника Гильд ближе к Земле. Оптимальными нам представляются наблюдения в первом квадранте гелиоцентрических долгот во втором полугодии 2006, с октября до конца 2007, в июне и с сентября 2008 до марта 2009 года.

Следующим этапом нашего исследования стало построение гистограмм и распределений элементов орбит астероидов группы Гильды с помощью программной системы ЭПОС. Удалось обнаружить динамически устойчивые на протяжении по крайней мере нескольких тысяч лет подгруппы (возможно, семейства) внутри группы Гильды.

Сама Гильда возглавляет семейство астероидов, наклон орбит которых к плоскости орбиты Юпитера составляет  $8^{\circ}.6 \pm 0^{\circ}.5$ . Остальные несколько сотен членов семейства значительно уступают Гильде по абсолютной звёздной величине.



**Рис. 4.** Распределение “Узел-Наклон” для 267 астероидов группы Schubart (эпоха элементов 2004 10 22).



**Рис. 5.** Вид астероидов группы Schubart с полюса эклиптики на 1 января 2005 г.

Ещё более концентрированным семейством является совокупность астероидов, возглавляемая малой планетой 1911 Schubart. По нашим данным в неё входит 267 астероидов со средним наклоном плоскости орбиты  $2^{\circ}.85$  к плоскости орбиты Юпитера.



Отметим, что впервые выявивший это семейство по другим критериям И.Шубарт относит к ним лишь 16 из 347 членов группы Гильды, выбранных из 85000 нумерованных астероидов [3]. На рис.4 показано распределение “Узел - Наклон” для 267 астероидов группы Schubart, а на рис.5 для даты 1 января 2005 г. показан треугольник, состоящий из астероидов упомянутой группы и в основном повторяющий особенности треугольника Гильд.

В заключение выражаю благодарность авторам ПС ЭПОС за помощь в подготовке материалов и полезные обсуждения.

#### Литература

1. **В.Н. Львов, Р.И. Смехачева, С.С. Смирнов, С.Д. Цекмейстер.** Некоторые особенности движения астероидов группы Гильды. Изв. ГАО, 2004, № 217.
2. <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>
3. **J. Schubart.** News on HILDA ASTEROIDS.  
<http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~s24/hilda.htm>

### ON THE STRUCTURE OF THE HILDAS TRIANGLE

Smirnov S.S.

#### Summary

*The internal structure of the Hildas Triangle is described. Some aspects of its interaction with the Trojans and with the outer Main Belt of asteroids are discussed. New data on the Schubart group of asteroids is presented.*

## **О СХОДИМОСТИ РАЗЛОЖЕНИЙ ПЕРТУРБАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ПЛАНЕТНОЙ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ ПО СТЕПЕНЯМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ**

**Соколов В.Г.**

*Предлагается универсальный метод определения условий сходимости разложений пертурбационных функций плоской планетной задачи трех тел в ряды по степеням эксцентриситетов в окрестности их нулевых значений с коэффициентами, представленными в виде функций средней, эксцентрической или истинной аномалии внутренней планеты.*

Проблема определения областей сходимости степенных разложений пертурбационных функций  $R$  и  $R'$  планетной задачи трех тел имеет такое же фундаментальное значение в теории возмущенного движения, как и предел Лапласа для разложений координат эллиптического движения в задаче двух тел. К. Сундман [1] нашел критерий сходимости разложения главной части  $R$  по степеням эксцентриситетов планетных орбит, расположенных в одной плоскости, с коэффициентами, зависящими от средних аномалий планет. Между тем, как известно [2], использование эксцентрической или истинной аномалии одной из планет вместо средней позволяет выразить ее координаты через элементарные функции и ускорить сходимость рядов по степеням эксцентриситета. Кроме того, эксцентрическая аномалия регулирует особенность в координатах при соударении (тесном сближении) в задаче двух тел [3] и пропорциональна переменной, регулирующей уравнения возмущенного движения [4]. Проблема сходимости разложений главной части  $R$  плоской астероидной задачи трех тел в степенные ряды с коэффициентами, представленными в виде функций эксцентрической и истинной аномалии астероида, рассматривалась Н.С. Самойловой-Яхонтовой [5] и Т. Банахевичем [6]. Однако ими были найдены только условия расходимости.

В данной работе предложен универсальный метод определения критериев сходимости разложений  $R$  и  $R'$  в ряды по степеням эксцентриситетов планетных орбит с коэффициентами, зависящими от любой из аномалий внутренней планеты: средней, эксцентрической или истинной.

Для плоского варианта планетной задачи трех тел пертурбационные функции, с точностью до постоянного множителя, определяются выражениями [2]

$$R = \frac{1}{\Delta} - \frac{r}{r'^2} \cos H, \quad R' = \frac{1}{\Delta} - \frac{r'}{r^2} \cos H, \quad (1)$$

в которых

$$\Delta^2 = r^2 - 2rr' \cos H + r'^2, \quad H = f - f' + \omega - \omega',$$

$r, r'$  – радиусы-векторы планет;  $f, f'$  – их истинные аномалии;  $\omega, \omega'$  – долготы перицентров. Первый член в правых частях (1) обычно называют главной частью, а второй — дополнительной частью. Здесь и в дальнейшем обозначения без штриха относятся к элементам орбиты внутренней планеты, а со штрихом — к внешней. Предполагается, что  $r(\max) < r'(\min)$ , то есть выполнено условие сходимости коэффициентов Фурье тригонометрических разложений  $\Delta^{-1}$ , установленное А.Пуанкаре [7]. Для определенности в качестве независимой переменной уравнений возмущенного движения будем принимать одну из аномалий внутренней планеты: среднюю –  $l$ , эксцентрическую –  $u$ , или истинную –  $f$ . Заметим, что при использовании

средней аномалии выбор планеты не имеет значения в виду линейной зависимости  $l$  и  $l'$  от времени.

Для определения условий сходимости разложений функций (1) по степеням эксцентриситетов  $e, e'$  в окрестности начала координат,  $e = e' = 0$ , положим

$$e = g \exp(i\gamma), \quad e' = g' \exp(i\gamma'), \quad i^2 = -1. \quad (2)$$

Обозначим через  $n, n'$  средние движения планет, а через  $l_0, l'_0$  их средние аномалии в начальную эпоху. Тогда, полагая

$$m = |n'/n|, \quad c = l'_0 - ml_0, \quad l_1 = ml + c, \quad u_1 = mu + c, \quad f_1 = mf + c,$$

и исключая время из уравнений Кеплера для каждой из планет, получим соотношения, связывающие  $u'$  с  $l, u, f$  при  $j=1,2,3$  соответственно:

$$u' - e' \sin u' = F_j, \quad j = 1,2,3, \quad (3)$$

где

$$F_1 = l_1 = l', \quad F_2 = u_1 - me \sin u, \\ F_3 = f_1 - 2m \operatorname{arctg} \frac{e \sin f}{1 + e \cos f + \sqrt{1 - e^2}} - me \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin f}{1 + e \cos f}.$$

Особые точки  $u'$  как функции переменной  $e'$  ищутся среди решений системы, в которой в качестве первого уравнения берется одно из уравнений (3), а в качестве второго — уравнение

$$1 - e' \cos u' = 0. \quad (4)$$

Если  $u'$  определяется уравнением Кеплера, то ближайшей к началу координат,  $e' = 0$ , особой точке, как известно [2,3], соответствует значение

$$u' = \frac{\pi}{2} + iy, \quad (5)$$

где  $y = 1.1996... \equiv y^*$  — решение уравнения

$$y = \operatorname{cth} y, \quad (6)$$

а радиус сходимости разложения  $u'$  по степеням  $e'$  равен пределу Лапласа  $\rho^* = 0.6627...$ . Легко показать, что при использовании  $l, u$  или  $f$  в качестве независимой переменной ближайшим особым точкам соответствует выражение вида (5). Исключение  $e'$  из (3) при помощи (4) с учетом (5) дает уравнения

$$u' - \operatorname{tg} u' = F_j, \quad j = 1,2,3. \quad (7)$$

Подставляя (2) и (5) в (7) и разделяя вещественные и мнимые части, получим

$$\frac{\pi}{2} = l_1, \quad y = \operatorname{cth} y, \quad j = 1, \quad (8.1)$$

$$\frac{\pi}{2} = u_1 - mg \sin u \cos \gamma, \quad y = \operatorname{cth} y - mg \sin u \sin \gamma, \quad j = 2, \quad (8.2)$$

$$\frac{\pi}{2} = f_1 - p, \quad y = \operatorname{cth} y - q, \quad j = 3. \quad (8.3)$$

В (8.3) через  $p$  и  $q$  обозначены соответственно вещественная и мнимая части выражения  $F_3 - f_1$ .

Уравнение (4) с учетом (5) для искомого радиуса сходимости дает

$$\rho = \frac{1}{\operatorname{sh} y}. \quad (9)$$

Поскольку уравнение для  $y$  из (8.1) тождественно (6), то  $y = y^*$  и  $\rho = \rho^*$  при  $j=1$ . Из (9) видно, что искомой минимальной величине  $\rho$  должно соответствовать максимальное значение  $y$ . При  $j=2$  последнее имеет место, когда выполнены условия

$$u = \pm \frac{\pi}{2}, \quad \gamma = \mp \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

где знаки  $u$  и  $\gamma$  противоположны, и из (8.2) с учетом (10) находим  $u_1 = \frac{\pi}{2}$ ,

$$y = \text{cth } y + mg. \quad (11)$$

Аналогично, при  $j=3$  величина  $y$  максимальна при условиях

$$f = \pm \frac{\pi}{2}, \quad \gamma = \mp \frac{\pi}{2}, \quad (12)$$

и соотношения (8.3) с учетом (12) дают  $f_1 = \frac{\pi}{2}$ ,

$$y = \text{cth } y + z, \quad (13)$$

где

$$z = m \ln(\sqrt{1+g^2} + g) + mg\sqrt{1+g^2}. \quad (14)$$

Уравнения (11) и (13) можно решать методом простой итерации. После того, как решения  $y_j$  найдены, радиусы сходимости,  $\rho_j$ , разложений  $u'$  по степеням  $e'$  при  $j=2,3$  определяются по формуле (9). Очевидно, что  $\rho^* \geq \rho_2 \geq \rho_3$ , причем равенства возможны только при  $g=0$ . Поскольку особые точки дополнительных частей функций  $R$  и  $R'$  определяются соответственно уравнениями  $r'=0$ ,  $r=0$ , то эти части голоморфны в открытых поликругах

$$\begin{aligned} |e'| < \rho^*, \quad |e| < \rho^*, \quad j=1, \\ |e'| < \rho_j, \quad |e| < 1, \quad j=2,3, \end{aligned}$$

при этом значения  $\rho_j$ , очевидно, существенно зависят от  $m$  и  $g$ . Графики зависимости  $\rho_j$  от  $m$  на промежутке  $0 \leq m < 1$  для  $g = 0.5$  приведены на рис.1, где  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  и  $\rho^*$  изображены соответственно прерывистой, сплошной и пунктирной линией.

Для определения условий сходимости разложения главной части функций (1), найдем корень уравнения

$$\Delta^2 = 0, \quad (15)$$

имеющий наименьший модуль  $g$ , при условии, что модуль  $g'$  задан и является величиной порядка  $g$ . Уравнение (15) равносильно уравнениям

$$r \exp(iH) = r', \quad r \exp(-iH) = r', \quad (16)$$

корни которых, в соответствии с принципом симметрии Римана-Шварца [8], сопряженные. Поэтому достаточно рассмотреть первое из (16).

Выведем искомые условия сходимости для случая использования  $f$  в качестве независимой переменной (при использовании  $l$  и  $u$  эти условия выводятся аналогично). Определим  $h$  формулой  $h = H - H_0$ , где

$$H_0 = f - f_1 + \omega - \omega', \quad (17)$$

и заменим первое из уравнений (16) на эквивалентное

$$r \exp(ih) = r' \exp(-iH_0), \quad (18)$$

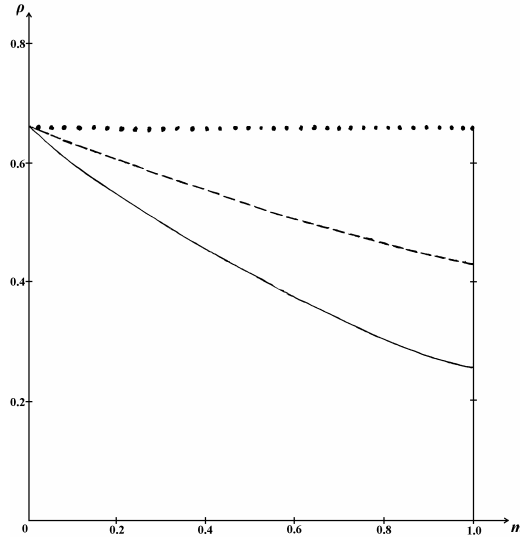


Рис.1.

которое исследуем сначала с точностью до величин первого порядка относительно  $e, e'$  в малой окрестности начала координат,  $e = e' = 0$ , такой, что при решении уравнения Кеплера в ней справедливы приближенные равенства  $\text{sh } y \approx y$  и  $\text{ch } y \approx 1$ . Обозначив через  $a, a'$  большие полуоси планетных орбит, с требуемой точностью имеем

$$r = a(1 - e \cos f), \quad r' = a'(1 - e' \cos f_1), \quad h = 2me \sin f - 2e' \sin f_1. \quad (19)$$

Подставляя (19) с учетом (2) в (18) и разделяя вещественные и мнимые части, получим систему уравнений вида

$$-\alpha g P = \cos H_0 - \alpha - g' P', \quad \alpha g Q = -\sin H_0 - g' Q', \quad (20)$$

где  $\alpha = a/a'$ , а  $P, P', Q, Q'$  – известные выражения.

Возведем в квадрат левые и правые части уравнений (20) и сложим. Тогда (с точностью до величин первого порядка относительно  $g'$  в правой части) получим соотношение

$$\alpha^2 g^2 (\cos^2 f + 4m^2 \sin^2 f) = 1 - 2\alpha \cos H_0 + \alpha^2 - 2g' [P'(\cos H_0 - \alpha) - Q' \sin H_0], \quad (21)$$

которое используем для определения значений  $H_0, f, \gamma, f_1, \gamma'$ , обеспечивающих минимальность  $g$ . Очевидно, что модуль  $g$  будет наименьшим, когда правая часть (21) минимальна, а коэффициент при  $g^2$  в левой части максимален. Последнее имеет место при значениях

$$f = 0 \vee \pi, \quad \text{если } m \leq 1/2, \quad \alpha \leq \alpha^* = 0.6300, \quad (22)$$

$$f = \pm \pi/2, \quad \text{если } m \geq 1/2, \quad \alpha \geq \alpha^*.$$

Поскольку в правой части (21) совокупность членов, не зависящих от  $g'$ , минимальна, когда

$$H_0 = 0, \quad (23)$$

то соотношение (21) с учетом (22) и (23) допускает два варианта:

$$\alpha^2 g^2 = S, \quad \text{если } \alpha \leq \alpha^*; \quad 4\alpha^2 m^2 g^2 = S, \quad \text{если } \alpha \geq \alpha^*,$$

где  $S = (1 - \alpha)^2 - 2g'(1 - \alpha)(\cos f_1 \cos \gamma' + 2\alpha \sin f_1 \sin \gamma')$ . Величина  $S$  минимальна, когда

$$f_1 = 0 \vee \pi, \quad \gamma' = 0 \vee \pi, \quad \text{если } \alpha \leq 1/2, \quad (24)$$

$$f_1 = \pm\pi/2, \quad \gamma' = \pm\pi/2, \quad \text{если } \alpha \geq 1/2.$$

Легко установить, что подстановка значений (22)–(24) в систему (20) дает:

$$\gamma = \pi \vee 0, \quad \text{если } \alpha \leq \alpha^*; \quad \gamma = \mp\pi/2, \quad \text{если } \alpha \geq \alpha^*.$$

В результате имеем три варианта значений  $f, \gamma, f_1, \gamma'$ , обеспечивающих минимальность  $g$ :

$$\begin{aligned} 1) & f = 0 \vee \pi, \quad \gamma = \pi \vee 0, \quad f_1 = 0 \vee \pi, \quad \gamma' = 0 \vee \pi, \quad \alpha \leq 1/2; \\ 2) & f = 0 \vee \pi, \quad \gamma = \pi \vee 0, \quad f_1 = \pm\pi/2, \quad \gamma' = \pm\pi/2, \quad 1/2 \leq \alpha \leq \alpha^*; \\ 3) & f = \pm\pi/2, \quad \gamma = \mp\pi/2, \quad f_1 = \pm\pi/2, \quad \gamma' = \pm\pi/2, \quad \alpha \geq \alpha^*. \end{aligned} \quad (25)$$

Сужения регулярной ветви функции  $u'$ , определяемые уравнением (3) при  $j=3$  и значениями (25), можно аналитически продолжить из окрестности начала координат до ближайших особых точек. Обозначим через

$$u'_k = x_k + iy_k, \quad k = 1, 2, 3, \quad (26)$$

сужения регулярной ветви, удовлетворяющие на основании (3) и (25) при  $e^{\pm} = 0$  условиям

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \vee \pi, \quad x_2 = \pm\pi/2, \quad x_3 = \pm\pi/2, \\ y_1 &= 0, \quad y_2 = 0, \quad y_3 = z, \end{aligned}$$

где  $z$  определяется выражением (14). Тогда из (3) при  $j=3$  с учетом (2) и (25) для искомого сужения (26) получим

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \vee \pi, \quad x_2 = \pm\pi/2, \quad x_3 = \pm\pi/2, \\ y_1 &= g' \operatorname{sh} y_1, \quad y_2 = g' \operatorname{ch} y_2, \quad y_3 = g' \operatorname{ch} y_3 + z. \end{aligned} \quad (27)$$

Используя уравнение (4), легко установить, что сужения регулярны, если  $g' < 1$  при  $k=1$ ,  $g' < \rho^*$  при  $k=2$ ,  $g' < \rho_3$  при  $k=3$ . Решения уравнений (27) легко находятся методом простой итерации, причем, например, первое из этих уравнений имеет единственное очевидное решение  $y_1 = 0$ .

Введем прямоугольную систему координат  $XOY$  с началом в центральном теле и осью  $OX$ , направленной в перигецентр внутренней планеты ( $\omega = 0$ ). Тогда для координат внутренней планеты находим

$$\frac{X}{a} = \begin{cases} -(1+g), & Y/a = \begin{cases} 0, & k=1, 2, \\ \pm(1+g^2), & k=3, \end{cases} \end{cases}$$

а внешняя планета в силу (17), (23) и (25) имеет следующую ориентацию:  $\omega' = \pi$  при  $k=1$ ,  $\omega' = \pm\pi/2$  при  $k=2$ ,  $\omega' = 0 \vee \pi$  при  $k=3$ . Полагая для определенности в вариантах 2 и 3  $\omega' = \pi/2$  и  $\omega' = 0$ , для координат внешней планеты получим

$$\frac{X'}{a'} = \begin{cases} -(1-g'), & Y'/a' = \begin{cases} 0, & k=1, \\ \mp i(\operatorname{sh} y_2 + g'), & k=2, \\ \pm \sqrt{1+g'^2} \operatorname{ch} y_3, & k=3, \end{cases} \\ \mp \sqrt{1+g'^2} \operatorname{ch} y_2, & \\ \mp i(\operatorname{sh} y_3 + g'), & \end{cases}$$

где  $y_2$  и  $y_3$  – решения второго и третьего из уравнений (27). Отметим, что если взять  $\omega' = -\pi/2$  и  $\omega' = \pi$ , то знаки в соответствующих выражениях изменятся на противоположные.

Подставляя найденные выше координаты в выражение  $\Delta^2 = (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2$  и вводя для каждого из трех вариантов безразмерную величину  $D_k$  формулой  $D_k a'^2 = \Delta^2$ ,  $k = 1, 2, 3$ , имеем

$$\begin{aligned} D_1 &= [(1 - g') - \alpha(1 + g)]^2, \\ D_2 &= [\sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_2 - \alpha(1 + g)]^2 - (\operatorname{sh} y_2 + g')^2, \\ D_3 &= [\sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_3 - \alpha(1 + g^2)]^2 - (\operatorname{sh} y_3 + g')^2, \end{aligned}$$

откуда в силу (15) получим три варианта границы области сходимости разложения  $\Delta^{-1}$ :

$$\begin{aligned} \alpha(1 + g) &= 1 - g', \\ \alpha(1 + g) &= \sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_2 - \operatorname{sh} y_2 - g', \\ \alpha(1 + g^2) &= \sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_3 - \operatorname{sh} y_3 - g'. \end{aligned} \quad (f)$$

Расчеты показывают, что искомая граница определяется последним из уравнений, (f), в котором  $y_3 = g' \operatorname{ch} y_3 + z$ , где  $z$  дается выражением (14).

Аналогично получены уравнения (l) и (u) для границ областей сходимости разложения  $\Delta^{-1}$  в случае использования  $l$  и  $u$  в качестве независимых переменных:

$$\alpha(\sqrt{1 + g^2} \operatorname{ch} y - \operatorname{sh} y + g) = \sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_1 - \operatorname{sh} y_1 - g', \quad (l)$$

где  $y = -g \operatorname{ch} y$ ,  $y_1 = g' \operatorname{ch} y_1$ ;

$$\alpha(\sqrt{1 + g^2} + g) = \sqrt{1 + g'^2} \operatorname{ch} y_2 - \operatorname{sh} y_2 - g', \quad (u)$$

где  $y_2 = g' \operatorname{ch} y_2 + mg$ . Отметим, что выражение (l) с точностью до обозначений совпадает с результатом К.Сундмана [1].

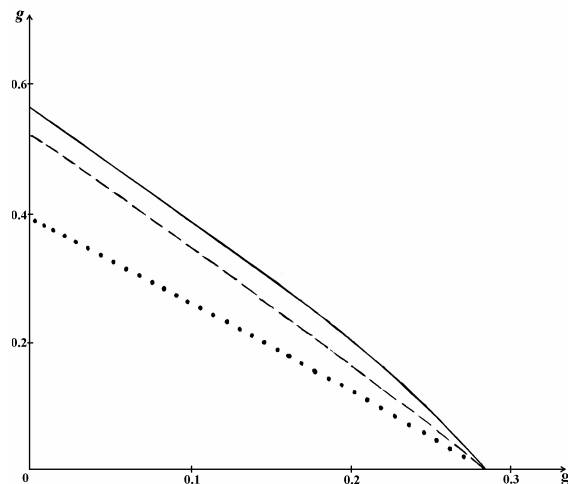


Рис.2

Условия сходимости разложений  $\Delta^{-1}$  получаются из уравнений (l), (u) и (f) заменой в них знака = знаком <. Границы областей Рейнхарта [8], определяемые уравнениями (l), (u) и (f) для  $\alpha = 0.5$ , изображены на рис.2 соответственно пунктирной, прерывистой и сплошной линией. Из рисунка видно, что использование эксцентрической и истинной аномалии внутренней планеты вместо средней последовательно приводит к увеличению области сходимости разложения  $\Delta^{-1}$ .

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность Ю.В.Батракову за постоянное внимание, оказанное при выполнении данной работы, и полезные замечания.

### Литература

1. *Sundman K.*// *Öfversigt Finska Vetenskaps-Soc. Förhandlingar*, 1916, v.58A, № 24.
2. *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968.
3. *Уинтнер А.* Аналитические основы небесной механики. М.: Наука, 1967.
4. *Штифель Е., Шейфеле Г.* Линейная и регулярная небесная механика. М.: Наука, 1975.
5. *Самойлова-Яхонтова Н.С.*// *Бюлл. Астрон. ин-та*, 1939, № 46, с.184–188.
6. *Banachiewicz T.*// *Circulaire de l'Observatoire de Cracovie*, 1926, № 22, p.1–12.
7. *Poincaré H.*// *Bull. Astron.*, 1898, v.15, p.449–464.
8. *Шабат Б.В.* Введение в комплексный анализ. М.: Наука, 1969.

## ON CONVERGENCE OF EXPANSIONS FOR THE DISTURBING FUNCTIONS OF THE PLANETARY THREE-BODY PROBLEM IN POWERS OF THE ECCENTRICITIES

Sokolov V.G.

### *Summary*

*A general method for determining the convergence conditions of expansions for the disturbing functions of the planetary three-body problem in powers of the eccentricities in the vicinity of their zero values is offered. The coefficients of the expansions are expressed in terms of the mean, eccentric or true anomaly of an inner planet.*



## **НОВЫЕ ВЫСОКОТОЧНЫЕ СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД В ПУЛКОВСКИХ ПЛОЩАДКАХ С ГАЛАКТИКАМИ**

**Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю.**

*По материалу пулковских фотографических наблюдений слабых звезд в площадках с галактиками (каталог Pul-3, CDS I/290) и данным современного высокоточного астрометрического каталога UCAC2 (CDS I/289) получены новые собственные движения 34081 звезды в зоне склонений  $-5^\circ - +42^\circ$ , преимущественно 12–16.5 звездной величины в системе ICRF/Tycho-2. Внутренняя точность новых собственных движений составляет 2–4 mas/год, точность по внешней сходимости с каталогом UCAC2 – 3–5 mas/год. Выявлены систематические ошибки собственных движений звезд в каталоге UCAC2, зависящие от звездной величины.*

### **Наблюдательный материал. Вывод собственных движений.**

Одной из причин, затрудняющих в настоящее время получение высокоточных собственных движений звезд слабее 12<sup>m</sup>.5, является отсутствие достаточного числа высокоточных астрометрических каталогов слабых звезд, которые можно было бы привлечь в качестве первой эпохи.

Полученный в Пулковской обсерватории каталог экваториальных координат 58483 звезд, преимущественно 12–16.5 звездной величины (Pul-3) [1] – один из немногих астрометрических каталогов, относящихся к довольно ранней эпохе (1963.25 г.) и построенный в современной опорной системе ICRF/Tycho-2. Этот факт, а также достаточно высокая точность полученных экваториальных координат (в среднем ~80 mas) позволяют рассматривать данные этого каталога как надежный источник для первой эпохи при выводе собственных движений при условии, что в качестве второй эпохи будут использоваться современные высокоточные наблюдения.

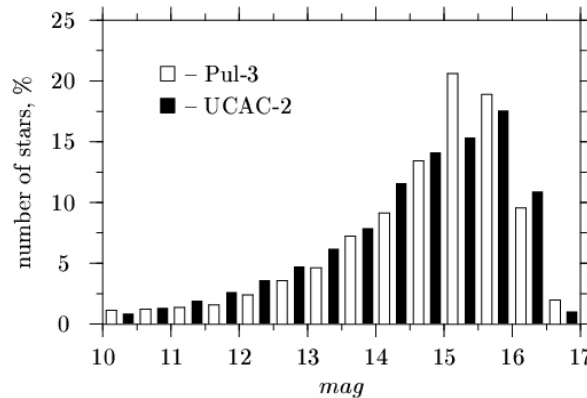
В 2003 г. после завершения работ над каталогом UCAC2 [2] стали доступны точные экваториальные координаты для более чем 48 млн. звезд до 16<sup>m</sup> в зоне склонений  $-90^\circ - +40^\circ$  с отдельными полями до  $+52^\circ$ . Вошедшие в UCAC2 наблюдения были получены в период с 1998 г. по 2002 г. Каталог обладает высокой точностью координат в центральную эпоху (~15–70 mas), ошибки собственных движений для звезд 8<sup>m</sup>–12<sup>m</sup> составляют 1–3 mas/год, для более слабых – 4–7 mas/год.

Для получения новых высокоточных собственных движений звезд в пулковских площадках с галактиками было решено использовать в качестве первой эпохи данные, вошедшие в Pul-3, а в качестве второй эпохи – данные каталога UCAC2 для центральной эпохи (близкой к 2000 г.).

Для отождествления звезд каталогов Pul-3 и UCAC2 положения из каталога UCAC2 были переведены на среднюю эпоху пулковских наблюдений. Звезда считалась отождествленной, если выполнялись два условия:

1. Разность координат не превышала  $3\sigma$ , где  $\sigma = \sqrt{\varepsilon_{Pul-3}^2 + \varepsilon_{UCAC2}^2}$ , где  $\varepsilon_{Pul-3}$  и  $\varepsilon_{UCAC2}$  – ошибки координат звезды в каталогах Pul-3 и UCAC2.
2. Разность между фотографическими звездными величинами, полученными в Пулкове, и звездными величинами UCAC2 не превосходила 3<sup>m</sup>.

Всего в зоне склонений от  $-5^\circ$  –  $+42^\circ$  было выбрано 116 пулковских площадок (34081 звезда). На рис.1 приводится распределение общих звезд Pul-3 и UCAC2 по звездной величине.



**Рис.1.** Распределение звезд каталогов Pul-3 и UCAC2 по звездной величине.

Новые собственные движения звезд в площадках с галактиками ( $\mu_0$ ) были вычислены как разности координат (UCAC2 – Pul-3), деленные на разность эпох.

Каталог Pul-3 [1] формировался из наблюдений, полученных в две эпохи: 50-х и 70-х годов. Из этих данных были вычислены и относительные собственные движения звезд, приведенные в каталоге.

Вывод новых собственных движений был сделан в двух вариантах. В первом – в качестве первой эпохи были взяты экваториальные координаты звезд в среднюю эпоху наблюдений Pul-3 (~1963.25). Во втором варианте – в качестве первой эпохи были взяты экваториальные координаты, полученные по наблюдениям 50-х годов (Pul-3I, средняя эпоха ~ 1953.5). В результате были получены два набора собственных движений. Оба набора собственных движений были сравнены с собственными движениями звезд каталога Tycho-2. В среднем, собственные движения, вычисленные по второму варианту, оказались точнее на 0.3-0.4 mas/год собственных движений первого варианта и были приняты в качестве новых собственных движений звезд в пулковских площадках.

### Оценка точности новых собственных движений

Формальная оценка точности новых собственных движений ( $\varepsilon_{\mu_0}$ ) была получена на основе известных ошибок положений, взятых из каталогов UCAC2 и Pul-3I:

$$\varepsilon_{\mu_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{UCAC2}^2 + \varepsilon_{Pul-3I}^2}}{\Delta T},$$

где  $\Delta T$  - разность между центральной эпохой UCAC2 (близкой к 2000 г.) и эпохой каталога Pul-3I. В среднем величина  $\Delta T$  составила 47 лет.

Для более детального исследования точности новых собственных движений анализировались ошибки разностей  $\Delta\mu = \mu_0 - \mu_{UCAC2}$ : формальные -  $\sigma_\mu$  и определенные по внутренней сходимости ( $D_\mu$ ) для различных интервалов звездных величин.

$$\sigma_\mu = \sqrt{\varepsilon_{\mu_0}^2 + \varepsilon_{\mu_{UCAC2}}^2}, \text{ где } \varepsilon_{\mu_{UCAC2}} - \text{ошибки собственных движений из каталога UCAC2.}$$

$$D_\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\mu_i - \Delta\bar{\mu})^2}{N-1}}, \text{ где } \Delta\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\mu_i, N - \text{количество звезд в рассматриваемом}$$

интервале звездных величин. Отклонение величины  $R = D_\mu / \sigma_\mu$  от единицы в определенной степени характеризует степень достоверности ошибок собственных движений,

приводимых в каталогах, и может указывать на корреляцию между собственными движениями двух каталогов (например, при использовании одного и того же каталога при выводе собственных движений). В нашем случае, использование положений UCAC2 в качестве второй эпохи при выводе как  $\mu_0$ , так и  $\mu_{UCAC2}$ , делает корреляцию между ними неизбежной, хотя и незначительной. Максимальное отклонение R от единицы наблюдается для самых ярких звезд. Не исключено, что помимо корреляции вклад в это вносят и несколько заниженные ошибки  $\mu_{UCAC2}$ , полученные формально по методу наименьших квадратов. В таблице 1 приведены ошибки новых собственных движений звезд в пулковских площадках с галактиками ( $\epsilon_{\mu_0}$ ) и ошибки собственных движений UCAC2 ( $\mu_{UCAC2}$ ), а также величины  $\sigma_\mu$ ,  $D_\mu$  и R. В каждой градации по звездной величине первая строка характеризует  $\mu_\alpha$ , вторая -  $\mu_\delta$ .

**Таблица 1.** Ошибки новых собственных движений звезд в пулковских площадках с галактиками и ошибки собственных движений каталога UCAC2 для различных интервалов звездных величин. Единицы: mas/год. N-число звезд в данной градации.

mag	N	$\epsilon_{\mu_0}$	$\epsilon_{UCAC2}$	$\sigma_\mu$	$D_\mu$	R
8.5	410	5.16	0.83	5.23	3.80	0.73
		4.73	0.84	4.80	3.86	0.80
9.5	940	4.19	0.92	4.29	3.74	0.87
		3.95	0.91	4.05	4.02	0.99
10.5	1521	3.65	1.25	3.86	3.47	0.90
		3.85	1.24	4.05	3.84	0.95
11.5	2997	2.99	2.03	3.61	3.87	1.07
		3.18	2.01	3.76	4.09	1.09
12.5	4796	2.65	4.10	4.88	4.97	1.02
		2.91	4.09	5.02	5.05	1.01
13.5	6296	2.68	5.61	6.22	5.78	0.93
		2.96	5.62	6.35	5.63	0.89
14.5	9677	2.90	5.78	6.47	6.05	0.94
		3.23	5.78	6.62	5.92	0.89
15.5	6532	3.37	5.94	6.83	6.66	0.98
		3.53	5.92	6.89	6.72	0.98

Из таблицы видно, что новые собственные движения ( $\mu_0$ ) уступают по точности собственным движениям UCAC2 для относительно ярких звезд (до  $12^m$ ) и имеют лучшую точность для более слабых звезд. В среднем, точность новых собственных движений лежит в пределах 2-4 mas/год по внутренней сходимости и 3-5 mas/год по внешней сходимости с каталогом UCAC2.

### Сравнение экваториальных координат звезд каталога Pul-3 и новых собственных движений с данными каталога UCAC2

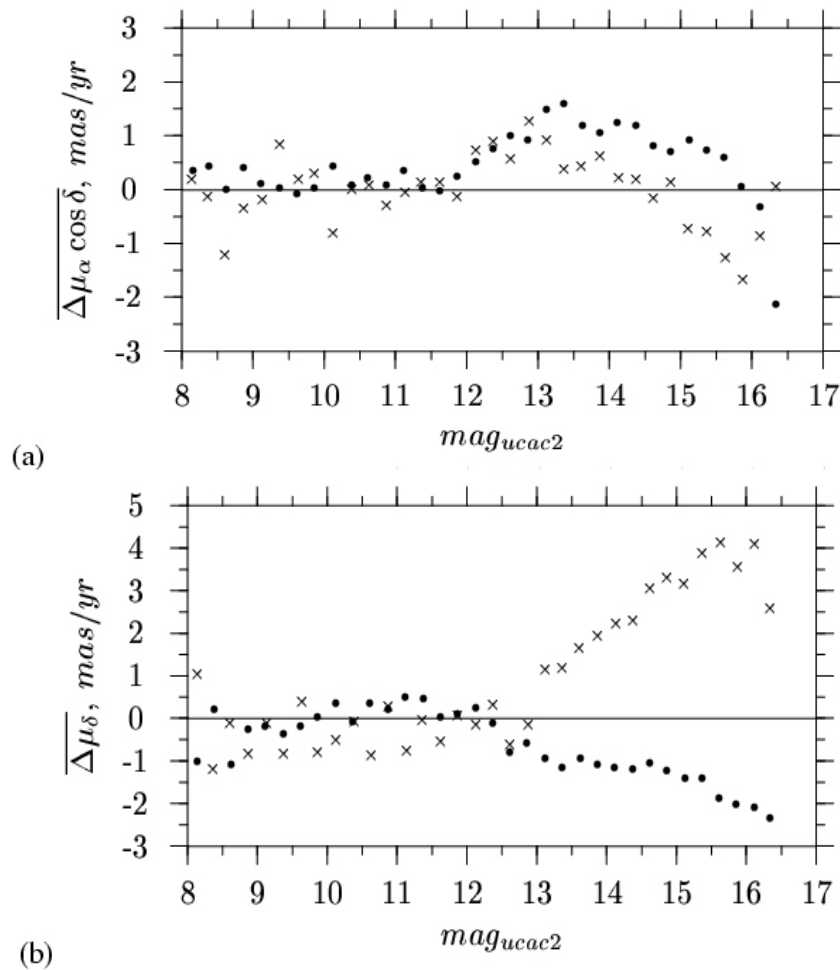
Для выяснения причин ухудшения точности собственных движений звезд слабее  $12^m$  в каталоге UCAC2 было сделано сравнение положений звезд каталога Pul-3 с данными каталога UCAC2. Сравнение проводилось для средней эпохи пулковских наблюдений (1963.25). Точность координат звезд UCAC2 для этой эпохи будет существенно зависеть от точности собственных движений звезд каталога UCAC2. Выполненные оценки показывают, что точность координат составляет 180-200 mas для звезд слабее  $12^m.5$ .

В среднем, величины систематических разностей в смысле (UCAC2-PUL-3) составили 35 mas по RA и 19 mas по DECL при ошибке одной разности 200 mas и 210 mas

соответственно. Полученные оценки разностей подтверждают достоверность оценок точности координат Pul-3 ( $\sim 80$  mas) на среднюю эпоху наблюдений.

Значительная величина ошибок UCAC2 для эпохи 1963.25 для слабых звезд может быть следствием систематических ошибок собственных движений слабых звезд UCAC2, вызванных недоисключенными ошибками в Yellow Sky каталоге (YS3), который использовался как первая эпоха при вычислении собственных движений звезд слабее  $12^m$  в каталоге UCAC2. Каталог YS3 был построен в системе Tycho-2 на основе переизмеренных фотографических пластинок, полученных в рамках Ликской программы определения абсолютных собственных движений с привязкой к галактикам.

Для подтверждения сделанного предположения разности собственных движений  $\Delta\mu = \mu_0 - \mu_{UCAC2}$  анализировались на зависимость от звездной величины по двум группам звезд: наблюдавшимся до зенита Ликской обсерватории и после ( $z_{Lick} = 37^\circ 20'$ ). Ход полученных средних значений разностей представлен на рис.2.



**Рис.2.** Зависимости средних значений разностей ( $\mu_0 - \mu_{UCAC2}$ ) от звездной величины по прямому восхождению (a) и по склонению (b). Значок (•) – разности для площадок со склонениями меньше  $37^\circ 20'$ , значок (×) - разности для площадок со склонениями больше  $37^\circ 20'$ .

Как видно из графиков, для относительно ярких звезд ( $8^m - 12^m.5$ ) систематические зависимости  $\Delta\mu$  от звездной величины практически отсутствуют для обеих групп и обеих компонент собственного движения. Для звезд слабее  $12^m.5$  уравнение блеска наиболее выражено для компоненты  $\mu_\delta$ . Одной из причин этого может быть неполное исключение влияния атмосферной дисперсии на координаты звезд в каталоге YS3.

Известно, что доля относительно “красных” звезд возрастает с увеличением звездной величины и зависит от галактической широты. Следовательно, вклад атмосферной дисперсии должен расти со звездной величиной. При этом поправки  $\Delta\delta$  за атмосферную дисперсию для звезд, кульминирующих к северу от отвесной линии и к югу от отвесной линии, будут иметь разные знаки и будут минимальны в зенитной зоне места наблюдения. Рис.2 (b) демонстрирует “расслоение” хода разностей собственных движений ( $\mu_0 - \mu_{UCAC2}$ ) по склонению относительно  $\delta = 37^\circ 20'$ , что позволят говорить о неполном исключении влияния атмосферной дисперсии на координаты звезд YS3. Последнее отразилось и на точности собственных движений слабых звезд каталога UCAC2.

**Определение компонент угловой скорости вращения между системой ICRF/Tycho-2 и инерциальной системой, задаваемой каталогом Pul2 по новым собственным движениям и собственным движениям каталога UCAC2**

По разностям ( $\mu_0 - \mu_{Pul2}$ ) новых собственных движений 34081 звезды и абсолютных собственных движений тех же звезд из каталога Pul2 [3] определялись компоненты вектора угловой скорости вращения  $\varpi$  ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) между системой каталога Pul-3 (система ICRF, реализованная каталогом Tycho-2) и инерциальной системой, реализованной каталогом Pul2 (каталог собственных движений, абсолютизированных с помощью галактик). Аналогичные определения были выполнены по разностям ( $\mu_{UCAC2} - \mu_{Pul2}$ ) для общих звезд UCAC2 и Pul-3. Результаты полученных решений представлены в таблице 2.

Решения по ( $\mu_0 - \mu_{Pul2}$ ) и по ( $\mu_{UCAC2} - \mu_{Pul2}$ ) свидетельствуют о значимости компоненты  $\omega_z$ . Что касается расхождения в величинах компонент  $\varpi$  для двух решений, то оно лежит в пределах  $\pm\sigma$  для однотипных групп. Причиной расхождения величин компонент  $\varpi$  в различных группах могут быть систематические ошибки разностей ( $\mu_0 - \mu_{UCAC2}$ ), зависящие от звездной величины.

**Таблица 2.** Компоненты вектора угловой скорости вращения между системой ICRF/Tycho-2 (каталоги Pul-3 и UCAC2) и инерциальной системой, представленной каталогом Pul2. Единицы: mas/год

Решение	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
<b>решение по (<math>\mu_0 - \mu_{Pul2}</math>)</b>			
Все звезды	$-0.39 \pm 0.84$	$-0.72 \pm 0.63$	$-1.14 \pm 0.62$
$7^m - 12^m.5$	$0.44 \pm 1.02$	$-0.06 \pm 0.78$	$-1.80 \pm 0.69$
$12^m.5 - 17^m.0$	$-0.39 \pm 0.83$	$-0.89 \pm 0.63$	$-0.98 \pm 0.63$
<b>решение по (<math>\mu_{UCAC2} - \mu_{Pul2}</math>)</b>			
Все звезды	$-1.73 \pm 0.84$	$-0.22 \pm 0.64$	$-1.96 \pm 0.62$
$7^m - 12^m.5$	$0.76 \pm 0.92$	$-0.58 \pm 0.69$	$-1.25 \pm 0.63$
$12^m.5 - 17^m.0$	$-2.03 \pm 0.83$	$-0.31 \pm 0.64$	$-2.15 \pm 0.63$

Окончательный вариант новых собственных движений звезд каталога Pul-3 (для всех 58483 звезд в зоне склонений от  $-5^\circ$  до  $+90^\circ$  будет получен после завершения наблюдательных работ в рамках проекта UCAC.

Получение высокоточных собственных движений слабых звезд дает материал для изучения кинематики звезд в Галактике, может способствовать выявлению новых двойных и кратных систем среди слабых звезд, а также использоваться для анализа инерциальности опорной системы ICRF.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 04-07-90081.

### Литература

1. **Khrutskaya E.V, Khovritchev M.Yu, Bronnikova N.M.** The Pul-3 catalogue of 58483 stars in the Tycho-2 system. 2004, A&A, V.418. P.353-362.
2. **Zacharias N, Urban S.E, Zacharias M.I, Wycoff G.L, Hall D.M, Monet D.G and Rafferty T.J.** The second US Naval observatory CCD Astrograph catalog (UCAC2). 2004, A.J. V.127. P.3043-3066.
3. **Bobylev V.V, Bronnikova N.M, Shakht N.A.** Proper Motions of 59766 Stars Absolutized Using Galaxies in 149 Sky Fields (PUL2). 2004. Pis'ma Astron.Zh. V.30. N 7. P.519-529.

## NEW HIGH PRECISION PROPER MOTIONS OF THE STARS IN THE PULKOVO FIELDS WITH GALAXIES

**Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu.**

### Summary

*The preliminary version of the new proper motions of 34081 mainly faint stars (12 to 16.5 mag) in the Tycho-2 system has been obtained on the basis of star positions that were used during the Pul-3 astrometric catalogue construction (the first epoch, 1953.5), and the UCAC2 catalogue data (the second epoch, 2000).*

*Mean epoch differences is 47 years. The accuracy of the new proper motions is 2 to 4 mas/yr. The results of comparison of the new proper motions with UCAC2 proper motions show that magnitude-dependent systematic errors probably exist in the UCAC2 proper motions of the faint stars. The calculations of final new proper motions of all the Pul-3 stars are planned after completion of the UCAC project.*

**СИСТЕМА АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ  
ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ  
ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ КАТАЛОГИ И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ  
СОВРЕМЕННЫХ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ МАЛЫХ ПЛАНЕТ**

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

*Приводится описание информационного ресурса, создаваемого в Пулковской обсерватории. Ресурс состоит из трех астрометрических баз данных и гипертекстовых страниц, содержащих оценки точности ПЗС-наблюдений малых планет, выполняемых на различных телескопах мира. Сайт доступен по адресу: [www.puldb.ru](http://www.puldb.ru).*

За последние годы в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН был выполнен ряд больших работ по созданию астрометрических звездных каталогов (Pul2, Pul-3 (Pul-3 SE), Pul ERS). Построенные каталоги основаны на материале наблюдений, выполненных в разные годы на нормальном астрографе Пулковской обсерватории. Помимо каталожных работ на двух инструментах лаборатории (26-дюймовом рефракторе и нормальном астрографе) получены более чем 40-летние регулярные фотографические, а с 1995 г. и ПЗС-наблюдения тел Солнечной системы, наблюдения двойных и кратных звезд и звезд с невидимыми спутниками. Используя оригинальное программное обеспечение, созданное в ГАО, проводятся регулярные оценки точности современных ПЗС-наблюдений малых планет, выполняемых на телескопах всего мира.

Для обеспечения широкого доступа к имеющейся информации было решено создать систему астрометрических баз данных, включающую в себя три базы:

I база: Пулковские фотографические каталоги.

II база: Результаты фотографических и ПЗС-наблюдений тел Солнечной системы.

III база: Результаты фотографических и ПЗС-наблюдений избранных двойных и кратных звезд и звезд с невидимыми спутниками.

В соответствии с планом работ, в 2004 г. для пользователей открыта первая база данных, обеспечивающая доступ к пулковским фотографическим каталогам, и информационный ресурс в виде гипертекстовых страниц, содержащий анализ точности ПЗС-наблюдений малых планет, наблюдавшихся на различных телескопах мира, как профессионалами, так и астрономами-любителями. Начаты работы по анализу и стандартизации материала для второй и третьей баз.

**I база: Пулковские фотографические каталоги**

Первая база данных позволяет работать с каталогами Pul2, Pul-3 (Pul-3 SE), Pul ERS.

***Каталог Pul2 (CDS I/295) [1]***

Каталог Pul2 содержит оригинальные абсолютные собственные движения 59766 звезд в 149 площадках с галактиками в зоне склонений от  $-5^\circ$  до  $+90^\circ$ . Используются наблюдения, выполненные на нормальном астрографе Пулковской обсерватории в соответствии с планом А.Н. Дейча по созданию Каталога Слабых звезд [2]. Первые эпохи фотографических пластинок получены с 1937 по 1965 гг., вторые эпохи - с 1969 по 1986 гг. Средняя разность эпох – 24 года. Предельная фотографическая звездная величина –  $17^m$ . Для абсолютизации относительных собственных движений использовано около

700 галактик. Средняя ошибка относительных собственных движений звезд в каталоге Pul2 составила 5.5 mas/год. Средняя ошибка абсолютизации – 7.9 mas/год для обеих координат. Средняя ошибка одного абсолютного собственного движения в каталоге – 9 mas/год. При построении каталога Pul2 задача получения точных экваториальных координат звезд в пулковских площадках с галактиками не ставилась. В каталоге приводятся лишь их приближенные значения.

### ***Каталог Pul-3 (Pul-3 SE) (CDS I/290) [3]***

Основная масса звезд в пулковских площадках с галактиками это звезды 12-16.5 звездной величины. Наличие у таких звезд точных экваториальных координат в современной опорной системе (ICRF), позволяет использовать их как опорные при обработке ПЗС-наблюдений слабых объектов (внегалактических радиоисточников, объектов пояса Койпера и т.п.), что актуально в настоящее время. Это явилось мотивацией для создания каталога Pul-3, используя тот же наблюдательный материал, что и для каталога Pul2. Каталог Pul-3 содержит точные экваториальные координаты и относительные собственные движения для 58483 звезд в пулковских площадках с галактиками в зоне склонений от  $-5^\circ$  до  $+90^\circ$  в системе ICRF/Tycho-2. Средняя эпоха каталога –1963.25. Среднее значение ошибок по внутренней сходимости для координат – 80 mas, для собственных движений –  $3\div 12$  mas/год. Ошибки координат по внешней сходимости с каталогом Tycho-2 составили 150 mas на среднюю эпоху пулковских наблюдений.

Каталог Pul-3 построен на основе результатов наблюдений, полученных в две эпохи: в 50-е годы и в 70-е годы. После появления каталога UCAC2 было решено уточнить имеющиеся относительные собственные движения каталога Pul-3. В качестве первой эпохи были использованы координаты звезд Pul-3, полученные по наблюдениям 50-х годов. Положения звезд для второй эпохи были взяты из каталога UCAC2. Средняя разность эпох составила 47 лет. Новые собственные движения были вычислены для 34081 звезды в зоне склонений от  $-5^\circ$  до  $+42^\circ$  [4]. Новые собственные движения, их ошибки и номер по каталогу UCAC2 были добавлены в каталог Pul-3. Так был сформирован каталог Pul-3 SE. Внутренняя точность новых собственных движений составила  $2\div 4$  mas/год, точность по внешней сходимости с каталогом UCAC2 –  $3\div 5$  mas/год. Получение новых собственных движений для всех звезд каталога Pul-3 в зоне склонений от  $-5^\circ$  до  $+90^\circ$  будет сделано после завершения всех наблюдательных работ по проекту UCAC и построения каталога UCAC3.

### ***Каталоги Pul ERS [5-6]***

В период с 1992 по 1997 гг. на нормальном астрографе Пулковской обсерватории были выполнены наблюдения звездных полей вокруг 73 внегалактических радиоисточников в зоне склонений от  $+26^\circ$  до  $+90^\circ$ . Цель работы – определение точных экваториальных координат слабых звезд в современной опорной системе для их последующего использования в качестве опорных при обработке наблюдений внегалактических радиоисточников, полученных на телескопах, оснащенных ПЗС-приемниками.

В настоящее время опубликованы каталоги звезд в окрестностях 23 внегалактических радиоисточников (23 индивидуальных каталога Pul ERS). Каталоги содержат точные экваториальные координаты звезд до 16 звездной величины в системе ICRF/Tycho для средней эпохи наблюдений, близкой к 1993 г. и оценки звездных величин. Для 13 наиболее ярких радиоисточников ( $m < 17$ ) получены их экваториальные координаты [7]. Общее число звезд в каталогах Pul ERS – 2817, из них 1647 звезд (13-16 mag) находятся в радиусе  $16'$  от внегалактических источников. Обработка полученного наблюдательного материала продолжается.



Данные всех каталогов, вошедших в первую базу, представлены в виде ASCII-таблиц и размещены на сервере. Взаимодействие web-сервера и браузера осуществляется с помощью web-приложений, написанных на языке PHP. Интерфейсные гипертекстовые страницы включают в себя web-формы для формирования запросов пользователя. На рис.1 показана титульная страница сайта. С этой страницы пользователь может войти в базу, содержащую пулковские фотографические каталоги, а также выйти на гипертекстовые страницы, содержащие оценки точности ПЗС-наблюдений малых планет. Имеется возможность ознакомиться с техническими характеристиками 26-дюймового рефрактора и нормального астрографа Пулковской обсерватории.

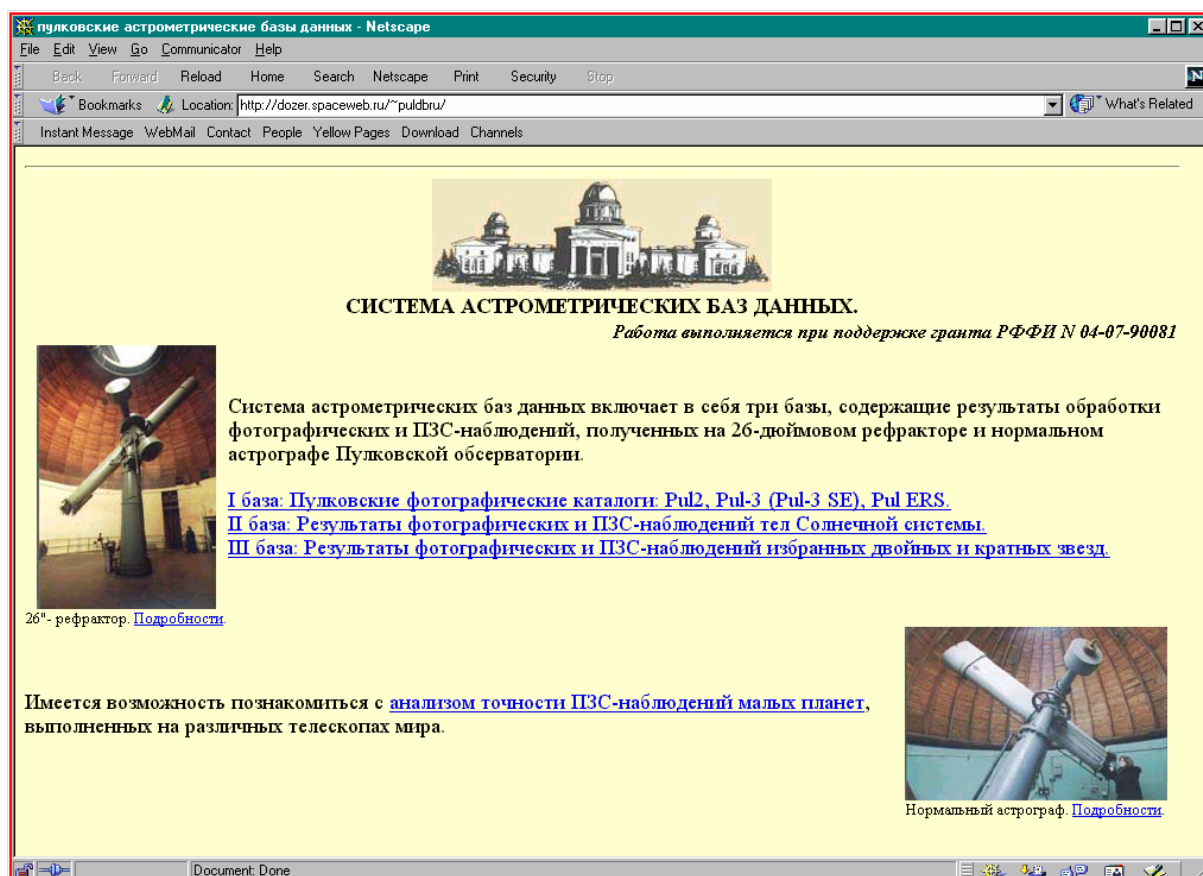


Рис.1. Титульная страница сайта с астрометрическими базами данных.

При входе в первую базу данных пользователь может познакомиться с краткими характеристиками доступных каталогов и посмотреть основные публикации по ним, а также выбрать интересующий его каталог.

После выбора каталога происходит переход на гипертекстовую страницу, содержащую экваториальные координаты центров звездных полей (рис.2). Здесь возможен выбор нужного поля и автоматический переход на web-форму для выборки данных из каталога, либо осуществление перехода на web-форму вручную. На рис.3 показан фрагмент web-формы (Data access form), позволяющей формировать запросы пользователя, для выборки данных из каталога Pul-3 SE.

Возможно, получить как все данные каталога (по умолчанию), так и только данные, интересующие пользователя, сняв значок (v) с остальных колонок. Имеется возможность произвести выборку данных в указанных пределах (по звездной величине, по величине ошибок и т.п.). Для этого необходимо установить “маячок” у соответствующей величины в первой колонке и нужные пределы в поле “select stars within parameter interval”.

Время работы скрипта выборки не превышает 10 секунд при полной выборке из полей, содержащих наибольшее число звезд (~1500 звезд). Данные каталога могут быть получены как в виде html-файла, так и в виде ASCII-файла. Имеется возможность получить “картинку” выбранного поля звезд и задать ей нужную ориентацию.

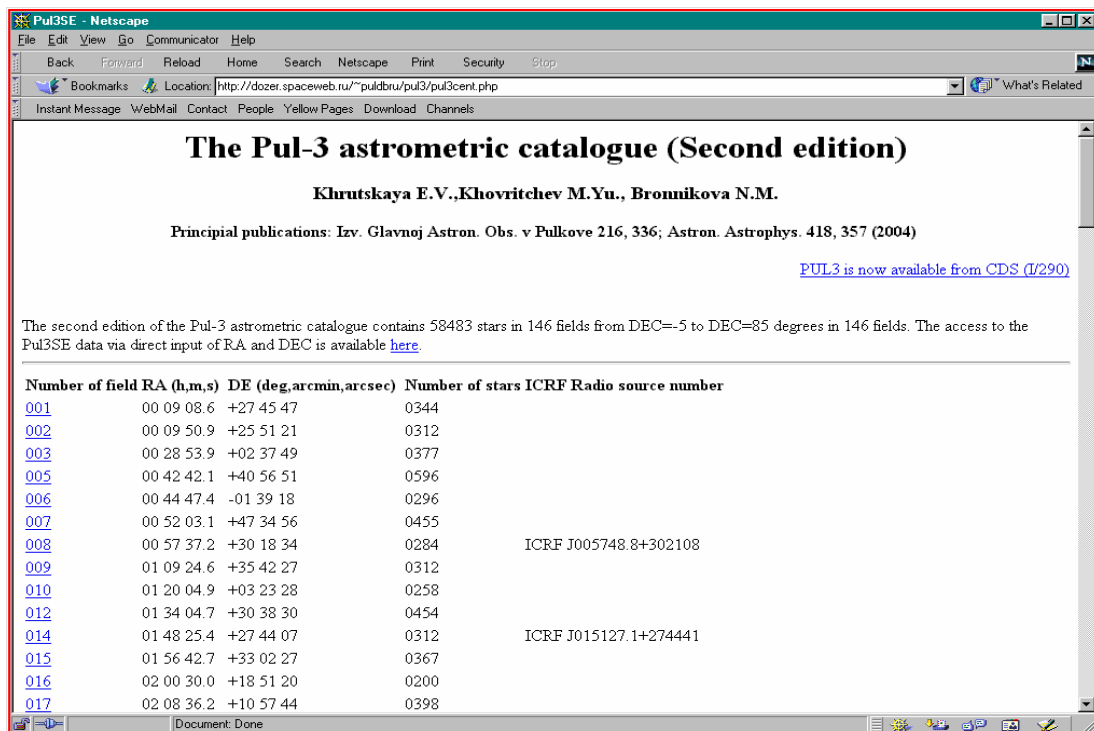


Рис.2. Экваториальные координаты центров площадок для каталога Pul-3 SE.

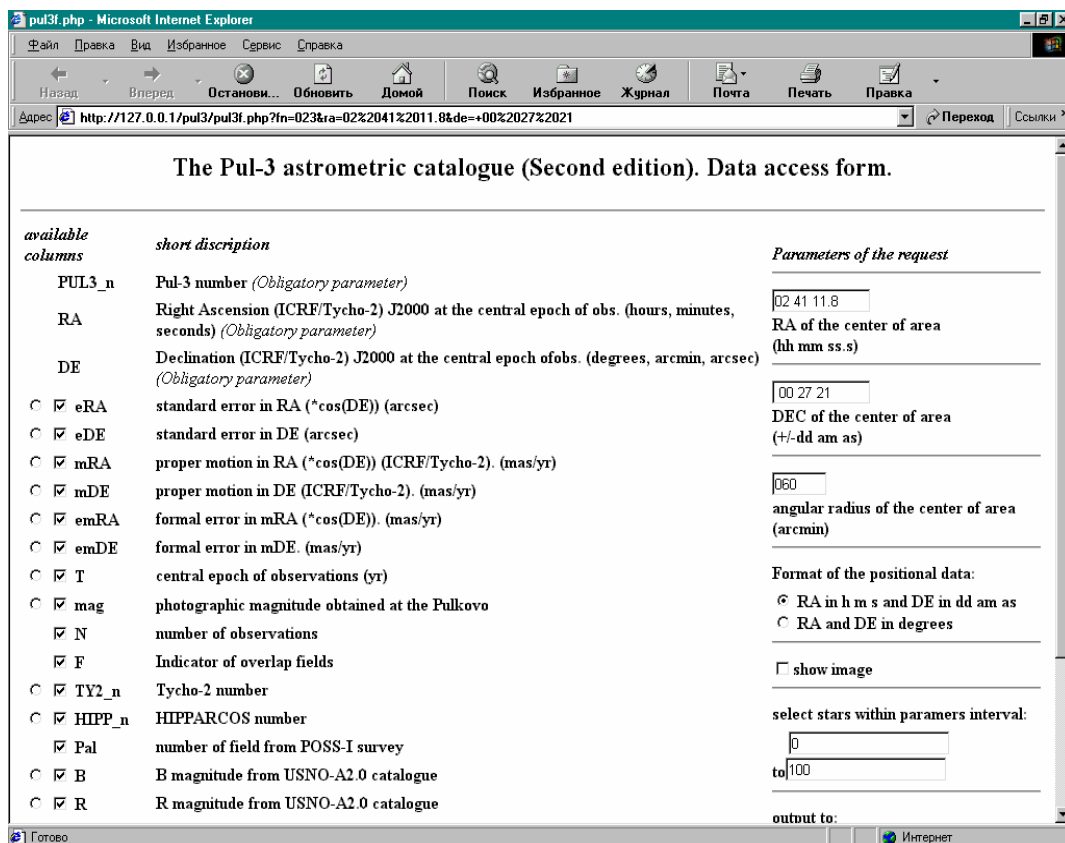


Рис.3. Фрагмент web-формы для выборки данных из каталога Pul-3 SE.

### Оценка точности современных ПЗС-наблюдений малых планет [8-9]

Web-страницы содержат набор таблиц, в которых приводятся ошибки ПЗС-наблюдений для всех обсерваторий, выполняющих астрометрические наблюдения малых планет.

Анализируются величины (O-C), полученные из сравнения наблюдаемых координат небесного тела (O) с его вычисленными координатами (C). Наблюдаемые координаты берутся из базы данных Международного центра малых планет, эфемеридные значения координат вычисляются с помощью программного пакета ЭПОС, созданного в Пулковской обсерватории группой В.Н. Львова. Для каждой малой планеты и каждой наблюдательной станции, имея несколько разностей (O-C), вычисляется ошибка этих разностей и далее вычисляется средняя ошибка, по всем наблюдениям этой станции за месячный период.

Internal errors. April, 2004.

MPC code	Country, Observatory	Diam., Focus (m)	FOV	Scale, Catalog	Number of minor planets	Number of positions	Mean errors of single observation	
							RA	DE
							"	"
<a href="#">012</a>	Belgium, Uccle	0.85 2.1	45 x 30'	0.9" GSC	22	164	0.480	0.325
<a href="#">049</a>	Sweden, Kvistaberg	1.0	35 x 35'	1.0" USNO	60	186	0.212	0.166
<a href="#">106</a>	Slovenia, Crni vrh	0.36 2.4	36 x 36'	2.0" USNO	27	81	0.288	0.311
<a href="#">113</a>	Germany, Schonbrunn	0.50 2.3	13 x 10'	2" USNO	9	29	0.247	0.219
<a href="#">130</a>	Italy, Lumezzane	0.4 1.8	15 x 10'	1.0" USNO	3	11	0.192	0.230
<a href="#">151</a>	Switzerland, Eschenberg	0.25 2.0	24 x 16'	0.9" USNO	1	3	0.049	0.181
<a href="#">153</a>	Germany, Stuttgart	0.25 1.8	16 x 12'	2.8" GSC	2	12	0.318	0.276
<a href="#">170</a>	Spain, Obs. de Begues	0.31 2.0	No data		1	3	0.025	0.142

External errors. April, 2004.

MPC code	Country, Observatory	Diam., Focus (m)	FOV	Scale, Catalog	Number of minor planets	Number of positions	Mean errors of single observation	
							RA	DE
							"	"
<a href="#">012</a>	Belgium, Uccle	0.85 2.1	45 x 30'	0.9" GSC	1	25	0.929	0.200
<a href="#">049</a>	Sweden, Kvistaberg	1.0	35 x 35'	1.0" USNO	2	12	0.241	0.360
<a href="#">084</a>	Russia, Pulkovo Obs.	0.32 3.2	9 x 7'	1.5" USNO	16	138	0.308	0.389
<a href="#">113</a>	Germany, Schonbrunn	0.50 2.3	13 x 10'	2" USNO	1	5	0.469	0.508
<a href="#">153</a>	Germany, Stuttgart	0.25 1.8	16 x 12'	2.8" GSC	2	12	0.360	0.264
<a href="#">185</a>	Switzerland, jur.-Vicques	0.61 2.1	23 x 15'	0.9" USNO	4	38	0.254	0.292
<a href="#">291</a>	USA, Kitt Peak, Spacewatch II	1.8 4.7	390 x 30'	1.0" USNO	62	453	0.375	0.216
<a href="#">294</a>	USA, Astroph. Obs.	0.41 2.6	No data		3	18	0.765	0.469
<a href="#">333</a>	Canada, Desert	0.45	No data		93	386	0.539	0.399

Рис.4. Фрагменты таблиц с внутренними и внешними ошибками наблюдений малых планет.

Вычисляются как “внутренняя“ так и “внешняя” ошибка, отдельно по прямому восхождению и склонению. Под внутренней ошибкой понимается ошибка, для получения которой использовались наблюдения данной малой планеты в одну ночь, а под внешней ошибкой - наблюдения нескольких ночей. При таком подходе внутренняя ошибка характеризует суммарное влияние на наблюдения таких источников ошибок, как "атмосфера + телескоп + ПЗС-матрица + метод обработки изображений + точность измерений + астрометрическая редукция + случайные ошибки каталога". Для внешней ошибки к ним добавляются еще систематические ошибки каталога.

На сайте представлены таблицы двух типов. Первый тип содержит средние месячные ошибки по прямому восхождению и склонению, внешние и внутренние. На рис.4 приведены фрагменты таких таблиц. Таблицы второго типа содержат разности (O-C), для всех произведенных наблюдений данной станции в данный месяц, а также все индивидуальные внутренние и внешние ошибки, на основании которых вычислялись ошибки, содержащиеся в таблицах первого типа. Пример такой таблицы для обсерватории с кодом 049 показан на рис.5.

В настоящий момент на сайте содержится анализ более 2 миллионов отдельных наблюдений, выполненных обсерваториями мира за год. Обновление информации производится регулярно после выхода очередного циркуляра Международного центра малых планет.

(O-C) for observatory with code – 049. April, 2004.

-----Compressed Ephemeris DE200/LE200-----											
MP	Obs	Dynamical Time		RA			(O-C)	cosDEC	DEC	(O-C)	
				h	m	s	"	'	"	"	
6144	049	2004	4	13.896596	12	15	54.626	-0.67	+ 6 56 16.88	-0.16	
6144	049	2004	4	13.911906	12	15	54.180	-0.68	+ 6 56 19.18	-0.33	
6144	049	2004	4	13.924636	12	15	53.801	-0.80	+ 6 56 21.29	-0.27	
Mean of last 3 obs.							-0.72			-0.25	
							+/- 0.04			+/- 0.05	
Internal error of single observation							0.07			0.09	
-----Compressed Ephemeris DE200/LE200-----											
MP	Obs	Dynamical Time		RA			(O-C)	cosDEC	DEC	(O-C)	
				h	m	s	"	'	"	"	
8520	049	2004	4	11.974886	13	35	30.251	-0.34	+ 2 05 51.05	-0.13	
8520	049	2004	4	11.987266	13	35	29.741	-0.43	+ 2 05 55.95	-0.17	
8520	049	2004	4	12.000646	13	35	29.202	-0.34	+ 2 06 01.25	-0.20	
Mean of last 3 obs.							-0.37			-0.17	
							+/- 0.03			+/- 0.02	
Internal error of single observation							0.05			0.04	
-----Compressed Ephemeris DE200/LE200-----											
MP	Obs	Dynamical Time		RA			(O-C)	cosDEC	DEC	(O-C)	
				h	m	s	"	'	"	"	
8520	049	2004	4	15.939546	13	32	48.333	0.25	+ 2 31 32.33	0.77	
8520	049	2004	4	15.953026	13	32	47.784	0.28	+ 2 31 37.13	0.48	
8520	049	2004	4	15.977686	13	32	46.764	0.10	+ 2 31 46.53	0.57	
Mean of last 3 obs.							0.21			0.61	
							+/- 0.06			+/- 0.09	
Internal error of single observation							0.10			0.15	
Total mean value of 6 observations							-0.08	+/-0.13		0.22	+/-0.18
External error of single observation							0.33			0.43	

Рис.5. Пример таблицы второго типа. (O-C) для обсерватории с кодом 049. Апрель 2004 г.

Основной задачей выполняемой работы, является предоставление сервиса, используя который, наблюдатели малых планет могли бы совершенствовать методику наблюдений и обработки. В связи с появлением высокоточного астрометрического каталога UCAC2, имеющего достаточную для ПЗС-наблюдений плотность звезд, задача повышения точности наблюдений малых планет является крайне актуальной. Ранее точность подобных наблюдений ограничивалась, в основном, крайне низкой точностью каталогов серии USNO и GSC, используемых при обработке наблюдений.

Сайт с астрометрическими базами данных Пулковской обсерватории размещен на одном из двухпроцессорных серверов ЗАО "Space Web". Суммарная пропускная способность каналов 3 Gb (из них 2 Gb на Россию и 1 Gb на Западную Европу и США). Скорость основного канала 1 Mb/сек, имеется резервный канал с той же скоростью. Сервер работает под операционной системой Linux, web-сервер Apache. Осуществляется ежедневное резервное копирование данных. Работа сайта тестировалась с наиболее популярными браузерами Explorer, Netscape, Mozilla.

Сайт с астрометрическими базами данных доступен по адресу: [www.pulddb.ru](http://www.pulddb.ru)  
Возможен выход на сайт и через сервер ГАО: [www.gao.spb.ru](http://www.gao.spb.ru) → базы данных → система астрометрических баз данных.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ N 04-07-90081.

#### Литература

1. **Бобылев В.В., Бронникова Н.М., Шахт Н.А.** Собственные движения 59766 звезд, абсолютизированные с использованием галактик, в 149 избранных площадках неба (Pul2). 2004. Письма в АЖ. Т.30. N 7. С.519-529.
2. **Дейч А.Н.** Использование внегалактических объектов для построения абсолютной системы собственных движений звезд. 1952. Москва. 34 с.
3. **Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., Bronnikova N.M.** The Pul-3 catalogue of 58483 stars on the Tycho-2 system. 2004. A&A. V.418. P.353-362.
4. **Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu.** New high precision proper motions of stars 12 to 16.5 mag. Based on the data from the Pul-3 and UCAC2 astrometric catalogues. 2004. A&A (in press).
5. **Dement'eva A.A., Ryl'kov V.P.** The Fields of Reference Stars of Optical Positional Observations of Astrometric Extragalactic Radio Sources. 1995. Astron and Astroph. Trans. V.9. P.127-138.
6. **Дементьева А.А.** Каталог положений 2775 звезд в окрестностях 23 внегалактических радиисточников. 1999. Деп. в ВИНТИ N 1328-B99.
7. **Дементьева А.А.** Положения внегалактических радиисточников, полученных по каталогу по каталогу Tycho. 2000. Изв. ГАО в Пулкове. N 214. С.227-232.
8. **Выков О.Р., L'vov V.N., Izmailov I.S., Sumzina N.K.**, Accuracy of World positional CCD observations of the numbered minor planets in 2000", by "Ceres 2001" Workshop on: Astrometry and Physics of Minor Planets from Observational Networks, Institut de mecanique celeste IMCCE. Observatoire de Paris. October 9-12. 2001. Paris, France.
9. **Выков О.Р., L'vov V.N., Izmailov I.S., Sumzina N.K.** "Accuracy of positional CCD observations of the Numbered Minor Planets in 1999-2001. Proc. of the International Conference "Asteroids, Comets, Meteors 2002". Berlin, Germany. 2002. P.413 - 416.

**ASTROMETRIC DATA BASES OF THE PULKOVO OBSERVATORY:  
PHOTOGRAPHIC CATALOGUES AND ACCURACY ESTIMATIONS  
OF CCD-OBSERVATIONS OF MINOR PLANETS**

**Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., Izmailov I.S.**

*Summary*

*An Internet resource **www.puldb.ru** being developed at the Pulkovo observatory is described in this paper. Three databases will be constructed according to plan of the works. The first of them is available now. It has opened wide access to the Pulkovo photographic catalogues of positions and proper motions of stars (Pul-3SE, Pul2 and PUL ERS). The PHP web-applications and html-pages are allowed to select stars from astrometric catalogues according to given parameters (positions, magnitude and others). One of the parts of resource is 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.*

# ГЕОДИНАМИКА





## **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РЕГИОНАЛИЗАЦИИ БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА**

**Ассиновская Б.А.**

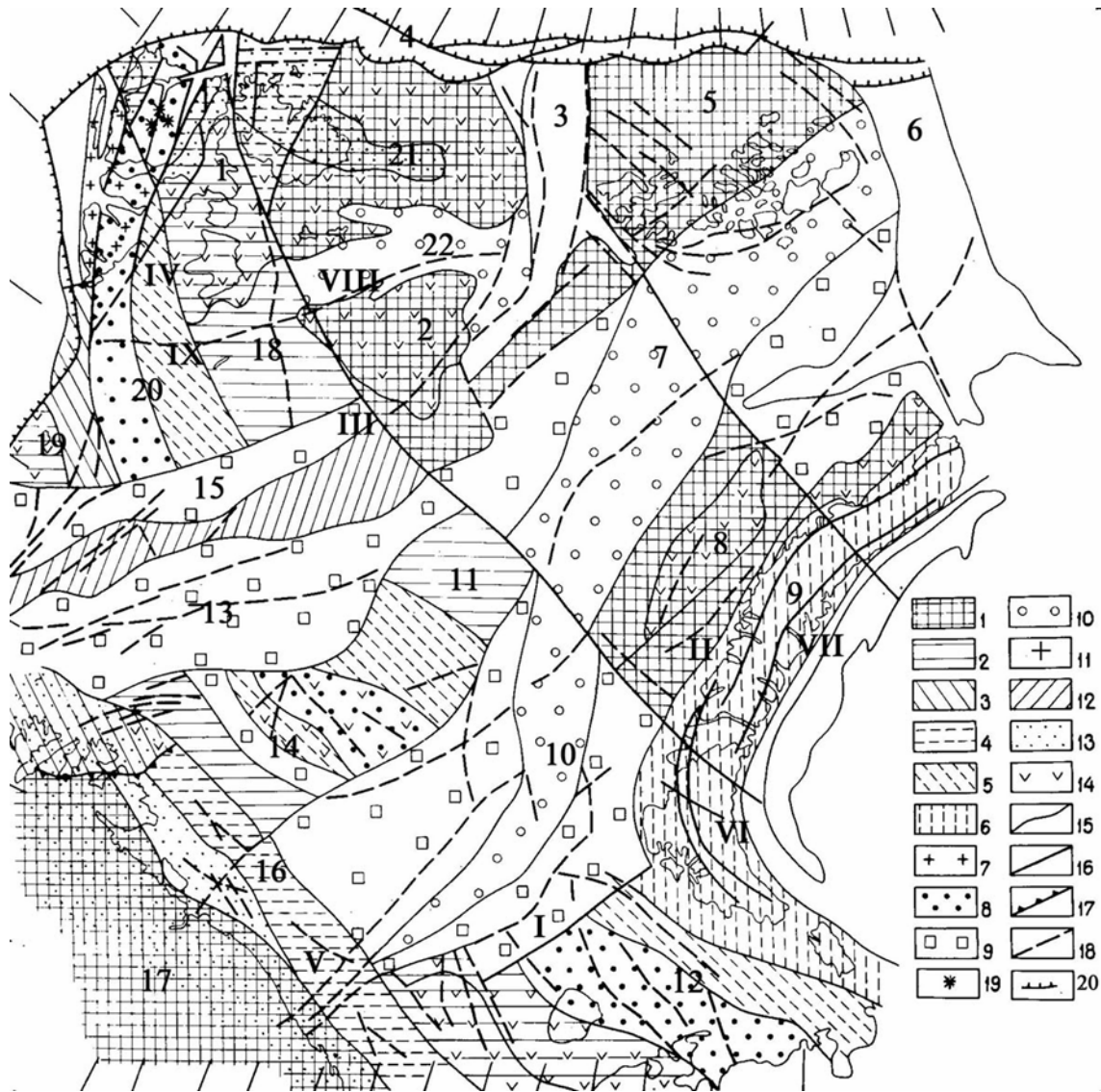
*В представленной работе описываются методика и результаты сейсмической регионализации российской (с прилегающими районами) части Баренцевоморского шельфа как основы для оценки сейсмической опасности. По сравнению с уже опубликованным вариантом работы данные о сейсмичности использованы по состоянию на 2003 год, а границы района исследований в части описания сейсмичности расширены. Выделены и подробно исследованы действующие зоны сейсмической активности, для каждой из них приводится детальная геолого-геофизическая характеристика. Оценка максимально возможной магнитуды вероятных землетрясений для слабоактивной центральной части шельфа проведена по методу аналогий, когда на основе региональных геолого-геофизических критериев сейсмичности проводится сравнение геолого-геофизических параметров сейсмоактивных и асейсмичных структур.*

Действующая версия карт Общего сейсмического районирования [Карты сейсмического районирования России...2000], регламентирующего уровень сейсмической опасности Баренцевоморского шельфа, составлена по состоянию сейсмологических данных на 1990 год. В настоящее время уже имеются данные по 1998-2003 годы. Схема сейсмической регионализации (входит в комплект карт) не включает информацию по окружающим районам, а поэтому не позволяет полностью представить взаимосвязь современных тектонических процессов в активных океанических хребтах и в пределах структур шельфа. К картам не было опубликовано никаких подробных приложений, описывающих методику регионализации слабоактивных районов, таких, как Баренцевоморский шельф. В данной работе сделана попытка восполнить эти пробелы.

### **1. Тектоника Баренцевоморского шельфа**

Баренцевоморский шельф на севере и западе имеет четко выраженные геологические границы - молодые кайнозойские разломы континентальных уступов Поморского и Брусилова. На юго-западе флексурно-разломная зона отделяет шельф от выступа докембрийских образований Балтийского щита. С востока Баренцевоморский шельф ограничен Новоземельско-Уральской складчатой системой киммерид. На юге четкой границы нет. Шельф представляет собой гигантский осадочный бассейн, в основании которого залегает палеозойская океанская кора [Аплонов и др., 1996]. На шельф протягиваются рифтовые системы прилегающей суши - Тимано-Печорской провинции.

Основными структурами фундамента региона являются Баренцево-Северокарская депрессионная зона (прогиб), глыбовые поднятия - микроконтиненты Свальбарда, Земли Франца-Иосифа (ЗФИ), Новоземельское, Центрально-Баренцевское и др., разделенные разновозрастными палеоконвергентными системами (зонами разломов) и рифтами [Баренцевская..., 1988, Сенин и др., 1988, Аплонов и др., 1996] (рис.1).



**Рис.1.** Схема тектонического районирования Баренцевоморской шельфовой плиты [Баренцевская..., 1988]

**Условные обозначения:** 1-3 – складчатые комплексы: 1 – карельские, 2 – байкальские, 3 – каледонские; 4-7 – зоны активизации: 4 – байкальские, 5 – каледонские, 6 – киммерийские, 7 – альпийские; 8-12 – зоны глубокой переработки фундамента в рифтогенных прогибах: 8 – девонских, 9 – пермских, 10 – триасовых, 11 – кайнозойских, 12 – неясного возраста; 13 – выходы фундамента на поверхность; 14 – Pz<sub>3</sub>-Mz чехол; 15 – границы геоструктурных комплексов; 16 – ремагенные границы структур; 17 – надвиги; 18 – сбросы; 19 – голоценовые вулканы; 20 – флексурно-разломная зона на границах шельфа.

**Цифрами на карте обозначены:** *Структуры:* 1 – Свальбардское поднятие; 2 – поднятие Персея; 3 – желоб Франц – Виктория; 4 – континентальный уступ Брусилова; 5 – Грумантское поднятие; 6 – желоб Святой Анны; 7 – Северо-Баренцевская впадина; 8 – поднятие Адмиралтейства; 9 – Пайхойско-Новоземельская гряда; 10 – Южно-Баренцевская впадина; 11 – Центрально-Баренцевское поднятие; 12 – Печорская плита; 13 – Нордкапский прогиб; 14 – прогиб Варангер; 15 – Медвежинский прогиб; 16 – Кольско-Канинская моноклираль; 17 – Балтийская антеклиз; 18 – Надеждинский; 19 – Медвежинский; 20 – Шпицбергенский; 21 – Восточно-Свальбардский блок; 4 – Ольгинский прогиб;

*Разломы:* I – Южно-Баренцевский, II – Предновоземельский, III – Медвежинский, IV – Восточная Граничная зона разломов, V – Карпинского, VI – Колодкинский, VII – Восточно-Новоземельский, VIII – Хинлопенский, IX – Надеждинский.

Данные об общей мощности земной коры в регионе свидетельствуют о сравнительно однородном (35–40 км) распределении этого параметра по площади, однако соотношение консолидированной и осадочной составляющих резко изменчиво. Некоторые наиболее погруженные районы шельфа, а также зоны континентальных склонов характеризуются океаническим или переходным субокеаническим типом земной коры [Аплонов и др., 1996].

## 2. Сейсмическая активность

Уровень сейсмической активности Баренцевоморского шельфа и положение сейсмогенных областей в его пределах, как неоднократно указывалось, предопределен структурой и современной геодинамикой рифтовых зон Северной Атлантики и Арктики. Воздействие рифтовых зон на окружающие территории можно наглядно показать, если сравнить сейсмический режим системы хр. Книповича–Нансена и Баренцевоморского шельфа. На рис.2 показано распределение во времени, начиная с 1908 года, рифтовых ( $M_s > 6$ ) (в границах описываемого региона) и платформенных ( $M_s > 5$ ) землетрясений, откуда следует, что возникновение сильных землетрясений происходит практически синхронно, сдвиг во времени составляет 10–20 лет. Наибольшая активность в рифтовых зонах отмечена в 30–е и 70–е годы 20 столетия. Протяженность цикла составляет 40 лет. Если считать эти сведения достоверными, сильных землетрясений следует ждать лишь в 10–20–х годах 21 века.

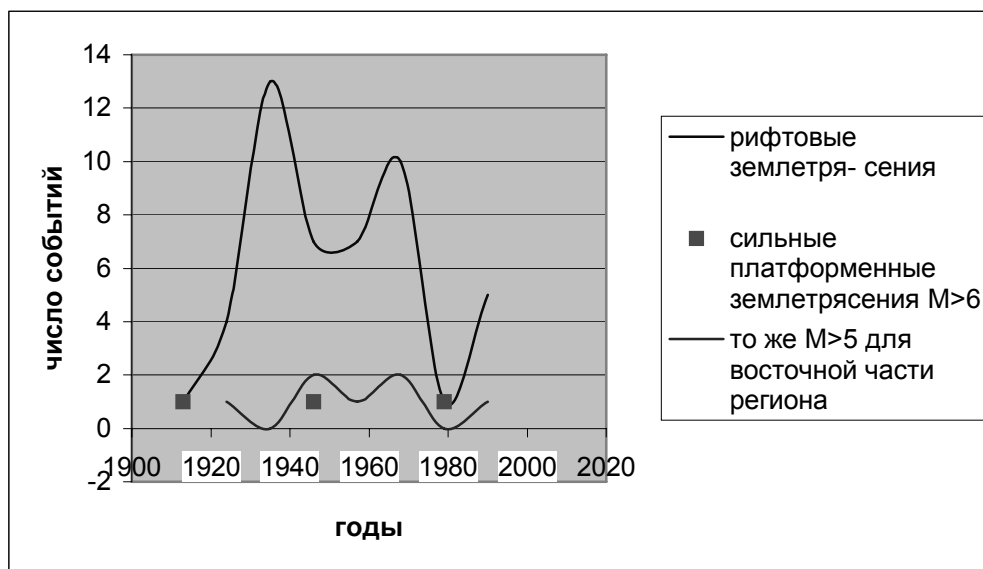


Рис.2. Распределение сейсмических событий Северной Атлантики во времени (20 век).

На карте эпицентров (рис.3) представлены землетрясения шельфа, а также океанических хребтов Мона (частично), Книповича, Гаккеля и соединяющей два последних Шпицбергенской зоны дислокаций. Карта построена по материалам публикаций [Линден, 1959, Hodgson и др., 1965, Sykes, 1965] для событий периода 1908–1963 годы, по данным ISC [International..., 1966–1999] для интервала 1964–1998 годы. Для северной части Фенноскандии использовались данные Г.Д. Панасенко [Панасенко, 1977, 1979, 1984, 1991], Фенноскандинавской базы данных [Ahjos и др., 1991] и публикаций [Vun-gum и др., 1997]. Всего на карте показано положение более 1000 землетрясений с  $M_s > 3.2$  ( $m_b > 3.5$ ) для всего региона в целом и все землетрясения без ограничения по магнитуде и по 2003 год для района регионализации. Глубины очагов составили 5–25 км. В настоящее время составляется каталог землетрясений региона по данным ISC для ин-

тервала времени с 2000 по 2003 годы. Анализ этих данных показывает, что за указанный период произошло более 150 землетрясений с  $m_b > 3.5$ , из которых 8 событий имели магнитуду  $\approx 5$ , при этом 6 землетрясений были приурочены к океанической части региона и только 2 – к шельфовой. Характер сейсмичности в границах указанного района неоднократно обсуждался, например, для Шпицбергена или Баренцева моря [Панасенко и др., 1987, Ассиновская. 1994, Аветисов, 1996], однако результаты наблюдений последних лет, а также рассмотрение всех данных в совокупности позволил сделать некоторые важные дополнительные выводы. Существенное расширение наблюдательной сети в последние 20 лет позволило значительно уменьшить погрешности в определении мест возникновения землетрясений, что, в свою очередь, дало возможность более четко локализовать зоны сейсмической активности.

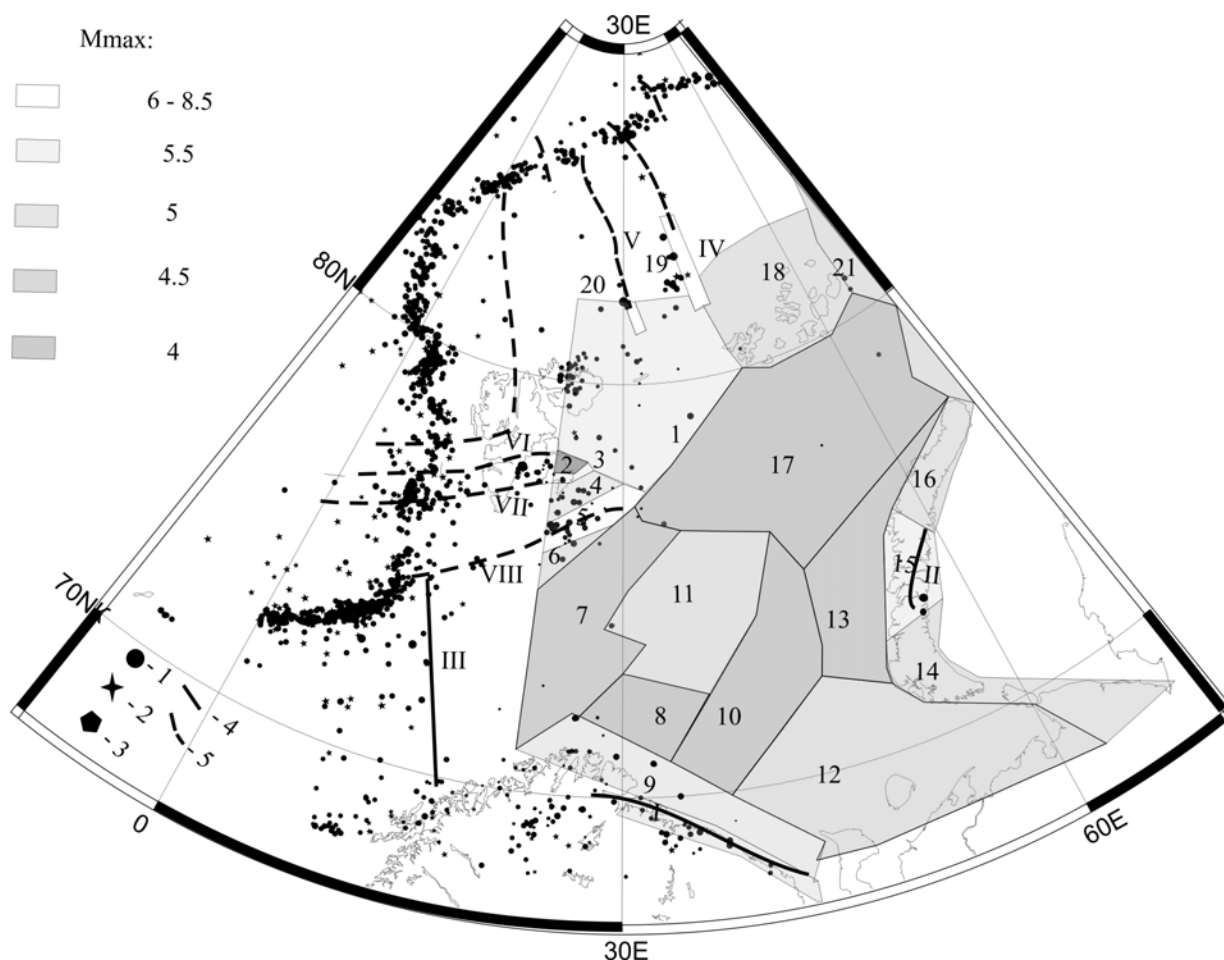
Можно утверждать определенно, что, например, что сейсмичность океанических хребтов Мона и Книповича структурируется по-разному: если хребет Мона – это протяженная, но узкая и сейсмически однородная зона, то в пределах хр. Книповича при общем его меридиональном простирании землетрясения располагаются в пределах довольно широких северо-восточно направленных полос, очевидно связанных с вероятными трансформными разломами, пересекающими континентальную кору Свальбардского поднятия на большом протяжении. Три нарушения данного типа (Надеждинское, Северо-Эджинское и Стур-фьорд-Земля Геера) показанные на рис.3, образуют сейсмогенные зоны, восточные окончания которых расположены в пределах изучаемого региона.

Внутриплитовая сейсмичность Свальбардского блока имеет ярко выраженный локальный характер, особенно это касается архипелага Шпицберген. В этом районе в настоящее время проявляет себя ряд зон сейсмической активности. Из них наиболее активная вышеупомянутая зона залива Стур-фьорд - Земли Геера на о. Западный Шпицберген (Восточная Граничная зона разломов), в океанической части она обозначена последовательностью сильных землетрясений, связанных с узлом рифта хр. Книповича на широте  $76-76,5^\circ$  с.ш., в континентальной части с ней связано землетрясение 18 января 1976 года с  $M_s = 6.3$  (за пределами района). Микросейсмическая активность очаговой области детально изучалась в 1977-1979 г.г. [Bungum H. и др., 1982]. Установлены ее субширотное простирание и геометрические размеры (длина 35 км и ширина 15 км). В 2003 году в зоне усилилась сейсмическая деятельность, а 28 августа 2003 года произошло землетрясение с  $M 5$ .

Вторая меридиональная зона сейсмической активности располагается на о. Северо-Восточная Земля, вплотную примыкая к изучаемому региону. Самое сильное землетрясение острова - 02.01.1962 г. имело магнитуду  $M_s = 4.8$ . В 1990-98 годы в данном районе зарегистрировано 27 землетрясений с  $M_s = 3.1 - 3.9$ , тогда как за весь предыдущий период наблюдений отмечено всего семь плохо локализованных (погрешность  $\pm 100$  км) сейсмических событий. Данные этого десятилетия подтвердили меридиональную направленность зоны и ее возможную связь с тектоническими нарушениями континентального склона. В районе поднятия Надежда в период времени 1990–1998 годы также произошло существенно больше землетрясений (21 событие, максимальная магнитуда 4.1), чем это имело место в предыдущие 80 лет (13 землетрясений, из которых событие 1963 года имело магнитуду 5.1). Подобное несоответствие объясняется повышением чувствительности сети. Сейсмически активны непротяженные разломы северо-восточного и меридионального простираний. Глубина очагов землетрясений Свальбардского поднятия 10–15 км. В подтверждение активности зоны в ее пределах в 2003 году имело место землетрясение с  $M 5$ .

Распределение сейсмичности вдоль хребта Гаккеля, расположенного к северу от изучаемого региона, также неоднородно: здесь выделяются участки повышенной плот-

ности эпицентров землетрясений с дислокациями сбросового характера рифтовой природы, непротяженные области рассеянной сейсмичности или ее отсутствия, а также линейные зоны концентрации землетрясений, которые ассоциируются с трансформными разломами (рис.3).



**Рис.3.** Сейсмическая регионализация Российской части Баренцевоморского шельфа.

**Условные обозначения:**

Эпицентры землетрясений  $M_s \geq 3.5$  с 1908 по 1998 годы: 1 – по данным ISC и [Ahjos T. и др., 1991], 2 – по данным [Линден Н.А., 1959, Hodgson I.H. и др., 1965, Sykes L.R., 1965], размер знака пропорционален  $M_s/100$ , 3 – то же - без магнитуды, глубина гипоцентра 5 –25 км. Для района регионализации показаны эпицентры землетрясений без нижнего ограничения магнитуд по 2003 год.

4 – сейсмически активные разломы: I – Карпинского; II – Восточно-Новоземельский; III – Сенья (за пределами изучаемого района); 5 – то же предполагаемые; IV – Франц –Виктория; V – Стуре; VI –Стур-фьорд – Земля Геера; VII - Южно-Эджинский; VIII - Надеждинский. Домены: 1 – Восточно-Свальбардский; 2 - Стур-фьорд – Земля Геера; 3 – Южно-Эджинский; 4 – Северо-Надеждинский; 5 – Надеждинский; 6 – Нордкапский; 7 – Медвежинский; 8 – Варангер; 9 – Мурман-Финмаркен; 10 – Южно-Баренцевский; 11 – Центрально-Баренцевский; 12 – Печорский; 13 – Приновоземельский; 14 – Южно-Новоземельский; 15 – Центрально-Новоземельский; 16 – Северо-Новоземельский; 17 – Северо-Баренцевский; 18 – Земли Франца-Иосифа; 19 – Франц – Виктории; 20 – Стуре; 21 – Св. Анны  
Океанические рифтовые зоны: А – Мона; В – Книповича; С – Гаккеля.

Две подобные трансформные зоны, по нашему мнению, ответственны за образование желобов Стуре и Франц-Виктория, к которым приурочены наиболее сильные

землетрясения континентального склона и всего Баренцевоморского шельфа. Землетрясения 14.10.1908 и 1948 годов имели магнитуду 6.6 и 6.3 соответственно при глубине очага 20 км. В желобе Стуре указанное событие 1908 года вплоть до 1994 года было единственным, однако в последующие 4 года в эпицентральной области и далее к югу проявилась слабая сейсмическая активность (максимальная магнитуда событий 3.7). Из района желоба Франц-Виктория сильные землетрясения зарегистрированы в период 1948-67 гг. (4 события с  $M_s = 6.3-4.3$ ), в интервале 1967-1975 годов отмечено только 3 землетрясения, магнитуда максимального из них была 4.5, в 1975-1994 годы землетрясений не было совсем, в 1994-1998 гг. в связи с повышением минимального порога регистрируемых событий получены данные о слабой активности. Интересно, что 09.04.1996 года в западной части Земли Франца-Иосифа произошло неглубокое землетрясение с  $M_s = 4.4$ . В этом районе сейсмическое событие произошло впервые, хотя на востоке архипелага слабые землетрясения отмечались и ранее. Они регистрировались только сейсмической станцией Хейс. В период 2000-2003 годы зона не проявила сейсмической активности.

В южной части Баренцева моря зоны сейсмической активности располагаются в области сочленения структур кристаллического щита и шельфа. На востоке этой области очаги землетрясений образуют две параллельные полосы, которые протягиваются вдоль Кольского берега и связаны, по современным представлениям, с бортами рифейского грабена, один из которых представлен известным разломом Карпинского. Сильные землетрясения приурочены к узлам пересечения этого разлома с линейными северо-восточного простирания (Харловское землетрясение 10.04.1981 г.  $M 4.8$  и другие). В пределах северной части Финмаркена и Норвежского побережья очаги землетрясений концентрируются в пределах меридиональных фьордов и разрывных зон, их продолжающих: например, зона, берущая начало в Порсангер-фьорде, по данным последних 20-ти лет обрела квазилинейный характер и протягивается вплоть до Ботнического залива [Bungum, и др. 1997].

Наиболее сильные исторические землетрясения с  $M_s = 5$  в Мурманском районе связаны с Северо-Кейвским разломом, их параметры определены по макросейсмическим данным (18.02.1772 и 21.02.1873 гг.). Последнее событие имеет, возможно, метеоритное происхождение (А.А. Никонов, устное сообщение). Вдоль указанного нарушения располагается еще ряд эпицентров, зарегистрированных в 1990-1999 годы. Характерной особенностью сейсмичности зоны Мурман-Финмаркен является тот факт, что на фоне интенсивной, но слабой сейсмичности Балтийского щита в целом, некоторые сильные землетрясения имели место именно в этом районе. В период 1990-1999 годов банк данных о землетрясениях региона пополнился 23 событиями, в 1981-1999 годы произошло 43 землетрясения (отметим, что с исторических времен до 1981 года в Мурман-Финмаркене имели место только 19 землетрясений в интервале магнитуд 3-5). В Российской части зоны зарегистрировано 8 землетрясений, из которых наиболее значительным было 16.06.1990,  $M_s = 4.2$ , ощущавшееся макросейсмически. Не исключен техногенный характер некоторых из этих событий. Последний рассматриваемый период (2000-2003) для этой зоны можно считать спокойным в сейсмическом отношении.

Подводя итоги описания основных зон сейсмической активности Баренцевоморского шельфа, можно констатировать, что за 100-летний период 1900 - 2000 год в пределах шельфа произошло 2 землетрясения с  $M_s$ , равной или большей 6, 4 землетрясения с магнитудой  $M_s$  большей или равной 5. На северной окраине Балтийского щита интервал возникновения подобных событий составляет, вероятно, более ста лет. Следует заметить, правда, что уже в первые годы следующего столетия произошло 2 события с магнитудой около 5-ти.

### 3. Регионализация

В силу практической асейсмичности Баренцевоморского шельфа для выделения зон потенциальной сейсмической опасности и оценки максимально возможной магнитуды  $M_{max}$  использованы, в основном, сеймотектонический принцип и метод аналогий, когда изучались геологические характеристики активных в сейсмическом отношении районов (в нашем случае северо-запада шельфа) и устанавливалось наличие таковых на остальной акватории. Величина  $M_{max}$  определялась для районов с собственной сейсмичностью по графикам повторяемости, при их отсутствии – с использованием экспертных оценок (см. ниже). Максимально возможная магнитуда в асейсмичных районах часто обуславливалась уровнем представительности. При этом имелось в виду, например, что землетрясения с магнитудой 5 представительны (регистрируются без пропусков) в регионе только с 20-х годов 20 века и вполне могли иметь место 100 и более лет тому назад. Землетрясения с  $M = 4$  представительны с 70-х годов, 4.5 – с 60-х. Графики повторяемости землетрясений, использованные для расчета сотрясаемости при ОСР –97 (Карты сейсмического районирования России...2000), представлены в таблице 1. Часть из них получена по прямым сейсмостатическим данным (1772 –1990 годы) (названия выделены), остальные расчетным путем в предположении, что наклон графика равен 1.0,  $T_{max} = 100$  лет,  $M_{max}$  для каждого домена, определенное экспертным путем, равно значению, приведенному в таблице 1.

**Таблица 1.** Повторяемость землетрясений различных магнитуд.

<i>магнитуда</i>	<b>6.5</b>	<b>6.0</b>	<b>5.5</b>	<b>5.0</b>	<b>4.5</b>	<b>4.0</b>	<i><math>M_{max}</math></i>
<i>Домены</i>	<i>Число землетрясений / год</i>						
<b>Восточно-Свальбардский</b>	0	0	0	0.01	0.024	0.05	<b>5</b>
<b>Стур-Фьорд-Земля Геера</b>	0.01	0.025	0.079	0.25	0.79	2.51	<b>6.5</b>
<b>Ю-Эдж</b>	0	0	0	0.01	0.032	0.1	<b>5</b>
<b>С-Надеждинский</b>	0	0	0	0.01	0.032	0.1	<b>5</b>
<b>Надеждинский</b>	0	0	0.01	0.032	0.1	0.32	<b>5.5</b>
Центрально-Баренцевский	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5
Нордкапский	0	0	0	0	0	0.01	4
Медвежинский	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5
<b>Мурман-Финмаркен</b>	0	0	0	0.01	0.032	0.1	<b>5</b>
Варангер	0	0	0	0	0	0.01	4
<b>Стуре</b>	0.012	0.03	0.076	0.19	0.48	1.2	<b>6.5</b>
С-Баренцевский	0	0	0	0	0	0.01	4
Ю-Баренцевский	0	0	0	0	0	0.01	4
<b>Ф-Виктория</b>	0.01	0.021	0.052	0.13	0.33	0.83	<b>6.5</b>
Земля Франца-Иосифа	0	0	0	0	0.01	0.032	5
Приновоземельский	0	0	0	0	0	0.01	4
Печорский	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5
Ю-Новоземельский	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5
Центрально - Новоземельский	0	0	0	0.01	0.032	0.1	5
Северо-Новоземельский	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5
Св. Анны	0	0	0	0	0.01	0.032	4.5

Анализ повторяемости для региона в целом и с учетом данных последнего десятилетия показал, что землетрясения с  $M_s = 6$  могут происходить в регионе один раз в 90–100 лет, с  $M_s = 5$  – каждые 10 лет, с  $M = 4$  – каждый год.

Экспертная оценка  $M_{max}$  для различных районов шельфа базировалась на следующих сеймотектонических критериях: удаление от основного источника напряжений – рифтовых зон хр. Книповича и Гаккеля, мощность и состав кристаллической земной коры, мощность осадочного чехла, наличие интрузий, усредненные скоростные и плотностные характеристики коры, размах рельефа, амплитуды неотектонических движений, плотность новейших разломов и пр. Большая сейсмическая активность предполагалась в районах, приближенных к окраинным частям шельфа до расстояний менее 500 км с мощностью континентальной коры порядка 30 км, существенно гранитным ее составом, малой толщиной осадков (менее 8 км), высокой плотностью новейших разломов и интрузий, восходящим типом неотектонических движений с интенсивностью 500 и более м. Детальные сведения по каждому отдельному району представлены в таблице 2.

В качестве опорного района выбрана Свальбардская платформа, часть которой попадает в изучаемую область. Территориально исследуемый район делится на две части - юго-восточную и северо-западную. Юго-восточная часть состоит из восточных окончаний 5-и линейных доменов, протягивающихся за границу исследуемой области на запад к Шпицбергенскому континентальному склону. Северо-западная часть – это Северо-Свальбардский домен изометричной формы. В структуре фундамента юго-востока принимают участие складчатые комплексы различного возраста (см. выше). Сочленение разновозрастных блоков фундамента происходит по зонам глубинных разломов северо-западного и северо-восточного простираний. Разломы северо-восточного направления имеют непосредственную связь с рифтовой зоной и сейсмически активны. Всего здесь инструментально зарегистрировано 30 землетрясений, из которых наиболее сильными были события 1963 года с  $M = 5.1$  и 1988 с  $M = 4.8$ .

Достаточно высокая сейсмичность позволила структурировать юго-восток Свальбардского поднятия по уровню  $M_{max}$  на ряд мелких зон. Основная сейсмогенная зона расположена в районе о. Надежда (одноименный домен  $M_{max} 5.5$ ). По данным сейсморазведки одноименное поднятие линейной формы выделяется монолитным обликом, отсутствием отражающих горизонтов, распространенностью интрузивных образований. Высокие скорости распространения сейсмических волн, окременность и огипсованность пород разреза осадочных пород, а также их углефикация могут свидетельствовать о наличии тангенциальных напряжений. Гравитационное поле характеризуется повышенным фоном. На батиметрических картах область поднятия Надежда мелководна и представляет собой ровное плато. Новейшие движения положительны, несмотря на современное подводное положение. Сравнительно сильные землетрясения приурочены к узлам пересечений разнонаправленных нарушений, причем при сдвиговом характере дислокаций ориентация плоскостей разрывов в решении механизма очага 1963 года совпадает с простиранием основных разломов. К северу от Надеждинской зоны расположены Северо-Надеждинский и Южно-Эджинский домены, оконтуривающие площадные и линейные скопления эпицентров. Их  $M_{max}$  по сейсмостатистическим данным определено как 5.0.

Наибольшая сейсмическая опасность, по нашему мнению, может быть приписана восточному окончанию зоны Стур-фьорд – Земли Геера, который охватывает самую активную область всего Свальбардского поднятия – район возникновения наиболее сильного землетрясения Шпицбергена 18 января 1976 года с  $M = 6.3$  ( $M_{max} = 6.5$ ).

Восточно-Свальбардская зона выделена в остальной части Свальбардской платформы и соседний желоб Франц-Виктория. Его сеймотектонические характеристики близки описанным выше. Географически домен расположен наиболее близко к активно развивающимся рифтовым зонам, активным разломам Шпицбергена и вероятным



трансформным структурам.  $M_{max}$  определена как 5.0. Слабая геологическая изученность и большие погрешности в локализации эпицентров не позволили структурировать домен более детально: внутри и на восточной границе выделены лишь две линейные области – Стуре и Виктория. Тектонически указанные домены, вероятно, представляют собой трансформные разломы хр. Книповича протяженностью около 500 км, их южные окончания морфологически выражены грабенами, расчленяющими континентальный склон. Здесь происходили самые сильные землетрясения региона ( $M = 6.6$  1908 и 1948 годы).  $M_{max}$  6.5 определена по сейсмостатистическим данным.

Зона, выделенная в границах Земли Франца-Иосифа, расположена вблизи континентального склона, характеризуется континентальным типом земной коры, уменьшенной мощностью осадочного чехла, расчлененного большим количеством интрузивных образований, знакопеременными и высокоамплитудными новейшими движениями, многочисленными, но непротяженными новейшими разломами. Сейсмичны западный и восточный склоны поднятия. Невысокое значение  $M_{max}$  4.5 (на уровне представительности) обусловлено отсутствием сейсмичности во внутренних частях, что, в свою очередь, связано с сильной раздробленностью архипелага и значительной базификацией коры, уменьшающей сеймотектонический потенциал [Assinovskaya, 2003].

Домен Св. Анны имеет все признаки сейсмоактивной структуры (см. таблицу). Более низкое значение  $M_{max}$ , чем, например, определенное для Свальбардского поднятия, связано с нисходящим типом тектонических движений и гораздо более слабой современной сейсмичностью. Последнее обстоятельство обусловлено низкой изученностью этого района Арктики и отсутствием здесь в отличие от Шпицбергена локальных сетей станций.

Мурманская зона охватывает северную часть Балтийского щита, а также ту часть шельфа, куда пролонгируются структуры щита.

Северо-западная граница домена представляет собой границу распространения земной коры архейского возраста. На юге зона граничит с разломом Карпинского (одноименный домен), к которому приурочены наиболее сильные землетрясения. Зона, вообще говоря, устроен более сложно: при детальном рассмотрении [Assinovskaya и др., 2000] содержит еще целый ряд более мелких подразделений. Однако ввиду отсутствия сейсмостатистики для оценки предполагаемого сейсмического режима использовалась вся совокупность сейсмических событий, имевших место на территории зоны, в предположении рассеянной сейсмичности, что на самом деле не совсем так. Мурманская зона удовлетворяет всем выбранным сеймотектоническим критериям для определения  $M_{max}$  как 5.0 (см. таблицу 2).

Средне-Новоземельская зона – это центральная, наиболее сложно устроенная в тектоническом плане часть Новоземельского эпиплатформенного орогена, охватывающая зону сочленения двух региональных структур Новой Земли (см. выше). Земная кора характеризуется здесь наибольшей жесткостью в силу большого распространения интрузивных образований. Отмечен размах рельефа, новейших тектонических движений и повышенная плотность разломов. 1 августа 1986 года на восточном побережье, в районе пролива Маточкин Шар произошло землетрясение с  $M = 4.5$ . Очаг землетрясения в геологическом плане находится на границе как субмеридиональных (Восточно-Новоземельского и Пахтусовского), так и субширотных (Южно-Новоземельского и Средне-Новоземельского) блоков. Меридиональная граница имеет четкое выражение в рельефе, по этим разрывным нарушениям контактируют области рельефа различного типа: прибрежно-морской равнины и денудационно-тектонического низкогорья с перепадом высот 700 м. Поперечный неотектонический линеамент выражен проливом Маточкин Шар, который в районе тектонического узла имеет наибольшую глубину. Есть

данные об очень слабой сейсмической активности в данном районе [Ассиновская, 1994].

**Таблица 2.** Геолого-геофизические данные, использованные при сейсмической регионализации и оценке  $M_{max}$

Наименование домена	Расстояние от океанических рифтовых зон, км	Мощность консолидированной Земной коры по [Аллонов, 1996]	Тип земной коры	Мощность осадочного чехла по [Аллонов, 1996]	Насыщенность коры интрузиями (по Боголепову и др.)	Плотность пород фундамен-та, г/см <sup>3</sup> по [Аллонов, 1996]	Новейшие движения, м По [Мусатов, 1996]	Новейшие разломы По [Мусатов, 1996, Ассиновская, 1994]	Сейсмичность (максимальная наблюдаемая магнитуда)	$M_{max}$
Свальбардский (в том числе Франц-Виктория)	0-400	32	Континентальный	4-6	+++	2.6	0-500	+++	6.6	5-6.5
Земля Франца-Иосифа	500	34	“	4	++	2.8 -	-300 – +500	+++		4.5 - 5
Святой Анны	250	28	“	4	-	2.7	-400	+	3	4.5
Мурманский	300 – 800	40	“	0-2	++	2.7	+500 -300	+++	5	5-5.5
Средне-Новоземельский	1300	28-34	“	8-12	++	2.6	+500	+++	4.6	5
Печорский	1300	24-32	“	6-8	+	2.6	-100 – -200	+	-	4.5
Центрально-Баренцевский	700	28	“	6	++	2.7	-100 -200	++	-	4.5
С-Новоземельский	1000	28-34	“	8-12	++	2.6	+500	+	-	4.5
Южно-Новоземельский	1300	28-34	“	8-12	-	2.6	+500	+	-	4.5
Приновоземельский	1000	32-36	“	10	-	2.6	-100	+	-	4
Южно-Баренцевский	1000	12-24	Океанический	14-18	-	3.0	-400	+	-	4
Варангер	750	24	“	8-12	-	2.8-3.0	-400	++	-	4
Северо - Баренцевский	750	12-24	“	8-16	-	3.0	-300	+	-	4
Нордкапский	250	24	“	8-12	-	2.8-3.0	-400	++	-	

Соседние Северо- и Южно-Новоземельские домены имеют сеймотектонические характеристики, близкие описанным выше, (см. таблицу 2) однако собственной сейсмичности на известном уровне представительности не имеют, что обусловило более низкий выбор  $M_{max}$ .

Центрально-Баренцевская область характеризуется континентальным типом коры, близким расположением относительно западной сейсмически активной границы шельфа, сокращенной мощностью осадков, резким подводным рельефом. Амплитуды новейших движений, однако, не превышают –100 м. Кроме того, малые геометрические

размеры блока и его, возможно, невысокий сейсмотектонический потенциал (малая мощность гранитной составляющей коры) препятствуют возникновению здесь землетрясений более чем 4.5 за 100 лет.

Остальные домены (Южно-Баренцевский, Северо-Баренцевский, Нордкапский, Варангер) обладают самым низким уровнем потенциала, предопределенного океаническим типом земной коры и невысокой современной и новейшей тектонической активностью (см. таблицу). Домены асейсмичны на современном уровне представительности землетрясений, для периода повторяемости 100 лет.  $M_{max}$  обозначена как 4.0.

### Выводы

Как постулировалось ранее, сейсмичность Баренцевоморского шельфа распределена в пространстве крайне неравномерно, наиболее активны его западные районы. Причем последующие сейсмические наблюдения только подтверждают крайне консервативный характер этого природного фактора. Необходимость проведения долгосрочных прогнозных оценок сейсмической опасности в слабоактивных районах обусловили разработку и использование методик, основанных на комплексе обширных геолого-геофизических данных. Так, центральные районы шельфа при отсутствии собственной сейсмичности регионализированы по методу аналогий. При этом правильность оценки опасности в асейсмичных областях трудно проверяема в силу, во-первых, очень большого периода повторяемости (до тысячелетий) землетрясений, во-вторых, их малой энергетике, не контролируемой современными сейсмическими сетями. Возможен также неверный выбор постулата – «любой район сейсмичен, только нужно правильно выбрать инструментальные параметры регистрации». Правда, в последнее время эта парадигма находит все же свое подтверждение в сейсмических проявлениях в Калининградской области.

Представленные в данной работе методики могут быть использованы для районирования шельфа Балтийского моря.

### Литература

- Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. С-Петербург: НИИ Океангеология. 1996. 185 с.
- Аплонов С. В., Шмелев Г.Б., Краснов Д.К.* Геодинамика Баренцево-Карского шельфа // Геотектоника. 1996. № 4. С.58-76.
- Ассиновская Б.А.* Сейсмичность Баренцева моря. М.: НГК. 1994. 125 с.
- Баренцевская шельфовая плита* / Под ред. Грамберга И. С. Л.: Недра. 1988. 263 с.
- Карты сейсмического районирования России* (под редакцией В.Н. Страхова, В.И. Уломова. 4 листа в масштабе 1:8000000 (ОСР-97). М: ОИФЗ РАН. 2000.
- Линден Н.А.* О карте сейсмичности Арктики // Сейсмические и гляциологические исследования в период Международного геофизического года. М.: АН СССР. 1959. № 2. С.7-17.
- Панасенко Г.Д.* Землетрясения Фенноскандии 1951-1985. М.: МГК АН СССР. 1977-1991.
- Панасенко Г.Д., Кременецкая Е.О., Аранович З.И.* Землетрясения Шпицбергена. М.: МГК АН СССР. 1987. 81 с.
- Сенин Б. В., Шипилов Э.В.* Тектоника Баренцево-Карской плиты // Геологические и географические проблемы. Освоение природных ресурсов северных морей. Мурманск: Геогр. общество СССР.1988. С.3-10.
- Ahjos T., Uski M.* Earthquakes in northern Europe in 1375–1989 // Tectonophysics 1991. December 5. P.100–150. и [www.seismo.helsinki.fi](http://www.seismo.helsinki.fi)

- Assinovskaya B.A.** On the method of assessment of seismotectonic potential. // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2003. Vol. 44. № 2. PP.87-101.
- Assinovskaya B., Kiselev I., Vinogradova N., Koff G.** Seismic hazard of the North-West part of the Cola //XXVII General Assembly of the European Seismological Commission, Lisbon University, Lisbon, PORTUGAL 10-15 September 2000. Abstracts, p.95.
- Bungum H and Lundholm C.** Seismo- and neotectonics in Finmark, Kola and the northern Barents Sea. Part 2: seismological analysis and seismotectonics. // Tectonophysics 1997. Vol.270 № 1-2. P.15–29.
- Bungum H., Mitchel B.I., Kristofferson I.** Concentrated earthquake zones in Svalbard. // Tectonophysics. 1982. Vol.82. P.176-188.
- Hodgson I.H., Both M., Jensen H. at al.** Seismicity of the Arctic. // Ann. IGY, 1965. Vol. 30. P.33-65.
- International Seismological Centre Bull.** 1964-2003. Newbury U.K.: 1966-2003 p://www.isc.ac.uk/.
- Sykes L.R.** The seismicity of the Arctic // Bull. of the Seismol. Soc. Am. 1965. Vol.55. P.501-518.

## METHODS AND RESULTS OF SEISMIC REGIONALIZATION OF THE BARENTS SEA REGION

**Assinovskaya Bela A.**

### *Summary*

*The methods and the results of seismic regionalization of the Russian part of the Barents Sea shelf and surroundings are described in the study presented. As compared with already published version of the work the seismicity data used here reflect the 2003 state and research region boundaries with reference to the seismicity description are expanded. The functioning zones of seismic activity are revealed and studied in full; the detail geology-geophysical description for each of them is given. The probable earthquakes maximum magnitude assessment for the weakly-active central part of the Barents Sea was carried out according to the analog method when the comparison of the geology-geophysical parameters for seismically active and aseismic structures is being made using regional geology-geophysical seismicity criteria.*

## О МЕТОДАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ГЕОДИНАМИКЕ

Горшков В.Л.

*Дано краткое описание методов, применяемых в геодинимике для прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ). На материале данных международной службы вращения Земли (IERS) проведен сравнительный анализ некоторых методов прогнозирования.*

### Введение

Все более точное прогнозирование геофизических процессов является конечной целью многих научных задач особенно в прикладных направлениях, к которым относится большинство наук о Земле. На пути повышения точности их прогноза имеются интуитивно понятные ограничения. Они связаны с нестационарностью большинства рядов, с наличием случайных или, тем более, не совсем случайных помех. Помехи могут быть обусловлены как средствами наблюдений, так и невозможностью отделить данный процесс от взаимодействия с другими процессами геосистемы, многообразие которых также порождает почти случайный фон воздействий. Повышение точности регистрирующих систем привело к эффекту микроскопа – стали видны *реальные*, не вызванные ошибками наблюдений почти случайные флуктуации многих геофизических процессов. По этим причинам методы прогнозирования становятся все более изошренными. При этом меняется сам подход к прогнозу. Там, где за вычетом всех известных составляющих процесса, остается только шум, открывается не менее интересная, многокрасочная картина этого шума (от белого до коричневого). Возможность традиционного прогнозирования (чему будет равно  $f(t_i)$  в момент  $t_{i+k}$ ) там отсутствует, но содержится достаточно нерасшифрованной информации о характере процесса, его поведении и даже возможных кризисных состояниях (точках бифуркаций).

Истоки современного прогнозирования можно найти в монастырях средневековья, в которых монахи были озабочены познанием истинных путей Господних (не дай Бог не так понять Его *замысел*). Имея в виду эту величайшую и недостижимую цель – понять замысел, исследовались наблюдаемые закономерности в природе, многие из которых со временем оформились в родившейся таким образом науке как законы природы. Будучи многократно подтверждены в эксперименте и математически формализованы, они дали направление детерминизму в науке, и вместе с ним иллюзию возможности точного предсказания. Использование гармонического анализа временных рядов разной природы с последующим восстановлением основных гармоник для целей их прогноза – следствие этого подхода. В общем случае такого рода *детерминированные* модели предусматривают представление рядов набором трендов, гармоник, полиномов, экспонент и их аддитивных и мультипликативных комбинаций.

Идеи детерминизма до сих пор не изжиты в научной среде, потому что в целом достаточно продуктивны. Многие процессы допускают представление их в виде линейных композиций вышперечисленных функций, наращивание параметров в них часто оправдано с практической точки зрения. Однако надежность с прогностической точки зрения даже небесной механики на масштабах миллионов лет уже не достаточна для солнечной системы в целом, не говоря уже об орбитах малых тел. Прогнозируя наблюдаемый процесс, мы всегда опираемся на предшествующую, часто непродолжительную зарегистрированную его часть. Из этого, кстати, следует необходимость всемерно поддерживать сеть обсерваторий астрономического и геофизического направлений, уже

имеющих долговременные ряды наблюдений и продолжающих их накапливать. Со временем различные непрерывные геофизические ряды наблюдений становятся всё более востребованными, и не только в науке.

Даже не принимая во внимание всегда присутствующие многообразные ошибки наблюдений и стохастичность практически всех природных процессов, всегда нужно помнить, что могут существовать компоненты циклического характера, превосходящие по продолжительности любой заданный интервал наблюдений. Модели, в которых на основе предшествующих наблюдений процесса оценивается и пролонгируется его *стохастическая* составляющая, образуют большой класс прогностических моделей. Любопытно, что столь часто используемый в прогностике термин «стохастический» имеет прямое отношение к прогностике. В переводе с греческого языка «стохастический» значит «умеющий угадывать».

Возвращаясь к методам прогнозирования, отметим, что помимо рассматриваемого в данной работе прогноза параметров вращения Земли (ПВЗ), существует обширная литература по прогнозам временных рядов, также имеющих геофизическое происхождение. Для сложных систем, к которым, безусловно, необходимо отнести большинство геофизических процессов, типично отсутствие характерных частот в спектре мощности процесса, что резко ограничивает возможности традиционного прогнозирования. Характерный для многих процессов степенной вид спектра мощности ряда (фликкер-шум) означает, что значительная часть его энергии связана с очень медленными процессами, для которых, как отмечалось ранее, невозможен прогноз ввиду непроявленности в данной реализации долговременных составляющих. В этом случае возможны огромные непредсказуемые флуктуации исследуемого ряда.

Эти проблемы в приложении к прогнозу геофизических полей, в частности, к прогнозу землетрясений более подробно рассмотрены в работе (Дещеревский и др., 2003). Вообще для сложных систем, характеризующихся нелинейностью и, как правило, невозможностью их детерминированного описания из-за сильной взаимообусловленности компонент, разрабатываются специальные методы прогноза, приведенные, например, в книге (Владимиров и др., 2000).

### Детерминированные модели

Для прогноза параметров вращения Земли может быть успешно применен классический подход, основанный на Фурье-анализе (FFT) исследуемых рядов. Гармоники, определяемые с помощью FFT, имеют определенный физический смысл и достаточно хорошо разделяются (аддитивны).

На рис.1, заимствованном на сайте IERS (<http://hpiers.obspm.fr/>), представлена декомпозиция (с помощью метода CENSUS X-11) Y-компоненты движения полюса на основные составляющие по сводному решению EOP(IERS)C01. Для демонстрации выбрана именно эта составляющая движения полюса, т.к. помимо квазигармонических чандлеровской и годичной компонент в ней отчетливо заметны линейный и полиномиальный тренды. Видно также, что остатки разложения не свободны от более слабых квазигармонических компонент.

На основании выбранных за определенный предшествующий интервал (временной лаг) гармоник находится наилучшая (в гауссовом приближении, т.е. с помощью метода наименьших квадратов - МНК) аппроксимирующая функция, которая и пролонгируется на выбранный интервал в будущее. Именно детерминированная модель стандартно используется в IERS (McCarty, Luzum, 1991) перед использованием авторегрессионного прогнозирования (см. следующий раздел). В нее включены полугодичная, годичная, чандлеровская и трендовые составляющие движения полюса, оцениваемые на предшествующем лаге в 6 лет. С недавнего времени (Kosek et al., 1998) помимо них стали включать в модель данные автоковариационной функции рядов ПВЗ.

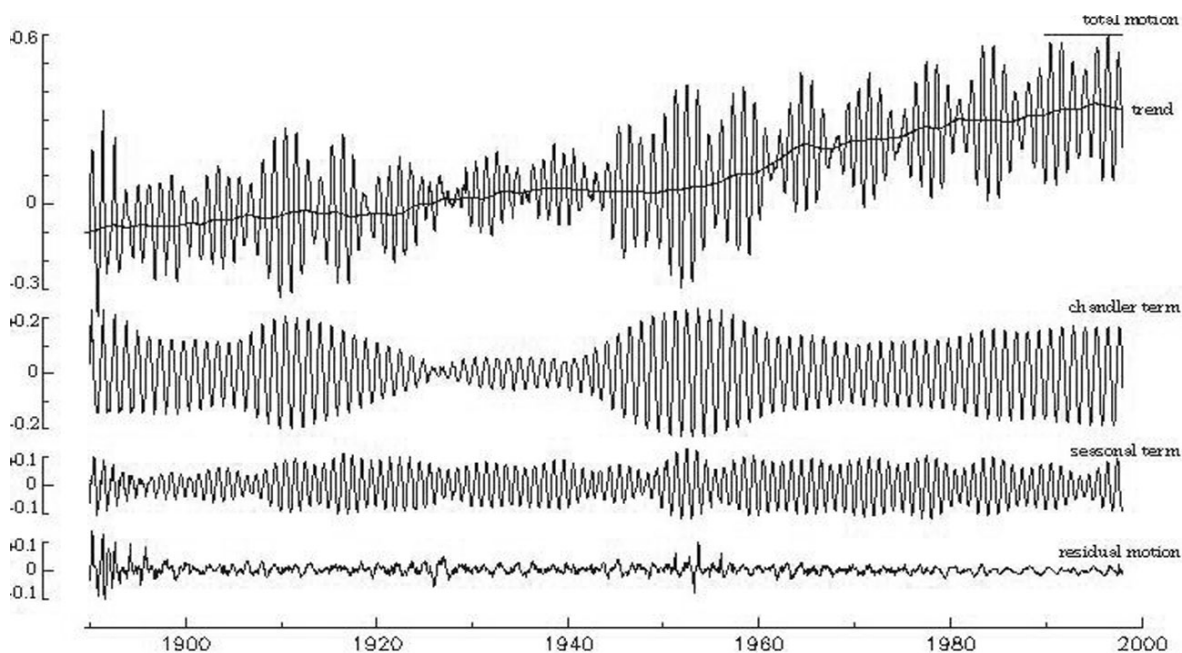


Рис.1.

Детерминированные модели для прогноза ПВЗ приведены, например, в работе (Акуленко и др., 2002). Модель строится на основе теоретического упрощенного представления о структуре Земли - двухслойный шар с абсолютно твердым ядром и вязкоупругой мантией. Существенное отличие теоретической модели авторов от общепринятой состоит в том, что годовое колебание полюса считается возбуждаемым не от сезонных геофизических процессов (атмосфера, океан и др.), а является результатом недоучтенного влияния суточных гравитационных приливов в деформируемой Земле. Несмотря на некоторую «революционность» этой модели, её теоретические аспекты никак не отразились на предложенной прогностической МНК модели. В работе стандартно использован линейный, годичный и чандлеровский компоненты и добавлен параметр, линейно меняющий амплитуду чандлеровского колебания со временем. Оценка параметров производится по предшествующим лагам в 6 и 12 лет. В частности, для 12-летнего интервала приводится следующая модель:

$$X(t) = -0.03935 + 0.000075 t + 0.030469 \cos 2\pi t + 0.06669 \sin 2\pi t + \\ + (0.03047 - 0.000496 t) \cos(2\pi\omega_c t) - (0.20456 - 0.0042036 t) \sin(2\pi\omega_c t)$$

$$Y(t) = 0.30798 + 0.002772 t - 0.06302 \cos 2\pi t + 0.02766 \sin 2\pi t + \\ + (0.19990 - 0.0038540 t) \cos(2\pi\omega_c t) + (0.02753 + 0.0001330 t) \sin(2\pi\omega_c t),$$

где  $\omega_c = 0.85$  циклов/год – частота чандлеровского колебания, время  $t$  – в годах.

На рис.2 представлены колебания полюса на интервале 1988-2002 для Y координаты полюса (EOP(IERS)C04 – сплошная линия). Пунктирная кривая – вышеприведенное аналитическое представление и основанный на наблюдениях в интервале 1988-2000 гг. прогноз на 2001-2002 годы.

Заметим, что почти все методы прогнозирования дают сбой в моменты экстремумов прогнозируемого ряда ПВЗ или в моменты затухания процесса. Подобный сбой часто возникает также, когда начальная точка прогноза задаётся вблизи этих моментов.

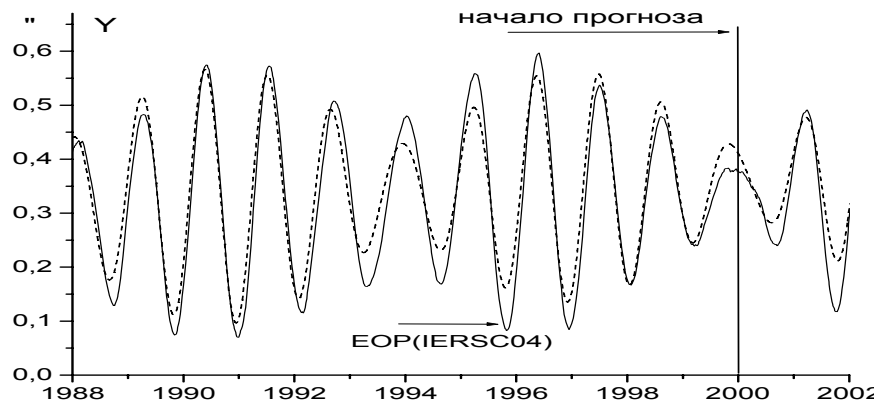


Рис.2.

В работе (Малкин, Скурихина, 1996) также отмечается, что для длительного прогноза (более трех месяцев) действительно наилучшим в смысле ср. кв. отклонения прогнозируемых от наблюдаемых значений является именно детерминированное представление ряда полугодичной, годичной и чандлеровской составляющими движения полюса с учетом полиномиального тренда. Из этого следует, что для рядов координат полюса нормально распределенная случайная составляющая имеет ограниченную таким сроком область применения.

### Модели авторегрессии и скользящего среднего

Наблюдаемая в рядах ПВЗ некоторая неаддитивность составляющих (перераспределение энергии между гармониками, их амплитудные вариации) также может быть интерпретирована с физической точки зрения. Однако она в совокупности с другими нелинейностями процесса ставит предел предсказуемости детерминированных моделей. Можно заведомо сказать, что реальный геофизический процесс рано или поздно выйдет за рамки любой такой модели. Однако и стохастические модели не имеют больших преимуществ, хотя и позволяют заранее оценить доверительный интервал прогноза. При этом, как правило, основные гармоники детерминированной модели предварительно исключаются из исследуемого ряда.

В большинстве случаев текущее значение ряда  $X_t$  может быть записано в зависимости от предыдущей его истории следующим образом:

$$x_t = \xi + \phi_1 x_{(t-1)} + \phi_2 x_{(t-2)} + \phi_3 x_{(t-3)} + \dots + \varepsilon_t,$$

где  $\xi$  – константа, а  $\phi_i$  – регрессионные параметры модели (попросту весовые коэффициенты),  $i = 1, 2, \dots, p$ . Таким образом, каждое текущее наблюдение состоит из линейной комбинации предшествующих наблюдений и случайного компонента  $\varepsilon$  на момент  $t$ . При этом данное модельное (авторегрессионное - АР) представление процесса устойчиво только в том случае, когда его параметры ( $\phi_i$ ) удовлетворяют условию конечности их суммы квадратов. В этом случае веса  $\phi_i$  должны уменьшаться достаточно быстро, чтобы ряд был стационарен. Так, для  $i = 1$   $\phi_1$  должно удовлетворять условию  $|\phi_1| < 1$ . Заметим, что при  $i = 1$  вышеозначенное выражение определяет марковский процесс, каждое текущее состояния которого полностью определяется предыдущим. В этом случае при  $\phi_1 \rightarrow 1$  ряд перегружен низкими частотами (трендует), а при  $\phi_1 \rightarrow -1$ , ряд сильно и быстро флуктуирует.

Помимо вышеописанного представления ряда, текущее его значение может зависеть также от ошибок каждого предшествующего элемента, что записывается в следующем виде:

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{(t-1)} - \theta_2 \varepsilon_{(t-2)} - \theta_3 \varepsilon_{(t-3)} - \dots,$$



где  $\mu$  – константа, а  $\theta_i$  – параметры модели *скользящего среднего* (СС),  $i = 1, 2, \dots, q$ . Таким образом каждое предшествующее наблюдение привносит некий случайный элемент в текущее значение ряда.

Согласно основополагающей работе по анализу и прогнозу временных рядов (Бокс, Дженкинс, 1974) между процессом авторегрессии и скользящего среднего существует обратимость, а именно: конечный процесс авторегрессии может быть записан как бесконечный процесс скользящего среднего, и наоборот. Поэтому при практическом моделировании ряда из соображений экономного его представления необходимо исследовать как АР, так и СС параметры модели. Однако искусство это не из простых, т.к. ошибки в выборе числа параметров АР и СС процессов приводят к быстрой расходимости прогностической модели. В случае стационарных процессов набор АР коэффициентов  $\phi_i$  полностью определяется автокорреляционными функциями с помощью алгоритма Уокера-Юла (Бокс, Дженкинс, 1974).

Для процессов со слабой нестационарностью, выражающейся в наличии трендов и сдвигов среднего, существует разновидность модели АРСС – авторегрессии и *проинтегрированного скользящего среднего* АРПСС (ARIMA в английской аббревиатуре). Суть этого метода состоит в том, что ряд, имеющий колебания среднего, после его трансформирования (дифференцирования один или несколько раз) становится стационарным и к нему может быть применена СС процедура. Однако для прогнозирования полученную СС модель необходимо, естественным образом, «вернуть на место» с помощью интегрирования, после чего прогнозный ряд может быть совмещен с рядом наблюдений.

В наиболее распространенных статистических пакетах (например, STATISTICA) почти всегда используется именно эта прогностическая модель. Это связано с тем, что заранее никогда не известно - имеет ряд смещения среднего или нет. Поэтому для «придания» ему стационарности предварительно исследуется продифференцированный ряд, например, на быстрое затухание автокорреляционной функции и другие критерии стационарности ряда. В случае прогноза движения полюса эта процедура практически эквивалентна удалению детерминированных гармонических составляющих, в то время как для прогноза скорости вращения Земли данная процедура уместна ввиду наличия долговременных полиномиальных трендов.

Некоторое усложнение прогностической модели для ПВЗ предложено в работе (Vondrak, 1989). В модель были включены возбуждающие функции атмосферного углового момента (ААМ в общеупотребительной английской аббревиатуре), регулярно вычисляемые несколькими метеорологическими центрами. Константы связи между ААМ и ПВЗ оцениваются при этом из наблюдений и используются совместно с ААМ функциями для экстраполирующего интегрирования движения полюса. Понятно желание свести прогноз фактически к детерминированному другими процессами поведению ПВЗ, в данном случае в зависимости от возбуждающих функций атмосферы, океана и, возможно, других глобальных геофизических процессов обмена моментами с твердотельной оболочкой Земли. Однако кажется сомнительным использование не менее трудно предсказуемого явления, каковым является динамика атмосферных процессов, океанические течения и т.д., для предсказания поведения ПВЗ. В работе (Kosek et al., 2001) исследуется, например, влияние течения Эль-Ниньо на прогностическую модель ПВЗ. Обусловленность ПВЗ многими глобальными процессами массопереноса имеет и обратную сторону. Поведение вектора вращения Земли, в свою очередь, возбуждает многие геофизические процессы, как, например, полюсной прилив, дискутируемое возбуждение сейсмичности и др. С этой точки зрения ни детерминированные, ни стохастические модели прогнозирования не адекватны реальности сложного процесса «жизни» геосистемы.

На рис.3 из работы (Vondrak, 1989) приведён пример прогноза на год вперед части ряда движения полюса на основе предыдущей трёхлетней реализации самого ряда и

ряда ААМ функций. В этой работе в детерминированную часть прогноза включены два дополнительных параметра, позволившие оценить с помощью МНК нестабильность и зависимость от амплитуды частоты свободной нутации Земли (чандлеровского движения полюса).

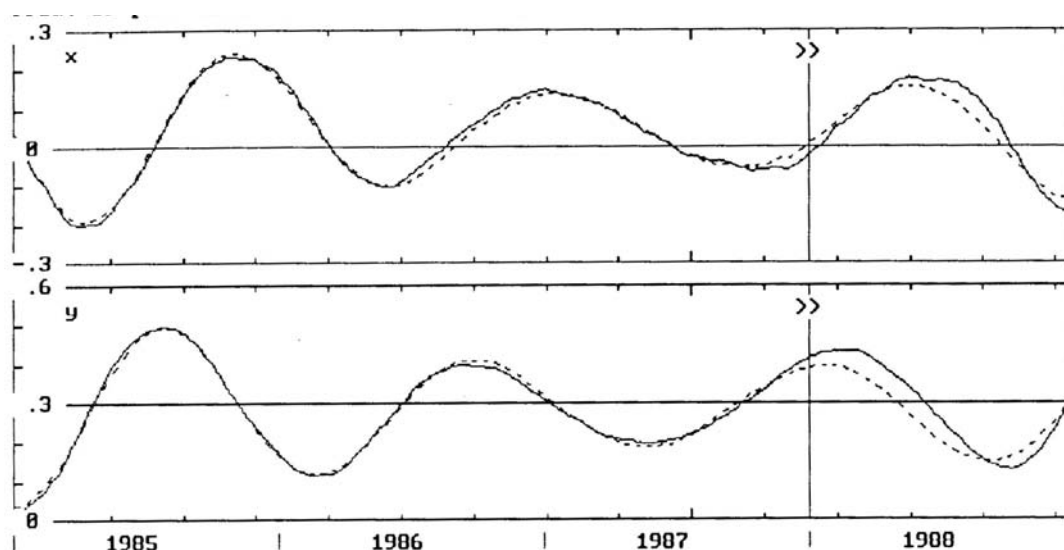


Рис.3.

Вообще необходимо заметить, что прогнозирование даже с помощью очень развитых методов всегда требует помимо опыта работы с реализацией конкретного процесса в виде временного ряда, некоторого неформального, по сути, эмпирического подхода по выбору того или иного количества тех или иных параметров модели. Так, например, в прогностических моделях из работы (Малкин, Скурихина, 1996) метод АРСС используется с разным количеством параметров для прогноза разной продолжительности: на 30 дней - АР(1) СС(5), до 90 дней - АР(1) СС(2), а для более продолжительного прогноза, как уже упоминалось, экстраполируется детерминированная составляющая.

### Рекуррентный прогноз на основе фильтра Калмана и средней квадратической коллокации

Состояние системы, непрерывно меняющейся во времени, в простейшем (линейном) случае описывается дифференциальным уравнением вида:

$$dx/dt = F_t x(t) + G_t \varepsilon(t),$$

где  $x(t)$  –  $m$ -вектор состояния системы,  $\varepsilon(t)$  – возмущающий систему случайный  $p$ -вектор (белый шум с нулевым средним значением). Матрицы  $F_t$  и  $G_t$  заданы и в общем случае зависят от времени. Обычно  $G$  – блочная единично-нулевая матрица. Общее решение этого уравнения, как следует из курса дифференциальных уравнений, распадается на два члена. Если не вдаваться в подробные выкладки, то первый из них описывает невозмущенное движение системы, исключительно зависящее от матрицы  $F_t$  (через переходную матрицу  $\Phi_t$ ), а второй обусловлен возмущающим воздействием и зависит от  $G_t$  и  $\Phi_t$ . Решение такого уравнения, используемое для динамического моделирования подобного рода систем, фактически, аналогично АР представлению:

$$x(t_{k+1}) = A(t_k) x(t_k) + B(t_k) \varepsilon(t_k),$$

где  $x(t_k)$  – вектор ( $m*1$ ) состояния системы,  $\varepsilon(t_k)$  – вектор ( $p*1$ ) возмущающего воздействия,  $A(t_k)$  – переходная матрица ( $m*m$ ) системы на шаге  $k$ ,  $B(t_k)$  – переходная матрица ( $m*p$ ) способа воздействия на систему. Считается, что эти матрицы заданы. При этом для построения матрицы  $A(t_k)$ , если из априорных соображений она не известна

(т.е. не известна собственно динамическая модель состояния объекта), достаточно знание только такой статистической характеристики процесса  $\mathbf{x}(t_k)$ , как его ковариационная функция.

Существенное отличие вышеприведенного уравнения от АР представления состоит в том, что на момент  $t_{k+1}$  система зависит только от предыдущего состояния. То есть это приближение достаточно только для марковских процессов. Именно в этом приближении работает рекуррентный прогноз на основе фильтра Калмана. В общем виде рекурсивный вид алгоритма Калмана записывается следующим образом:

$$\mathbf{x}^c(t_j) = \Phi(t_j - t_k) \mathbf{x}^c(t_k),$$

где  $j > k$ , а верхний индекс отмечает оценочное (прогнозируемое) значение величины  $\mathbf{x}(t_k)$ . Переходя к полной модели предсказания имеем (Petrov et al., 1996):

$$\mathbf{x}^c(t_j) = \Phi(t_j - t_k) \mathbf{x}(t_k) \Phi^T(t_j - t_k) + C(1 - \exp(-C_1(t_j - t_k))) I.$$

Здесь константы  $C$  и  $C_1$  определяются самим процессом (для ПВЗ эти константы являются функциями частоты свободного колебания полюса (чандлеровской), добротностью системы и спектральной плотностью возбуждающего процесса),  $I$  – единичная матрица. Отсюда обновленное состояние системы при априорном знании дисперсии процесса  $\sigma_n^2$  запишется через так называемую калмановскую матрицу усиления  $K(t) = \mathbf{x}^c(t) (\mathbf{x}^c(t) + \sigma_n^2 I)^{-1}$  следующим образом:

$$\mathbf{x}(t_j) = (I - K(t_j)) \mathbf{x}^c(t_j).$$

Применение более точного метода средней квадратической коллокации (СКК) для прогноза подробно описано в работе (Губанов, 1997а), а его использование в целях прогнозирования ПВЗ в работах (Губанов, Русинов, 1997b; Русинов, 1998). Основа метода – экстраполяция автоковариационной матрицы процесса, содержащей полную информацию о нем, в предположении стационарности самого процесса.

Как показано в работе (Губанов, 1997а), если автоковариационная функция прогнозируемого процесса неизвестна, то единственным способом прогнозирования остается применение фильтра Калмана, дающего грубое приближение корреляционной функции процесса. Естественно, что прогнозирование на основе фильтра Калмана имеет малый горизонт прогноза и поэтому используется, в основном, для краткосрочного прогнозирования. Однако в применении к прогнозу ПВЗ авторы работы (Petrov et al., 1996) не обнаружили значимых отличий применения калмановской фильтрации и метода СКК. Отмечено, что чисто в вычислительном плане применение фильтра Калмана значительно быстрее работает (в  $N^2$  раз, где  $N$  – длина реализации) и требует в  $N$  раз меньшей памяти, что, впрочем, естественно для рекурсивных методов.

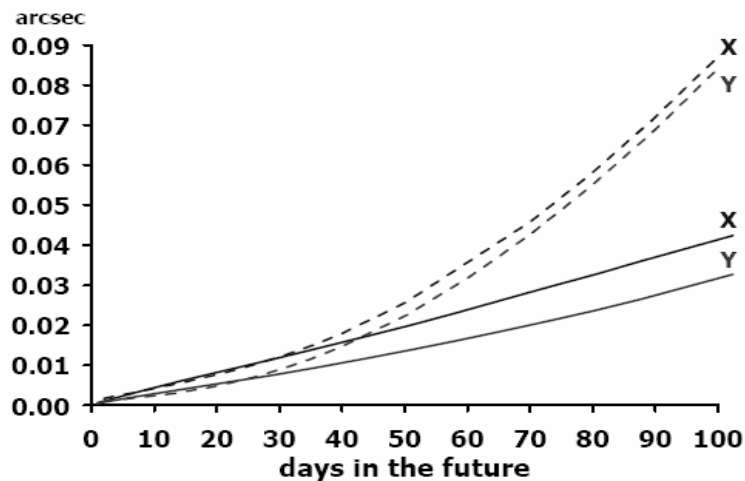


Рис.4.

В работе (Kosek, 2002) (рис.4) приведена ср.кв. ошибка прогноза для рекурсивного автоковариационного (сплошная линия) и рекурсивного Калмановского (пунктирная линия) методов. Видно, что для прогноза до 30-40 дней методы практически эквивалентны (с точностью до вышеупомянутого вычислительного преимущества фильтра Калмана), в то время как после этого периода точность фильтра Калмана значительно ухудшается.

### **Модели на основе сингулярного спектрального разложения**

Как уже отмечалось, все ряды параметров вращения Земли имеют нерегулярности, обусловленные климатическими глобальными явлениями, эндогенными процессами в недрах Земли и, вероятно, космическими причинами. Для исследования рядов такой нестационарной природы помимо динамического (оконного) спектрального и вэйвлет анализов используется также метод сингулярного спектрального анализа. Модификация этого метода на основе сингулярного спектрального разложения матрицы, заполняемой последовательными частями временного ряда выбранной длины ( $M$ ) приведена в работе (Данилов и др., 1997; (<http://www.gistatgroup.com/gus/>)). Подробное исследование возможностей данного метода для геодинамических приложений приведено в работах (Горшков и др., 2000; Воротков и др., 2002).

Данный метод позволяет по выбранным компонентам создавать продолжение ряда на  $L$  точек. При этом совершенно необязательно предварительно отделять стохастическую часть процесса от детерминированной. Однако длина лага (окна)  $M$  должна быть выбрана достаточной, чтобы приближенно обеспечить это разделение, т.е. разделение шумовой и информативной компонент. Этот момент в прогнозировании с помощью данного метода также надо отнести к полуэмпирическим. После этого по выбранному набору главных компонент с помощью диагонального усреднения получается восстановленный ряд, к последним  $M+L-1$  точкам которого затем применяется рекуррентная формула, сходная по виду с формулой АР процесса, но имеющая точную размерность  $M-1$ . Таким образом, характеристический полином для прогнозирования в точности равен базису разложения.

В зависимости от того, делается ли диагональное усреднение до или после продолжения ряда, различают рекуррентный и векторный прогноз. Близость этих прогнозов должна свидетельствовать об устойчивости полученного прогноза. Свойства диагонального усреднения таковы, что первые и последние члены ряда восстанавливаются с меньшей точностью (краевой эффект). Поскольку в рекуррентном прогнозе используются в качестве начальных данных последние  $M-1$  членов ряда, это может вызвать увеличение ошибок прогноза. В этом смысле векторный прогноз более консервативен, но менее адаптивен к меняющейся к концу ряда тенденции его поведения.

Вычислительный ресурс времени ССА, как и в СКК, пропорционален  $M^2$ . Однако это не единственный недостаток большого лага  $M$ . Чем больше  $M$ , тем одновременно больше размер характеристического полинома в рекуррентной формуле при прогнозировании, что может привести к появлению побочных корней полинома. Поэтому в этом методе выбор оптимального лага для конкретного ряда при его прогнозировании более существенен, чем при анализе. Строго говоря, то, что касалось конечности суммы квадратов коэффициентов  $\phi_i$  АР-процесса, в не меньшей степени относится и к методу СКК при продолжении автокорреляционной функции и к параметрам в рекуррентной формуле данного ССА метода. Чудес не бывает, дело только в операционном удобстве. Для ССА прогноза можно, например, заранее не беспокоиться о стационарности ряда, по виду и значимости главных компонент разложения можно оценить необходимое их количество для прогноза.

Поскольку прогноз на основе ССА до сих пор не применялся в геодинимической практике, продемонстрируем его возможности на ряде EOP(IERS)C04.

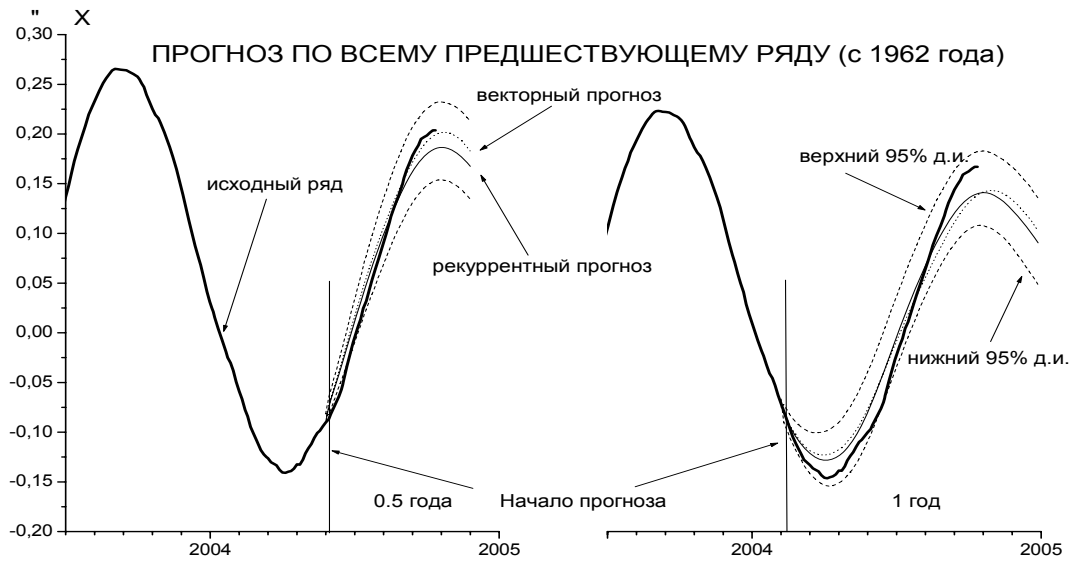


Рис.5.

Был сделан прогноз X-координаты полюса на полгода (рис.5, слева) и на год (рис.5, справа) ряда EOP(IERS)C04, предварительно приведенного на интервал 0,01 года. Использовался лаг в 6 лет. Восстановление ряда было осуществлено по 46 первым главным компонентам (все компоненты до 0.002%). Прогноз осуществлялся по известным на начало февраля (на год) и на начало июня 2004 года (на полгода) данным. Таким образом, моделировались реальные условия прогноза. Данные для сравнения выбраны на начало октября 2004 года.

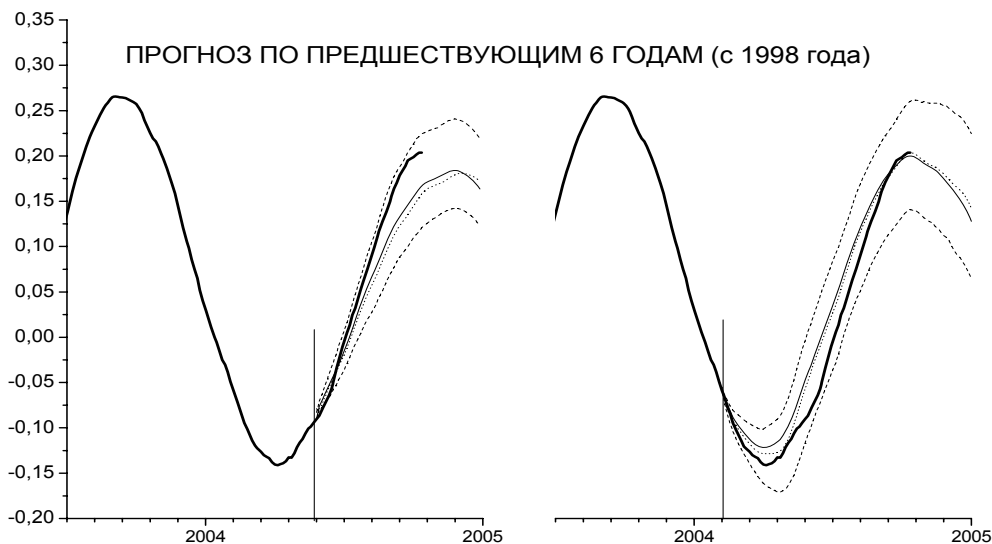


Рис.6.

Видно, что абсолютное максимальное отклонение прогноза достигается для моментов экстремумов кривой. Этот результат следует признать не очень хорошим, тем более что эта величина достигается именно на экстремуме ряда в ближайшие 40-50 дней прогноза. Аналогичный прогноз был сделан по 6-летней предшествующей части ряда с лагом в 3 года (рис.6). Качество прогноза в такой же степени удовлетворительное и не хуже приведенных выше прогнозов, как видно из рис.7.

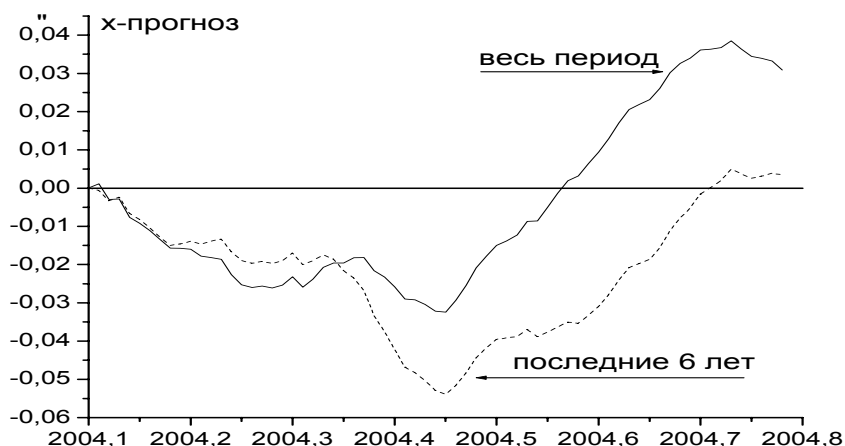


Рис.7.

В качестве более «трудного» прогноза приведем прогноз ряда продолжительности суток LOD этим же методом. Предварительно из рядов LOD были исключены все приливные члены, т.е. исследовался и прогнозировался ряд LODS. Помимо чётко выделяемых декадных и сезонных вариаций (99.5% мощности ряда) ряд имеет непрерывный спектр «шумовых» составляющих. Есть, однако, одна особенность в шумовых компонентах рядов ПВЗ, позволяющая «на глаз» определить порог между информационными компонентами и чисто наблюдательным (нормально распределённым) шумом. В 1987 году резко изменился состав наблюдательных средств ПВЗ, сопровождавшийся таким же резким, почти на порядок, повышением точности определения ПВЗ. В ССА компонентах с шумовым содержанием это разделение отчетливо заметно, что позволяет эмпирически отделять «зёрна от плевел».

На рис.8 слева дан прогноз ряда LODS на полгода вперед от начала октября 2004 года, а на рис.8 справа - сопоставление ряда, спрогнозированного с начала года до октября, с реальным рядом. Обозначения аналогичны рисункам 5-7. Ряд LODS также был предварительно интерполирован на каждые 0,01 года, лаг равен 6 годам ( $M = 600$ ), выбрана первая треть от общего числа компонент для прогноза.

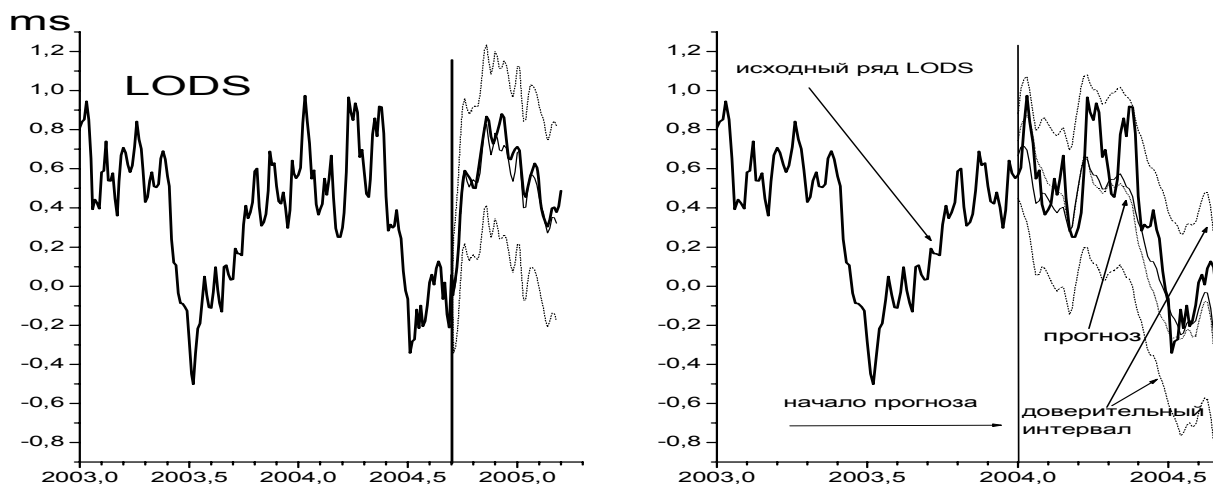


Рис.8.

Для сопоставления с IERS прогнозом были использованы данные из окончательного (finals2000A.all) решения (<http://maia.usno.navy.mil/bulletin-a.html>). Прогноз для LOD в этом решении отсутствует, поэтому был взят прогноз для ряда UT1-UTC, производная от которого и есть продолжительность суток. На рис.9 представлен прогноз на год вперед ряда UT1-UTC на основе всех данных наблюдений с 1.01.1999 по

21.10.2004. На этом интервале не вводилось дополнительной секунды, поэтому ряд не имеет скачков. Видно, что на полгода прогноз IERS и наш прогноз с помощью ССА близки, а в точке предполагаемого изгиба кривой резко расходятся.

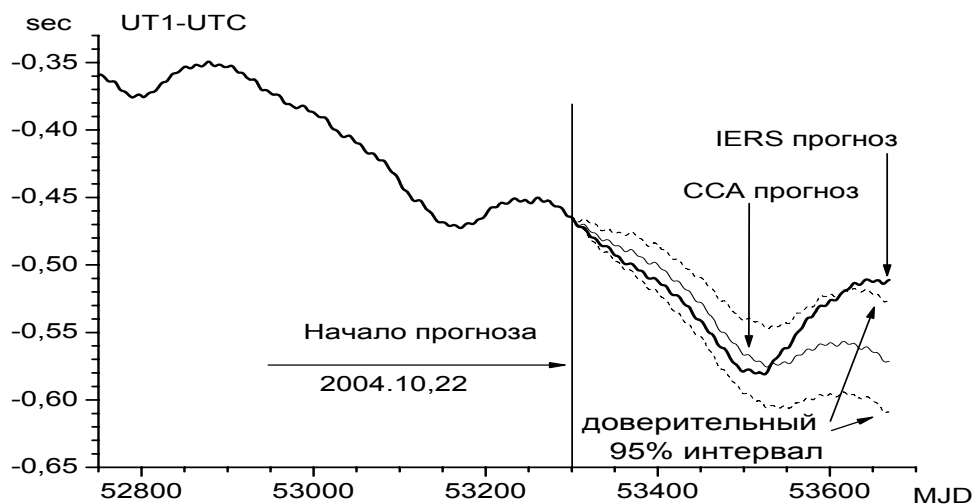


Рис.9.

### Прогноз среднего движения полюса

В области предсказания ПВЗ особняком стоит работа основоположника фрактальных исследований Мандельброта (Mandelbrot, McCany, 1970), посвященная исследованию векового и чандлеровского движения полюса. Работа касается в основном исследования движения среднего полюса и возможности его прогноза. Из трех возможных предположений о характере движения среднего полюса: 1) полюс движется детерминировано, 2) движения полюса есть стационарный процесс случайного колебания около фиксированного положения (спектр не зависит от частоты), 3) полюс свободно блуждает в результате суммарного воздействия последовательных толчков, т.е. совершает броуновское движение (спектр обратно пропорционален квадрату частоты), Мандельброт, на основе предложенной им методики (анализ кумулятивного ранга), делает вывод о промежуточном между белым шумом (2) и броуновским движением (3) характере движения полюса.

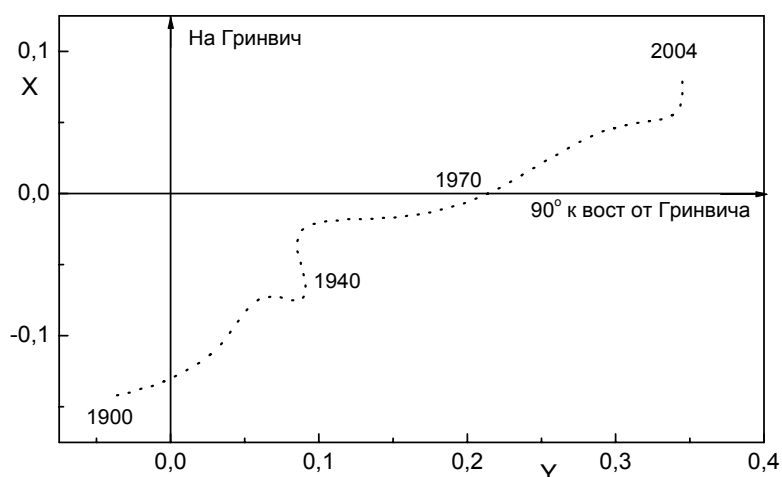


Рис.10.

Таким образом спектр движения среднего полюса обратно пропорционален первой степени частоты. Это означает, что такой процесс не стационарен, практически не усредняем и богат низкочастотными компонентами. В нашей работе (Горшков и др,

1998), охватывающей существенно больший интервал наблюдений, движение среднего полюса получилось всё же ближе к броуновскому. Для оценок использовался метод нормированного размаха. В прогностическом аспекте в любом случае это означает, что движение среднего полюса не прогнозируется. Следует отметить, что метод кумулятивного размаха не может быть отнесен к мощным методам исследования временных рядов ввиду качества достигаемых с его помощью выводов.

На рис.10 приведено движение среднего полюса по данным EOP(IERS)C01, выделенное методом ССА по наиболее значимым компонентам. В заметном нелинейном движении среднего полюса неоднократно пытались обнаружить гармоники, так называемые волны Марковица с периодом около 30 лет (одна из последних работ на эту тему – Schuh et al., 2001).

### **Нейронные сети**

Помимо вышеперечисленных существует бурно развивающийся метод прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей. В основе искусственных нейронных сетей лежит математическая модель функционирования разных типов нейронов. Помимо этого сами нейронные сети бывают разного вида и структуры. Нейронные сети необходимо настраивать, т.е. обучать на примерах выборочных рядов из того же процесса. Но существуют и самоорганизующиеся сети также разного типа. Под каждую задачу необходимо проектировать адекватную структуру сети – количество слоев сети, количество нейронов в каждом слое и связи между слоями.

Будучи спроектированной, нейронная сеть способна к обобщению полученной информации (знаний). Это означает, что сеть способна генерировать результаты при подаче на вход данных, относящихся к тому же процессу, но пока не участвовавших в процессе обучения. Эта способность возникает вследствие возможности сети кодировать различные комбинации ранее полученных входных данных. Способность сохранять информацию по прецедентам и при схожем проявлении ее прогнозировать – замечательное и многообещающее свойство нейронных сетей.

Этот способ прогнозирования может привести к значительным успехам в тех неформализуемых случаях, какой отмечался в примере со сбоями при прогнозе ПВЗ в периоды замирания сезонно-чандлеровских биений полюса. Однако работ в этой области прогнозирования для целей геодинамики пока единицы, а полученный результат практически эквивалентен IERS прогнозу (<http://www.cbk.waw.pl/~kosek/>).

### **Заключение**

В данном обзоре методы прогнозирования рассматривались на наиболее простом, с точки зрения построения модели, примере. Для других геофизических процессов такие простые, практически детерминированные модели находятся редко. В том случае, когда они обнаруживаются, исследователь вправе искать закономерность физического свойства. Однако случайность всегда проявляется в реальных процессах. За вычетом детерминированной составляющей в наблюдениях остается еще целый мир случайностей. В этом мире также существуют свои закономерности, выражающиеся в специфике функций распределения, в характерных особенностях спектров и т. д. Есть надежда, что поиск «закономерностей» в стохастическом мире когда-нибудь вернет первоначальный смысл слову стохастический – умеющий угадывать.

Идеи детерминизма неистребимы на каком-то глубоком, интуитивном уровне, подсказывающем, что в мире все взаимосвязано и даже то, что кажется случайным, имеет ряд скрытых от недостаточно просвещенного ума причин и следствий, строго ведущих к этому событию. Фактически это некое почти религиозное чувство, предполагающее наличие цели или плана, по которому складывается цепь событий. Придание единства, не случайности, скрытого смысла окружающему нас миру, делает его человеческим и приемлемым для проживания. Человек в этом случае находится не сбоку, сверху или снизу, а является частью мироздания, которое в этом случае не может быть ему враж-



дебным и, что более важно, ждёт такого же отношения от него. Наделяя изучаемый объект элементами субъекта, мы ставим *нравственный принцип* в науке на своё законное место.

Этот элемент чувства недооценивается наукой, обычно отстраняющейся от субъективности при «препарировании» объективной реальности. Тем самым искажается и сам исследуемый объект, т.к. при этом его связи, встроенность в систему частично усекаются и, в частности, искажается его прогнозируемая динамика. Это стало очевидным, например, при исследовании землетрясений, где роль антропогенного фактора давно ощутима (Knopoff L., Gardner J., 1972). В научную аксиоматику должно быть включено единство мира, как некий сходящийся процесс, как некий план, имеющий цель. С этой антропной точки зрения человек становится включенным в процесс и поэтому должен соотносить свои «эксперименты» с планом строительства общего дома. Осознание того, что мы не вне, а внутри, вовсе не ограничивает нашу свободу, но делает её более ответственной. Не всё нами осуществляемое разумно и не всё разумное с нашей точки зрения должно быть осуществлено без нравственной экспертизы. В этой связи задачи прогнозирования в широком плане должны иметь приоритет в науке.

### Литература

- Акуленко Л.Д., Кумакишев С.А., Марков Ю.Г., Рыхлова Л.В.**, Прогноз движения полюса деформируемой Земли, 2002, АЖ, т.79, № 10, с.952-960.
- Бокс Дж., Дженкинс Г.**, Анализ временных рядов, «Мир», 1974, т.1, с.407.
- Владимиров В.А. и др.**, Управление риском, «Наука», 2000, отв. ред. Макаров И.М., с.432.
- Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.**, Исследование основных составляющих в движении полюса земли, 2002, Изв. ГАО, № 214, с.406-414.
- Горшков В.Л., Миллер Н.О., Воротков М.В., Баушев А.Н.**, О персистентности параметров ориентации Земли, 1998, Изв. ГАО, № 213, с.269-272.
- Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я.**, Исследование геодинимических рядов методом главных компонент, 2000, Изв. ГАО, № 214, с.173-180.
- Губанов В.С.**, Обобщенный метод наименьших квадратов, 1997а, СПб «Наука», с.320.
- Губанов В.С., Русинов Ю.Л.**, Прогнозирование движения полюса методом СКК, 1997б, Сообщения ИПА РАН, СПб, № 109.
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А.** (ред.), Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница», 1997, СПбГУ, с.308.
- Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я.**, Флуктуации геофизических полей и прогноз землетрясений, 2003, Физика Земли, № 4, с.3-20.
- Малкин З.М., Скурихина Е.**, On prediction of EOP, 1996, Communications of IAA, СПб, № 93.
- Русинов Ю.Л.**, Прогнозирование ПВЗ методом СКК, 1998, Сообщения ИПА РАН, СПб, № 116.
- Knopoff L., Gardner J.**, Higher seismic activity during local night on the raw worldwide earthquake catalogue, 1972, Geophys. J. R. astr. Soc., 28, 311-313.
- Kosek W., McCarty D.D., Luzum B.J.**, Possible improvement of Earth orientation forecast using autocovariance prediction procedures, 1998, Journal of Geodesy, v.72, No 4.
- Kosek W., McCarty D.D., Luzum B.J.**, El Nino impact on polar motion prediction errors, 2001, Studia Geophysica et Geodaetica, v.45, p.347-361.
- Mandelbrot B.B., K. McCany**, On secular and chandlerian pole wobbles, Geophys. J.R. astr.Soc., 1970, v.21, p.217-232.
- McCarty D.D., Luzum B.J.**, Prediction of Earth Orientation, 1991, Bull. Geod., v.65, p.18-21.
- Petrov S., Brzezinski A., Gubanov V.**, A stochastic model for polar motion with application to smoothing, prediction and combining, 1996, Artificial Satellites, Planetary Geodesy, No 26, v.31, pp.51-70.

*Schuh, H.; Nagel, S.; Seitz T., Linear drift and periodic variations observed in long time series of polar motion, 2001, Journal of Geodesy, v.74, pp.701-710.*  
*Vondrak J., Prediction of polar motion from air and water excitations, 1989, Rep No 402 Dep. of Geodetic Science and Surveying the Ohio State Univ., p.60.*

## **ON FORECASTING METHODS IN GEODYNAMICS**

**Gorshkov V.L.**

### ***Summary***

*A short description of the methods for prediction of Earth parameter orientation is given. Some comparative analysis of the various forecasting tools is demonstrated with an example of IERS data.*

## ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

**Горшков В.Л., Воротков М.В.**

*Взаимодействие вынужденного (годового) и свободного (чандлеровского) колебаний полюса в рамках модели с нелинейным трением между внутренними оболочками Земли (Горшков, Воротков, 2002) должно приводить к периодически возникающим напряжениям в них и между ними. Сейсмический процесс возникает как следствие этих напряжений в той среде, где эти напряжения превысили сбросовый порог. На материале глобальных сейсмических баз данных IRIS и NEIC исследовано распределение сейсмических событий во времени, подтверждающие наличие особенностей распределения в соответствующей колебаниям полюса частотной области.*

### Введение

В области низкочастотных вариаций движения полюса Земли наиболее дискутируемым является вопрос о механизме возбуждения свободной нутации Земли (чандлеровской составляющей в движении полюса – ЧДП) с частотой  $\omega_c = 0.84$  цикл/год. В работах (Gross, 2000; Chao, Zhou, 1999) и др. показано, что суммарного атмосферного (ААМ), океанического (ОАМ) и водного баланса атмосферы и океана (гидрологического - НАМ) угловых моментов достаточно для возбуждения и поддержания ЧДП при существующих оценках добротности ( $Q \approx 100$ ) внешних оболочек Земли. Оценки проводились с использованием соответствующих геофизических возбуждающих функций  $\Psi_i$  в уравнениях движения мгновенного полюса Земли (Манк, Макдональд, 1964):

$$\begin{aligned}(1/\omega_c) dm_1/dt + m_2 &= \Psi_2 \\ (1/\omega_c) dm_2/dt - m_1 &= -\Psi_1\end{aligned}$$

Заметим, что в большинстве вышеперечисленных геофизических моделей возбуждения свободной нутации не находит объяснения факт значительной переменности амплитуды ЧДП и изменение его фазы в 30-х годах прошлого столетия. По-видимому, должны существовать относящиеся к внутренним слоям Земли механизмы, модулирующие соответствующую динамику ЧДП.

В работе (Горшков, Воротков, 2002) проведен численный эксперимент, конкретизирующий возможность возбуждения свободной нутации сезонными вариациями движения полюса на основе модели с нелинейным трением между слоями Земли, проявляющимся на близких к году частотах. В этой модели предполагается, что:

- Суммарное воздействие угловых моментов ААМ, ОАМ и НАМ достаточно для возбуждения и поддержания сезонных вариаций движения полюса в многослойной, обладающей экваториальным избытком Земле.
- Обмен моментами движения происходит от внешних к внутренним слоям Земли и, следовательно, сезонный компонент является задающей частотой в модели.
- Внутренние оболочки Земли взаимоподвижны, и на границах их разделов происходит переменное (нелинейно-селективное) трение, обусловленное состоянием вещества в зоне контакта (проявление ползучести или скольжения).
- Вязко-упругие свойства Земли задаются в модели только вариациями добротности и вышеозначенного трения.

Таким образом, вынужденная (возбужденная вышеприведенными угловыми моментами) годовая компонента колебания полюса рассматривалась как геофизически заданный нормированный процесс ( $\Psi_{an}$ ), возбуждающий свободную нутацию Земли. В

данной модели внешний слой Земли (кора, литосфера) является передаточным звеном, трансформирующим приложенный к нему момент к нижележащим слоям. Благодаря тому же трению этот внешний слой в определенной степени участвует и в возбужденной этим механизмом свободной нутации Земли.

Предложенный механизм сродни автоколебательному процессу, возникающему в маятнике Фруда (W.Froude) (Мандельштам, 1972) под действием подкачки энергии через нелинейное трение в оси вращения маятника. В маятнике Фруда скорость вращения оси, на которую через втулку подвешен маятник, несколько превышает скорость колебания самого маятника. Поэтому при совпадении вращения оси маятника и самого маятника происходит увеличение кинематического трения за счет уменьшения взаимной скорости между втулкой и вращающейся осью и, таким образом, осуществляется соответствующая подкачка энергии в процесс колебаний. В нашей модели мы имеем двумерный аналог этого маятника с некоторым усложнением механизма трения между слоями. В реальной Земле также существует последовательное от периферии к центру ускорение вращения слоев (Song, Richards, 1996; Smith, Lewis, 1998)

При моделировании в уравнениях движения мгновенного полюса Земли использовалась безразмерная возбуждающая функция  $\Psi = (1 + S * Cov) \Psi_{an}$ . Здесь параметр  $S$  задает степень нелинейности (“избирательности”) передачи возбуждающего момента и таким образом регулирует сцепление слоёв Земли в зависимости от состояния вещества в зоне их контакта. Функция  $Cov = d(an)/dt * d(ch)/dt$ , где  $an$ ,  $ch$  - годовая и чандлеровская составляющие в движении полюса, определяет соотношение фаз годового и свободного колебаний полюса и играет роль реального почти гармонического модулятора в этой модели. При  $Cov > 0$  свободное и вынужденное движение полюса синфазны.

Наиболее дискуссионным с точки зрения применимости этой модели к данному слою является состояние вещества в нем. Температура (и давление) на границе Мохо не «дотягивают» до возможности проявления установившейся ползучести<sup>1</sup> вещества в этом слое и, следовательно, возможности использовать предложенный механизм. Однако в переходном слое между литосферой и верхней мантией уже можно предполагать проявление не только установившейся ползучести, но и, возможно, диффузионной ползучести ( $T > 0.85 T_p$ ) (Жарков, 1983). Дополнительным аргументом в пользу приемлемости этой модели является флюидонасыщенность верхней мантии, играющая роль смазки. В этом случае взаимоподвижность слоёв может обеспечиваться и при меньших температурах. Если толщина переходного слоя, где проявляется действие этого механизма, порядка 50-100 км, то скорость ползучести должна составлять от долей миллиметра до миллиметра в год на метр толщины в рамках предложенного механизма, что не противоречит геофизическим данным.

Помимо границы литосфера-астеносфера существуют еще границы раздела между мантией, жидким ядром и внутренним ядром. Однако эти слои, более соответствующие предложенному механизму с точки зрения влияния трения и скорости взаимного вращения (скорость вращения внутреннего ядра относительно мантии по некоторым оценкам доходит до 5 град/год), имеют, вероятно, ничтожный вклад с точки зрения передачи момента движения (Huang, Dehant, 2001).

Если рассмотренный гипотетический механизм поддержки собственных колебаний Земли действительно существует, то очевидным следствием периодически возникающих напряжений должен быть сейсмический отклик на них в той среде, где эти напряжения превысили сбросовый порог. Данная работа посвящена поиску регулярной составляющей сейсмического отклика на колебания полюса, что отражено в научных

---

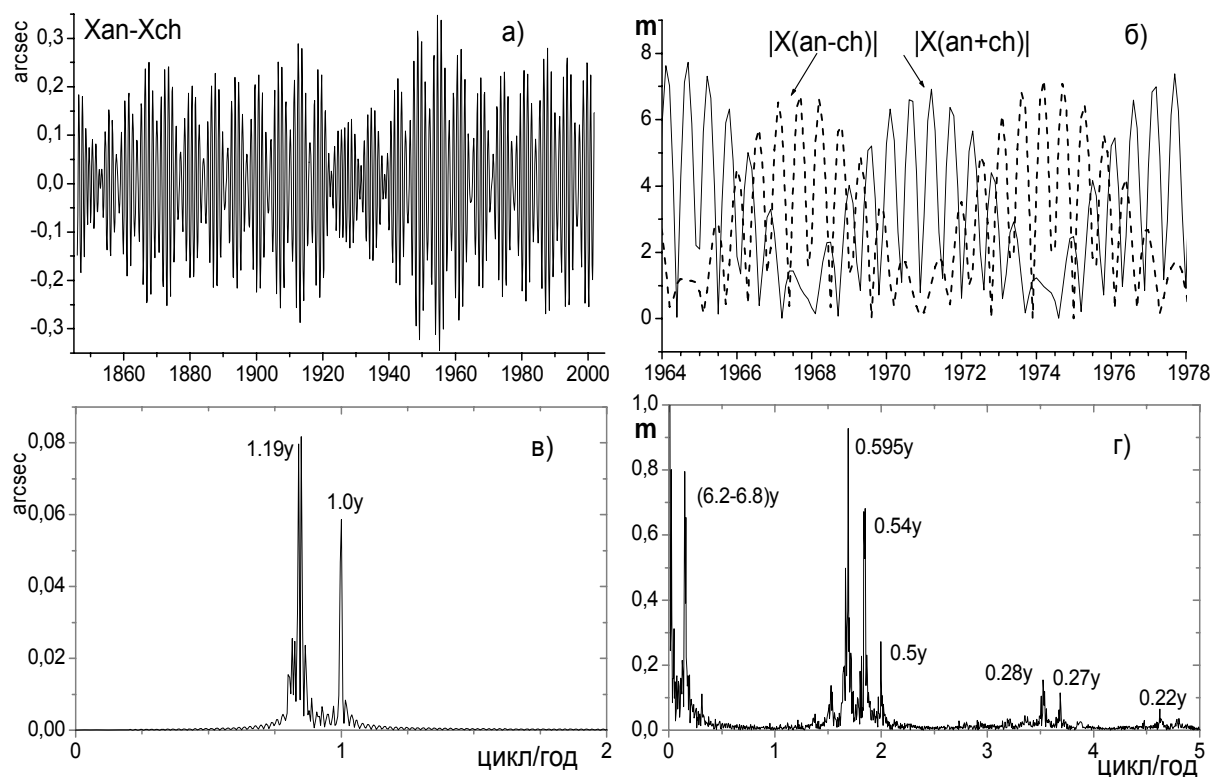
<sup>1</sup> Ползучесть – медленное неупругое течение вещества под постоянной нагрузкой. Установившаяся ползучесть характеризуется постоянной скоростью при фиксированной нагрузке и проявляется при температурах ( $T$ ), превышающих половину абсолютной температуры плавления ( $T_p$ ).

исследованиях в значительно меньшей степени, чем связь сейсмической активности и неравномерности вращения Земли.

### Постановка задачи и методы ее решения

Наиболее естественным при рассмотрении предложенного механизма возбуждения представляется взаимодействие литосферы, принимающей на себя сезонные нагрузочные и динамические воздействия, и астеносферы, использующей эти сезонные возбуждения для поддержания свободной нутации Земли в целом. При этом, разумеется, литосфера вовлечена и в суммарный колебательный процесс. Большая вязкость этого слоя под континентами, чем под океанами (в 6-8 раз), делает ещё более неоднородным поле относительных перемещений, что с неизбежностью приводит к возникновению дополнительных напряжений.

Влияние колебаний полюса на сейсмический процесс не зависит от направления смещений. Следовательно, предполагаемый механизм будет порождать поток сейсмических событий с удвоенной частотой исходного геодинамического процесса. На **рис.1а** приведены разности годового и чандлеровского колебаний полюса по координате  $X$ , выделенные из данных EOP(IERS)C01 (<http://hpiers.obspm.fr/>) с помощью сингулярного спектрального анализа (SSA) (Данилов, Жиглявский, 1997). На **рис.1б** для части данных приведены абсолютные значения этих разностей и самой составляющей  $X=X_{an}+X_{ch}$ . На **рис.1в** и **1г** приведены амплитудные спектры соответствующих рядов. Для координаты  $Y$  верхние графики будут смещены на половину периода, а спектральные оценки, естественно, не изменятся. Спектр, подобный представленному на **рис.1г**, следует ожидать и в распределении сейсмических событий в рассматриваемом нами случае.



**Рис.1.** а) Разность годового и чандлеровского компонента в движении полюса в дуговых секундах; б) поведение абсолютной величины этой разности для части ряда (в метрах), отражающее возникающие напряжения; в) и г) амплитудные спектры соответствующих рядов.

Следует заметить, что вид, подобный **рис.1а**, имеет и само движение полюса, за исключением смещения фазы пульсаций. Следовательно, сейсмический отклик на предполагаемый механизм закачки энергии в соответствующий слой Земли будет отличаться от возможного отклика на общее колебательное движение полюса только фазой, что хорошо заметно на **рис.1б**. Раскачка полюса происходит тогда, когда годовое и чандлеровское движение полюса синфазны. Но именно в это время взаимное движение этих составляющих, а, следовательно, и предполагаемая подвижность слоёв минимальны.

Предложенный механизм взаимодействия слоёв будет вызывать также своеобразный ритм пространственного распределения напряжений, который также можно попытаться обнаружить в сейсмических данных. Однако значительные региональные особенности проявления сейсмичности (субдукция, спрединг и др.), сильная их специфика из-за фор- и афтершоковых событий (Арефьев, 2002) и глобальная неполнота сейсмических баз данных в части слабых землетрясений не позволяют надеяться получить надежный результат.

В статистических исследованиях сейсмического процесса, как правило, используются в разной степени сглаженные гистограммы распределения сейсмических событий. Этот подход, вполне естественный ввиду дискретной природы сейсмических рядов, позволяет приводить исследуемые величины к осредненным на равномерной сетке данным для последующего анализа полученных таким образом временных рядов.

На основе гистограмм можно строить достаточно информативные динамические (с разверткой во времени) портреты сейсмического процесса. Выборки из нескольких сотен элементов вполне представительны для оценок статистических моментов высоких порядков, различных функций распределения и спектральных оценок. Плотность же регистрируемых землетрясений такова, что сотня событий в глобальном масштабе накапливается за считанные дни. Использование динамического подхода, т.е. исследование вариаций во времени тех или иных стохастических характеристик ряда, особенно важно ввиду нестационарности большинства геофизических процессов.

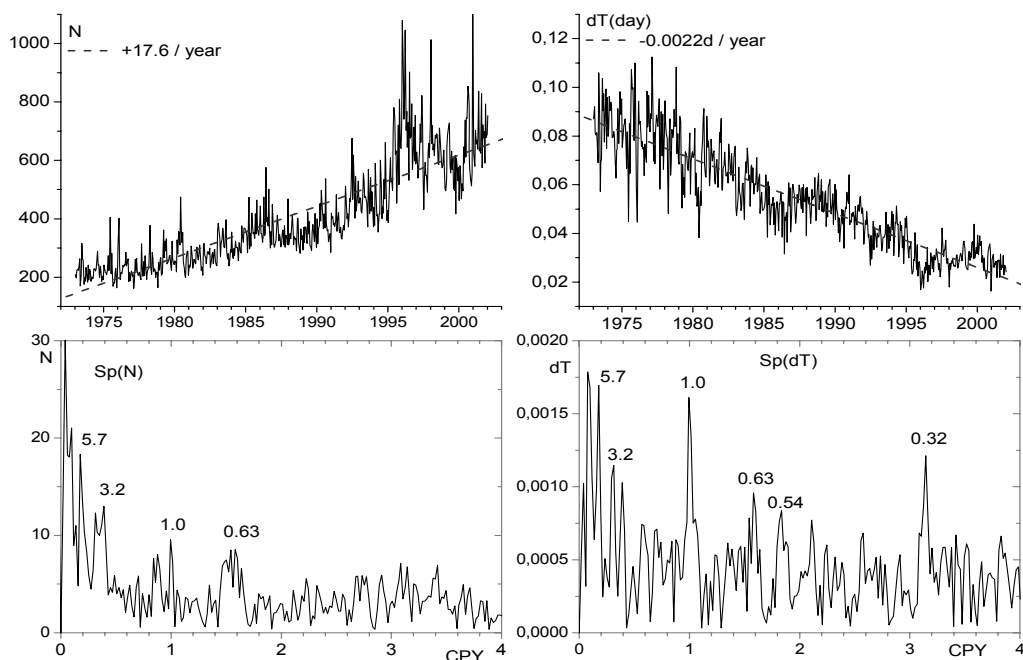
Помимо перечисленных выше параметров, использовавшихся при исследовании сейсмичности, полезно исследовать такую стохастическую характеристику, как персистентность (устойчивость в сохранении тенденций). Параметр персистентности  $H$ , оцениваемый методом нормированного размаха, является устойчивым по отношению к варьированию типа распределения приращений процесса. На этом основании по оценке  $H$ , полученной для некоторого временного ряда, делают вывод о наличии персистентности ( $H > 0.5$ ), её отсутствии ( $H \approx 0.5$ ) или о наличии антиперсистентности ( $H < 0.5$ ) в данном временном ряде. Значению  $H = 0.5$  соответствует ряд с независимыми приращениями (пуассоновское распределение для сейсмического процесса). Если же  $H \neq 0.5$ , то приращения процесса стохастически зависимы, причем значениям  $H > 0.5$  отвечает положительная корреляция приращений, а значениям  $H < 0.5$  – отрицательная.

Динамика поведения персистентности  $H(t)$  глобального сейсмического процесса должна отражать влияние в такой же степени глобальных воздействий, которые нарушают наметившиеся тенденции в проявлении сейсмической активности Земли. Здесь существенна именно глобальность оценок, т.к. проявление сейсмичности в том или ином регионе может иметь индивидуальную динамику, о чём выше уже упоминалось. Региональная сейсмичность также может быть исследована на персистентность, однако при этом трудно соблюсти репрезентативность последовательных выборок.

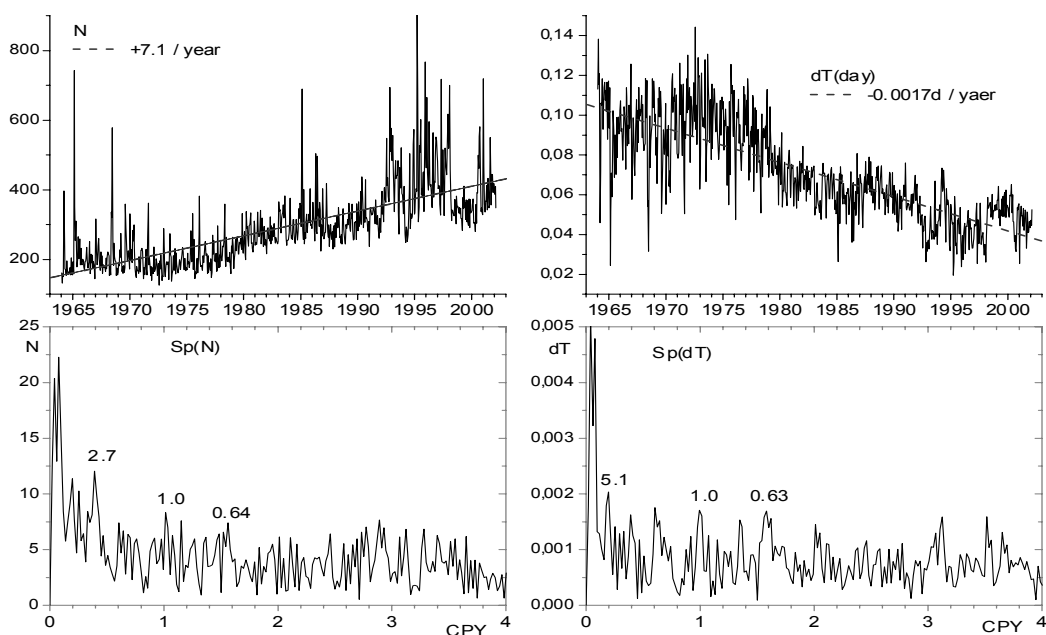
### Данные и их анализ

В работе использовались глобальные сейсмические базы данных IRIS (1964-2001гг.) (<http://www.iris.washington.edu/>) и NEIC (<http://wwwneic.cr.usgs.gov/neis/>) (1973-

2001 гг.). Обе базы полны в целом с магнитуды  $M > 4.5$ . Исследовались все данные за исключением поверхностных событий (с глубиной очагов 0 км) для избежания попадания в статистику антропогенных событий. Всего было использовано в базе IRIS 221 тысяча событий ( $M > 4$ ), а в базе NEIC 232 тысячи ( $M > 3$ ). Сейсмические данные за более ранние периоды (и даже IRIS до 1970 годов) сильно не полны в области слабых землетрясений и поэтому в исследовании не использовались. Интенсивность сейсмического процесса имеет сильный тренд, обусловленный в основном модернизацией аппаратуры и расширением сети сейсмостанций. В данном исследовании предполагался линейный характер «технического» роста сейсмичности, что не отражается на оценке результатов в интересующей нас частотной области.



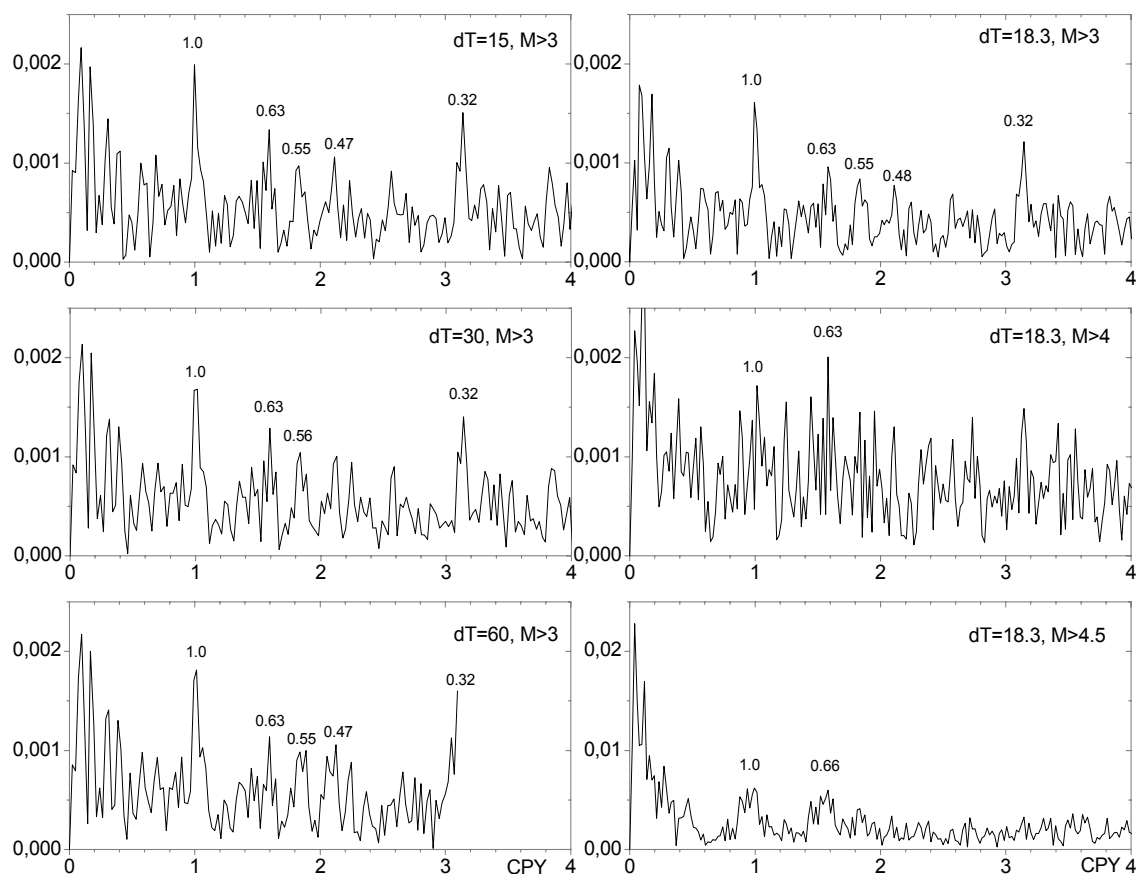
**Рис.2а.** Гистограммы распределения землетрясений и интервалов между ними (вверху) и соответствующие им амплитудные спектры (внизу) сейсмической базы NEIC. Частоты в циклах за год. Над значимыми пиками спектров указаны периоды в годах.



**Рис.2б.** Аналогично рис.2а для сейсмической базы IRIS.

На **рис.2а** и **2б** представлены в виде гистограмм с разрешением 0,05 года количество событий  $N$  и средние интервалы  $dT$  баз NEIC и IRIS соответственно. Размер выборок с таким разрешением регулярно растет от  $n > 150$  в 1964 году до  $n > 1000$  в конце исследуемого периода, что позволяет производить достоверные оценки любых статистических параметров. Видно, что более детальная база NEIC дает более выраженные спектральные характеристики, в целом совпадающие в обеих базах. Заметим, что спектральные оценки полученных таким же образом для рядов асимметрии и эксцесса этих баз также дают значимые всплески примерно на тех же периодах 0,7, 0,57, 0,52 года.

Для проверки устойчивости спектральных оценок  $dT$  в зависимости от размера выборки использовались непересекающиеся лаги  $L = 15, 30$  и  $60$  дней из базы NEIC. Зависимость оценок от магнитуды исследовалась по этой же базе для магнитуд  $M > 3, M > 4$  и  $M > 4.5$ . На **рис.3** видно, что устойчивые группы спектральных полос с периодами, характерными для **рис.2**, практически не зависят ни от размера выборок, ни от величины магнитуд в выбранных пределах. Более выделен годичный компонент, который может возбуждаться многообразными сезонными и приливным факторами, и совершенно отсутствует проявление более мощного, чем годичный чандлеровского компонента движения полюса.



**Рис.3.** Амплитудные спектры интервалов между землетрясениями ( $dT$  в днях) из базы NEIC в зависимости от размера выборки (слева) и от магнитуды землетрясения (справа).

Была также исследована зависимость спектральных оценок от глубины сейсмических событий. Наиболее надежные оценки получены для глубин от 30 до 100 км, что объясняется абсолютным максимумом событий на этих глубинах.

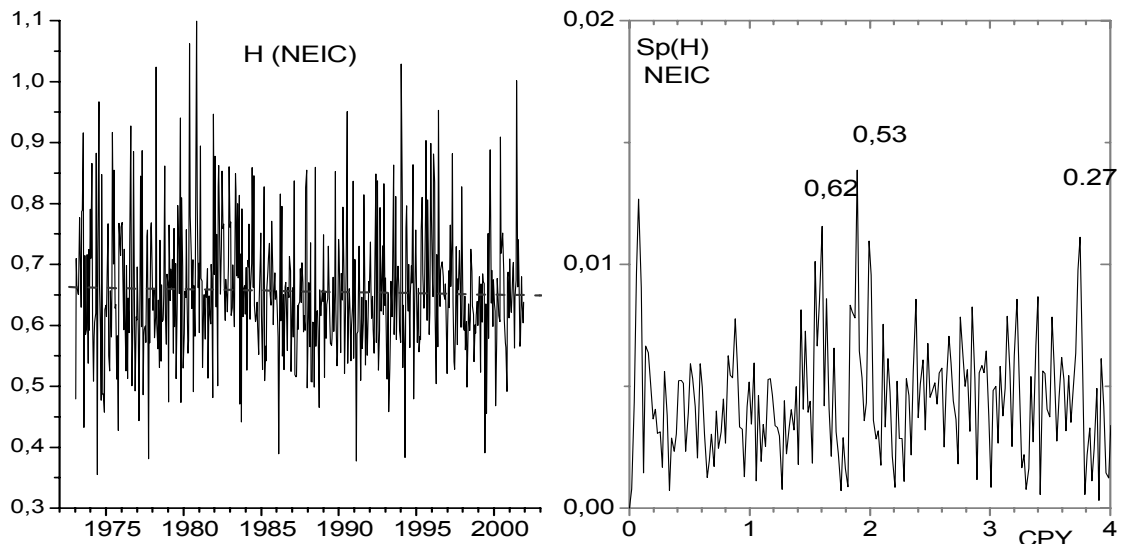
Методом  $R/S$  анализа исследовалась динамика поведения персистентности интервалов между отдельными сейсмическими событиями рядов. Как и предполагалось ряд сейсмических событий в целом является классическим примером персистентного



процесса с параметром  $H = 0.773 \pm 0.004$  для базы IRIS и  $H = 0.744 \pm 0.005$  для базы NEIC. Для исследования динамики поведения персистентности для обеих баз были посчитаны ряды параметров  $H$  с использованием различных лагов. Ввиду устойчивости спектральных оценок  $H$  в зависимости от размера лага, в дальнейшем использовался лаг  $L = 0.05$  года.

На **рис.4** приведена динамика параметра  $H$  для базы NEIC и амплитудный спектр полученного ряда. Возрастание  $H$  свидетельствует об увеличении времени устойчивого развития процесса (т.е. глубины «памяти») и наоборот. В случае гармонического изменения параметра  $H$  можно говорить о периодической структуризации сейсмического процесса внешним фактором при возрастании  $H$  и наоборот. Заметим, что параметр  $H$  не содержит значимых годового и чандлеровского компонента движения полюса, но имеет заметный всплеск на искомым частотах.

Отметим также, что на частоте в треть года имеется заметный пик, видный также на предыдущих рисунках. Видно, что эта гармоника проявляется только на слабых землетрясениях. Требуется дополнительного исследования также факт незначительно, но устойчиво большей частоты (0.63-0.64 циклов в год) в исследованных характеристиках сейсмического процесса по сравнению с искомой (0,59).

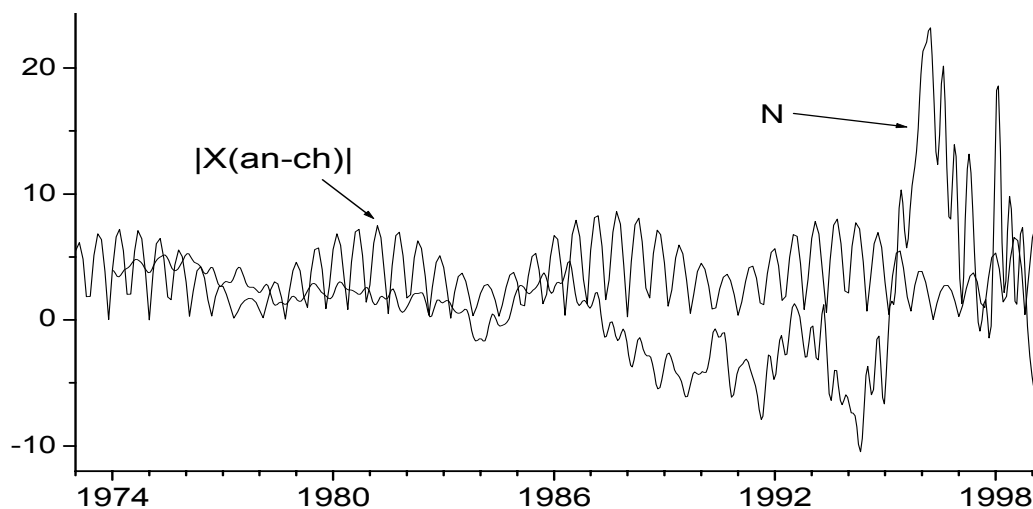


**Рис.4.** Развертка параметра персистентности с лагом 0.05 года для базы NEIC (слева) и её амплитудный спектр (справа).

Из анализа всех приведенных спектральных оценок видно, что гармонические компоненты дают незначительный вклад в общий сейсмический процесс, однако имеют специфику в области полугодных частот, возрастающую с повышением порога чувствительности к слабым землетрясениям (от IRIS к NEIC). Кроме того, в сейсмическом процессе имеется существенная низкочастотная составляющая.

С помощью сингулярного спектрального анализа по гистограмме с разрешением 0,05 года были восстановлены основные компоненты интенсивности сейсмического ряда NEIC. После снятия линейного тренда (96% мощности ряда) сумма следующих по значимости квазигармонических компонент представлена на **рис.5** в масштабированном и смещенном виде для сопоставления с «порождающим» в рамках рассматриваемой гипотезы рядом  $|X_{an} - X_{ch}|$  из **рис.16**. Высокочастотная составляющая (около полугода) удовлетворительно согласуется с соответствующей гармоникой ряда  $|X_{an} - X_{ch}|$ , в то время как квазипятилетние составляющие явно нестационарны, особенно в конце реализации, что, как уже упоминалось, обусловлено периодической модернизацией ап-

паратуры, изменением конфигурации сети сейсмостанций и проведением исследовательских кампаний. Поэтому делать выводы о фазовых совпадениях с рядом  $|X_{an} - X_{ch}|$  преждевременно.



**Рис.5.** Сопоставление ряда  $|X_{an} - X_{ch}|$  (в метрах) с восстановленным по первым значимым (не трендовым) гармоникам ряда сейсмических событий NEIC (смещён и уменьшен в 10 раз).

Таким образом, можно заключить, что предполагаемое влияние рассмотренного механизма возбуждения ЧДП на сейсмический процесс уверенно прослеживается в области полугодичных гармоник, однако обнаружить фазовые совпадения этих процессов затруднительно. При уверенном расширении сейсмических баз в область слабых землетрясений эта проблема может быть решена. Наиболее выразительным результатом является практическое совпадение спектра динамической развертки персистентности ( $H$ ) со спектром «порождающего» процесса  $|X_{an} - X_{ch}|$ , что свидетельствует о наличии периодической структуризации или возрастании обусловленности сейсмического процесса на этих частотах внешним фактором.

### Литература

- Арефьев С.С.**, Форшоки, афтершоки и рои землетрясений, *Физика Земли*, 2002, № 1, с.60–77.
- Горшков В.Л., Воротков М.В.**, Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли, *Изв. ГАО РАН*. 2002. № 216, с.415-425. (<http://gao.spb.ru/>)
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А.** (ред.), Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». СПбГУ. 1997. с. 308. (<http://www.gistatgroup.com/gus/>)
- Жарков В.Н.**, Внутреннее строение Земли и планет, М., Наука, 1983, 415 с.
- Манк У., Макдональд Г.**, Вращение Земли, Мир, М., 1964, 385 с.
- Мандельштам Л.И.**, Лекции по теории колебаний, М., Наука, 1972. 470 с.
- Chao B., Zhou Y.**, Meteorological excitation of interannual polar motion by the North Atlantic Oscillation, *J. of Geodynamics.*, 1999, v.27, p.61-73.
- Gross, Richard S.**, The excitation of the Chandler wobble, 2000, *Geophys. Res. Let.*, vol. 27, No.15, pp.2329-2332.
- Huang C., Dehant V.**, Is the differential rotation detectable from Earth nutation?, 2002, in the Proceedings of the *Journées Systemes de Reference Spatio-temporels*, 2001, N. Capitane (ed), Observatoire de Paris, pp.20-27.
- Smith A., Lewis C.**, Differential rotation of lithosphere and mantle and the driving forces of plate tectonics, *J. Geodynamics*, 1998, v.28. p.97-116.

**Song X.D., Richards P.G.**, Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core, 1996, Nature, 382, p.221-224.

## **POLAR MOTION DYNAMICS AND SEISMIC PROCESS**

**Gorshkov V., Vorotkov M.**

### ***Summary***

*The interaction of forced (annual) and free ( Chandlerian) pole oscillations within the framework of model with nonlinear friction between internal shells of the Earth should reduce to oscillations stress in them and between them. The seismic process has to arise as a consequence of these stress. On the global seismic databases IRIS and NEIC the distribution of seismic events is investigated. There is confident correlation between seismic process and pole motion.*

## ПРОЯВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В СЕЙСМИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ РЯДАХ ЗЕМЛИ

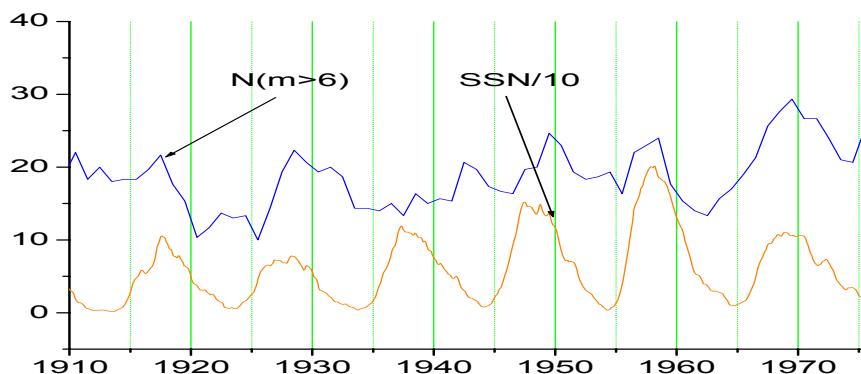
Горшков В.Л., Воротков М.В., Миллер Н.О.

*На основе современных баз сейсмических (NEIC и IRIS) и атмосферных (NCEP) данных исследована статистическая связь структурных особенностей распределения во времени сейсмических и атмосферных рядов с солнечной активностью.*

*С ростом солнечной активности происходит слабый спад интенсивности сейсмического процесса, уменьшается вероятность возникновения роев сейсмических событий и распределение интервалов между сейсмическими событиями становится практически пуассоновским, что в целом свидетельствует об общей деструктуризации рядов сейсмических событий. Для атмосферных рядов (поверхностное давление и процент облачного покрова) результаты не столь однозначны и требуют дальнейших исследований.*

### Введение

Модуляция глобальной сейсмичности Земли солнечной активностью – один из спорных аспектов солнечно-земных связей. Известна работа А.Д. Сытинского (1987), в которой для обоснования обусловленности сейсмического процесса солнечной активностью использовались энергетические характеристики сейсмичности в сопоставлении с числами Вольфа и моменты сильных землетрясений в сопоставлении с геомагнитными возмущениями и активными процессами на Солнце. В качестве «посредника» между этими процессами в работах А.Д. Сытинского предлагается атмосфера, импульсно возбуждаемая солнечной активностью к перестройке термобарических полей, в свою очередь играющих роль спускового механизма для возникновения землетрясений. Из-за неполноты баз сейсмических данных до 1960 года полученные в прошлом результаты нельзя признать убедительными (рис.1).



**Рис.1.** Числа Вольфа (SSN) и сейсмическая активность Земли в XX веке.

Ввиду доступности в настоящее время более детальных глобальных баз сейсмических и атмосферных данных была продолжена работа (Воротков и др., 2003) в целях верификации возможных гипотез в этой области солнечно-земных связей. С одной стороны, это гипотеза А.Д. Сытинского, основанная на прямом энергетическом механизме возбуждения землетрясений, а, с другой стороны, предположение о нелинейном характере этих взаимодействий, отражающем элементы самоорганизации сложной системы Солнце-Земля.

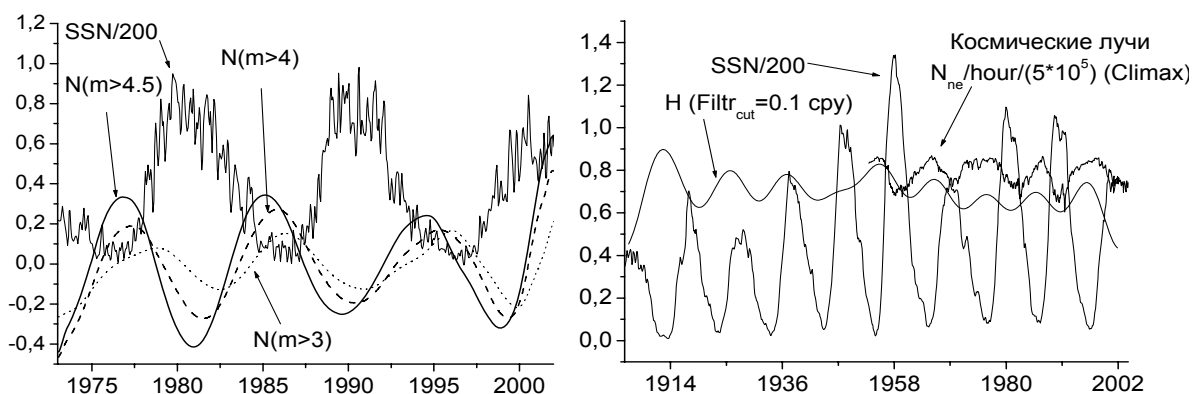
В первом случае достаточно когерентности спектров мощности рассматриваемых процессов, для построения и оценки динамической модели передачи импульса. Для этого нами использовались гистограммы распределения интенсивности исследуемых параметров для последующего применения к ним методов анализа временных рядов и выделения детерминированной составляющей. Заметим, что в этом случае задачей является подавление шумов для выделения энергетически значимой (детерминированной, обусловленной внешним процессом) составляющей исследуемого явления.

Если же рассматривать процессы как взаимосвязанные проявления сложной системы, то необходимо найти те ведущие статистические параметры этих процессов, которые могут характеризовать согласованность их поведения. Для сейсмических и, в особенности, для атмосферных рядов, именно их «шумовые» характеристики фактически являются самыми информативными при поиске связи с другими геофизическими и космическими факторами. Естественно предположить, что прямые низкочастотные воздействия солнечной активности будут слабо выражены на фоне имманентных тектонических и атмосферных процессов. Но в сложном переплетении прямых и обратных связей начинают проявляться закономерности, накладывающие некоторые «организующие» ограничения на случайные флуктуации нелинейной системы. Поэтому исследования динамики поведения вероятностных и фрактальных (персистентность) характеристик соответствующих временных рядов являются одним из основных методов в данной работе. Трудность при этом заключается в том, что эти методы эффективно работают только с достаточно плотными потоками данных, что как раз и предоставляют сейсмические и атмосферные ряды.

### Результаты анализа сейсмических рядов

Ввиду того, что используемые сейсмические ряды покрывают всего три солнечных цикла, применение спектральных оценок для исследования низкочастотной области непосредственно к гистограммам нецелесообразно. Поэтому к гистограммам интенсивности сейсмического процесса применялась высокочастотная фильтрация. Для выделения наиболее мощных низкочастотных компонент сейсмического процесса использовался сингулярный спектральный анализ (SSA).

В работе (Воротков и др., 2003) изложены методы и основные результаты анализа воздействия солнечной активности на сейсмичность Земли по данным сейсмических баз IRIS (<http://www.iris.washington.edu/>) и NEIC (<http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/>). На **рис. 2** приведен демонстрационный материал, не попавший в означенную работу.



**Рис.2.** Сопоставление солнечной активности (SSN) и выделенных с помощью SSA низкочастотных компонент в ряду NEIC для разных отсеков по магнитуде (ряд предварительно стандартизован) (слева) и отфильтрованные (0,1 цикл/год) значения параметра персистентности  $H$ , вычисленные для всего XX века по данным сейсмических событий с  $M > 5.5$  (справа). Для сравнения приведен также масштабированный ряд данных регистрации космических лучей по станции Climax ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar\\_data/cosmic\\_rays/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/cosmic_rays/)).

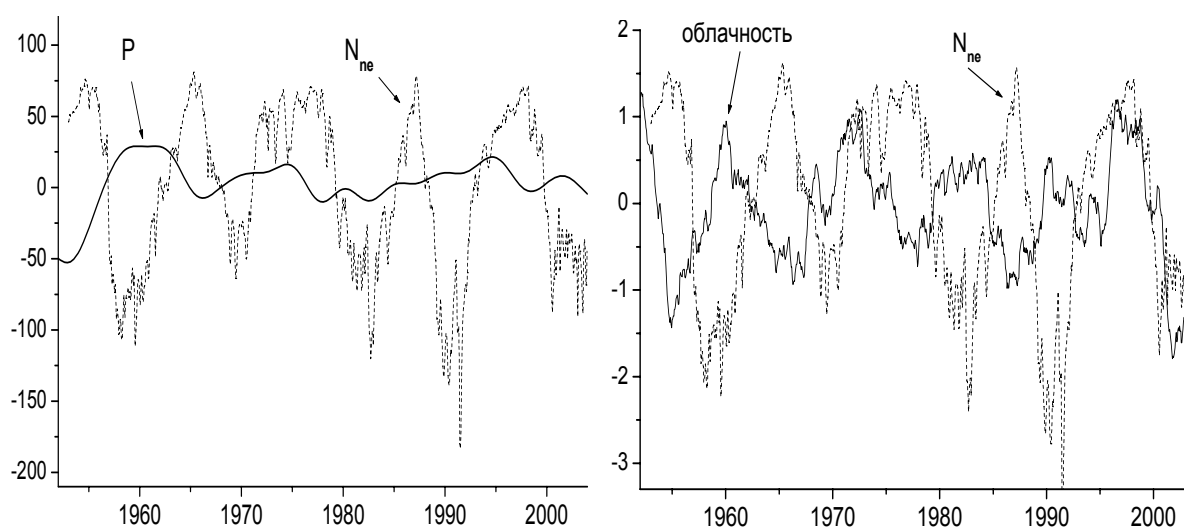
Суммируем результаты по совместному анализу сейсмической активности Земли и солнечной активности:

- 1) интенсивность сейсмических рядов имеет сильный тренд, обусловленный в основном модернизацией аппаратуры и расширением сети сейсмостанций,
- 2) характер суммарной энергии и интенсивности сейсмического процесса испытывает квазигармонические колебания, приблизительно противофазные солнечной активности,
- 3) устойчивость этих характеристик сейсмичности растет с увеличением представительности базы сейсмических данных в области слабых землетрясений (ряд NEIC дает более устойчивые оценки),
- 4) сейсмический процесс «откликается» на солнечную активность менее 10% интенсивности; оценить отклик энергии процесса затруднительно из-за того, что редкие, но сильные землетрясения значительно нарушают статистику,
- 5) характеристики, отражающие структурные особенности распределения во времени сейсмического процесса (вероятности образования роев землетрясений, персистентность интервалов между землетрясениями), после соответствующей фильтрации имеют составляющую, коррелирующую с солнечной активностью и, особенно, с рядом космических лучей.

Последнее обстоятельство дает основания предполагать посредником между солнечной активностью и сейсмичностью атмосферу, тем более что один из механизмов, модулирующий приток тепла в нижнюю атмосферу, по данным работы (Kristjánsson, 2002) связан с переменностью потока космических лучей. В этой связи рассмотрим некоторые атмосферные данные на предмет выявления в них сходных закономерностей.

### Результаты анализа атмосферных рядов

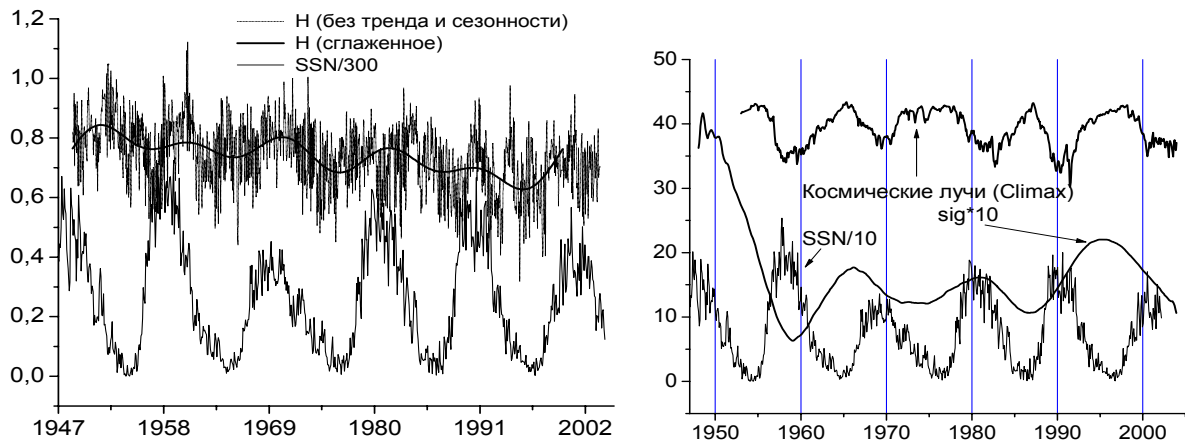
Для анализа использовались ряды поверхностного давления и процент облачности на каждый день на сетке 2.5 на 2.5 градуса по широте и долготе из базы атмосферных данных NCEP reanalysis (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>). На рис.3 представлены эти ряды, глобально осредненные с лагом 0,05 года. Сезонные составляющие в обоих рядах были предварительно удалены с помощью SSA после чего ряды были сглажены.



**Рис.3.** Низкочастотная динамика (слева) глобального превышения поверхностного давления над нормальным ( $P$  в Паскалях) и (справа) облачности (за вычетом средней глобальной облачности) в сопоставлении с масштабированным потоком космических лучей.

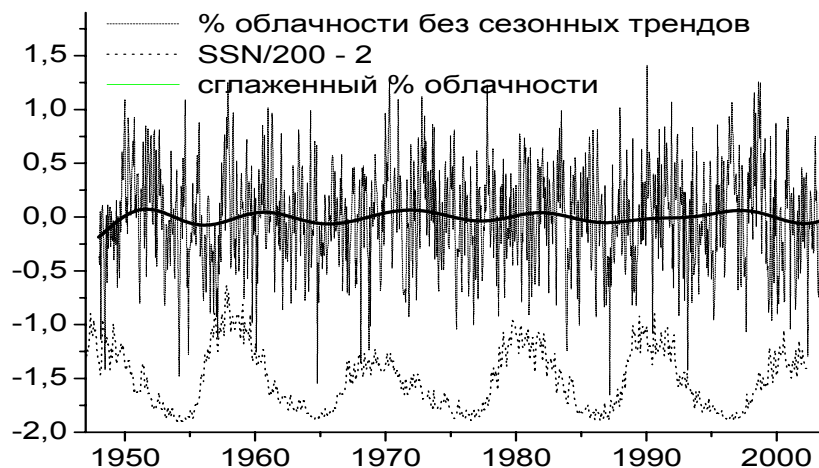
Видно, что ряды имеют нерегулярные низкочастотные тренды, видимым образом не коррелирующие с потоком космических лучей, равно как и с SSN.

Естественно предположить, что влияние на сейсмичность оказывает не низкочастотная составляющая барического поля, а низкочастотные модуляции его «шумовой» составляющей, т.е. его возбужденность, предположительно обусловленная некоторыми солнечными факторами. Эта составляющая может быть выражена, например, динамикой поведения дисперсии или персистентности ряда. Низкочастотные составляющие этих параметров, выделенные FFT фильтрацией и с помощью SSA представлены на **рис.4** в сопоставлении с солнечной активностью.



**Рис.4.** Сглаженная динамика (слева) персистентности ряда поверхностного давления выделенная с помощью SSA и (справа) дисперсии в сопоставлении с солнечной активностью и потоком космических лучей.

Видно, что, хотя в их низкочастотной составляющей явно присутствуют квазипериодические компоненты, заметно их частотное несовпадение с солнечной активностью и потоком космических лучей. Корреляционно более убедительно выглядят данные по облачности на **рис.5**, однако в целом из анализа глобальных, *пространственно не дифференцированных* рядов статистическая связь солнечной активности и рассмотренных атмосферных рядов выглядит не очень убедительно. Изучение динамики пространственных фрактальных характеристик атмосферных рядов представляется перспективным и будет продолжено.



**Рис.5.** Процент глобального облачного покрова после удаления сезонных трендов и других периодических компонент с периодами 0,5-5 лет в сопоставлении с SSN.

Резюмируя представляемый материал, можно заключить, что подход, основанный на поиске соответствия энергетических характеристик сейсмичности с солнечной активностью не достаточно убедителен. В рассмотренных нами атмосферных рядах также не наблюдается прямого соответствия. В то же время, характеристики, отражающие структурные особенности распределения во времени сейсмического процесса (вероятности образования роев землетрясений, персистентность интервалов между землетрясениями), имеют составляющую, значимо коррелирующую с солнечной активностью. Эти результаты свидетельствуют о том, что в моменты возрастания солнечной активности происходит деструктуризация рядов сейсмических событий.

Вариации рассмотренных атмосферных параметров, на уроне оценочной статистической обработки, не дают убедительных аргументов, чтобы рассматривать ее как передаточный механизм этого взаимодействия.

Полученный результат допускает другую интерпретацию. Спусковые механизмы оказывают воздействие не на физические факторы, ответственные за сейсмическую активность, а на взаимосвязи между структурными элементами всей геосистемы, приводящие в периоды повышения солнечной активности к их деструктуризации. В рамках такого предположения, сейсмический процесс выступает в роли индикатора состояния геосистемы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-02-17560.

#### Литература

- Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О.,** Солнечная активность и сейсмичность Земли, 2003, СПб, Тр. VII Пулковской международной конференции по физике Солнца. «Климатические и экологические аспекты солнечной активности», с.99-104.
- Сытинский А.Д.,** Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами, 1987, Л.: Гидрометеоздат, 100 с.
- Kristjánsson, J. E., Staple, A., Kristiansen, J., Kaas, E.** A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate, *Geoph. Res. Lett.*, vol. 29, 0.1029/2002GL015646, 07 December 2002.

## THE DISPLAY OF SOLAR ACTIVITY IN SEISMIC AND ATMOSPHERIC SERIES

**Gorshkov V.L., Vorotkov M.V., Miller N.O.**

#### Summary

*The seismic (NEIC and IRIS) and atmospheric (NCEP) database are used for investigation of statistic dependences of structural features of time distribution of seismic and atmospheric series with solar activity.*

*There is revealed that the all variety of global seismic activity decreases with growth of solar activity. For atmospheric series of surface pressure and global cloudy cover the results are not so simple and require the further investigations.*



## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕПРИЛИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРАВЛЕНИЯ ТЯЖЕСТИ ПЕРМАНЕНТНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ ЗЕНИТ-ТЕЛЕСКОПОМ**

**Даракчиев Ц., Чапанов Я.**

*Центральная лаборатория высшей геодезии, Болгарская Академия Наук,  
София, Болгария*

*Изложены основные положения методики определения неприливных изменений направления тяжести (направление отвеса) в данной точке земной поверхности перманентными астрономическими наблюдениями широты с помощью зенит-телескопа. Меридианные компоненты неприливных изменений направления тяжести (НИНТ) или неприливные изменения направления тяжести по широте определяются двумя способами - от неполярного изменения широты и от неполярного изменения средней широты наблюдательного пункта.*

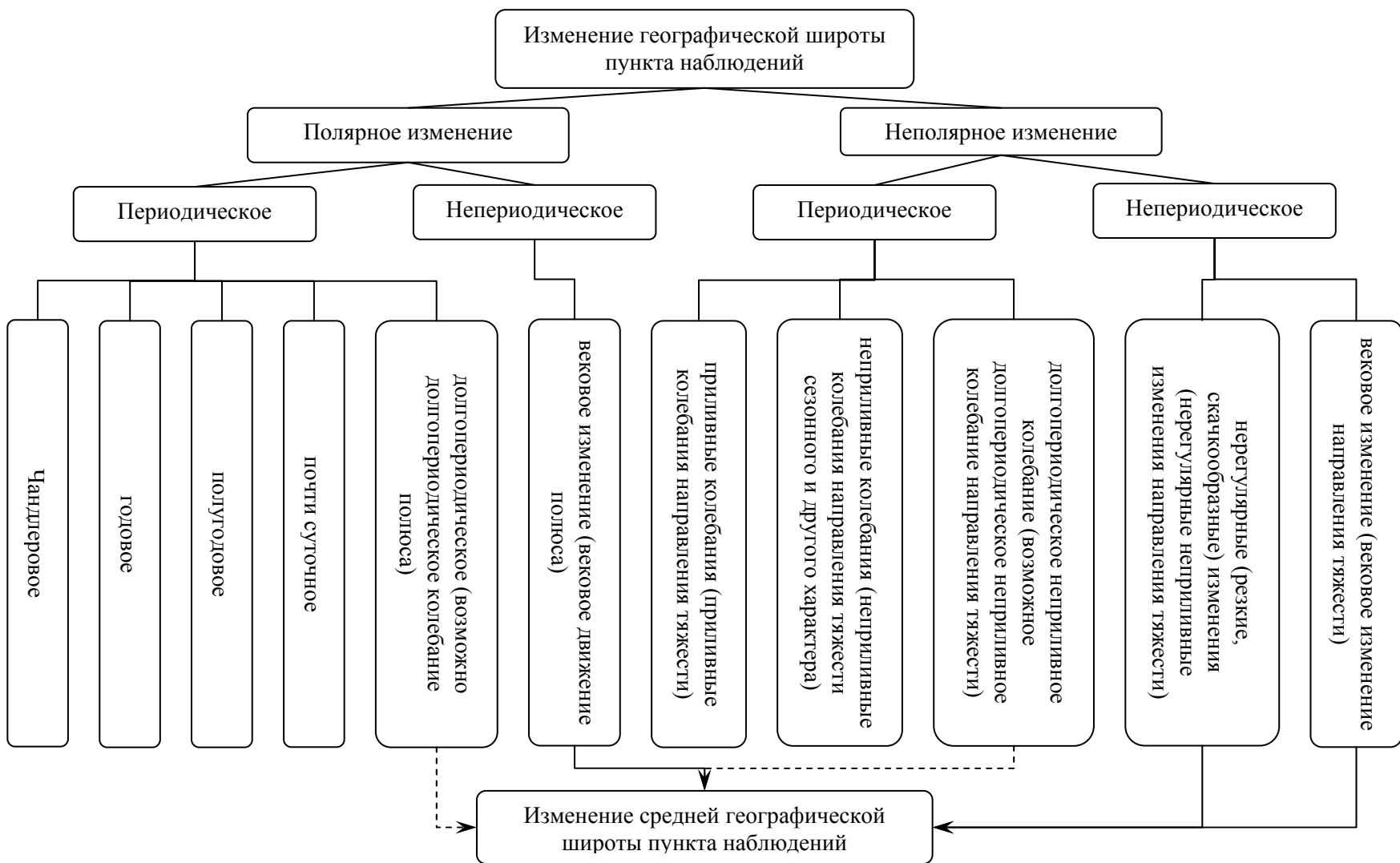
### **Введение**

В период 1997-2001 г. в ЦЛВГ БАН была разработана методика для определения НИНТ в данной точке земной поверхности перманентными астрономическими наблюдениями широты, сделанными зенит-телескопом (Darakchiev, 1999; Chaparov and Darakchiev, 2002). Основное предназначение методики было направлено на исследование изменения широты Геодезической обсерватории "Плана" (ГО "Плана") и определение НИНТ в обсерватории за период 1987-2001 г. Методика создана на основе разработанной в ЦЛВГ классификации изменений астрономической широты и показана на рис.1. В работе представлены основные положения этой методики.

Под «неприливными изменениями направления тяжести» следует понимать те изменения в положении направления тяжести во времени, которые не имеют приливного характера или происхождения, т.е. они не вызваны возмущающим или приливообразующим воздействием Луны и Солнца на Землю. Они следуют из явлений и процессов, которые обуславливают строение и динамические свойства Земли, ее гравитационное поле и, естественно, представляют большой интерес для геодинамики и геофизики. Таковыми являются: деформации и движения земной коры и локальные образования в ней; формирование и перемещение масс внутри Земли, по ее поверхности и в атмосфере естественным путем или в результате человеческой деятельности; динамика мантии и ядра и взаимодействия между ними; землетрясения и вулканическая деятельность; изменения уровней больших водных бассейнов и подпочвенных вод; изменения локального геомагнитного поля; неравномерности во вращении Земли и др.

Отклонения направления тяжести, обусловленные одним или несколькими из этих явлений, объединены под общим названием «неприливные изменения направления тяжести», в отличие от отклонений, вызванных возмущающим притяжением Земли Луной и Солнцем, которые, как известно, называются «приливыми колебаниями направления тяжести» (Darakchiev, 1999).

Меридианные компоненты неприливных отклонений направления тяжести (НТ) по широте определяются в двух аспектах – от неполярного изменения широты и от неполярного изменения средней широты пункта наблюдений. От неполярного изменения широты определяются меридианные компоненты векового и неправильных (нерегулярных) изменений и периодичных неприливных колебаний НТ, а от неполярного изменения средней широты – меридианные компоненты векового и нерегулярных изменений среднего направления тяжести в пункте наблюдений.



**Рис.1.** Классификация изменений географической широты и средней географической широты пункта наблюдений и причин (явлений), которые их вызывают.

Таким образом, создается возможность для сравнения и анализа полученных результатов и для достижения более богатой информации о НИИТ по времени.

### **1. Определение неприливных изменений направления тяжести от неполярного изменения широты наблюдательного пункта**

Определение меридианных компонент НИИТ делается в следующей последовательности (см. рис.2, где в виде блок-схемы представлен подробно и в деталях созданный и использованный авторами алгоритм при определении и исследовании изменений широты и НИИТ в ГО “Плана”).

#### ***1.1. Освобождение наблюдений от влияния приливных колебаний направления тяжести***

Освобождение наблюдений от приливных колебаний НТ достигается с помощью формул влияния Луны и Солнца на широту, полученных теоретическим путем. Оно делается при первичной или текущей обработке наблюдений. В результате получается мгновенное значение широты, освобожденное от этих колебаний НТ.

#### ***1.2. Освобождение наблюдений от влияния систематических ошибок***

Полученные из астрономических наблюдений значения широты содержат кроме действительных изменений, т.е. полярных и неполярных изменений широты, еще и фиктивные изменения, вызванные ошибками наблюдений. Освобождение наблюдений от фиктивных изменений широты связано с исследованием и определением ошибок наблюдений и, прежде всего, переменных систематических ошибок.

При выводе НИИТ определяются и исследуются более значимые систематические ошибки наблюдений и уточняются значения обычных инструментальных параметров и констант (рис.2).

С уже определенными систематическими ошибками и улучшенными значениями инструментальных параметров и констант совершается повторное вычисление всех наблюдений. В результате этого наблюдения освобождаются от фиктивных изменений широты, и получается ряд почти однородных наблюдений, по которому строится кривая изменения широты пункта.

#### ***1.3. Определение полярного и неполярного изменения широты наблюдательного пункта***

При вычислении полярного изменения широты используются координаты X, Y полюса, определяемые и публикуемые Международной Службой Вращения Земли (IERS), например, решение EOP(IERS)C04.

Величины неполярного изменения широты за рассматриваемый период времени получаются как разность между сглаженными значениями широты, снятые с кривой ее изменения через 0.05 г., и соответствующими значениями полярного изменения широты пункта. При оценке точности неполярного изменения широты, значения полярного изменения принимаются как безошибочные.

#### ***1.4. Построение кривых изменения широты и неполярного изменения широты наблюдательного пункта. Оценка точности***

Построение кривой изменения широты и кривой неполярного изменения широты и оценка ее точности совершаются по процедурам, представленным на рис.2.

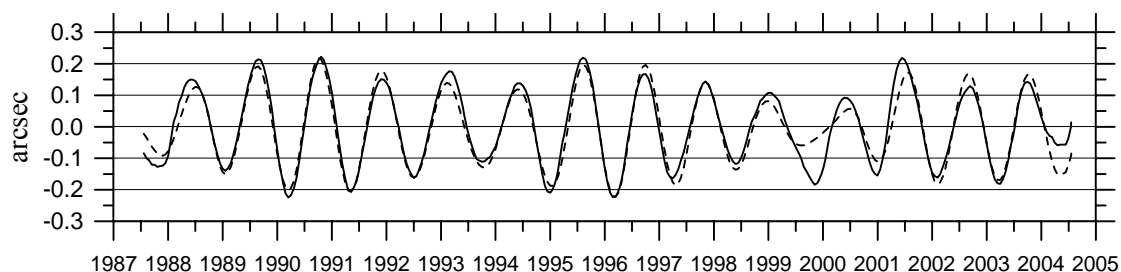
Определяются нормальные точки неполярного изменения широты, соответственно через 5 суток, 0.05 г. и 0.1 г. Определяются периодические и вековые компоненты неполярного и полярного изменения широты. В этом случае, если наблюдения не были периодом Луны и с половиной солнечных и лунных суток



**Рис.2.** Блок-схема алгоритма для определения неприливных изменений направления тяжести от наблюдений географической широты.

освобождены предварительно от приливных колебаний в соответствии с пунктом 1.1., определяются еще и неполярные колебания широты с синодическим и сидерическим. Они характеризуют приливные эффекты в изменении широты. Составляется функция для предсказания широты в периодах без наблюдений. Делается построение кривой изменения широты и кривой неполярного изменения широты с помощью нормальных точек через 0.05 г. и функции для предсказания широты в периодах без наблюдений. Оцениваются ср. кв. ошибки нормальных точек и ср. кв. ошибка одного наблюдения звездной пары по отклонениям отдельных (единичных) наблюдений от кривой изменения широты, так называемая ср. кв. ошибка единицы веса. Эти ошибки являются исходными при оценивании периодических неприливных колебаний и годовой скорости векового изменения НТ. В следующих вычислениях и исследованиях используется сглаженная кривая изменения широты.

На рис.3 представлены сглаженные кривые изменения широты Геодезической обсерватории Плана и полярного изменения широты в периоде 1987.5-2004.6. Заметна хорошая согласованность обеих кривых за исключением короткого участка около 1999 года, в связи с катастрофических землетресений в Турции в августе и ноябре 1999 года.

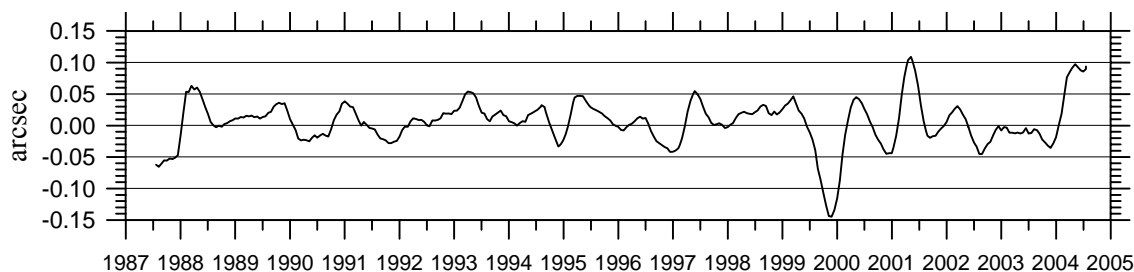


**Рис.3.** Сглаженная кривая изменения широты Геодезической обсерватории Плана (сплошная линия) и сглаженная кривая полярного изменения широты, определенное при помощи решения C04 IERS (пунктирная линия).

### **1.5. Определение меридианных компонент неприливных изменений направления тяжести в наблюдательном пункте. Оценка точности**

Меридианная компонента изменения НТ за данный интервал времени это проекция отклонения НТ в плоскости исходного или начального меридиана пункта, т.е. в плоскости меридиана пункта для исходной или начальной эпохи.

Получением неполярного изменения широты фактически определяется общее неприливное отклонение НТ по широте или меридианная компонента общего НИИТ в пункте наблюдения. Получение меридианных компонент каждого из трех НИИТ выполняется фильтрацией и выделением из общего НИИТ в последовательности: периодические колебания – нерегулярные изменения – вековое изменение НТ.



**Рис.4.** Неприливные изменения направления тяжести Геодезической обсерватории Плана, определенные от наблюдений географической широты.

На рис.4 представлены неприливные изменения направления тяжести Геодезической обсерватории Плана, определенные от наблюдений географической широты, сделанные в периоде 1987.5-2004.6.

#### 1.5.1. Периодические колебания направления тяжести

Колебания НТ с Чандлеровым и годовым периодом идентичны с неполярными колебаниями широты с такими же периодами. Оцениваются параметры периодических колебаний и их ср. кв. ошибки.

#### 1.5.2. Нерегулярные изменения направления тяжести

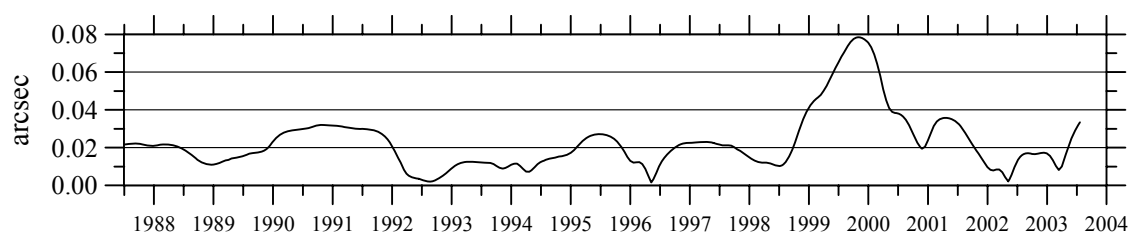
Нерегулярные изменения НТ и соответствующая кривая получены как разности между неполярным изменением широты и сглаженными значениями периодических колебаний НТ.

#### 1.5.3. Вековое изменение направления тяжести

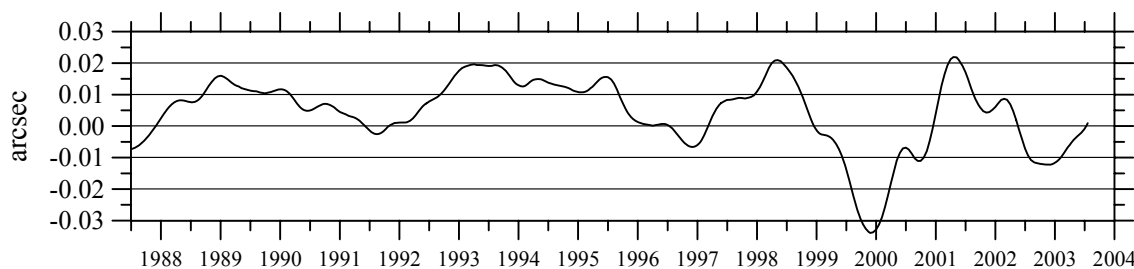
Вековое изменение НТ определяется как линейный тренд данных неполярного изменения широты. Оцениваются годовая скорость векового изменения НТ и ее ср. кв. ошибка.

#### 1.5.4. Долгопериодические вариации направления тяжести

Долгопериодические колебания направления тяжести определяются в процессе фильтрации сезонных колебаний и колебаний с периодом около одного года. Применяется оценивание параметров сезонных колебаний в скользящем окне длиной 500 дней. В результате получают оценки для вариации во времени для амплитуды и фазы сезонных колебаний, а также средние изменения, которые обусловлены только долгопериодическими колебаниями. На рис.5 представлены вариации амплитуды сезонных колебаний направления тяжести в Геодезической обсерватории Плана, которые имеют значительное возрастание в периоде 1998.5-2001.0 и максимум во второй половине 1999 года, в непосредственной близости к эпохам катастрофических землетрясений в Турции.

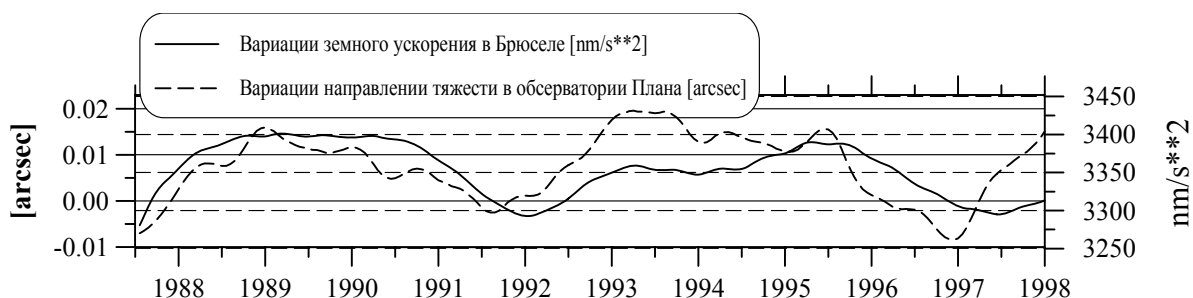


**Рис.5.** Вариации амплитуды сезонных колебаний направления тяжести в Геодезической обсерватории Плана, определенные в скользящем окне длиной 500 дней.



**Рис.6.** Долгопериодические вариации направления тяжести в Геодезической обсерватории Плана, определенные в скользящем окне длиной 500 дней.

Долгопериодические вариации направления тяжести в Геодезической обсерватории Плана (рис.6) состоят из трех циклов с периодом около 6 лет и возмущения в периоде 1998.3-2001.3, сопутствующих катастрофических землетрясений в Турции в 1999 года. Надо отметить, что первые два цикла хорошо согласуются с долгопериодическими колебаниями величины земного гравитационного ускорения в Брюсселе (рис.7), определенные через приливные измерения на сверхпроводящем гравиметре (Charanov, 2004).



**Рис.7.** Сравнение долгопериодических вариаций направления тяжести в обсерватории Плана и величины земного гравитационного ускорения в Брюсселе в периоде 1987.5-1998.0. Коэффициенты корреляции двух рядов находятся между +0.75 и +0.92 за исключением короткого участка в периоде 1992.7-1994.0 (Charanov, 2004).

## 2. Определение неприливных изменений среднего направления тяжести от неполярного изменения средней широты наблюдательного пункта

Под «средним направлением тяжести» в данный момент следует понимать такое положение НТ, которое оно бы заняло в этот же момент, если бы отсутствовали его периодические колебания.

Определение меридианных компонент векового и неправильных изменений среднего НТ выполняется в следующей последовательности, при этом предполагается, что операции 1.1. - 1.4. уже выполнены (см. рис.2)

### 2.1. Получение средней широты наблюдательного пункта и построение кривой ее изменения. Оценка точности.

Вычисляются через равные интервалы времени (через 0.05 г.) значения средней широты пункта при помощи модифицированного метода усреднения каждые 6 лет (Charanov, 1999) и через 0.1 г. по методу А.А. Орлова и делается построение соответствующих кривых изменения широты.

Кривая изменения средней широты, полученная по первому методу используется для определения векового изменения НТ, а по второму методу – для установления нерегулярных изменений среднего НТ.

### 2.2. Получение полярного и неполярного изменения средней широты наблюдательного пункта и построение соответствующих кривых изменений.

Неполярное изменение средней широты НП получается после удаления векового движения полюса (систематического непериодического изменения в положении земного полюса за период исследований) из средней широты. Кривая неполярного изменения средней широты, является разностью между кривой изменения средней широты и кривой полярного изменения средней широты (Charanov, 1999).

### 2.3. Определение меридианных компонент неприливных изменений среднего направления тяжести в наблюдательном пункте. Оценка точности.

Неполярное изменение средней широты обусловлено изменением в положении среднего НТ в пункте наблюдения, т.е. направление тяжести, свободное от его перио-

дический колебаний. Для получения векового и неправильных изменений среднего НТ по широте или меридианных компонент этих изменений НТ необходимо определить медленное, плавное неполярное изменение средней широты НТ, которое на относительно небольших интервалах времени аппроксимируется обычно прямой линией.

### *2.3.1. Нерегулярные изменения среднего направления тяжести.*

Нерегулярные изменения среднего НТ определяются кривой неполярного изменения средней широты, полученной по методу Орлова. Они характеризуются отклонениями кривой от аппроксимирующей медленное, плавное неполярное изменение средней широты прямой. Это обусловлено тем, что средняя широта, полученная по формуле Орлова, дает, благодаря своей хорошо выраженной селективно фильтрующей способности, изменение средней широты в деталях, а вместе с этим и нерегулярные изменения в положении среднего НТ.

### *2.3.2. Вековое изменение среднего направления тяжести.*

При определении векового изменения среднего НТ используется кривая неполярного изменения средней широты, полученная как разность между кривыми средней широты и полярным изменением той же самой широты, определенными модифицированным методом усреднения по шестилеткам.

Меридианная компонента векового изменения НТ совпадает с медленным неполярным изменением средней широты, которое, как уже было отмечено, аппроксимируется прямой линией. Линейный тренд регулярного неполярного изменения средней широты, равен годовой скорости меридианной компоненты векового изменения НТ, а его ср. кв. ошибка – точности, с которой определяется эта меридианная компонента. Оцениваются годовая скорость векового изменения НТ и ср. кв. ошибка годовой скорости.

## **Заключение**

По этой методике были исследованы изменения широты и НИИТ в ГО «Плана» Центральной лаборатории высшей геодезии по наблюдениям с зенит-телескопом Цейсс 135/1750 за период июль 1987 – июль 2001 г. (Darakchiev and Chapanov, 2002; Chapanov, 2002a, 2002b; Darakchiev and Chapanov, 2004). Полученная высокая точность при определении изменений широты и НИИТ (первые единицы *mas* при определении амплитуд неполярных периодических колебаний широты и периодических неприливных колебаний НТ и доли *mas/year* при определении годовых скоростей вековых неполярных изменений широты и НТ) весьма показательна для применяемой методики и зенит-телескопа обсерватории Плана при проведении геодинимических исследований.

В результате исследований была подтверждена возможность и целесообразность использования зенит-телескопов для проведения научных исследований в области геодинимики и, в частности, для исследования НИИТ по времени.

По созданной в ЦЛВГ БАН методике будут определены и исследованы НИИТ и в обсерваториях международной сети Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли Российской Федерации, и в станциях системы Международного бюро времени (ВН) в Париже в соответствии с подписанными двусторонними проектами между Центральной лабораторией высшей геодезии, с одной стороны, и Институтом метрологии времени и пространства ФГУП ВНИИФТРИ при Госстандарте в Москве и Астрономическим институтом Чешской академии наук в Праге, с другой стороны. В результате реализации этих и последующих подобных проектов будет создана сеть точек (обсерваторий), расположенных на значительной части земного шара с известными, определенными нами НИИТ, т.е. земного ускорения. Это позволит получить и анализировать ценную геодинимическую информацию не только локального и регионального, но и глобального масштаба, которая будет использована как



для усовершенствования теории, так и для изучения связей между природными явлениями и их прогнозирования.

### Благодарности

Исследования финансированы Национальным советом «Научные исследования» при Министерстве образования и науки Республики Болгарии по проекту «Исследование непреливных изменений направления тяжести с помощью перманентных астрономических наблюдений географической широты, сделанных зенит-телескопом для целей геодинамики» согласно договору НЗ-1205/02 от 15.05.2003 г.

### Литература

1. **Chapanov, Ya.**, 1999, *A method for determination of periodical components and mean coordinates of the earth pole*. Proc. "Modern information and GPS Technology - Aspects and Implication of their Application". Sofia, 11-12 Nov. 1999, p.292-301.
2. **Chapanov, Ya.**, 2002a, *Dynamics of the Chandler period variation in the Balkan region for the period Juli 1987 - Juli 2001*. Proc. 3-rd Balkan Geophysical Congress and Exhibition, 24-28 June 2002, Sofia, p.333-334.
3. **Chapanov, Ya.**, 2002b, *Dynamics of the seasonal latitude variation at Geodetic Observatory "Plana" for the period Juli 1987 - Juli 2001*. Proc. 3-rd Balkan Geophysical Congress and Exhibition, 24-28 June 2002, Sofia, p.335-336.
4. **Chapanov, Ya.**, 2004, *A global gravity oscillation determined by superconducting gravimetry measurements and astronomical latitude observations*. Proc. of the MAO-2004 Conference "Astronomy in Ukraine - Past, Present and Future", Kiev, Ukraine, 15-17 July 2004 (in print).
5. **Chapanov, Ya., Tz. Darakchiev**, 2002. *Processing and analysis of long series astrometric observations*. Proc. Int. Symp. "Space Information-Technologies, Acquisition, Processing and Effective Application, 7-8 Nov. 2002, Sofia, p.120-129.
6. **Darakchiev, Tzv.**, 1999, *Nontidal variations of the gravity direction and their determination by permanent astronomical observations with a zenith telescope*. Bulg. Geophys. J., vol. 25, No 1-4, p.124-134.
7. **Darakchiev, Tzv., Ya. Chapanov**, 2002, *Investigation of the nontidal changes of the vertical at Geodetic Observatory "Plana" by regular astronomical observations of geografic latitude*. Proc. 3-rd Balkan Geophysical Congress and Exhibition, 24-28 June 2002, Sofia, p.337-338.
8. **Darakchiev, Tzv., Ya. Chapanov**, 2004, *Nontidal changes of the vertical at Geodetic Observatory "Plana" for the period 1987-2001*. Geodesy, No 16, p.71-80.

## DETERMINATION OF THE NONTIDAL VARIATIONS OF THE VERTICAL BY PERMANENT OBSERVATIONS FROM ZENITH TELESCOPE

**Darakchiev Tz., Chapanov Ya.**

*Central Laboratory for Geodesy, BAS, Sofia, Bulgaria*

### Summary

*The conception of the methods, developed in the Central Laboratory for Geodesy at Bulgarian Academy of Sciences, for determination of the nontidal variations of the vertical at a given point of Earth surface by means of permanent astronomical observations from zenith telescope are described. The meridian components of the nontidal variations of the vertical are determined by two approaches - by the nonpolar latitude changes and by nonpolar changes of the mean latitude of the observatory.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ШИРОТЫ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ЭПОХУ 2000.0 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ЗТФ-135 ЗА ПЕРИОД 1904.7-2003.0

Костина Л.Д., Миллер Н.О., Наумов В.А., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я.,  
Зыков И.А.

20 сентября 2004 г. исполнилось 100 лет со дня начала наблюдений на Большом зенит-телескопе ЗТФ-135 Пулковской обсерватории, изготовленном ученым - механиком Генрихом Андреевичем Фрейбергом-Кондратьевым. Уникальный по длительности и однородности ряд включает около 200 тысяч наблюдений широты (пар звезд). Наблюдения были перевычислены в системе каталога звезд HIPPARCOS. Значения широт исправлены за вековое изменение широты и дрейф плит Земли.

20 сентября 2004 г. исполнилось 100 лет со дня начала наблюдений на Большом зенит-телескопе Пулковской обсерватории, изготовленном ученым - механиком Г.А. Фрейбергом-Кондратьевым и известном как ЗТФ-135. Уникальный по длительности и однородности ряд включает около 200 тысяч наблюдений широты, которые были выполнены более чем тремя десятками наблюдателей. Выберем из обширной библиографии [1] несколько работ, основанных на этом богатом материале. Прежде всего нас будут интересовать результаты старой (авторской) обработки вычислений средней широты ЗТФ-135, выполненной С.В. Романской [2], И.Ф. Корбутом [3], Л.Д. Костиной и В.И. Сахаровым [4] в рамках работы над диссертациями. Для довоенных наблюдений выполнено приведение значения широты к новому павильону посредством поправки:  $\Delta\phi = \text{«новый» павильон} - \text{«старый» павильон} = -1.590''$  [5].

Таблица 1.

	$T_i$	$\phi T_i$
1904-1915	И.Ф. Корбут	$56^{\circ}46'15.563''$
1929-1941	С.В. Романская	.462''
1904-1985	Л.Д. Костина, В.И. Сахаров	.538''

Сравнивая результаты наблюдений И.Ф.Корбута и С.В.Романской, отмечаем, что они расходятся между собой на величину  $0.101''$ . Среднее значение широты для периода 1904-1941, полученное И.Ф. Корбутом и С.В.Романской, отличается на величину  $0.126''$  от аналогичных результатов Л.Д. Костиной и В.И. Сахарова [4]. Недостатком этих определений является то, что они выполнены в различных системах склонений звезд. Первые две работы выполнены в системах склонений звезд "улучшенных" каталогов. В работе Л.Д. Костиной и В.И. Сахарова средние значения широты получены в системе склонений звезд FK4.

Поэтому все широтные наблюдения ЗТФ-135 за весь период с 1904 года до настоящего времени были перевычислены в системе каталога HIPPARCOS и обработаны в системе ICRS с применением прецессионно-нутационной модели IAU2000A (Convention 2000). Данные с 1904 по 1994 год переобработаны рабочей группой по изучению вращения Земли под руководством Y. Vondrak [10].

Значения этих широт отличаются тем, что для их вычисления использованы значительно более точные склонения и собственные движения звезд, а также тем, что осреднение промежуточных результатов выполнено по примерно равному количеству

реднение промежуточных результатов выполнено по примерно равному количеству точек (по шестилеткам). К сожалению, по мере удаления от эпохи наблюдений HIPPARCOS (1991.25 г.) точность несколько падает за счет увеличения ошибок собственных движений звезд. Если принять критерий абсолютности по [6], при использовании системы склонений звезд каталога HIPPARCOS на эпоху, даже на 100 лет отстоящую от эпохи наблюдений каталога HIPPARCOS, метод определения широты по способу Талькотта можно считать абсолютным с ошибкой, не превышающей примерно 0.01". Это происходит за счет усреднения очень большое количество собственных движений звезд, использованных при наблюдении широт за 100 лет.

Напишем основную формулу приведения широты на 2000 г:

$$\varphi_{2000} = \varphi_{T_i} + (\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i}) + \Delta\varphi^1_{T_i},$$

где  $\varphi_{2000}$  есть значение средней широты, вычисленное на эпоху 2000г.,  $\varphi_{T_i}$  – значение широты, полученное на эпоху наблюдений ( $T_i$ );  $(\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i})$  – перевод значений средней широты с эпохи  $T_i$  на 2000г. за вековое движение полюса, т.е. за изменение средних координат полюса X и Y;  $\Delta\varphi^1_{T_i}$  – поправка широты Пулкова за тектоническое движение плит Земли, вычисленная по геофизической модели Nuvel-1 NNR и равная +0.034" в столетие [8,9]. Принимаем  $\Delta\varphi^1_{2000}=0$ , следовательно,  $\Delta\varphi^1_{T_i} = +0.034" (2000 - T_i)$ .

Мгновенные координаты полюса в новой редакции (EOP IERS C01, решение 2) на интервале с 1846г. до настоящего времени приводятся в [7]. Перевод значений средней широты с эпохи  $T_i$  на 2000г. за колебание полюса осуществляется 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 2000 г.,  $X_{T_i}$  и  $Y_{T_i}$  – средние координаты полюса на эпохи наблюдений, долгота Пулкова здесь принята отрицательной.

Результат вычислений приведен в таблице 2. В качестве  $T_i$  взяты средние значения по шестилеткам.

**Таблица 2.**

$T_i$	$\varphi_{T_i}$	$(\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i})$	$\Delta\varphi^1_{T_i}$	$\varphi_{2000}$
1908	59°46'15.544"	-0.039"	+0.031"	59°46'1.536"
1914	.529	30	29	.528
1920	.530	56	27	.501
1926	.498	38	25	.485
1932	.504	23	23	.504
1938	.543	28	21	.536
1952	.520	71	16	.465
1958	.523	42	14	.495
1964	.525	25	12	.512
1970	.511	26	10	.495
1976	.533	26	8	.515
1982	.517	20	6	.503
1988	.512	22	4	.494
1994	.472	+ 0 001	2	.475
2000	.455	0	0	.455
	59°46'15.514"			59°46'15.504"
				±0.009"

Следовательно, широта павильона ЗТФ-135 равняется **59°46'15.504"**.

Т.к.  $\Delta\varphi(\text{цкз-зтф } 135) = +3.156"$ , то широта Центра круглого зала (ЦКЗ) ГАО на эпоху 2000.0 г. оказывается равной

$$\varphi_{2000.0} = 59°46'18.660" \pm 0.009"$$

Заметим, что ни среднее значение широты, ни его ошибка, практически не изменились после учета изменений отдельных широт. Оказалось, что влияние векового движения полюса и дрейфа плиты Евразии на широту Пулкова в прошлом веке было практически равным по величине, но противоположным по знаку.

Возможные ошибки:

1) принятая система координат (X,Y) ошибочна, тогда, возможно, и их средние значения и, следовательно, вековое движение полюса также имеют ошибки, (точность определения координат полюса Земли и даже их система значительно изменялись в течение периода наблюдений);

2) дрейф Пулкова отличен от дрейфа всей плиты Евразии (возможно, это связано с эффектом Фенноскандии).

Тем не менее, отметим основные этапы создания системы координат (X,Y) и убедимся в их неоднородности:

1846-1899: решение Л.В. Рыхловой, - получены X и Y с учетом только годового движения полюса и движения Чандлера по наблюдениям программ абсолютных склонений звезд - Pulkovo, Grinwhich, Washington, (Федоров и др, 1976), отсутствует координата Y для периода 1858.9-1860.9;

1900-1961: решение Y. Vondrak (1995), полученное из оптической астрометрии по результатам наблюдений нескольких международных широтных станций (в течение этого периода работало пять станций, иногда одна станция заменялась другой, всего международных широтных станций в разное время было семь), находящихся на одной параллели. Затем добавлены наблюдения широтных станций на других широтах, а с 1956 добавлены наблюдения служб времени, получены X,Y, UT1-TAI,  $d\psi$ ,  $d\epsilon$ ;

1962-1979: решения IERS и ВИН, получены X,Y, UT1-TAI (нормальные точки), вошли новые методы - с1969 - LLR:UT, с1972-Допплер: движение полюса;

1980-1992: решение IERS, получены X и Y, UT1-TAI,  $d\psi$ ,  $d\epsilon$  (нормальные точки), основанные на наблюдениях VLBI, LLR, с1992 - GPS и SLR;

1993-настоящее время: решение IERS, получены X,Y, UT1-TAI, продолжительность суток,  $d\psi$ ,  $d\epsilon$  (нормальные точки), основанные на наблюдениях VLBI, LLR, GPS и SLR.

### Литература

1. *Л.Д. Костина, Н.О. Миллер, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова, И.А. Зыков, В.В. Хохлов.* Изв. ГАО, 210, 1996, с.121-130.
2. *С.В. Романская.* Труды ГАО, том LXX, с.3-67.
3. *И.Ф. Корбут.* Труды ГАО серия II, т LXXIV, 1966, с.69-150.
4. *Л.Д. Костина, В.И. Сахаров.* Изв. ГАО, № 206, 1989, с.56-61.
5. *В.И. Сахаров.* Тр.11-й астрометр. конф. СССР Л, 1955, Изд. ГАО АН СССР, с.226-235.
6. *В.А. Наумов.* Изв. ГАО № 213, С.-Петербург, 1998, с.259-263.
7. <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
8. *IERS, TECHNICAL NOTE 21.*
9. *Y. Vondrak, C. Ron I., Pesec, A.* Seces.Ears orientation parameter 1899.7-1992.0. In the ICRS based on the Hipparcos reference frame, Pub. № 87, 1998.
10. *Y. Vondrak.* Частное сообщение.

**THE DETERMINATION OF THE MEAN LATITUDE  
OF PULKOVO OBSERVATORY ON THE EPOCH 2000.0 FROM OBSERVATIONS  
MADE BY ZTF-135 DURING 1904.7-2003.0**

**Kostina L.D., Miller N.O., Naumov V.A., Persijaninova N.R., Prudnikova E.Ja., Zykov I.A.**

***Summary***

*22 of September 2004 is a day of centenary of the Pulkovo zenith-telescope constructed by G. A. Freiberg-Kondratjev and known as ZTF-135. The outstanding by its accuracy and homogeneity set consists of more than 200 thousands of observations carried out by thirty observers. The observations were recalculated in the Hipparcos system with reductions for secular polar motion (EOP IERS C01) and tectonic plate motion according to geophysical model Nuvel-1.*

## ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ГОДОВОЙ ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ВОЛНЫ СУТОЧНОГО ЧЛЕНА В НАБЛЮДЕНИЯХ ШИРОТЫ

Литвиненко Е.А.

*Доказывается, что годовая трансформированная волна суточного члена в широте является следствием разности поправок склонений, полученных классическим цепным методом по вечерним и утренним наблюдениям.*

Исследованиям суточного члена в наблюдениях широты и времени уделялось много внимания. В.Р. Берг предложил разделять суточный член на две составляющие: регулярную суточную вариацию широты и суточную вариацию широты, зависящую от сезона [1]. Эту идею развил В.А. Наумов, предложив свой модифицированный цепной метод и обосновав предположение о трансформации суточного члена в z-член и τ-член [2]. Предполагается, что двухчасовые изменения широты линейны каждую ночь, но изменяются в течение года. Тогда их можно представить в виде суммы:

$$\Delta\varphi + \Delta\varphi_j$$

где  $\Delta\varphi$  – двухчасовые изменения широты, не зависящие от сезона (постоянная часть суточного члена),  $\Delta\varphi_j$  – переменная часть суточного члена.

При трехгрупповой программе наблюдений предполагается (в качестве первого приближения), что суточный член линеен только между двумя соседними группами, но изменяется со сменой групп. При уравнивании широт можно составить две системы уравнений отдельно для вечерних и утренних наблюдений. Для вечерних наблюдений это 12 уравнений вида:

$$\overline{(\varphi_{i-1} - \varphi_i)} + (\Delta\delta_{i-1}^M - \Delta\delta_i^M) = \Delta\varphi_{\beta-n} + \Delta\varphi_j \quad (1)$$

Для утренних наблюдений – 12 уравнений вида:

$$\overline{(\varphi_i - \varphi_{i+1})} + (\Delta\delta_i^M - \Delta\delta_{i+1}^M) = \Delta\varphi_{\eta-y} + \Delta\varphi_j \quad (2)$$

В этих системах:  $\varphi_i$  – среднегрупповая широта группы  $i$ ,  $\Delta\delta_i^M$  – среднегрупповая поправка склонений группы  $i$ , полученная модифицированным цепным методом (МЦМ),  $\Delta\varphi_{\beta-n}$  и  $\Delta\varphi_{\eta-y}$  – постоянные части суточного члена для вечерних и утренних наблюдений (двухчасовые изменения широты «вечер-ночь» и «ночь-утро»).

Посмотрим, какой физический смысл имеет переменная часть суточного члена. По программе наблюдений, используемой в Китабе, в январе наблюдаются 4-я, 5-я и 6-я группы. Тогда из (1) и (2) получаем:

$$\Delta\varphi_{j+1} = (\varphi_{i+4} - \varphi_{i+5})_{\beta} + (\Delta\delta_{i+4}^M - \Delta\delta_{i+5}^M) - \Delta\varphi_{\beta-n}$$

$$\Delta\varphi_j = (\varphi_{i+4} - \varphi_{i+5})_y + (\Delta\delta_{i+4}^M - \Delta\delta_{i+5}^M) - \Delta\varphi_{\eta-y}$$

Отсюда:

$$\Delta\varphi_{j+1} + \Delta\varphi_j =$$

$$= [(\varphi_{i+4} - \varphi_{i+5})_{\beta} - \Delta\varphi_{\beta-n}] - [(\varphi_{i+4} - \varphi_{i+5})_y - \Delta\varphi_{\eta-y}] \equiv \quad (3)$$

$$\equiv (\Delta\delta_{i+5,\beta} - \Delta\delta_{i+4,\beta}) - (\Delta\delta_{i+5,y} - \Delta\delta_{i+4,y}) = (\Delta\delta_{i+5,\beta} - \Delta\delta_{i+5,y}) - (\Delta\delta_{i+4,\beta} - \Delta\delta_{i+4,y})$$

Знак тождественного равенства соответствует классическому цепному методу, примененному отдельно для вечерних и утренних наблюдений. При этом постоянные части суточных членов  $\Delta\varphi_{\delta-n}$  и  $\Delta\varphi_{n-y}$  – это соответствующие ошибки замыкания, деленные на 12. Из (3) следует, что

$$\Delta\varphi_j = \Delta\delta_{i+4,\delta} - \Delta\delta_{i+4,y},$$

т.е. переменная часть суточного члена – это расхождение между вечерними и утренними поправками склонений, вычисленными классическим цепным методом.

Нужно отметить, что трансформированная годовая волна суточного члена, вычисленная по формулам (1) и (2), не зависит от того, какие поправки склонений были введены в исходный материал и были ли они введены вообще, то есть она не зависит от используемого каталога. Это следует из самой методики вычислений. А это в свою очередь означает, что если мы даже возьмем некий абстрактный идеальный каталог, то, обработав материал обычным цепным методом, все равно получим какие-то поправки склонений. Чем больше амплитуда годовой волны, тем больше мы испортим исходный каталог. В качестве примера были вычислены годовые волны суточных членов для пяти международных широтных станций:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_M &= 0.086''\cos(30^\circ t - 11^\circ) + 0.044''\cos(60^\circ t - 85^\circ) \\ \Delta\varphi_K &= 0.007''\cos(30^\circ t - 60^\circ) + 0.035''\cos(60^\circ t - 244^\circ) \\ \Delta\varphi_C &= 0.009''\cos(30^\circ t - 321^\circ) + 0.032''\cos(60^\circ t - 282^\circ) \\ \Delta\varphi_G &= 0.069''\cos(30^\circ t - 127^\circ) + 0.013''\cos(60^\circ t - 293^\circ) \\ \Delta\varphi_U &= 0.023''\cos(30^\circ t - 119^\circ) + 0.024''\cos(60^\circ t - 258^\circ)\end{aligned}$$

Для каждой из этих станций были выведены поправки склонений классическим цепным методом (КЦМ) и модифицированным. Из полученных среднегрупповых поправок образовали средние значения по пяти станциям. В таблице 1 приведены уклонения среднегрупповых поправок склонений, полученных для данной станции, от среднего значения.

**Таблица 1.**

№ гр	КЦМ					МЦМ				
	М	К	С	G	U	М	К	С	G	U
1	+0.002	-0.015	-0.023	-0.021	+0.056	+0.098	-0.011	-0.003	-0.131	+0.048
2	+ 1	+ 32	- 4	- 5	+ 15	+ 96	+ 31	- 45	- 65	- 18
3	+ 4	- 19	- 30	- 1	+ 45	+ 115	- 47	- 57	+ 1	- 13
4	+ 32	+ 7	- 11	- 7	- 23	+ 117	- 22	- 51	+ 50	- 93
5	- 28	+ 12	+ 69	0	- 54	- 44	- 1	+ 31	+ 113	- 100
6	- 21	+ 13	+ 5	+ 13	- 11	- 146	+ 26	- 11	+ 147	- 18
7	- 25	- 14	+ 44	+ 18	- 24	- 202	+ 17	+ 56	+ 131	0
8	+ 17	- 26	+ 28	+ 21	- 40	- 144	- 11	+ 58	+ 84	+ 12
9	- 1	+ 14	+ 21	+ 1	- 37	- 85	+ 8	+ 52	+ 4	+ 23
10	+ 10	- 4	+ 1	+ 14	- 19	+ 13	- 7	+ 16	- 50	+ 26
11	+ 19	+ 3	- 34	+ 4	+ 8	+ 92	+ 13	- 34	- 110	+ 38
12	- 12	- 6	- 26	- 40	+ 82	+ 89	+ 2	- 13	- 175	+ 95
	±0.019	±0.017	±0.035	±0.017	±0.042	±0.118	±0.022	±0.042	±0.108	±0.055

Используя моделирование, можно посмотреть, как математический аппарат двух методов уравнивания действует на различные наблюдения. Может существовать два крайних случая: в одном - поправки склонений, полученные КЦМ, будут равны нулю, а полученные МЦМ дадут большую годовую волну, в другом - наоборот. И при этом годовая волна суточного члена будет одной и той же. Это объясняется тем, что (если предварительно убрать постоянную часть суточного члена) сам математический аппарат МЦМ приводит наблюдения каждой ночи к линейному виду, в то же время в результате использования КЦМ изменение широты от вечера к ночи в любой месяц становится равным по абсолютной величине, но противоположным по знаку изменению широты от ночи к утру в предыдущий месяц. Соответственно, если в реальных наблюдениях суточный член близок к линейному, хорошо работает МЦМ. Если нет, его использовать нельзя. Именно этим объясняются плохие результаты применения МЦМ, приведенные во второй половине таблицы.

Для ФЗТ в Китабе была проделана более детальная работа. Средняя эпоха для вывода каталога наблюдаемых звезд оказалась близкой к эпохе получения каталога HIPPARCOS, который на тот момент можно считать идеальным. После перевода всех полученных наблюдений на систему HIPPARCOS, к ним опять были применены оба метода уравнивания. В обоих случаях полученные фиктивные поправки склонений дали годовую волну:

$$\text{КЦМ : } \Delta\delta = 0.008''\cos(30^\circ t - 124^\circ) + 0.008''\cos(60^\circ t - 184^\circ)$$

$$\text{МЦМ : } \Delta\delta = 0.111''\cos(30^\circ t - 341^\circ) + 0.008''\cos(60^\circ t - 129^\circ)$$

Соответствующие фиктивные годовые волны z-членов сохраняют фазы, а амплитуды уменьшаются с коэффициентом 0.91.

В свое время высказывалось предположение о том, что, получив фиктивный каталог широтных звезд и используя его для обработки наблюдений на том же телескопе, мы тем самым компенсируем ошибки в наблюдениях и получим истинные широты. Исходя из вышесказанного видно, что это неверно. Не зная заранее, как меняются суточные члены в течение года, нельзя выбрать необходимый метод уравнивания. Тем более что реальные наблюдения не бывают крайними случаями, как при моделировании. А в любом промежуточном случае появятся фиктивные годовые волны в склонениях при обоих методах уравнивания.

### Литература

1. **В.Р. Берг.** Труды ГАО АН СССР, 52, вып.2, Ленинград, 1938.
2. **В.А. Наумов.** Влияние суточного члена колебаний широты на ошибки наблюдений и его учет, Сб. «Проблемы определения параметров вращения Земли», Владивосток, 1986, с.47-54.

## ON THE PHYSICAL MEANING OF ANNUAL TRANSFORMED COMPONENT OF DIURNAL TERM IN LATITUDE OBSERVATIONS

Litvinenko E.A.

### Summary

*The annual transformed component of diurnal term in latitude variations is proved to be the result of declination corrections differences obtained by classic chain method from evening and morning observations.*



## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ШИРОТЫ ПУЛКОВА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗТФ-135 ЗА 100 ЛЕТ

Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.

*Изучение медленных изменений широты данного места наблюдений позволяет исследовать процессы, происходящие в регионе наблюдений и обусловленные различными геофизическими причинами. В работе сделана оценка изменения средней широты Пулкова за 100 лет. Исследованы долгопериодические составляющие средней широты, полученные различными методами. Обнаружены компоненты с периодами, близкими к периодам солнечной активности. Возможная взаимосвязь этих компонентов с рядом чисел Вольфа и с рядом интенсивности космических лучей может быть объяснена воздействием солнечной активности на характер температурных инверсий в атмосфере.*

Современные методы определения параметров вращения Земли дают результаты, характеризующиеся высокой точностью и плотностью, с которыми не могут соперничать астрооптические наблюдения. Однако ряды, полученные классическими инструментами, обладают большим достоинством - длительностью, которое делает эти ряды уникальными и позволяет решать на их материале задачи, связанные с долгопериодическими процессами. Данная работа посвящена исследованию медленных вариаций широты Пулкова. В работе были использованы ряды наблюдений на зенит-телескопе ЗТФ-135 (1904-1941; 1948-2003) перевычисленные в системе каталога HIPPARCOS и обработанные в системе ICRS с применением прецессионно-нутационной модели IAU2000A [1]. Данные с 1904 по 1991 год переобработаны рабочей группой по вращению Земли под руководством Y. Vondrak в 2004 году [2]. В таблице 1 представлены некоторые характеристики этих рядов.

Таблица 1.

Продолжительность и средняя эпоха наблюдений	1904.7-1941.5 1923.1	1948.7-2003.8 1978.8
Количество наблюдений (вечеров)	55199 (4131)	102018 (7350)
Средняя ошибка одной широты	$\pm 0.166''$	$\pm 0.185''$
Средняя ошибка среднесуточной широты	$\pm 0.051''$	$\pm 0.055''$

После войны телескоп ЗТФ-135 был установлен южнее довоенного места, поэтому широты из первого ряда были уменьшены на  $1''.599$ . Надо отметить особое качество самого инструмента. На протяжении всего столетнего периода наблюдений, без каких либо существенных переделок, зенит-телескоп Фрейберга-Кондратьева позволял проводить наблюдения без дополнительных регулировок, связанных с изменениями погодных условий.

На рис.1 представлен ряд остатков после исключения из наблюдений полярного колебания по координатам полюса C01(IERS)[3] и его линейная аппроксимация, значения параметров которой также приведены в таблице 2. Поправка широты Пулкова за тектоническое движение плит Земли, вычисленная по геофизической модели Nuvel-1 NNR равна  $0.34 \text{ mas/year}$  ( $10 \text{ mm/year}$ ) [3,4]. Значение скорости изменения средней широты  $d\varphi/dt = -0.031 \text{ mas/year}$  ( $1 \text{ mm/year}$ ).

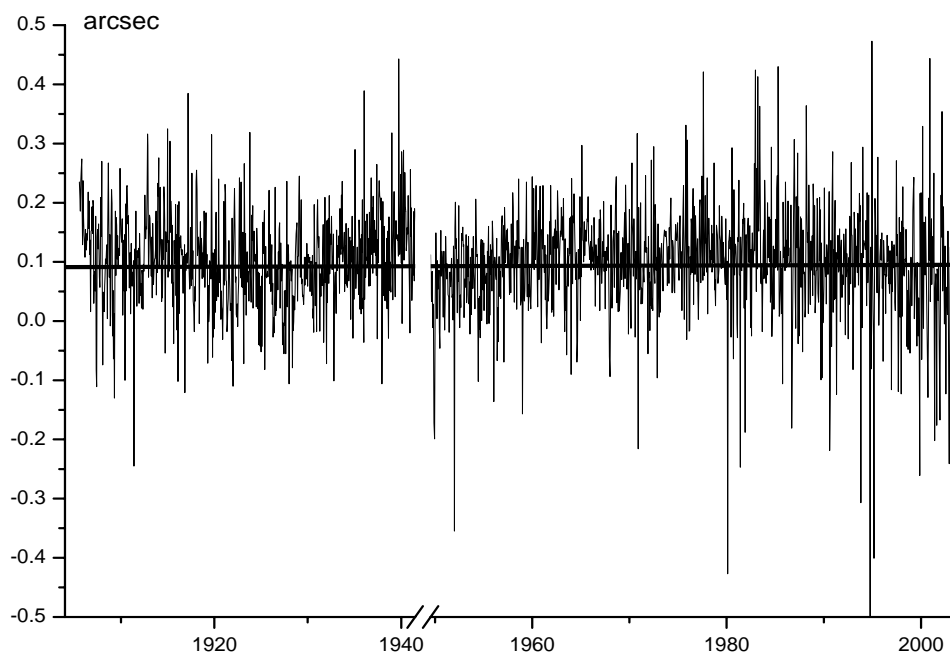


Рис.1. Неполярные вариации широты ЗТФ-135, их линейная аппроксимация.

Таблица 2.

Период наблюдений	C01	
	$\Delta\varphi_{2000.0}$ (mas)	$d\varphi/dt$ (mas/year)
1904-1941 (C01)	$102 \pm 22$	$-0.032 \pm 0.029$
1948-2003 (C01)	$95.9 \pm 5.1$	$-0.028 \pm 0.018$
1904-2003 (C01)	$90.1 \pm 3.8$	$-0.031 \pm 0.071$

По определению А.Я. Орлова, средней широтой в данный момент называется такая широта, какой она была бы в этот момент, если бы не было ее периодических изменений [5]. В 1925 г. им были предложены формулы для вычисления средней широты, в результате использования которой получается ряд, свободный от влияния чандлеровской, годовой и полугодовой составляющих колебания широты. В работе для выделения долгопериодического тренда и получении средней широты был использован метод “Гусеница” [6], аналогичный метод известен как сингулярный спектральный анализ (SSA) (Singular Spectrum Analysis). В работах [7,8] с помощью этого метода было показано наличие годовой, чандлеровской, второй чандлеровской, полугодовой составляющих в изменениях широты Пулкова. Таким образом, можно предположить, что кривая, построенная методом “Гусеница”, является средней широтой, т.к. этот метод даёт возможность выбирать компоненты заведомо свободные от периодических изменений, исключаемых методом Орлова.

Так как изменения средней широты, обусловлено существованием различных причин, таких как возможное вековое движение полюса, движение литосферных плит, геологические процессы в районе наблюдений, “жизнь” павильона, возникает потребность в зависимости от решаемой задачи строить ряды, в которые были бы включены те или иные интересующие исследователя составляющие процесса. Выбирать сочетания различных компонент, долгопериодических, гармонических или даже квазигармонических позволяет используемый нами метод “Гусеница” [7].

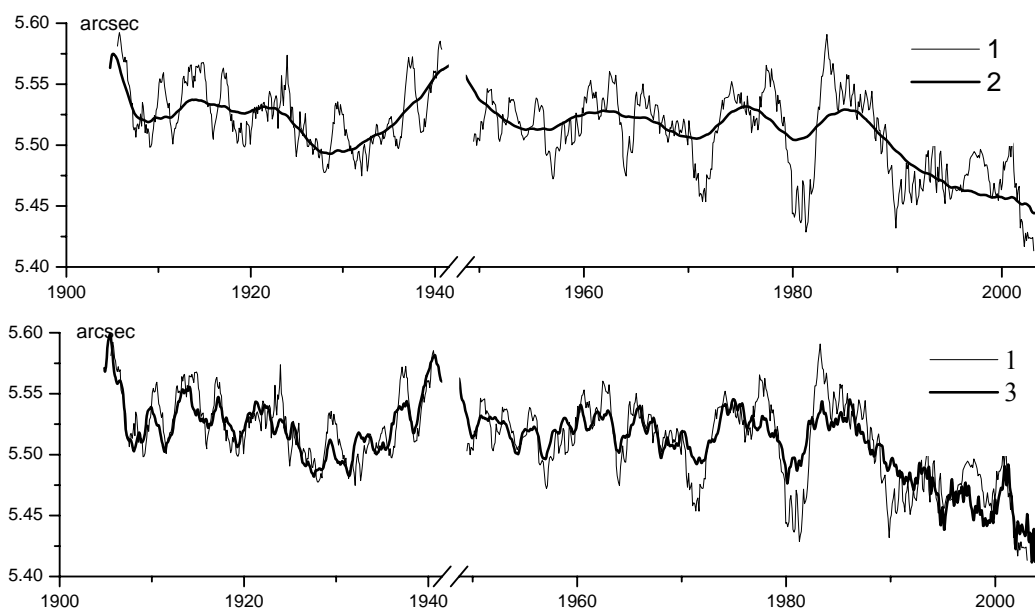
В основе метода лежит анализ главных компонент, который является ядром факторного анализа. Процедура исследования одномерного временного ряда начинается с преобразования его в матрицу. Задавшись некоторым числом (“гусеничным” лагом), значениями исходного ряда последовательно заполняют строки матрицы. Далее вычисляется корреляционная матрица, сингулярное разложение которой даёт диагональную матрицу собственных чисел и ортогональную матрицу собственных векторов корреляционной матрицы. Собственные вектора корреляционной матрицы и главные компоненты исходной матрицы могут быть исследованы. И что особенно важно, осуществляется восстановление ряда по тем главным компонентам, которые были выбраны исследователем. Все ряды визуализируются и упорядочиваются по возрастанию их вклада в исходный ряд. Это позволяет интерактивно производить непосредственный поиск гармонических компонентов, фильтрацию или сглаживание ряда, с помощью периодограммы удаётся осуществлять проверку разложения.

По наблюдениям ЗТФ-135 были построены непрерывные ряды нормальных точек с шагом 0.05 и 0.1 года, пропуск был заполнен данными из международного ряда, что позволило исследовать долгопериодические составляющие широты на 100 летнем интервале. Методом “Гусеница” с “гусеничным” лагом в 12 лет было получено разложение ряда нормальных точек. В таблице 3 приведены периоды первых основных составляющих изменения широты из 11 первых компонент и их вклад в исходную кривую. Вклад главного тренда составляет обычно более 90%, в данном случае он составляет 98.9%. Значение вклада для остальных составляющих вычислены в предположении, что остаток после исключения главного тренда составляет 100%.

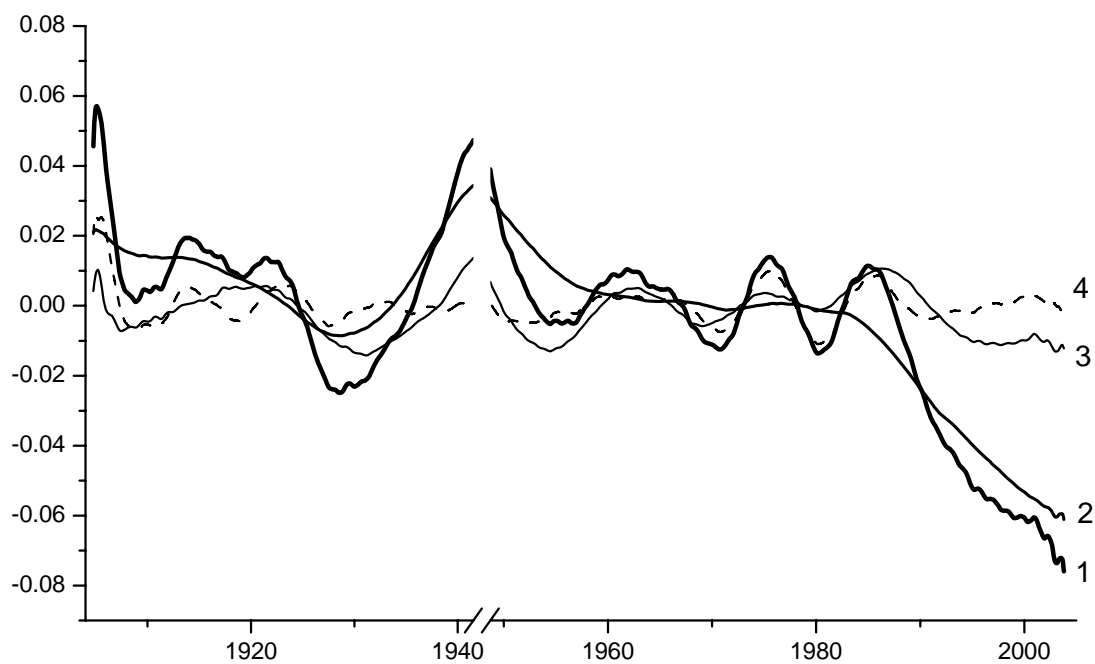
**Таблица 3.**

Составляющая	ЗТФ-135	
	Вклад (%)	Период (год)
Главный тренд	-	-
Чандлеровская	53.2	1.19
Годовая	15.6	1.00
Вторая чандл.	2.6	1.13
Второй тренд	0.9	20.48
Полугодовая	0.7	0.51
Третий тренд	0.3	10.23

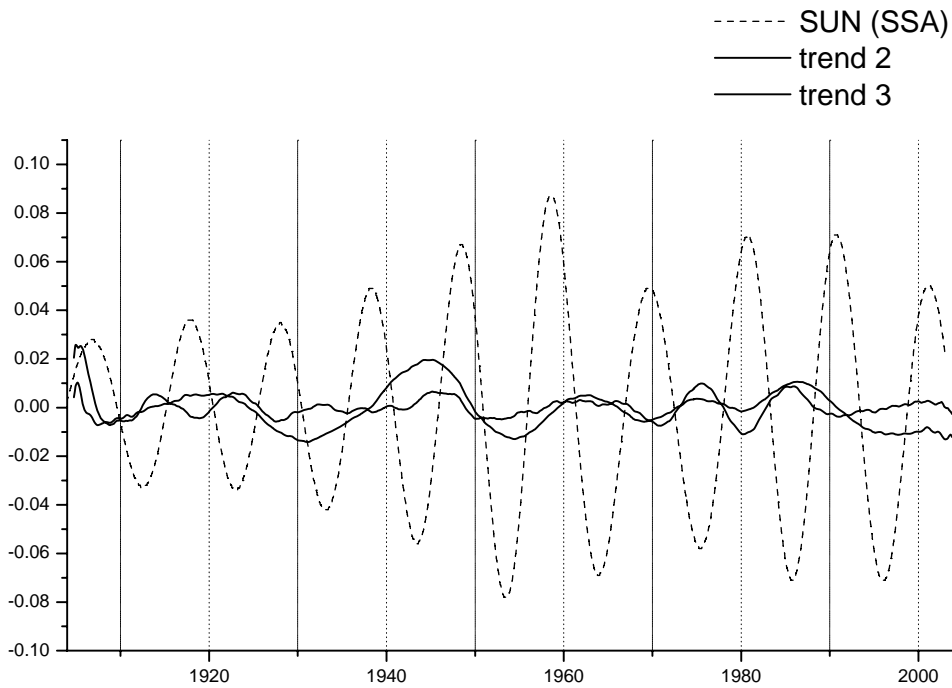
На рис.2 представлены изменение средней широты (метод Орлова) из ряда нормальных точек с шагом 0.1, долгопериодическое изменение широты (главный тренд) и средняя широта, полученная путём исключения чандлеровской, годовой, второй чандлеровской и полугодовой составляющих из ряда нормальных точек 0.05 (метод “гусеница”).



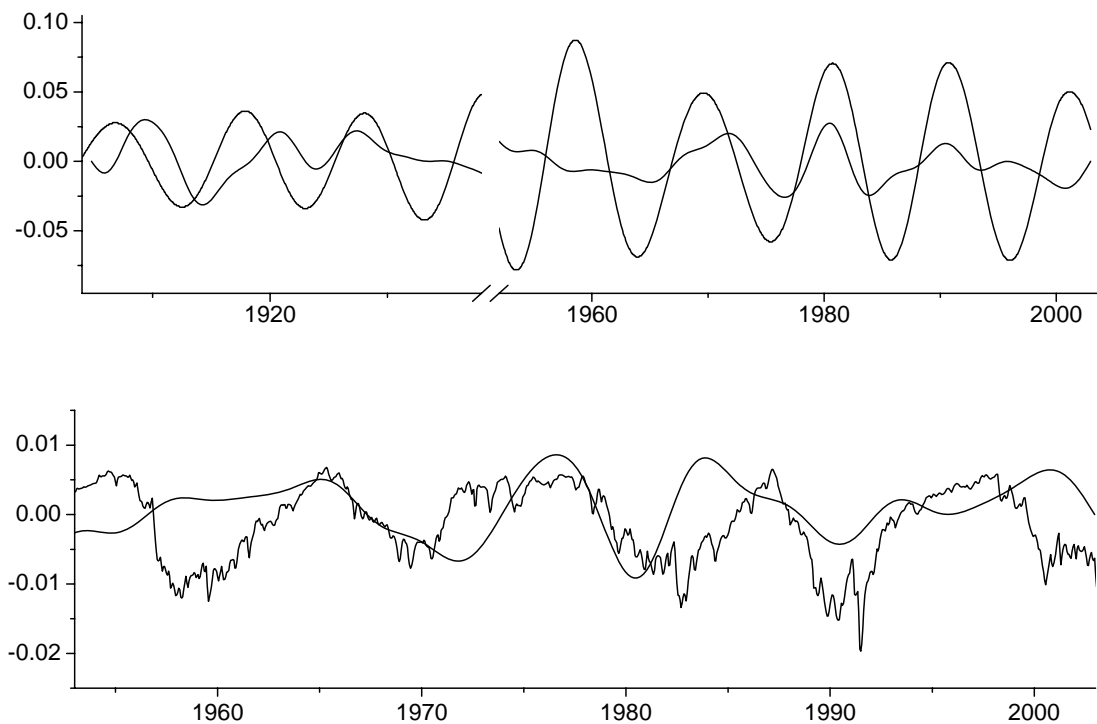
**Рис.2.** 1 – изменение средней широты, полученной методом Орлова;  
 2 – долгопериодический тренд, 3 - изменение средней широты,  
 полученные методом “Гусеница”.



**Рис.3.** Долгопериодические изменения средней широты (1),  
 и первые три трендовых компонента (2, 3- с периодом 20.48; 4 – с периодом 10.23).



**Рис.4.** Кривая центрированных и нормированных чисел Вольфа, вторая и третья составляющие тренда долгопериодического изменения широты.



**Рис.5.** *Верхний график:* сопоставление инвертированной кривой неполярных вариаций широты, отфильтрованных узкополосным фильтром с кривой чисел Вольфа.  
*Нижний график:* - сопоставление кривой неполярных вариаций широты, отфильтрованных узкополосным фильтром и с рядом интенсивности космических лучей.

Из рис.3 и табл.3 видно, что вторая и третья компонента тренда дают периодичу, близкую к периодам солнечной активности. Наличие этих периодичностей побудило

нас исследовать ряд неполярных вариаций на возможную взаимосвязь изменения широты и солнечной активности. Мы использовали узкополосный фильтр с частотами 0.06-20 циклов в год. Результат фильтрации, сопоставленный с рядами чисел Вольфа и рядом интенсивности космических лучей, представлен на рис.4 и 5. Возможно, в данном случае солнечная активность проявляется, как систематическое воздействие на местные условия наблюдений. Например, механизмом воздействия солнечной активности на изменение широты может быть образование температурных инверсий в атмосфере, порождающих закономерные изменения наклонов атмосферных слоёв, которые и могут быть причиной периодической составляющей неполярных изменений широты [8]. Проверка этого механизма требует дальнейших исследований.

### Литература

1. *Convention 2000, IERS*, (<http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>)
2. *Y. Vondrak, C.Ron*, “Solution of Earth Orientation Parameters in the Frame of New Earth Orientation Catalogue”. Abstract book. “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future”. 2004, Kiev, p.139.
3. *IERS*, TECHNICAL NOTE 21. (<http://hpiers.obspm.fr/>)
4. *Y. Vondrak, I. Pesec, C. Ron, A. Cepec*. “Earth orientation parameters 1899.7 – 1992.0 in the ICRS based on the HIPPARCOS reference frame”. Public. of the Astr. Inst. of the Academy of Sciences of the Czech Rep.
5. *А.Я. Орлов*. “Служба Широты”, АН СССР, Москва, 1958, 123 с.
6. *Данилов Д.Л., Жиглявский А.А.* (ред.), “Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница””, 1997, СПбГУ, с.308. (<http://www.gistatgroup.com/gus/>)
7. *В.Л. Горшков, Н.О. Миллер, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова*. “Исследование геодинамических рядов методом главных компонент”, Изв. ГАО, 214, 2000, с.173-180.
8. *В.Л. Горшков, Н.О. Миллер, Е.Я. Прудникова, В.А. Наумов, Н.Р. Персиянинова*. “Исследование основных составляющих вектора вращения Земли по результатам Пулковских и международных наблюдений” - труды конференции “Внутреннее ядро-2000” (ноябрь 2000 г.).
9. *А.Е. Филиппов*. “Сравнение пулковских и иоганнесбургских наблюдений широты” АН УССР, Киев, 1956, 193 с.

## ON THE SLOW LATITUDE VARIATIONS OBTAINED AT PULKOVO WITH ZTF-135 DURING 100 YEARS

Miller N.O., Prudnikova E.Ja.

### Summary

*The slow local latitude variations permit to investigate the processes in the region of observations caused by different geophysical factors. In this paper the estimation of Pulkovo main latitude on the interval of 100 years was made. The long-periodical mean latitude components obtained by different methods were investigated. The components were found with periods near to the periods of solar activity. The probable connection of these components with Wolf's number set and with cosmic rays set can be explained by the influence of solar activity on the thermal inversion in atmosphere.*

## ПРИЛИВНЫЕ ВАРИАЦИИ ИЗ СТОЛЕТНЕГО РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ ШИРОТЫ НА ЗТФ-135

Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.

*Плотность и однородность столетнего ряда наблюдений широты, возросшая точность редуцированных моделей позволила не только оценить короткопериодические приливные возмущения локального характера, но и получить их вариации во времени. Используемый для этой цели ряд исследовался на наличие приливных волн с помощью метода анализа Диминга для неравномерно распределенных рядов.*

В настоящее время определение координат полюса позволяет находить и исследовать ряды неполярных изменений широт, полученных по мгновенным наблюдениям без предварительного сглаживания. Большая часть неполярных изменений определяется долго- и короткопериодическими колебаниями отвеса и рефракционного зенита, вызываемыми, в свою очередь, различными геофизическими и атмосферными явлениями.

В данной работе используется ряд наблюдений на ЗТФ-135 за 100 летний период (1904-2004 гг.), частично пересекающийся с данными, использованными в большой международной работе по определению ПВЗ (1899.7-1992.0) по рядам астрометрических наблюдений [1].

Программы наблюдений, 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 [2]. Точность использованных наблюдений характеризуется ошибкой мгновенной широты  $\varepsilon_0$  и ошибкой среднесуточного значения  $\varepsilon_1$  (табл.1).

**Таблица 1.**

Периоды	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_1$
1904-1941	0,17''	0,057''
1948-1988	0,18	0,048
1989-2002	0,20	0,065

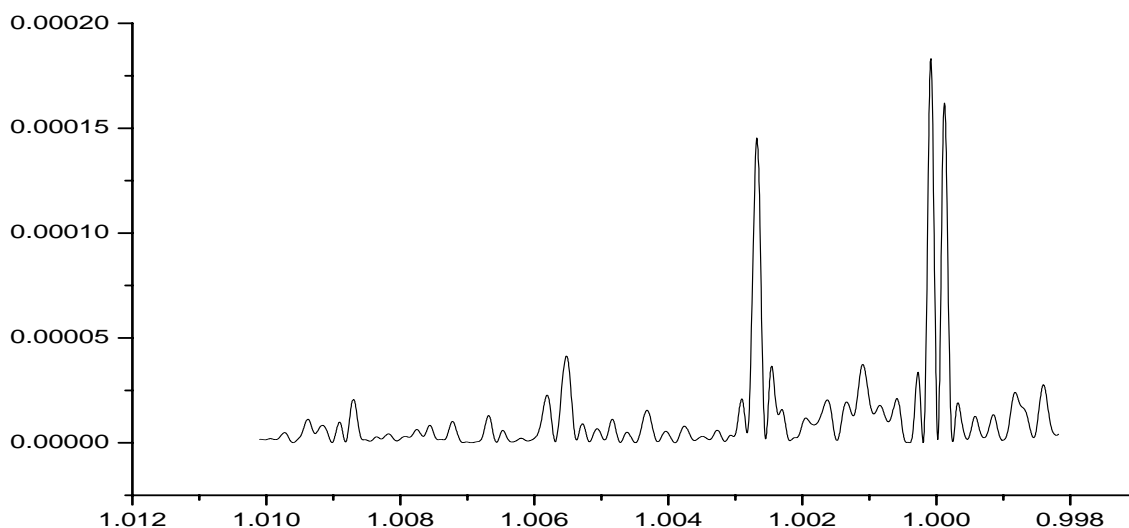
Неполярные вариации широты были вычислены с использованием координат X,Y взятых из рядов ПВЗ международной службы вращения Земли EOP(IERS) C01 (1904-2003 гг.) и C04 (1962-2004 гг.) (<http://hpiers.obspm.fr/>).

Известно, что астрономические наблюдения на частотах, близких к интересующим нас приливным полумесячным и месячным волнам, испытывают влияние рефракционных погрешностей, как правило, возбуждаемых циклональной деятельностью атмосферы. Этот эффект, обусловленный взаимодействием потока воздушных масс с инструментом и павильоном, приводит к возникновению температурного градиента, ответственного за аномальное рефракционное смещение изображений звезд навстречу ветра. С 1968 года учитывался так называемый эффект ветра по метеоданным, сопровождающим астрономические наблюдения. Были проведены исследования влияния на-

правления ветра ( $A$ ) на изменение широты за периоды 1968-1974 и 1998-2003. На основании исследований этого эффекта за 1968-1974 [4] и за 1998-2003, в наблюдения 1968-2003 гг. [5] были введены поправки вида

$$\Delta\varphi = 0.018'' + 0.078''\cos(A + 23^0) \pm 0.011 \pm 0.015 \pm 3^0$$

Для оценки наличия различных приливных волн в исследуемом ряде был проведён спектральный анализ методом Диминга [6]. Неравномерность распределения данных по времени при использовании спектрального анализа методом Диминга негативного влияния не оказывает. Особенно важно это в случае исследования высокочастотной области спектра. Уже отмечалось [7], что благодаря относительно высокой плотности рядов влияние неравномерности распределения наблюдений незначительно при исследовании периодов вплоть до околосуточных. При переходе в околосуточную область спектра необходимо исключать ложные пики на частотах  $(\nu_i \pm \nu_0)$ , где  $\nu_i$  – частота изучаемого пика,  $\nu_0 = 1.0$  цикл/сут - частота побочного пика, вызванного суточной периодичностью в распределении наблюдений. Результаты спектрального анализа приводятся в таблице 2 (периоды в сутках) и на рис.1. На рис.1 в качестве примера представлен спектр в околосуточной области частот, полученный для периода 1948-1968 гг. после исключения ложных пиков, производимых побочным всплеском в спектре окна на частоте  $\nu = 1.0$ . На всех периодах наблюдений на околосуточной частоте присутствует раздвоенный всплеск. Из таблицы 2 видно, что кроме области, содержащей приливные волны  $S_1$ ,  $P_1$ ,  $OO_1$ , существует также активная область частот вблизи периода средних лунных суток, что, по-видимому, говорит о присутствии волны  $M_1$ . В 1904-1941 гг. спектр имеет вид мощного шума, в котором плохо выделяются отдельные составляющие, отчетливо выделяющиеся в 1948-1988 гг. В области околосуточных периодов уверенно выделяются составляющие вблизи тропического, драконического и синодического месяцев, в чем, возможно, проявляется влияние волны  $M_m$ .



**Рис.1.** Спектральная плотность околосуточной области спектра исследуемого ряда за 1948-1968 годы.



Таблица 2.

Приливные волны	1904-1941	1948-1968	1968-1988	1988-2003*	1956	1957
O <sub>1</sub>					1.0752	1.0736
M <sub>1</sub>		1.0341	1.0343	1.0328	1.0348	1.0346
P <sub>1</sub>	1.0027	1.0026	1.0028	1.0022	1.0223	
	1.0001	1.0000	1.0008	1.0005	1.0030	1.0043
	0.9986	0.9998	0.9992	0.9994	0.9994	0.9982
						0.9947
K <sub>1</sub>	0.9928	0.9922			0.9919	0.9811
Φ <sub>1</sub>					0.9460	
OO <sub>1</sub>					0.9413	
M <sub>2</sub>				0.5177	0.5101	0.5125
L <sub>2</sub>					0.5090	0.5099
R <sub>2</sub>					0.5068	0.5071
S <sub>2</sub>				0.5007	0.5009	0.5000
T <sub>2</sub>				0.4998	0.4998	0.4994
K <sub>2</sub>					0.4986	0.4986
					0.4963	0.4978

Столбец (\*) таблицы 2 содержит результаты анализа ряда, состоящего не из средневечерных, а среднегрупповых широт, когда в течение ночи было получено от одного до трех значений. Поэтому были выявлены полусуточные составляющие. В спектре заметны периоды, соответствующие волнам M<sub>2</sub>, T<sub>2</sub> и S<sub>2</sub>. Кроме того, методом Диминга исследовались наблюдения, выполненные во время Международного Геофизического Года (МГГ) в 1956-57 гг. по расширенной программе. Два ряда примерно по 4 тысячи мгновенных широт дали результаты, приведенные в двух последних столбцах таблицы.

Спектральный анализ показал наличие в исследуемых рядах значимых составляющих из области суточных или полусуточных периодов. Поэтому по соответствующим колебаниям отвеса была выполнена оценка комбинаций чисел Лява  $A = I + k - l$ . Уравнение модели следующее:

$$\Delta\varphi(t) = A y(t) + \varepsilon(t), (1)$$

здесь полигармонические функции колебаний отвесных линий  $y(t)$  взяты из работы [1],  $\varepsilon(t)$  – шумовая компонента,  $\Delta\varphi(t)$  - стандартно редуцированная величина уклонений широты

$$\Delta\varphi(t) = (\varphi - \varphi_0) - (x \cos \lambda_0 - y \sin \lambda_0)$$

При вычислении  $\Delta\varphi(t)$  учитывалось влияние внутрисуточных океанических нагрузок и лунно-солнечных возмущений на ПВЗ. В связи с использованием при обработке данных новой прецессионно-нутационной модели IAU2000A, редуцирующие члены  $d\psi \sin \varepsilon$  и  $d\varepsilon$ , ответственные за неточности старой модели нутации не были использованы, так как они практически не оказывают влияние на  $\Delta\varphi(t)$  и используются лишь с 1984 года. Числа  $A$  были найдены методом наименьших квадратов (МНК) за разные периоды наблюдений для различных комбинаций выбранных коэффициентов приливной волны.

Предварительно была выполнена относительная оценка вклада каждой из 17 составляющих [1] в вариациях, полученных из наблюдений широты. Эта оценка практи-

чески совпадает с теоретической для всех волн, кроме волны  $O_1$ , что, возможно, зависит от точности и плотности наблюдений. Перед проведением расчётов была сделана проверка на устойчивость ряда в зависимости от его плотности. Была выполнена серия испытаний, заключающихся в том, что случайным образом убиралось 5% наблюдений. Наиболее устойчивым оказался ряд с 1948 по 1994 годы. Это может быть связано с наличием двух шестилетних периодов наблюдений 1948-1955 и 1955-1961, когда наблюдения выполнялись по расширенной программе (“от зари до зари”), а также тщательной обработкой наблюдений.

В работе [1] по ряду наблюдений 1904-1992,0 было получено  $\Lambda=1,12 (\pm 0,11)$ , вычисленное нами за этот же период для волн  $M_2, O_1$   $\Lambda=1,25 (\pm 0,11)$ .

**Таблица 3.**

	1948-2003 (C01)	1963 - 2003 (C04) w	1904-41;1948-03 (C01)
Число пар	100176	63490	146340
$M_2 T_2 K_1 O_1 P_1$	1,389±0,052	1,171±0,103	1,351±0,198
$M_2 T_2 O_1 P_1$	1,433±0,052	1,238±0,097	1,287±0,081
$M_2 T_2 K_1 P_1$	1,393±0,054	1,211±0,101	1,344±0,083
$M_2 T_2 P_1$	1,411±0,067	1,277±0,120	1,206±0,085
$M_2 O_1$	1,273±0,086	1,236±0,142	1,212±0,089
$M_2$	1,265±0,127	1,247±0,171	1,228±0,098

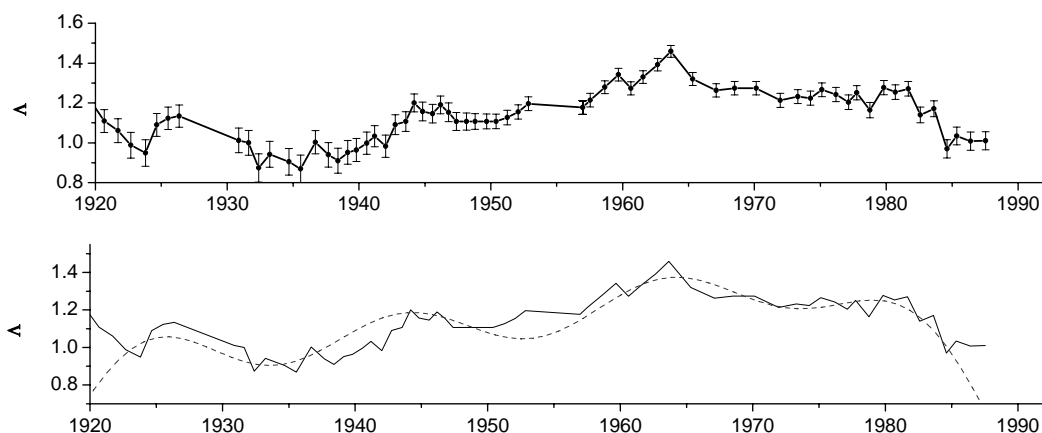
В первом столбце таблицы 3 приведены обозначения приливных волн, обнаруженных спектральным анализом в исследуемых широтных рядах. Второй и третий столбцы содержат числа  $\Lambda$ , вычисленные по одним и тем же данным, но первый ряд содержит большее число точек, хотя исправлен менее точными поправками за движения полюса и не исправлен за эффект ветра. Из сравнения этих двух столбцов видно, что внесение поправок за эффект ветра улучшает результаты в систематическом отношении, но ухудшает в случайном. В четвертом столбце использованы все имеющиеся наблюдения.

Для учёта поправок за движение полюса необходимо выполнять интерполяцию изменений широты, вычисленной по координатам полюса на момент наблюдения. При использовании ряда C01 не удаётся учесть короткопериодические флуктуации в движении полюса, что приводит к увеличению разброса. Если учитывать эту поправку с помощью ряда C04 (табл. 3), разброс уменьшается, но тогда не удаётся использовать весь ряд наблюдений.

По приливным волнам  $M_2$  и  $O_1$  получено изменение значения числа  $\Lambda$  во времени. Вычисления проводились с учётом поправки за движение полюса (C01) и поправки за внутрисуточное приливное возмущение за счёт океанических нагрузок. Динамика вычислялась по 300000 мгновенных широт с лагом, равным году, за период 1904-2004 гг.

На рис.2 на верхнем графике представлена кривая изменения значений числа  $\Lambda$  для моментов времени, являющихся средним для выбранного интервала. На нижнем графике построена сглаженная кривая, в которой наблюдается периодичность, близкая к 20 годам.

На интервале до 1941 года заметна несколько заниженная оценка числа  $\Lambda$ . А на послевоенном интервале в районе 1963.5 имеется пик, а затем кривая становится более гладкой. Полученные вариации комбинации чисел Лява могут отражать не упругие свойства Земли в целом, а региональные особенности места наблюдений. Выявление причин такого поведения кривой требует дальнейшего исследования.



**Рис.2.** Динамика изменения  $\Lambda$ .

Следует подчеркнуть, что именно благодаря длительности и стабильности исследуемого ряда удалось оценить динамику числа  $\Lambda$ , что на сегодняшний день затруднительно выполнить из других, наблюдений, полученных более современными средствами, ввиду их сравнительно короткой реализации.

#### Литература

1. **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.
2. **Convention 2000**, IERS, <http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>.
3. **Bizouard C**, 2002, (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>).
4. **Л.Д. Костина, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова**, Влияние эффекта ветра на наблюдения широты с двумя зенит-телескопами в Пулковке. "Вращение Земли и геодинамика", Ташкент, Фан, 1983, с.121-126.
5. **Е.Я. Прудникова**, Об учёте эффекта ветра в наблюдениях широты. Настоящий сборник.
6. **Deeming T.J.** Fourier analysis with unequally-spaced data //Astrophys. And Space Sci. - 1976. 36. P.137-158.
7. **В.В. Витязев, Е.Я. Прудникова**, Спектры скважности рядов астрономических наблюдений, Вестник СПбГУ, сер.1, вып.2, 1994, с.78-86.

### ON THE TIDAL VARIATIONS FROM THE PULKOVO LATITUDE OBSERVATIONS DURING THE CENTURY

**Miller N.O., Prudnikova E.Ja.**

#### Summary

*The density and homogeneity of latitude set obtained during 100 years, the increased accuracy of model reductions permitted to produce from diurnal variations of vertical not only the local tidal deformations but their dynamic variations. From the nonequally-spaced nonpolar variation set the short-periodic components were determined by spectral Deeming analysis.*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ШИРОТЫ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ЭПОХУ 2000.0 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА БОЛЬШОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КРУГЕ ЭРТЕЛЯ**

**Наумов В.А.**

*Геометрический центр круглого зала главного здания ГАО РАН является номинальным исходным пунктом АГС России. Выполнено перевычисление координат этого пункта на эпоху 2000.0 по наблюдениям рядов абсолютных каталогов Пулковской обсерватории на Большом вертикальном круге Эртеля.*

С 1910 г. по настоящее время геометрический центр круглого зала (ЦКЗ, углубление на центральной круглой плитке) главного здания Главной (Пулковской) астрономической обсерватории является номинальным исходным пунктом единой государственной астрономо-геодезической сети (АГС). Его утвержденной (на основе довоенных измерений) геодезической широтой Системы 1942 года является

$$B=59^{\circ} 46' 18.55''$$

на эллипсоиде Красовского [1]. Отметим, что главное здание обсерватории восстановлено на прежних фундаментах [2,3]. Послевоенные измерения показали, что отметка нового ЦКЗ совпадает с центром подвального довоенного столба с погрешностью, не превышающей 4 см., т.е. совпадает со старым ЦКЗ.

С 1924 г. астрономической широтой ЦКЗ является

$$\varphi=59^{\circ} 46' 18.71'',$$

которая относится к среднему полюсу эпохи наблюдений 1915 г. на вертикальном круге Эртеля (БВК) [4]. Указанное значение широты использовано при установлении национальных систем координат 1932 и 1942 годов, и считается таковым до сих пор. Учитывая, что определения широты в Пулкове выполняются и поныне, представляется очевидной научная актуальность пересмотра и уточнения принятого значения. Пересмотр необходим уже потому, что в первой половине прошлого столетия было обнаружено вековое движение полюсов Земли, которое ученые первоначально восприняли неоднозначно. Многие считали, что вековое движение полюса является результатом ошибок наблюдений международной службы широты.

Комиссия Международного астрономического союза по вращению Земли во время генеральной ассамблеи в августе 1967 г. в Праге приняла следующую резолюцию, определяющую положение северного полюса: «Координаты мгновенного полюса должны относиться к началу, определенному следующими пятью исходными широтами международных станций:

$$\begin{aligned} &39^{\circ} 8' 3.605'', \text{ Мидзусава,} \\ &39 8 1.850, \text{ Китаб,} \\ &39 8 1.850, \text{ Карлофорте,} \\ &39 8 13.202, \text{ Гейтерсберг,} \\ &39 8 12.096, \text{ Юкайя.} \end{aligned}$$

Это начало называется «Условное международное начало (СИО)»[5].

После официального решения комиссии Международного астрономического союза споры о существовании векового движения полюсов Земли (для упрощения часто пишут в единственном числе - «полюс Земли») постепенно прекратились. Вековое движение полюса Земли приводит к изменению значений координат полюса, вычис-

ляемых в центре международной Службы движения полюса, и, следовательно, к изменению также широт и долгот всех пунктов Земли. Поэтому координаты пунктов Земли позднее взаимное движение различных плит Земли. Так как принятая для Пулкова широта вычислена по наблюдению на Большом вертикальном круге Эртеля (БВК) абсолютных склонений звезд с помощью только одного каталога, а в Пулкове наблюдения по определению абсолютных склонений звезд выполнялись практически постоянно с 1840 г. по 1993 г. примерно один каталог в десять лет, то необходимо это значение широты перевычислить. Кроме этого, с 1904 г. выполнялись наблюдения широты на зенит-телескопе ЗТФ-135, а затем и на зенит-телескопе ЗТЛ-180, поэтому целесообразно выполнить уточнение значения широты Пулковской обсерватории по материалам практически всех наблюдений. Например, только на БВК до 1924 г. выполнено около десятка абсолютных каталогов, в частности, на эпоху 1915 г. выполнено два каталога и получено два разных значения широты Пулкова. На зенит-телескопе ЗТФ-135 получено около 200 тысяч наблюдений широт.

В 1822 г. Ф.В. Бессель, предложил способ вывода абсолютного каталога склонений звезд, который получил широкое распространение. Склонения звезд предварительно вычислялись по формулам

$$\begin{aligned}\delta_{0\text{в.к.}} &= \varphi_0 \pm z_{0\text{в.к.}}, \\ \delta_{0\text{н.к.}} &= \varphi_0 \pm z_{0\text{н.к.}},\end{aligned}$$

где  $\delta_0$  – склонение звезды, вычисленное по принятому значению широты  $\varphi_0$ ,  $z_0$  – наблюденное зенитное расстояние звезды.

Бессель предложил решать систему уравнений по разностям предварительных склонений звезд, полученных по наблюдениям звезд в верхней и нижней кульминациях, для определения поправок к широте и постоянной рефракции, т.е.:

$$\delta_{0\text{н.к.}} - \delta_{0\text{в.к.}} = 2\Delta\varphi + \Delta\mu(\operatorname{tg} z_{\text{н.к.}} \pm \operatorname{tg} z_{\text{в.к.}}),$$

где  $z$  - абсолютное значение зенитного расстояния.

С 11 марта 1842 г. в Пулкове начались наблюдения этим способом первого пулковского каталога на эпоху 1845.0 Х.А.Ф. Петерсом на вертикальном круге Эртеля. Поправки делений круга определены Петерсом и переопределены В. Струве. Обработка наблюдений была выполнена Г. Гюльденом с учетом поправок делений круга, найденных В.Струве. Затем, было обнаружено, что поправки делений В.Струве также ошибочны. Поэтому весь каталог вновь переобработан М. Нюреном и издан в 1875 г.

В дальнейшем, при реализации этого метода, возникли большие затруднения, связанные с различными систематическими ошибками, и мнения астрономов в оценке способа Бесселя разошлись.

Чтобы оценить результаты наблюдений методом Ф.В.Бесселя, приведем некоторые особенности получения пулковских каталогов.

Каталоги 1845 и 1866 гг. за колебания полюса не исправлялись. При обработке каталога 1885 г. колебание широты получено из наблюдений звезд этого каталога. В каталоге 1900 г. колебание широты взято из бюллетеней МСШ. В этом каталоге впервые учтено влияние влажности воздуха на рефракцию. Данные были получены по наблюдениям Геофизической обсерватории в Павловске, расположенной в 12 км от Пулкова. Следуя авторитетам Лапласа и Бесселя, определение влажности воздуха в Пулкове при работах над предыдущими каталогами не производилось [6].

М. Нюрен при выводе каталога 1885 г. в Пулкове для лучшей сходимости зенитных расстояний в верхней и нижней кульминациях использовал температуру воздуха, вычисленную по формуле  $t = t_e + \tau(t_i - t_e)$ , где  $t_e$ ,  $t_i$  – показания внутреннего и внешнего термометров,  $\tau$  - эмпирически полученный коэффициент [6]. В действительности этот коэффициент изменялся с зенитным расстоянием, но для каталогов 1885, 1892, 1892<sub>1</sub> было принято среднее значение, которое менялось в дальнейшем от каталога к

каталогу, что свидетельствует о неоднородности пулковских каталогов. (Известно, что ошибка отсчета температуры на  $-0.1^\circ$ , практически равносильна ошибке коэффициента рефракции, равной  $+0,02''$  [7]).

При выводе пулковского каталога 1905 г., полученного по наблюдениям П. Остащенко-Кудрявцева на вертикальном круге Эртеля, О.А. Баклундом во все зенитные расстояния введена эмпирическая поправка

$$\Delta z = - 0.16'' \sin 2 z.$$

При этом он изменил поправку за рефракцию, взятую из Пулковских таблиц, на величину  $0.09''$ , т.к. в такой обработке этот каталог находится в лучшем согласии с системой FK3, чем какой-либо другой из пулковских каталогов склонений [8].

Эмпирические поправки применялись не только в Пулкове. Так, в Одессе И. Бонсдорф по наблюдениям на вертикальном круге Репсольда после специального исследования пришел к выводу, что для лучшей сходимости наблюдений в показания термометра при инструменте необходимо ввести поправку  $+0.10^\circ$ . При этом полученное из наблюдений значение постоянной рефракции изменяется на величину  $0.022''$  [8].

В Пулкове И. Бонсдорф обнаружил, что разности зенитных расстояний, измеренных в главном здании и в южной обсерватории на одном и том же инструменте, расходятся, начиная с зенитных расстояний  $60^\circ$ , и достигают  $0.58''$  при зенитных расстояниях  $80-85^\circ$ . Расхождение объясняется зальной рефракцией в главном здании. Южная обсерватория располагалась в нескольких десятках метров от главного здания.

Все пулковские каталоги склонений на вертикальных кругах созданы с использованием способа Бесселя (кроме каталога 1993 г.) по наблюдениям большого количества звезд в верхней и нижней кульминациях. Известно, что этот способ, в отличие от широтных наблюдений службы широты, позволяет определить абсолютное значение широты, т.е. значение, не зависящее от ошибок склонений звезд. Хотя точность получения широты способом Бесселя невелика, но надо иметь в виду, что она повышается с широтой точки наблюдения и ошибки значения широты достигают минимального значения на широте  $60 - 70$  градусов. К сожалению, оказалось, что некоторые каталоги, даже в Пулкове, выполнены не строго абсолютно.

В настоящей работе использованы значения широты Центра круглого зала (ЦКЗ) Пулковской обсерватории, полученные по наблюдениям рядов абсолютных каталогов склонений звезд на различные эпохи, т.е. по наблюдениям звезд в двух кульминациях по способу Бесселя. Затем эти широты были перевычислены на эпоху 2000 г. с учетом движения полюса и тектонического движения плит Земли.

Исключением является каталог 1958 г. Б.К.Багильдинского и Г.С.Косина, который, хотя и выполнен по способу Бесселя, но для двух вариантов отдельно: для ярких и слабых звезд. Возможно, это привело к уменьшению влияния рефракции на определение склонений звезд из-за лучшего ее учета. Каталог и выполнялся для получения склонений звезд. Но при таком способе обработки каталога получилось, к сожалению, два значения постоянной рефракции, что допустимо, если принять во внимание, что в действительности мы находим не значение постоянной рефракции, а выполняем более подходящий ее учет. Например, в работе [7] на 88 стр. показано влияние ошибок метеофакторов на значение наблюденной поправки рефракции и предложено считать, что способ Бесселя дает не поправку коэффициента рефракции, а исправляет ошибки учета метеофакторов для определенного набора звезд. Таким образом, мы устраняем формальные упреки к способу Бесселя. Но, к сожалению, каталог Багильдинского и Косина дает два значения наблюденной широты столба павильона. И это тоже не очень большая беда, можно взять средневесовое значение широты (эти значения мало отличаются друг от друга - на  $0.03''$ ). Но авторы не привели значения наблюденных широт к центру круглого зала, а расстояние для перевода дали с недостаточной точностью. Они отме-

тили лишь следующее - БВК был расположен в послевоенном павильоне в 200 м к югу от главного здания [9,10]. В настоящий момент этот павильон перестроен. Значение расстояния утеряно. Поэтому мы не смогли воспользоваться этим каталогом для определения широты ЦКЗ ГАО.

Приведение широты на 2000г. вычислялось по формуле:

$$\varphi_{2000} = \varphi_{T_i} + (\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i}) + \Delta\varphi^1_{T_i}$$

где  $\varphi_{2000}$  - значение средней широты, вычисленное на эпоху 2000г.,  $\varphi_{T_i}$  - значение широты, полученное при создании каталога абсолютных склонений звезд на эпоху наблюдений - ( $T_i$ ),  $(\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i})$  - перевод значений средней широты с эпохи  $T_i$  на 2000г за вековое движение полюса, т.е. за изменение средних координат полюса X,Y,  $\Delta\varphi^1_{T_i}$  - поправка широты Пулкова за тектоническое движение плит Земли, вычисленная по геофизической модели Nuvel-1 NNR и равная +0.034" в столетие [11,12]. Принимаем  $\Delta\varphi^1_{2000} = 0$ , получаем  $\Delta\varphi^1_{T_i} = +0.034"(2000 - T_i)$ . Изменение широты за движение полюса 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 2000г.,  $X_{T_i}$  и  $Y_{T_i}$  - средние координаты полюса на эпохи наблюдений, долгота Пулкова при этих вычислениях принята отрицательной. Мгновенные координаты X,Y взяты из [13]: (EOP C01\_(2) в системе IERS на интервале с 1846г до настоящего времени, вторая редакция.

Таблица 1.

эпоха( $T_i$ )	$\varphi_{T_i}$	$\Delta\varphi_{2000} - \Delta\varphi_{T_i}$	$\Delta\varphi^1_{T_i}$	$\varphi_{2000}$
1 1845	59° 46' 18.67"	-0.05"	+0 5"	59°46'18.67"
2 1866	.54	4	+5	.55
3 1885	.54	3	+4	.55
4 1892	.54	4	+4	.54
5. 1892 <sub>1</sub>	.72	4	+4	.72
6. 1900	.70	4	+3	.69
7. 1905	.72	3	+3	.72
8. 1915	.63	3	+3	.63
9. 1915 <sub>1</sub>	.71	3	+3	.71
10. 1925	.61	5	+3	.59
11 1930	.55	4	+2	.53
				59°46'18.627"

Ср. кв. ошибка вычисления широты по одному каталогу  $\pm 0.077''$  из приведенных выше 11-ти каталогов. Отметим, что Н.И. Днепровский дает другую ошибку, вычисленную по внутренней сходимости для каталога 1915<sub>1</sub>, а именно -  $\pm 0.01''$ [4].

Ср. кв. ошибка вычисления среднего значения широты по всем, приведенным здесь 11-ти каталогам, оказалась равной  $\pm 0.023''$ .

В итоге, получено значение широты ЦКЗ ГАО РАН на 2000 г. по Пулковским абсолютным рядам наблюдений склонений звезд на БВК

$$\varphi_{2000} = 59^\circ 46' 18.627'' \pm 0.023''.$$

Значения широт в таблице 1 взяты из [6]. Заметим, что ошибка среднего значения широты, по крайней мере, не уменьшилась после внесения поправок, по-видимому, из-за ошибок наблюдений каталогов, а также ошибок определения движения полюса. Поправки за вековое движение полюса в 19-м веке не определялись. В начале 20-го века они были слишком разнородными за этот период как в случайном, так и в систематиче-

ском отношении, даже периодические колебания полюса либо не учитывались при выводе каталога, либо определялись по собственным наблюдениям звезд каталога, либо по наблюдениям на пулковском зенит-телескопе ЗТФ-135, о вековых изменениях полюса астрономы тогда не знали. Важно понять, что с 1924г. по настоящее время принятое значение нуль-пункта Астрономо-геодезической сети России равно  $59^{\circ}46'18.71''$  имело ошибку, равную приведенной выше ср. кв. ошибке одного каталога  $\pm 0.08''$ , а не  $\pm 0.01$ , полученную Н.И.Днепровским [4].

Приведем некоторые характеристики наблюдений. Число звезд в каталогах изменялось от сотен до тысяч, число наблюдений звезд от одной тысячи до десятка тысяч. Наблюдения выполнялись на Большом вертикальном круге (БВК) Эртеля, который до 1930 г. располагался в меридианном зале на широте центра круглого зала.

С 1930 г. БВК располагался в новом павильоне, который находился приблизительно на одном меридиане со старым на 198,5 м. к югу. Значение широты для ЦКЗ получено Н.И. Днепровским при помощи поправки  $+6.41''$  [6].

Наблюдения каталога 1993 года выполнялись, на лучшем, по-видимому, вертикальном круге—Фотографическом вертикальном круге (ФВК) М.С.Зверева по способу Бесселя, т.е. абсолютным способом. Всего выполнено более 10000 наблюдений склонений светил со склонениями от  $-17^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ , получено 8250 наблюдений склонений 1345 звезд. Предпринята попытка использования способа Бесселя, но полученные значения поправок широты и постоянной рефракции авторы забраковали. Таким образом, способ Бесселя при выводе каталога не использовался. Разности зенитных расстояний, полученные по наблюдениям звезд в верхней и нижней кульминациях, использовались при получении коэффициентов многочлена для улучшения системы инструмента, особенно, рефракции. Как альтернатива методу Бесселя выполнено глобальное выравнивание склонений звезд с абсолютизацией по наблюдениям тел Солнечной системы. Точность получения склонений звезд достигнута достаточно высокая. Широта не вычислялась [14]. Система инструмента ФВК дана в [15]. Считаю целесообразным вычисление широты выполнить по формуле  $\varphi = \delta \pm Z$ , если сохранились наблюденные значения зенитных расстояний -  $Z$ . Склонения звезд следует брать из каталога HIPPARCOS. Эпохи наблюдений каталогов ФВК и HIPPARCOS практически равны, наблюдения высококачественные, особенно в околзенитной области. Очень важно, что поправки за вековое движение полюса и плит Земли на таком коротком интервале малы, и их можно не учитывать.

### Литература

1. *Большая советская энциклопедия*, М, 1972, т.10, с.586.
2. *Письмо* директора ГАО АН СССР № 113/6 от 28.11.1953 г. в геодезическую службу г. Ленинграда. Архив ГАО РАН.
3. *С.Г. Верецагин и др.* Изв. ГАО, № 213, С.-Петербург, 1998.
4. *Н.И. Днепровский.* Изв. ГАО. № 93, Ленинград, 1924, с.419.
5. *А.А. Михайлов.* А.Ж., том XLV, вып.3, АН СССР, 1968, Москва, с.473-477.
6. *Б.А. Орлов.* “100 лет Пулковской обсерватории”, изд. АН СССР, стр.55-76.
7. *В.А. Наумов.* Сб. статей и воспоминаний. “Митрофан Степанович Зверев”. Изд. ГАО РАН, С-Петербург, 2003, с.83-89.
8. *Б.А. Орлов.* Изв. ГАО. №150, Ленинград, 1953, с.66.
9. *Б.К. Багильдинский, Г.С. Косин.* Труды 17-й астрометрической конференции СССР, Л-д, Наука, 1967, с.54, 55.
10. *Б.К. Багильдинский, Г.С.Косин.* Труды ГАО, т.76, 1966, с.5-32.
11. *IERS*, TECHNICAL NOTE 21.



12. *Y. Vondrak, C. Ron, I. Peseč, A. Čepec.* “Earth orientation parameter 1899.7-1992.0 In the ICRS based on the Hipparcos reference frame”, Pub. № 87, 1998.
13. <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>
14. *Б.К. Багильдинский, Г.А. Гончаров и др.* Каталог ФВК96.
15. *Г.А. Гончаров.* О системе Фотографического вертикального круга, ГАО РАН, препринт №2, изд-во “Глаголь”, С-Петербург, 1995 г.

**DETERMINATION OF MEAN LATITUDE OF PULKOVO OBSERVATORY  
ON THE EPOCH 2000.0 BY OBSERVATION ON BIG VERTICAL CIRCLE**

**Naumov V.A.**

*Summary*

*Determination of mean latitude of Pulkovo observatory on the epoch 2000.0 by observation on the big vertical circle was fulfilled. 11 catalogues of the absolute declination were used.*

## ОБ УЧЕТЕ ЭФФЕКТА ВЕТРА В НАБЛЮДЕНИЯХ ШИРОТЫ

**Прудникова Е.Я.**

*Рассматривается возможность учета эффекта ветра как одного из источников непольярных вариаций широты и систематических ошибок в наблюдениях широты.*

Основным источником систематических ошибок в астрооптических наблюдениях, и в частности в наблюдениях широты, являются процессы, связанные с изменением метеофакторов и, как правило, имеющие рефракционную природу. Особенно важным их учет представляется в тех случаях, когда предметом исследования становятся короткопериодические составляющие в рядах наблюдений, имеющие околуточные и полусуточные периоды. Если ряд наблюдений состоит из мгновенных широт, он с неизбежностью будет отягощен ошибками короткопериодического характера. Одним из источников таких ошибок является влияние ветра на инструмент и павильон - так называемый эффект ветра.

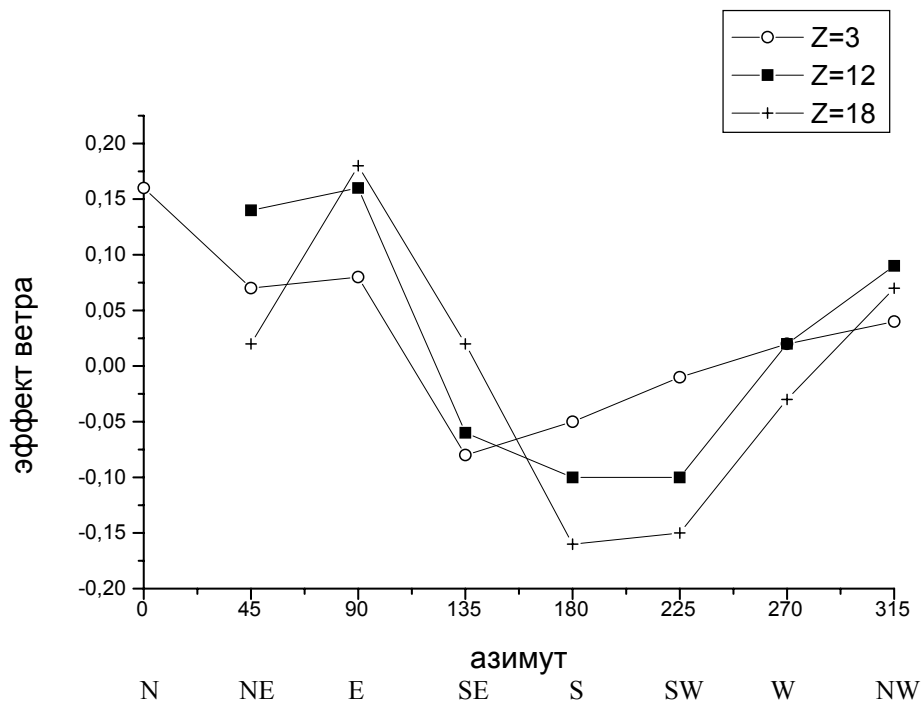
Для данного исследования были взяты наблюдения на ЗТФ-135 за период 1998-2003 гг., когда наблюдалась седьмая широтная программа. Вычисления проводились по традиционной методике, описанной в работе [1]. В ней была сделана только одна модификация - программа была разбита на три части, в которых были объединены пары с близкими зенитными расстояниями: от  $0^\circ$  до  $7^\circ$ , от  $8^\circ$  до  $14^\circ$  и от  $15^\circ$  до  $22^\circ$ . Результаты обработки представлены в Таблице 1 и на рис.1. Параметры эффекта ветра для различного зенитного расстояния представлены в Таблице 2.

**Таблица 1.** Эффект ветра на разных зенитных расстояниях.

Z	К-во пар	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
$3^\circ$ (0-7)	59	0.16"	0.07"	0.08"	-0.08"	-0.05"	-0.01"	0.02"	0.04"
		$\pm 0.16$	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
$12^\circ$ (8-14)	26	-	0.14	0.16	-0.06	-0.10	-0.10	0.02	0.09
			$\pm 0.08$	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.07
$18^\circ$ (15-22)	17	-	0.02	0.18	0.02	-0.16	-0.15	-0.03	0.07
			$\pm 0.12$	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.07

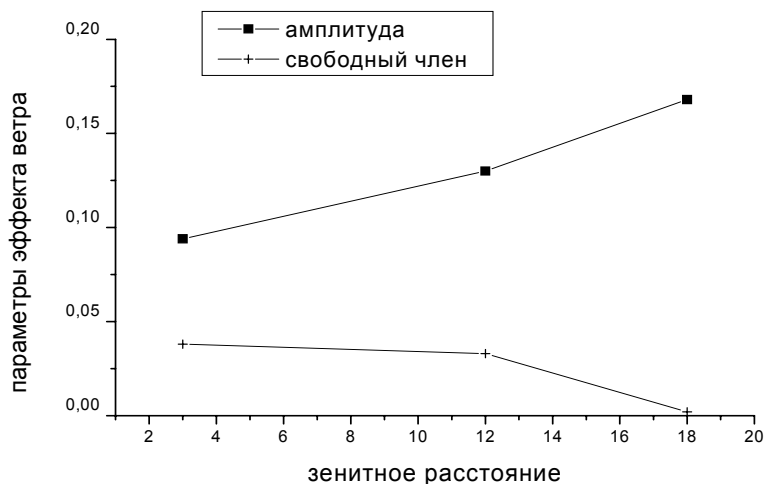
**Таблица 2.** Параметры эффекта ветра.

Z	Амплитуда	Фаза	Св. член
$3^\circ$	$0.094'' \pm 0.048''$	$21^\circ \pm 12^\circ$	$0.038'' \pm 0.022''$
$12^\circ$	$0.130 \pm 0.034$	$22 \pm 7$	$0.033 \pm 0.028$
$18^\circ$	$0.168 \pm 0.016$	$24 \pm 4$	$0.002 \pm 0.018$



**Рис.1.** Эффект ветра для трех частей программы, объединенных по зенитному расстоянию (в сек. дуги).

Параметры эффекта ветра в зависимости от зенитного расстояния представлены на рис.2. Видно, что даже при столь небольшой разнице в зенитных расстояниях пар величина амплитуды возрастает почти в два раза.



**Рис. 2.** Параметры эффекта ветра для разных зенитных расстояний (в сек. дуги)

Можно попытаться оценить влияние эффекта ветра на среднегрупповые и средне-суточные значения широт. Из таблицы 3 и рис.3 видно, что если в течение года наблюдаются последовательно все двенадцать групп (или связей, т.е. две группы за ночь), изменение амплитуды эффекта ветра имеет синусоидальный характер:

$$\Delta\varphi_1 = 0.026'' \cos(360^\circ t - 105^\circ)$$

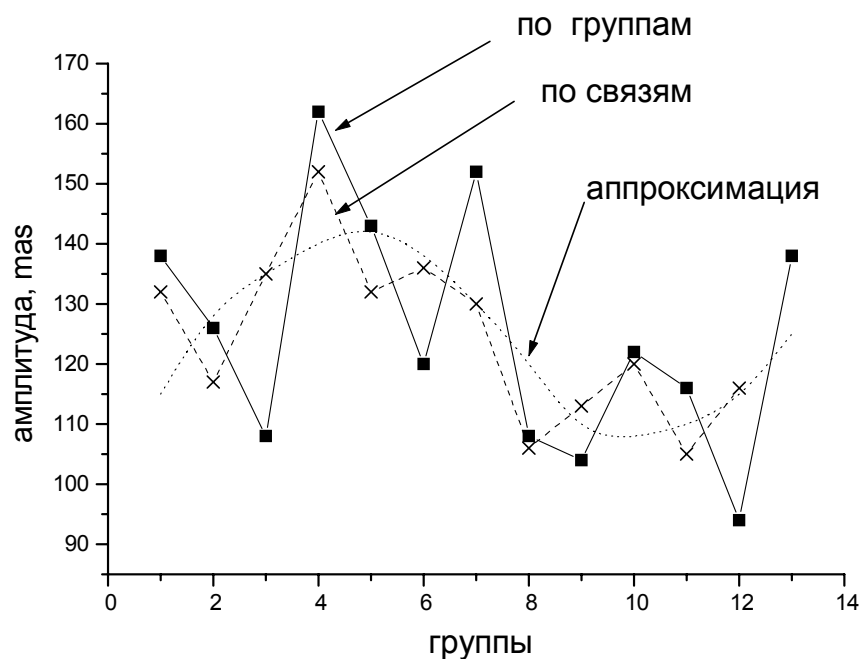
Это говорит о том, что эффект ветра является суммой синусоидальных процессов с переменной фазой, зависящей не только от доли года  $t$ , но и от направления ветра, а именно:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 \cos(A + 23^\circ) = 0.026'' \cos(360^\circ t - 105^\circ) \cos(A + 23^\circ) = 0.013'' \cos(360^\circ t - A - 128^\circ) + 0.013'' \cos(360^\circ t + A - 82^\circ)$$

и может быть источником неполярного годового изменения широты. Разумеется, внутри каждой группы присутствуют пары с разными зенитными расстояниями, их распределение является случайным. Но поскольку каждая программа наблюдается в течение примерно двадцати лет, то за период ее наблюдения это распределение ведет к появлению систематических погрешностей внутри вечера, т.е. к суточным вариациям изменений широты.

**Таблица 3.** Эффект ветра, усредненный по группам и связям.

Группа	Z	n	Св. член	Ампл.	Связь	Z	n	Св. член	Ампл.
1	7.5°	9	0.054''	0.138''	1-2	6.6°	18	0.002''	0.132''
2	5.7	9	-0.050	0.126	2-3	7.3	17	0.001	0.117
3	8.9	8	0.052	0.108	3-4	9.2	16	0.012	0.135
4	9.5	8	-0.028	0.162	4-5	8.2	16	-0.001	0.152
5	6.8	8	0.025	0.143	5-6	7.6	16	0.024	0.132
6	8.4	8	0.023	0.120	6-7	9.8	17	0.034	0.136
7	11.2	9	0.045	0.152	7-8	9.8	18	0.042	0.130
8	8.3	9	0.038	0.108	8-9	6.4	17	0.076	0.106
9	4.6	8	0.113	0.104	9-10	7.0	17	0.098	0.113
10	9.4	9	0.083	0.122	10-11	9.7	18	0.050	0.120
11	10.1	9	0.017	0.116	11-12	8.4	17	-0.009	0.105
12	6.7	8	-0.035	0.094	12-1	7.1	17	0.009	0.116



**Рис.3.** Эффект ветра для групп и связей.

На рис.4 кроме среднего эффекта ветра за 1998-2003 гг. показан график эффекта ветра, полученный по исследованиям наблюдений шестой программы за 1968-74 гг.

Видно, что характер зависимости аналогичен, но амплитуда увеличилась. К сожалению, трудно утверждать, что это увеличение есть следствие реальных метеорологических причин, например, ухудшения прозрачности атмосферы, а не ошибок наблюдений. Поэтому эффект ветра за 1968-2003г. был учтен как среднее значение из этих двух определений:

$$\Delta\varphi = 0.018'' + 0.078'' \cos(A + 23^\circ)$$

$$\pm .008 \quad \pm .012 \quad \pm 2$$

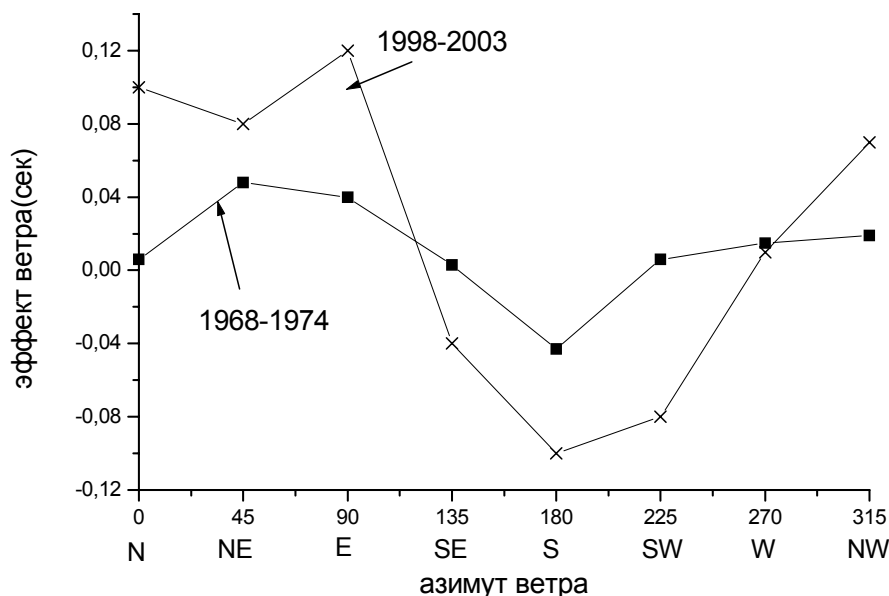


Рис.4. Эффект ветра по наблюдениям 1968-1974 г. и 1998-2003 г. (в сек. дуги).

Однако результат исследования показал, что при этом способе учета произошло улучшение результатов в систематическом отношении, но ухудшение в случайном. Возможны два дальнейших пути к улучшению результатов и в случайном отношении.

- Вариант 1. Учет эффекта ветра с переменными за тот же период параметрами

$$\Delta\varphi = a_0 + a_1 \cos(A + 23^\circ),$$

где  $a_0 = 0.028'' - 0.00000030''(t-t_{68})$

$$\pm .011 \quad \pm .00000008$$

$a_1 = 0.038'' + 0.00000843''(t-t_{68})$

$$\pm .014 \quad \pm .00000086$$

$t_{68}$  – первая дата 1968 года в MGD

- Вариант 2. Учет зависимости эффекта ветра от зенитного расстояния с переменной амплитудой.

$$\Delta\varphi = a_0 + a_1 \cos(A + 23^\circ),$$

где  $a_0 = 0.038'' - 0.028'' \sec^2 z$

$$\pm .014 \quad \pm .017$$

$a_1 = 0.092'' + 0.035'' \sec^2 z$

$$\pm .008 \quad \pm .016$$

Следует отметить, что эффект ветра на разных зенитных расстояниях близок по своим параметрам к результатам, полученным ранее при наблюдениях на ЗТЛ-180 и давшим заметное улучшение точности [2]. Эта сходимость вполне закономерна, по-

сколькx для столь близко расположенных инструментов наклон атмосферных слоев должен быть одинаков. Меньшая амплитуда и более простой характер эффекта ветра для ЗТФ-135 являются следствием меньшей теплоемкости инструмента и простоты конструкции павильона, выполненного из дерева и не имеющего двойных стен. К сожалению, наличие параллельно работающего инструмента, стоящего на той же параллели и имеющего в своей программе большое количество рефракционных пар, не было использовано раньше для более детального исследования и учета такого важного источника систематических погрешностей, как аномальная рефракция. При детальной ревизии столетнего ряда наблюдений этот учет представляется особенно важным. Будут опробованы оба варианта учета и выбран тот, который приведет к значимому уменьшению ошибок.

#### **Литература**

1. *Л.Д. Костина, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова.* Влияние эффекта ветра на наблюдения широты с двумя зенит-телескопами в Пулкове. Сб. "Вращение Земли и геодинамика", Фан, Ташкент, 1983, с.121-126.
2. *Е.Я. Прудникова.* "О влиянии внутрипавильонной рефракции на точность наблюдений", Изв. ГАО, № 210, 1996, с.192-197.

### **ON THE WIND EFFECT REDUCTION IN LATITUDE OBSERVATIONS**

**Prudnikova E.Ja.**

#### ***Summary***

*The necessity is shown of the wind effect reduction in latitude observations as the possible source of nonpolar latitude variations.*

**МЕТОДЫ**  
**И**  
**ИНСТРУМЕНТЫ**





## **ТЕРМОАБЕРРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ЛИМБОГРАФА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

**Абдусаматов Х.И., Ханков С.И.**

*Проведены исследования термоаббераций солнечного лимбографа космического базирования. Расчеты проводились для случая его работы в циклическом режиме: 30 минут наблюдение за Солнцем, 60 минут перерыв, количество циклов – 12. Показано, что при использовании в качестве материала для зеркал высокотеплопроводного карбида кремния в них практически не возникают значимые температурные градиенты и термодформации. Максимальное искажение профиля зеркал не превышает  $\sim 10^{-4}$  мкм, что вполне удовлетворяет допуску  $\lambda/50$ . Тепло-механическая структура конструкции космического комплекса позволит обеспечить устойчивое высокое качество изображения оптики и другие сквозные характеристики оптико-приемного блока лимбографа в целом.*

Известно, что наблюдения Солнца всегда осложнены значительным термическим влиянием интегрального потока его излучения на оптико-механические и фотоприемные узлы телескопа, и оно многократно усиливается при наблюдениях полного солнечного диска из космоса. При этом, когда интенсивный поток солнечного излучения направлен непосредственно во входной зрачок при периодических наблюдениях Солнца, проблема сохранения качества изображения оптики состоит в удержании термомеханического состояния всей структуры телескопа вблизи исходного состояния (до открытия крышки входного зрачка).

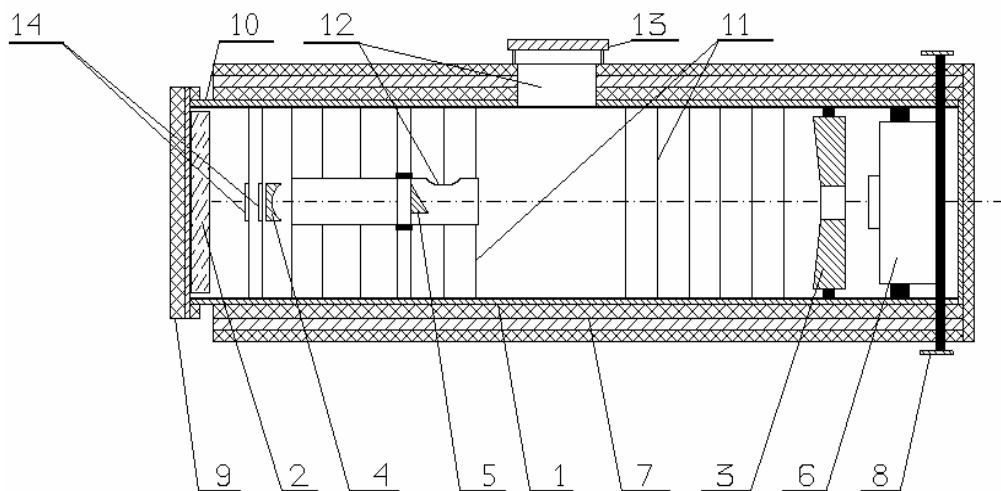
Проектом «Астрометрия» [1,2] предусмотрено измерение временных вариаций формы лимба и диаметра диска Солнца с точностью  $\sim 0,005$  угл. сек на Служебном модуле (СМ) Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). В связи с этим, для решения термических проблем, связанных с влиянием интегрального потока излучения полного диска Солнца на стабильность качества оптики и механической структуры телескопа и фотоприемного блока, разработан и запатентован уникальный солнечный лимбограф (СЛ) космического базирования, имитирующий кольцеобразное солнечное затмение [3]. Оптическая система (ОС) СЛ представляет собой телескопическую систему Грегори, в промежуточном фокусе которой устанавливается искусственная Луна, перекрывающая около 95% изображения солнечного диска и обеспечивающая наблюдение только за краем и отдельными участками диска Солнца. «Луна» представляет собой непрозрачный эллиптический экран с поперечным диаметром 1860 угл. сек с двумя центральными отверстиями, установленный под углом  $12^\circ$  по отношению к плоскости перпендикулярной оптической оси. Отраженный зеркальной поверхностью «луны» поток лучистой энергии Солнца, падающий сходящимся пучком от главного зеркала СЛ, выводится наружу через отверстие в корпусе лимбографа.

Солнечный лимбограф световым диаметром главного зеркала 200 мм (СЛ-200), термомеханическая схема которого представлена на рис.1, предназначен для наблюдения за краем диска Солнца и выбранными центральными участками самого диска и в настоящее время находится в стадии проектирования, которое ведется ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова» под руководством Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Дифракционное качество изображения СЛ и стабильность теплового режима всей структуры лимбографа вблизи исходного состояния должны обеспечиваться при прямом периодическом облучении его входного зрачка солнечным излучением. Лимбо-

граф планируется закрепить на выносной штанге за пределами корпуса Служебного модуля РС МКС на расстоянии около 1000 мм.

Основной защитой от мощного потока солнечного излучения являются отражающие покрытия на поверхностях светофильтра – кварцевой пластины, установленной на входном зрачке СЛ, ослабляющие мощность лучистого потока приблизительно в 100 раз. Разработанная автономная система обеспечения теплового режима (АСОТР) включает регулируемые электронагреватели общей мощностью до 100 Вт, а также наружную экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ). Корпус (труба) лимбографа снаружи покрывается двумя слоями ЭВТИ по 10 мм, между которыми размещается труба из дюраля для выравнивания температур вдоль оптической оси и по всему объему трубы. К пассивным элементам АСОТР можно отнести систему экранировки вторичного зеркала от прямого солнечного облучения, внешние радиационные панели, а так же светозащитную кольцевую бленду, устанавливаемую внутри корпуса объектива. Такая АСОТР в рабочем режиме может поддерживать температуру зеркал и корпуса трубы лимбографа в диапазоне не более  $\pm 1,0$  К при разнице температур между зеркалами и корпусом не более  $\pm 0,5$  К.

Термоабберационные расчеты [4-8] предназначены для исследования термоустойчивости оптической системы, для определения допустимых перепадов температур между элементами ОС, а также для обеспечения теплового режима ОС с целью сохранения дифракционного качества изображения и стабильности положения фокальной плоскости.



**Рис. 1.** Тепломеханическая схема солнечного лимбографа СЛ – 200,

где 1 – корпус телескопа; 2 – светофильтр; 3 – главное зеркало; 4 -вторичное зеркало; 5 – «луна»; 6 – фотоприемное устройство (ФПУ); 7 – ЭВТИ; 8 – радиатор; 9 – теплозащитная крышка объектива; 10 – щелевидная радиационная панель; 11 – кольца светозащитной бленды; 12 – разрезы для пропускания излучения, отражаемого «луной»; 13 – теплозащитная крышка трубы; 14 – радиационные экраны.

Главное зеркало имеет световой диаметр  $D = 200$  мм и центральное экранирование  $d = 54$  мм. Параксиальный радиус эллипсоидального главного зеркала равен  $R_n = 1360,52$  мм. Вторичное эллипсоидальное зеркало имеет световой диаметр  $D_3 = 44$  мм. В рассматриваемом случае большая полуось эллипса  $a = 477,635$  мм, а квадрат отношения длины малой и большой полуосей эллипса составляет  $\omega = 0,43915$ . Расстояние между зеркалами  $L = 800,0$  мм. Фокус оптической системы составляет  $f = 4800$  мм; относительное отверстие  $A = 1:26$ ; диаметр дифракционного кружка с учетом экранирования  $d_{\text{диф}} = 34$  мкм.

Зеркала предполагается изготовить из карбида кремния, коэффициент линейного расширения которого составляет  $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а коэффициент теплопроводности  $\lambda = 185 \text{ Вт/мК}$  [9]. Корпус СЛ-200 предполагается изготовить из инвара с коэффициентом линейного расширения  $\alpha_k = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Исходя из критерия необходимости обеспечения погрешности в определении формы лимба и диаметра диска Солнца не более 0,005 угл. сек нами задано суммарное допустимое смещение фокальной плоскости ОС СЛ относительно плоскости установки фоточувствительных элементов фотоприемного устройства  $\Delta f_1 \leq 26 \text{ мкм}$ . Допустимое максимальное термоискажение профилей рабочих поверхностей зеркал  $\lambda/50$ , где основная длина волны составляет  $\lambda = 0,546 \text{ мкм}$ , то есть максимальное допустимое искажение профиля зеркала в абсолютных величинах равно  $V = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ .

В основу расчета положены аналитические методики, включающие алгоритмы и расчетные формулы, полученные ранее в [4-8]. На данном этапе рассчитываются величины термического смещения фокуса  $\Delta f_1$ , продольная сферическая термоабберация  $\Delta f_2$  в виде зависимостей от перегрева зеркал и корпуса.

Термическое смещение фокуса для телескопа Грегори, обусловленное различием температур его элементов, определяется по формуле [7]

$$\Delta f_1 = \left( R_n \cdot \frac{\delta h_n}{2} - L \cdot \delta h_k \right) \Phi_n(\rho_0) + a \delta h_s \Phi_s(\rho_0); \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{y_{\min}}{R_n}; \quad \delta h_i = \alpha_i \vartheta_i; \quad \vartheta_i = t_i - t_0$$

где  $\delta h_i$  – единичные деформации  $i$  – го элемента;  $\alpha_i$  – коэффициенты линейного расширения [ $\text{K}^{-1}$ ];  $\vartheta_i$  – перегрев  $i$  – го элемента относительно начальной температуры  $t_0$  [K];  $y_{\min}$  – минимальная координата  $y$  в пределах светового диаметра, при отсутствии центрального экранирования  $y_{\min} = 0$ , что соответствует парааксиальному лучу [мм];  $\Phi_n$  и  $\Phi_s$  координатные функции деформаций.

Для длиннофокусных систем функции  $\Phi_n$  и  $\Phi_s$  определяются соотношениями [7]

$$\left. \begin{aligned} \Phi_n &= \Phi_{n0} - \Delta \Phi_n \cdot \rho_0^2; & \Phi_s &= \Phi_{s0} - \Delta \Phi_s \cdot \rho_0^2; \\ \Phi_{n0} &= c^2 = \left( \frac{1+e}{1-e} \right)^2; & \Phi_{s0} &= 2c = 2 \frac{1+e}{1-e}; \\ \Delta \Phi_n &= 8 \frac{e}{1-e} \cdot \frac{1+e^2}{1-e^2}; & \Delta \Phi_s &= (1-e) \Delta \Phi_n = 8e \frac{1+e^2}{1-e^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $e$  – эксцентриситет эллипса:

$$e = \sqrt{1 - \omega}; \quad c = \frac{1+e}{1-e}$$

После подстановки в (2) всех параметров ОС можно получить

$$\begin{aligned} e &= 0,749; \quad c = 6,965; \quad \Phi_{n0} = 48,5; \quad \Delta \Phi_{s0} = 21; \\ \Delta \Phi_n &= 85; \quad \Phi_n = 48,5 - 85 \rho_0^2; \quad \Phi_s = 13,9 - 21 \rho_0^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку  $\rho_0^2 = 4 \cdot 10^{-4}$ , то для расчетов величины  $\Delta f_1$  следует принять:

$$\Phi_n \approx \Phi_{n0} = 48,5 \quad \text{и} \quad \Phi_s \approx \Phi_{s0} = 13,9.$$

Таким образом в соотношении (3) вместо  $\Phi_n$  и  $\Phi_s$  с малой погрешностью можно подставить значения  $\Phi_{n0}$  и  $\Phi_{s0}$ , в результате получим:

$$\Delta f_1 = A_{\text{п}} \delta h_{\text{п}} - A_{\text{к}} \delta h_{\text{к}} + A_{\text{з}} \delta h_{\text{з}}; \quad A_{\text{п}} = \frac{R}{2} c^2; \quad A_{\text{к}} = Lc^2; \quad A_{\text{з}} = 2ac. \quad (4)$$

Это же соотношение можно выразить не через единичные деформации  $\delta h_i = \alpha_i \vartheta_i$ , а через перегревы элементов  $\vartheta_i$ :

$$\Delta f_1 = B_{\text{п}} \vartheta_{\text{п}} - B_{\text{к}} \vartheta_{\text{к}} + B_{\text{з}} \vartheta_{\text{з}}; \quad B_{\text{п}} = \alpha_{\text{п}} A_{\text{п}}; \quad B_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} A_{\text{к}}; \quad B_{\text{з}} = \alpha_{\text{з}} A_{\text{з}}. \quad (5)$$

Подставив в (4) и (5) все значения параметров ОС с учетом того, что оба зеркала выполнены из карбида кремния и  $\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{з}} = \alpha$ , определим значения  $A_i$  и  $B_i$ . Эти данные представлены в таблице 1.

**Таблица 1.**

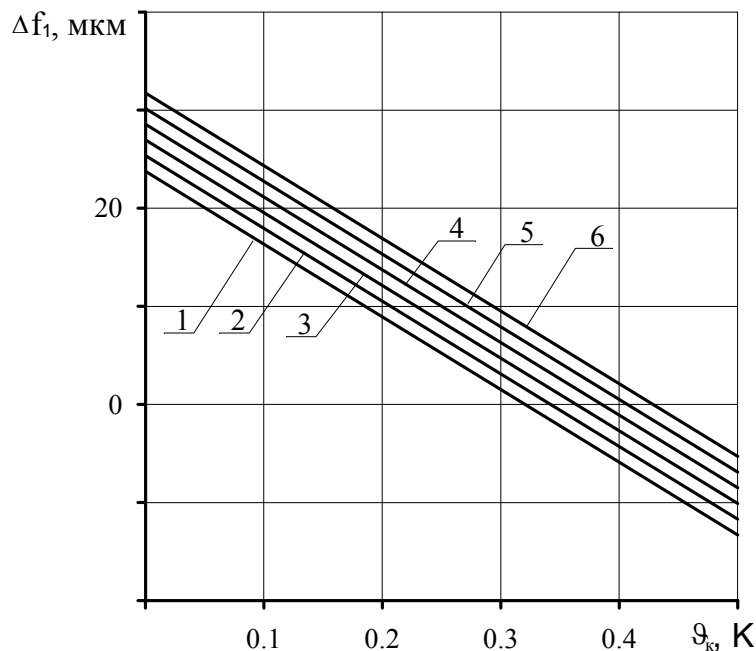
Значения коэффициентов  $A_i \cdot 10^{-3}$  [мм] и  $B_i$  [мкм/К] для солнечного лимбографа

$A_{\text{п}}$	$A_{\text{к}}$	$A_{\text{з}}$	$B_{\text{п}}$	$B_{\text{к}}$	$B_{\text{з}}$
33,0	39,0	6,0	79,2	74,1	15,8

Набор значений коэффициентов  $A_{\text{п}}$ ,  $A_{\text{к}}$ ,  $A_{\text{з}}$  является неизменной характеристикой конкретного телескопа. Значения  $B_{\text{п}}$ ,  $B_{\text{к}}$ ,  $B_{\text{з}}$  постоянны для того же телескопа с зеркалами из карбида кремния и с корпусом из инвара.

Из соотношения (5) можно определить зависимости смещения фокуса от перегрева корпуса при различных перегревах вторичного зеркала и при заданном перегреве главного зеркала. Такие зависимости представлены на рис. 2. Расчеты проводились при  $\vartheta_{\text{п}} = 0,3$  К.

Как видно из рис.2, максимальные значения термонаведенного смещения фокуса реализуются при  $\vartheta_{\text{к}} = 0$ , то есть тогда, когда инварный корпус термостабилизирован. Наличие малых значений  $\Delta f_1$  в области  $0,3$  К <  $\vartheta_{\text{к}} < 0,45$  К указывает на возможность тепловой компенсации смещения фокуса за счет термостабилизации корпуса на определенном температурном уровне.



**Рис.2.** Зависимость термонаведенного смещения фокуса лимбографа от перегрева его корпуса при перегреве главного зеркала  $\vartheta_{\text{п}} = 0,3$  К и при перегревах вторичного зеркала  $\vartheta_{\text{з}}$ , равных 0 К (1); 0,1 К (2); 0,2 К (3); 0,3 К (4); 0,4 К (5); 0,5 К (6).

Условие компенсации можно получить из (5), полагая  $\Delta f_1 = 0$ . В этом случае оно может быть записано в виде соотношения

$$\vartheta_k = D_{\Pi} \vartheta_{\Pi} + D_{\varepsilon} \vartheta_{\varepsilon}; \quad D_{\Pi} = \frac{\alpha_{\Pi}}{\alpha_k} \cdot \frac{R_{\Pi}}{2L}; \quad D_{\varepsilon} = 2 \frac{\alpha_{\varepsilon}}{\alpha_k} \cdot \frac{a}{Lc} \quad (6)$$

При выводе формул для расчетов термонаведенной продольной сферической абберации используем соотношение [7]

$$\Delta f_2 = \Delta f_1(\rho_0) - \Delta f_1(\rho_m); \quad \rho_m = \frac{y_{\max}}{R_{\Pi}} = 0,0735; \quad \rho_m^2 = 0,54 \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

где  $y_{\max}$  – координата зеркала на краю светового диаметра [мм].

Учтем, что из (3) следует:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\Pi}(\rho_0) - \Phi_{\Pi}(\rho_m) &= \Delta \Phi_{\Pi}(\rho_m^2 - \rho_0^2) = 0,475 \\ \Phi_{\varepsilon}(\rho_0) - \Phi_{\varepsilon}(\rho_m) &= \Delta \Phi_{\varepsilon}(\rho_m^2 - \rho_0^2) = 0,12 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

После подстановки (1) в (7) с учетом (8) можно получить

$$\Delta f = G_{\Pi} \delta h_{\Pi} - G_k \delta h_k + G_{\varepsilon} \delta h_{\varepsilon}; \quad G_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}}{2} \Delta \Phi_{\Pi}(\rho_m^2 - \rho_0^2); \quad (9)$$

$$G_k = L \Delta \Phi_{\Pi}(\rho_m^2 - \rho_0^2); \quad G_{\varepsilon} = a \Delta \Phi_{\varepsilon}(\rho_m^2 - \rho_0^2)$$

После подстановки в  $G_i$  всех значений параметров можно получить следующее количественное соотношение:

$$\Delta f_2 \text{ [мкм]} = (3,23 \delta h_{\Pi} - 3,8 \delta h_k + 0,57 \delta h_{\varepsilon}) \cdot 10^5. \quad (10)$$

В случае равенства между собой величин единичных деформаций, то есть при равномерном нагреве или охлаждении всего телескопа, все элементы которого выполнены из материала с одинаковым коэффициентом линейного расширения, сферическая термонаведенная абберация не будет развиваться.

Для случая  $\alpha_{\Pi} = \alpha_{\varepsilon} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а  $\alpha_k = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  получим вместо (10)

$$\Delta f_2 \text{ [мкм]} = 0,775 \vartheta_{\Pi} - 0,722 \vartheta_k + 0,137 \vartheta_{\varepsilon} \quad (11)$$

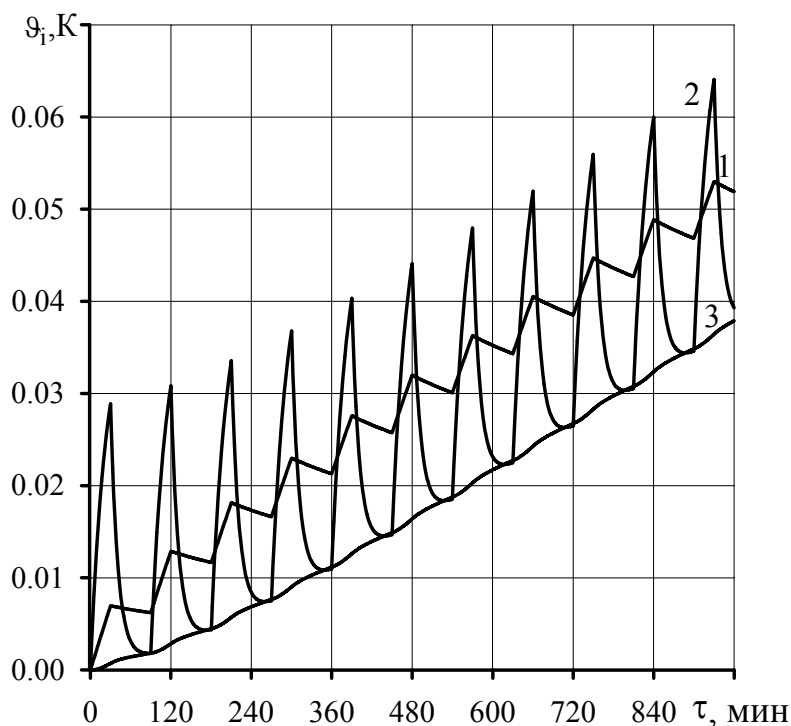
В случае равномерного нагрева всей системы  $\Delta f_2(\vartheta_{\Pi} = \vartheta_k = \vartheta_{\varepsilon} = \vartheta) = 0,199 \text{ мкм}$ . Например, при перегреве  $\vartheta = 30 \text{ K}$  получим  $\Delta f_2(\vartheta = 30 \text{ K}) = 5,7 \text{ мкм}$ .

Перейдем к расчету вариаций температур оптических элементов. Нестационарный тепловой баланс системы трех тел (главное зеркало, вторичное зеркало и корпус) в режиме наблюдения за Солнцем описывается системой трех дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} C_{\Pi} \frac{dT_{\Pi}}{d\tau} + \sigma_{\Pi k} (T_{\Pi} - T_k) &= \chi_{\Pi} t E S_{\Pi} \\ C_{\varepsilon} \frac{dT_{\varepsilon}}{d\tau} + \sigma_{\varepsilon k} (T_{\varepsilon} - T_k) &= \varepsilon_{\Pi \varepsilon} t E S_{\varepsilon} + \chi_{\Pi} (1 - \chi_{\Pi}) \chi_{\varepsilon} t E S_{\varepsilon} \\ C_k \frac{dT_k}{d\tau} + \sigma_{\Pi k} (T_k - T_{\Pi}) + \sigma_{\varepsilon k} (T_k - T_{\varepsilon}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $T_i$  – температура  $i$  – того элемента;  $\tau$  – текущее время;  $C_i$  – полная теплоемкость  $i$  – того элемента;  $\sigma_{ij}$  – тепловая проводимость между элементами  $i$  и  $j$  (индексы  $i$  и  $j$  означают:  $\Pi$  – главное зеркало,  $\varepsilon$  – вторичное эллиптическое зеркало,  $k$  – корпус);  $\chi_{\Pi}, \chi_{\varepsilon}$  – доля поглощенной энергии солнечного излучения рабочими поверхностями соответ-

венно главного и вторичного зеркал;  $t$  – пропускание светофильтра на входе оптической системы;  $\chi_{л}$  – доля энергии солнечного излучения приходящего на рабочую поверхность вторичного зеркала после отражения от главного;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты системы двух экранов перед тыльной поверхностью вторичного зеркала;  $E$  – солнечная постоянная;  $S_{п}$  и  $S_{э}$  – площади сечения рабочих поверхностей главного и вторичного зеркал.

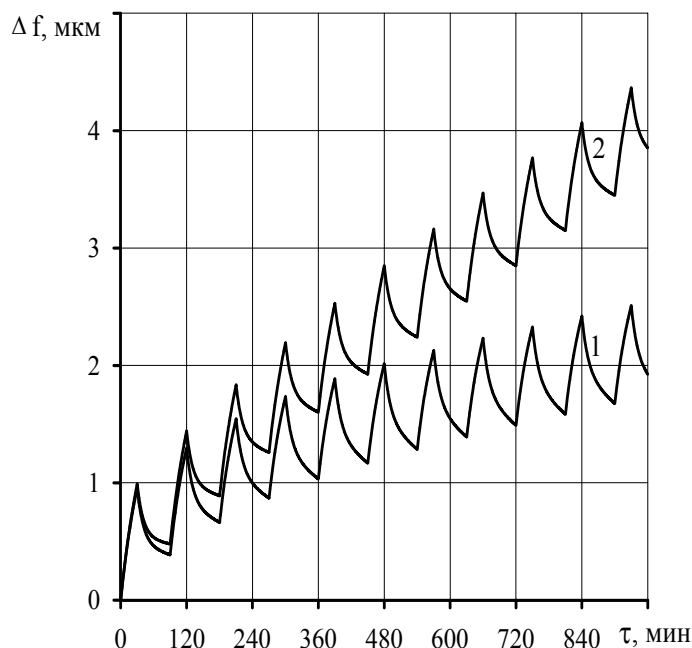


**Рис.3.** Зависимость перегревов элементов лимбографа от времени работы в циклическом режиме (30 минут – наблюдение за Солнцем, 60 минут – перерыв) при ослаблении солнечного излучения светофильтром в 100 раз и при степени черноты поверхностей двух экранов перед вторичным зеркалом, равной  $\varepsilon = 0.02$ . Номера линий означают: 1 – главное зеркало; 2 – вторичное зеркало; 3 – инварный корпус.

В перерывах между сериями наблюдений  $E=0$  и система уравнений отличается от (12) тем, что правые части первого и второго уравнения равны нулю.

В расчетах принято:  $C_{п}=1100$  Дж/К;  $C_{э}=20$  Дж/К;  $C_{к}=10^3$  Дж/К;  $\sigma_{пк} = 0,044$  Вт/К;  $\sigma_{эк}=0,015$  Вт/К;  $E=1400$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\chi_{п}=\chi_{э}=0,01$ ;  $t=0,01$ ;  $\chi_{л}=0,07$ ;  $\varepsilon_{пр}=0,004$ ;  $S_{п}=3,14 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>;  $S_{э}=1,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>.

Расчеты перегревов и термонаведенного смещения фокуса проводились для случая работы лимбографа в циклическом режиме: 30 минут наблюдение за Солнцем, 60 минут перерыв, максимальное количество циклов, предусмотренных космическим экспериментом «Астрометрия» – 12.



**Рис. 4.** Зависимость термонаведенного смещения фокуса лимбографа от времени работы в циклическом режиме (30 минут – наблюдение за Солнцем, 60 минут – перерыв) при коэффициенте линейного расширения инварового корпуса  $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (линия 1) и  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (линия 2).

Результаты расчетов зависимости перегревов элементов телескопа от времени работы в циклическом режиме наблюдения за Солнцем представлены на рис.3. Эти зависимости получены на основе численного решения системы уравнений (12). При этом перед началом каждого периода нагрева и охлаждения в систему вида (12) подставлялись начальные значения, соответствующие конечной температуре предыдущего периода. Как видно из рис.3, максимальные колебания температур характерны для вторичного зеркала, а для корпуса СЛ наблюдается почти монотонный рост перегрева. Максимальный перегрев невелик – около 0,06 К.

На рис.4 представлены результаты расчета по формуле (4) с учетом данных рис.3 колебаний величины термонаведенного смещения фокуса. Линия 2 соответствует случаю использования в качестве материала корпуса инвара специальной марки с особо низким коэффициентом линейного расширения. Из данных этого рисунка можно сделать следующие выводы: во-первых, использование инвара с низким коэффициентом линейного расширения нецелесообразно; во-вторых, телескоп весьма термоустойчив применительно к данному режиму работы при выбранных параметрах тепловой схемы.

**Основные выводы.** По известным формулам [8] были проведены исследования максимально возможных термодформаций зеркал СЛ. Показано, что при использовании в качестве материала для зеркал высокотеплопроводного карбида кремния в зеркалах практически не возникают значимые температурные градиенты и термодформации. Максимальное искажение профиля зеркал не превышает  $\sim 10^{-4}$  мкм, что вполне удовлетворяет допуску  $\lambda/50$ . Таким образом, тепломеханическая структура конструкции комплекса, выполненная на основе инвар-инварового корпуса, карбидокремниевых главного и вторичного зеркал, теплозащитных крышек и системы термостатирования фокального и важнейших оптико-механических узлов, а также использование кварцевого светофильтра на входном зрачке и «луны» в промежуточном фокусе позволит обеспечить устойчивое высокое качество изображения оптики и другие сквозные характеристики оптико-приемного блока лимбографа в целом.

## Литература

1. **Х.И. Абдусаматов.** Скоординированные вариации диаметра, активности и светимости Солнца и эксперимент «Измерения временных вариаций формы и диаметра Солнца» на борту Российского сегмента МКС // Петербургские фрагменты научной картины мира, вып.2. Санкт-Петербург, 2003, с.8-20.
2. **Н.И. Abdussamatov,** L.N. Arkhipova, Yu.V. Alekseev, A.A. Antoshkov, V.S. Bortkevich, V.P. Budin, N.t. Firsov, A.A. Garbul, D.L. Gorshanov, V.B. Grigoryev, A.I. Ivanov, I.S. Izmaylov, A.A. Kuznetsov, A.V. Markov, A.V. Matveev, N.Yu. Mavrina, V.E. Melnikov, L.A. Mirzoeva, I.I. Nikolaev, L.Sh. Oleynikov, E.V. Rakcheev, B.A. Shebanov, I.N. Sivyakov, S.G. Slavnov, D.P. Veselov. The project "Astrometry" to measurement of temporary variations of the shape and the diameter of the Sun on the Russian segment of the ISS // IAU Symp. 223. Book of abstracts. St. Petersburg, 2004, p.4-5.
3. **Х.И. Абдусаматов.** Оптический солнечный телескоп // Патент РФ на изобретение № 2158946. Бюллетень изобретений. 2000, № 31, с.383.
4. **Г.И. Погодин, Е.В. Трунева, С.И. Ханков.** Расчет термооптических aberrаций фокусирующих зеркал // ОМП, 1984, № 6, с.20-24.
5. **Е.В. Трунева, С.И. Ханков.** Термооптические aberrации зеркал с центральным отверстием // ОМП, 1986, № 6, с.8-11.
6. **С.И. Ханков.** Расчет влияния направления и интенсивности теплоотвода на термооптические aberrации фокусирующих зеркал // ОМП, 1986, №7, с.21-24.
7. **И.И. Захарченко, С.И. Ханков.** Расчет термооптических aberrаций зеркального телескопа, вызванных различием температур его элементов // Известия ВУЗов, Приборостроение, 1989, т. 32, № 2, с.49-54.
8. **Н.О. Байкова, С.И. Ханков.** Алгоритм и аналитическая методика расчета термонаведенных aberrаций зеркал // ИФЖ, 1994, т.66, № 1, с.69-75.
9. **Ю.Г. Якушенков.** Теория и расчет оптико-электронных приборов // Машиностроение, М., 1989, 360 с.

## THERMOABERRATIONS OF THE SOLAR LIMBOGRAPH OF SPACE BASING

**Abdussamatov H.I., Khankov S.I.**

### *Summary*

*Thermoaberrations of the solar limbograph for the satellite mission are investigated. The calculations were carried out for a case of work the solar limbograph in a cyclic mode: observations – 30 minutes, break – 60 minutes, amount of cycles – 12. It is shown, that at use of the silicon carbide mirrors practically do not arise significant temperature gradients and thermal deformations. The maximal distortion of a structure of mirrors does not exceed  $\sim 10^{-4}$  microns, what quite satisfies to the admission  $\lambda/50$ . The thermomechanical structure of a construction of the space complex will allow to ensure steady high-quality the image of the optics and other characteristics of its optics-reception block.*



## **МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ СИГНАЛА ТОЧЕЧНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ ИЗ НАБЛЮДАЕМЫХ КАРТ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Байкова А.Т.**

*С целью повышения точности оценки углового спектра мощности анизотропии реликтового излучения (РИ), кодирующего основные космологические параметры Вселенной, предлагается новый метод устранения точечных радиоисточников и других негауссовых помех. Основной идеей метода является восстановление флуктуаций РИ в местах загрязнений, в то время как традиционные подходы эти места просто исключают из рассмотрения, что приводит к появлению на картах так называемых "дыр". Принципиальная возможность восстановления сигнала РИ в "дырах" следует из свойства аналитичности функции, имеющей пространственно ограниченный спектр (Силковское затухание). Другой априорной информацией, существенно ускоряющей сходимость метода, является круговая симметрия спектра мощности флуктуаций РИ, подчиняющихся гауссовой статистике. В качестве практического алгоритма восстановления истинного сигнала в местах загрязнений предложена модификация известного в радиоастрономии алгоритма Фьенана, предназначенного для решения фазовой проблемы. Для локализации точечных радиоисточников применен двумерный медианный фильтр. Приводятся результаты моделирования метода для карт небольшого размера. Показано, что метод обладает высокой внутренней точностью и устойчив к шумам. Исследована эффективность применения метода для восстановления РИ из данных, полученных с ограниченным разрешением и включающих значительный пиксельный шум. Основным достоинством метода является возможность полного устранения негауссовостей, вызванных помехами. Показана принципиальная возможность применения метода для восстановления РИ в зоне Галактики, а также возможность восстановления РИ только по флуктуациям с отрицательным знаком, подверженным минимальным искажениям. Благодаря применению быстрых алгоритмов цифровой обработки сигналов разработанный метод обладает высокой вычислительной скоростью.*

### **Введение**

В настоящее время в связи с многочисленными экспериментами по измерению анизотропии реликтового излучения (РИ) с целью высокоточного определения основных космологических параметров Вселенной (Гавайзер, Силк, 2000), актуальной является задача поиска новых подходов, позволяющих повысить точность устранения из наблюдаемых карт РИ различных фоновых загрязнений галактического и внегалактического происхождения. Этой проблеме в литературе уделяется очень большое внимание (Тегмарк, Ефстатхи, 1996; Тегмарк и др., 2003; Столяров и др., 2002; Насельский и др., 2003б).

Мы ограничимся только задачей устранения точечных радиоисточников и других негауссовых помех, наиболее сильно искажающих угловой спектр мощности РИ на высоких пространственных гармониках (мультиполях). Эта задача рассматривалась многими авторами (Хобсон и др., 1998; Тегмарк, де Оливейра-Коста, 1998; Санз и др., 1999; Насельский и др., 2000; Виелва и др., 2001; Вио и др., 2002). Существующие в настоящее время методы различаются, в основном, способами локализации помех с целью их дальнейшего устранения из измеренных карт.

Естественными являются следующие три стратегии по устранению точечных источников: 1) восстановление точечных источников и их вычитание из измеренной карты

РИ; 2) устранение загрязненных пикселей в окрестностях локализованных источников; 3) восстановление истинных значений РИ в местах локализованных загрязнений.

Как показывает практика, первая стратегия приводит к самым большим ошибкам в определении углового спектра мощности РИ по сравнению с двумя другими, поскольку проблема точного восстановления распределения яркости источников является трудноразрешимой задачей в ситуации, когда пространственные спектры разделяемых сигналов перекрываются (Байкова, 2002). По этой причине карты, полученные в результате применения этого метода, характеризуются наличием остаточных негауссовостей. Существенно более эффективной является вторая стратегия, которая предполагает определение лишь местонахождения загрязненных пикселей карты с целью их исключения при оценке спектра мощности РИ. Заметим, что именно эта практика в настоящее время является общепринятой.

Однако второй способ устранения точечных источников также не лишен недостатков. Во-первых, уменьшается эффективная площадь карты, по которой оценивается угловой спектр мощности, что приводит к ощутимым ошибкам в случае больших удаленных участков РИ. Во-вторых, простое отбрасывание загрязненных пикселей не восстанавливает в полной мере гауссову статистику РИ, оставляя на картах своеобразные следы в виде “дыр”. Кроме того, резкие края вырезанных участков приводят к так называемому явлению Гиббса в поведении спектра, особенно сильно проявляющемуся на высоких пространственных гармониках, что может существенно затруднить исследование вторичной анизотропии РИ.

При этом надо отметить, что увеличение разрешающей способности систем, измеряющих анизотропию РИ, приводит к регистрации все большего количества слабых источников (Насельский и др., 2003а). В этом случае загрязненными оказываются все большее количество пикселей карты РИ. Особую проблему составляют также мощные загрязнения в зоне Галактики. Простое устранение зоны Галактики, составляющей заметную часть от всей площади небесной сферы, неизбежно приводит к значительным ошибкам при оценке углового спектра мощности по сравнению с использованием полных неповрежденных данных.

Очевидно, третья стратегия, при условии ее практической реализуемости, что зависит, в основном, от шумовых характеристик аппаратуры, свободна от недостатков двух первых. Поэтому в данной статье мы предлагаем и разрабатываем новый способ устранения высокомультипольных негауссовых помех, заключающийся не только в их эффективной локализации, но и в восстановлении истинных значений анизотропии РИ в местах загрязнений. При определенных условиях это может привести к повышению точности восстановления углового спектра РИ по сравнению с простым удалением поврежденных пикселей карты.

Таким образом, целью данной работы является разработка нового метода устранения загрязнения РИ точечными источниками и другими высокомультипольными помехами, оценка его внутренней точности и устойчивости к входным шумам, а также исследование эффекта от его применения к данным, полученным с ограниченной разрешающей способностью и при различных значениях инструментального пиксельного шума и, тем самым, оценка возможности применения в реальных системах.

В следующих разделах статьи дается статистическое описание анизотропии РИ, описание модели наблюдаемой карты, метода локализации точечных источников, метода восстановления значений РИ в местах загрязнений, а также приводятся результаты численного моделирования, проведенного для карт небольших угловых размеров, но обладающих статистическими свойствами распределения РИ по всей небесной сфере.

## 1. Модель наблюдаемой карты РИ

Распределение температуры РИ по небесной сфере может быть представлено в виде следующего разложения по сферическим гармоникам  $Y_\ell^m(\theta, \varphi)$  (Бонд, Ефстатхи, 1987):

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell, m} a_{\ell m} Y_\ell^m(\theta, \varphi),$$

где  $T$  и  $\Delta T$  — средняя температура и температура флуктуаций РИ соответственно,  $a_{\ell m}$  — коэффициенты разложения.

Угловой спектр мощности флуктуаций,  $C_\ell$  определяется как средняя квадратическая величина коэффициентов  $a_{\ell m}$ :

$$C_\ell = \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle,$$

где  $\ell$  — номер разложения (мультиполя).

Если флуктуации ранней Вселенной удовлетворяют гауссовой статистике, как ожидается в большинстве космологических теорий, то каждый коэффициент  $a_{\ell m}$  является статистически независимым и, таким образом, спектр мощности  $C_\ell$  обеспечивает полное статистическое описание анизотропии РИ, представляя собой фундаментальную характеристику Вселенной. Эта характеристика может быть получена прямо из наблюдений в результате применения сферического гармонического анализа.

Для гауссовых полей коэффициенты разложения  $a_{\ell m}$ ,  $\ell \neq 0$ , также представляют собой гауссовы поля со случайными фазами, нулевыми средними и дисперсиями

$$\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'} \rangle = \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'} C_\ell, \quad \ell \neq 0.$$

В данной работе рассматриваются участки неба небольшого размера. В таких случаях целесообразно оперировать гауссовыми полями в плоском двумерном пространстве и анализ по сферическим гармоникам заменить анализом Фурье, что существенно упрощает тестирование предлагаемых методов. Тогда флуктуации РИ  $\Delta T = T - \langle T \rangle$  могут быть сгенерированы путем простого вычисления рядов Фурье (Бонд, Ефстатхи, 1987):

$$\frac{\Delta T(\theta_x, \theta_y)}{T} = \sum_{n_u=0}^{N_u-1} \sum_{n_v=0}^{N_v-1} D(n_u, n_v) \exp[i \frac{2\pi}{L} (n_u \theta_x + n_v \theta_y)], \quad (1)$$

где  $L$  — линейный размер выделенного участка в радианах;  $(\theta_x, \theta_y)$  — прямоугольные координаты на небе (в пространственной области);  $(n_u, n_v)$  — номера отсчетов Фурье-компонент  $D(n_u, n_v)$  в области пространственных частот  $u$  и  $v$ .

Амплитуды Фурье-компонент  $D(n_u, n_v)$  удовлетворяют гауссовому распределению с нулевым средним и дисперсией

$$\langle |D(n_u, n_v)|^2 \rangle = C_\ell, \quad \ell = \frac{2\pi}{L} \sqrt{n_u^2 + n_v^2}, \quad (2)$$

а фазы подчиняются равномерному закону распределения в интервале значений  $(0, 2\pi)$ . Здесь  $C_\ell$  угловой спектр мощности температуры РИ в случае разложения его по сферическим гармоникам.

Соотношение (2) описывает свойство круговой симметрии спектра мощности, т.е. независимости от азимутального номера  $m$ , которое в дальнейшем используется в качестве дополнительной априорной информации при восстановлении флуктуаций РИ в местах загрязнений.

Другой, более важной априорной характеристикой спектра мощности является его пространственная ограниченность, которая следует из существования так называемой Силковской частоты затухания ( $\ell_D$ ) (Силк, 1967; Насельский и др., 2003а), выше

которой значения спектра мощности флуктуаций резко убывают и вклад РИ в суммарный наблюдаемый сигнал становится пренебрежимо малым с увеличением частоты. Ограниченность, или, по-другому, финитность спектра, позволяет применить к описанию флуктуаций РИ теорию аналитических функций (Хургин, Яковлев, 1971), из которой следует возможность восстановления функции во всей области определения по известной ее части в некоторой области или на некотором множестве точек (Василенко, Тараторин, 1986). Это лежит в основе предлагаемого алгоритма восстановления флуктуаций РИ в местах загрязнений.

При моделировании фона точечных источников (ТИ) предполагается, что их распределение по карте подчиняется случайному закону Пуассона. Инструментальный пиксельный шум представляет собой “белый” гауссов шум с нулевым средним. Измеряемая карта РИ может быть представлена в виде следующей модели:

$$RI_{изм} = (RI+ТИ)**ДН + Ш, \quad (3)$$

где Ш — шум, ДН — диаграмма направленности антенны, \*\* — знак линейной свертки.

Задача обработки заключается в решении уравнения типа свертки (3) относительно РИ. Последовательность операций по восстановлению РИ, используемая в данной работе, является следующей: 1) производится фильтрация шума с использованием фильтра Винера или его модификации, не искажающей формы углового спектра мощности, предложенной Горским (1997) и Новиковым и др. (2000). В результате, имеем оценку сигнала  $(RI+ТИ)**ДН$ ; 2) производится операция деконволюции полученной оценки диаграммой направленности ДН с использованием регуляризованного инверсного фильтра (Тихонов, Арсенин, 1986) с целью получения оценки сигнала  $(RI+ТИ)$ ; 3) производится локализация загрязнений точечными источниками с использованием медианного фильтра (см. раздел 3); 4) производится восстановление РИ в местах загрязнений с использованием метода, предложенного в следующем разделе.

## 2. Метод восстановления флуктуаций в местах загрязнений

Предлагаемый метод восстановления флуктуаций в “дырах” карты РИ представляет собой модификацию известного алгоритма Фьенапа (Фьенап, 1978), предназначенного для восстановления изображения объекта конечной протяженности по амплитуде его спектра-Фурье (фазовая проблема). В модифицированном нами алгоритме Фьенапа в ограничениях в спектральной области вместо заданной амплитуды спектра используется информация о его ограниченности и круговой симметрии (2), а в ограничениях в пространственной области используются известные значения карты.

Алгоритм является итерационным и представляет собой следующую последовательность действий:

1. Формируется начальное приближение карты. Мы рекомендуем в качестве начального приближения использовать исходную карту с нулевыми значениями яркости в местах локализованных загрязнений (“дырах”).

2. Вычисляется преобразование Фурье начального приближения, тем самым осуществляется переход в область пространственных частот.

3. Накладывается условие пространственной ограниченности спектра флуктуаций, что достигается за счет того, что значения Фурье-компонент, полученных на предыдущем шаге, с номерами, удовлетворяющими условию  $l > l_D$ , приравниваются нулю. Дополнительным ограничением в области пространственных частот, существенно ускоряющим процесс сходимости алгоритма, является ограничение на круговую симметрию спектра мощности флуктуаций. Для выполнения последнего условия значения Фурье-компонент видоизменяются таким образом, чтобы спектр мощности приобрел форму в соответствии с соотношением (2). Для этого для каждого значения  $l$  производится усреднение значений квадратов амплитуд отсчетов спектра вдоль радиуса длины

$\ell$ , затем эти отсчеты спектра заменяются на отсчеты с полученным значением квадрата амплитуды, при этом фазы отсчетов не изменяются.

4. Выполняется обратное преобразование Фурье спектра, полученного на предыдущем шаге, тем самым переходим в область карты РИ.

5. Накладываются ограничения в пространственной области. Для этого значения яркости вне “дыр” карты заменяются на известные, а в “дырах” не изменяются.

6. Выполняется прямое преобразование Фурье полученной на 5 шаге карты.

7. Производится возврат к шагу 3 до тех пор, пока изображение, получаемое на шаге 5, не перестанет изменяться в соответствии с выбранным критерием сходимости.

Как показывает моделирование (см. раздел 5), видоизмененный таким образом алгоритм Фьенапа довольно быстро сходится к правильному решению. При этом число неизвестных отсчетов флуктуаций РИ должно быть примерно вдвое меньше числа известных при условии, что частота дискретизации карты вдвое больше ее верхней пространственной частоты. При увеличении частоты дискретизации может быть восстановлено большее число отсчетов карты, поскольку недостаток информации в пространственной области может быть скомпенсирован информацией в области пространственных частот.

Очевидно, высокая вычислительная производительность метода достигается благодаря применению алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

### 3. Метод локализации участков загрязнений

Предлагаемый метод локализации точечных источников основан на применении двумерной медианной фильтрации, которая представляет собой построчно-столбцовой алгоритм выполнения одномерных операций  $n$ -точечной медианной фильтрации (Юстуссон, 1984; Тянь, 1984). При этом число  $n$  берется нечетным. Если  $n=2k+1$ , то одномерная медианная фильтрация заключается в присвоении текущему отсчету последовательности среднего по значению члена ряда, получающегося при упорядочении  $(2k+1)$ -точечной последовательности по возрастанию, первые  $k$  отсчетов которой располагаются слева и последние  $k$  отсчетов справа от данного отсчета. В результате применения такой операции к одномерной последовательности из нее удаляются все импульсные помехи. В нашем случае — это точечные источники.

Чтобы получить саму последовательность устраненных источников, необходимо из входной карты вычесть выходную. Очевидно, в силу того, что нелинейным преобразованиям подвергаются не только шумовой, но и полезный сигнал, то полученная в результате вычитания разностная карта содержит дополнительный шум, величина которого при правильном выборе  $n$  существенно меньше искомого импульсного шума. Применяя к полученной разностной карте операцию ограничения по уровню, можно получить участки загрязнений точечными источниками. Чем ниже уровень отсечки, тем большее число пикселей приписывается к искаженным. В наших задачах величина отсечки обычно выбирается достаточно малой (10% от пикового значения флуктуаций РИ) с тем, чтобы не пропустить истинные места загрязнений слабыми радиоисточниками. С другой стороны, избыток зарегистрированных точек не должен быть слишком большим, чтобы обеспечить сходимость последующей процедуры восстановления значений флуктуаций РИ в этих точках.

Отметим, что предложенный метод локализации точечных радиоисточников в отличие от множества методов, предложенных к настоящему времени в литературе: вейвлет-анализ (Санз и др., 1999; Виелва и др., 2001), методы чистки и максимальной энтропии (Байкова, 2002), оптимальной линейной фильтрации (Вио и др., 2002) и т.п., отличается простотой и высоким быстродействием, что имеет очень важное значение в случае обработки огромного массива данных, получаемых по всей небесной сфере.

Очевидно, рассмотренный метод работает тем надежнее, чем ярче точечные источники и чем их меньше на анализируемой карте. В данной работе исследование метода производится как для относительно ярких (разрешенных), так и слабых (неразрешенных) радиоисточников, число которых растет с увеличением разрешающей способности инструмента (Насельский и др., 2003а). В пределе фон слабых неразрешенных источников ведет себя подобно “белому” шуму, добавляясь к инструментальному шуму системы (Насельский и др., 2003а), и для его эффективного устранения необходимо применять методы фильтрации шума.

#### 4. Метод фильтрации инструментального шума

Для фильтрации инструментального “белого” шума используется модификация фильтра Винера, сохраняющая форму углового спектра мощности (Горски, 1997; Новикова и др., 2000), получившая название мощностного фильтра (МФ). В данной работе применение МФ осуществлено для двух случаев. В первом случае дисперсия инструментального (пиксельного) “белого” шума считается известной априори. При этом конечный результат восстановления РИ с участием МФ далее обозначается как РИ-МФ. Во втором случае дисперсия пиксельного шума априори не известна. Предварительная оценка этого шума производится с использованием медианного фильтра. Для этого производится медианная фильтрация входного сигнала. Шум определяется как результат вычитания из измеренной карты  $RI_{изм}$  выходного сигнала медианного фильтра. Конечный результат обработки РИ с использованием такого способа фильтрации обозначается как РИ-Мед-МФ. Поскольку техника линейной фильтрации шума с использованием различных модификаций фильтра Винера достаточно хорошо разработана в литературе, мы на этом вопросе останавливаться подробно не будем.

#### 5. Результаты моделирования

В этом разделе представляются результаты применения предложенного подхода к модельным данным измерений РИ. Для моделирования анизотропии РИ использована функция углового спектра мощности, соответствующая стандартной  $\Lambda$ CDM космологической модели Вселенной с параметрами  $\Omega_b h^2 = 0.02$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.65$ ,  $\Omega_m = 0.3$ ,  $h = 0.65$ ,  $n = 1$ . Карта РИ размером  $7.5 \times 7.5$  угловых градусов численно сгенерирована в соответствии с уравнениями (1) и (2) и поэтому обладает всеми свойствами флуктуаций РИ, распределенных по небесной сфере. Верхнее значение частоты углового спектра мощности РИ соответствует мультиполю  $\ell = 1536$ .

##### 5.1. Восстановление РИ в системах с высоким угловым разрешением

Целью первых двух экспериментов является иллюстрация предложенного метода и оценка эффекта от его применения в системах с высоким угловым разрешением, регистрирующих большое количество относительно слабых радиоисточников. Тестирование метода производится в предположении, что операции по предварительной фильтрации шума и деконволюции (см. конец раздела 1) уже произведены. Это сделано с целью оценки внутренней точности именно метода восстановления РИ в “дырах” карты. Размер карт взят равным  $64 \times 64$  пикселей. Это соответствует дискретизации с частотой Найквиста при заданном максимальном значении мультиполя спектра РИ  $\ell_{max} = 1536$ . Результаты первого эксперимента изображены на рис.1, где (а) — исходная (модельная) карта флуктуаций РИ; (б) — карта РИ, загрязненная радиоисточниками (РИ+ГИ) (234 разрешенных источника с амплитудой, втрое превышающей максимальное значение флуктуаций РИ, распределены по карте случайным образом по закону Пуассона); (в) — карта, полученная в результате обработки карты (б) построчно-столбцевым трех-точечным медианным фильтром; (г) — карта, полученная в результате

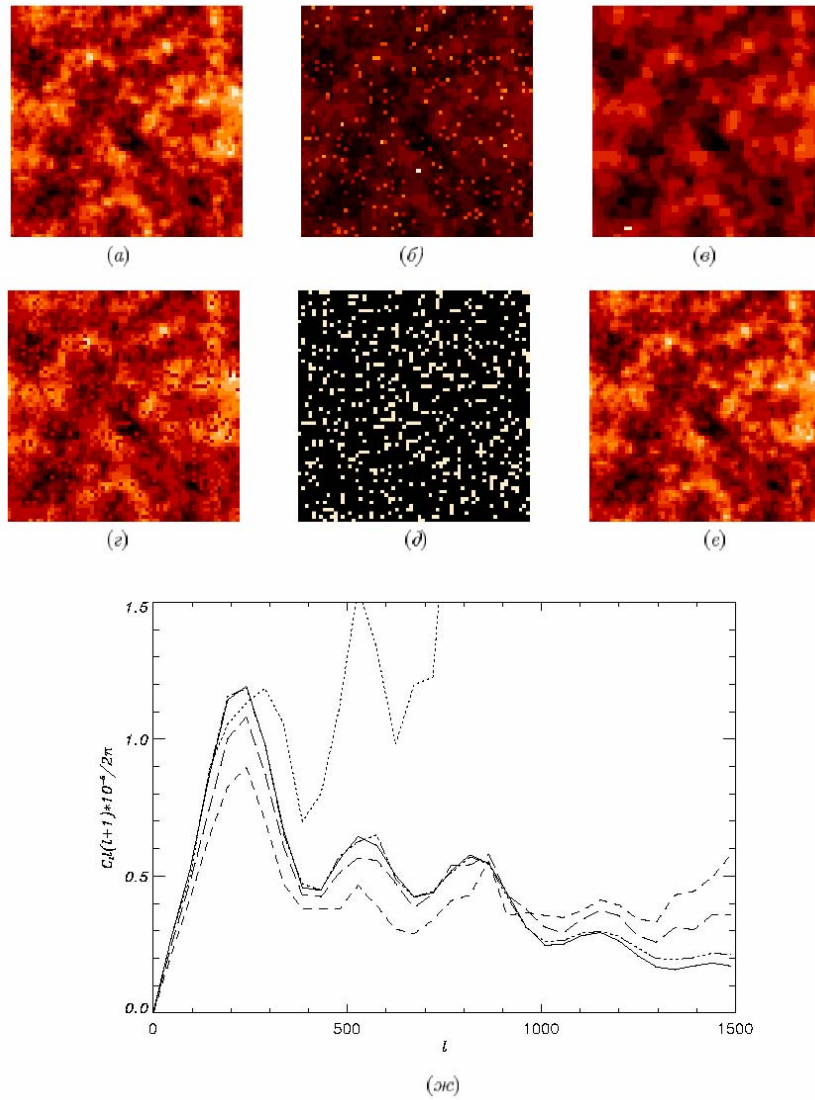
замены значений РИ в зарегистрированных местах загрязнений нулевыми значениями яркости; (д) — зарегистрированные участки загрязнений (которые в общем случае отличаются от истинного распределения точечных источников (см. раздел 2)), полученные с использованием операции амплитудной отсечки к разности карт (б) и (в). Порог амплитудной отсечки при этом выбран равным 10% от пикового значения флуктуации РИ; (е) — карта РИ, восстановленная с применением модифицированного алгоритма Фьенапа, которая почти в точности совпадает с исходной модельной картой РИ (а); (ж) — угловые спектры мощности карт: сплошная линия относится к исходной и восстановленной картам РИ, пунктирная линия — к загрязненной карте (б), линия из коротких штрихов — к карте (в), полученной в результате медианной фильтрации, линия из длинных штрихов — к карте (з) с обнуленными значениями яркости в местах реальных загрязнений. Дисперсии сигналов, дающие количественное представление об эксперименте, приводятся в табл. 1.

Из сравнения угловых спектров мощности, приведенных на рисунке (ж), можно оценить эффект от применения предложенного подхода по сравнению с традиционным, не предполагающим восстановления флуктуаций РИ в “дырах” (сравните также дисперсии соответствующих остаточных карт). Как видно, устранение 234 отсчетов из карты РИ привело к искажению истинного углового спектра мощности, особенно существенному на высоких гармониках, при  $\ell > 1000$  это искажение составляет от 30 до 100%. Использование же предложенного метода устранения точечных источников практически не привело ни к каким искажениям.

С целью исследования устойчивости предложенного метода к карте (б) был добавлен “белый” гауссовый шум, удовлетворяющий отношению “сигнал/шум”  $\approx 10$ , если за сигнал принять флуктуации РИ. На рис. 1(ж) линией из чередующихся штрихов и трех точек изображен угловой спектр мощности восстановленной карты в этом случае. Как видно, малые изменения во входных данных привели к малым изменениям решения, т.е. предложенный алгоритм обладает достаточно высокой устойчивостью.

В рассмотренном эксперименте точечные источники являются довольно яркими: они в три раза превышают по амплитуде пиковое значение флуктуаций РИ. А что будет, если амплитуда точечных источников сравнима с флуктуациями РИ, т.е. они являются неразрешенными? Какова точность алгоритма в этом случае?

Во втором эксперименте мы использовали ту же выборку точечных источников, только с амплитудами втрое меньшими. Демонстрация результатов восстановления приводится на рис. 2, где (а) — карта РИ, загрязненная слабыми точечными источниками; (б) — локализованные точки загрязнений (заметим, что их стало больше, чем в предыдущем эксперименте, поскольку был снижен порог амплитудной отсечки с целью не пропустить слабые источники); (в) — восстановленная карта РИ, которая опять практически совпадает с исходной картой флуктуаций РИ, изображенной на рис. 1(а). Угловые спектры мощности изображены на рисунке (з), где сплошная линия относится к исходной и восстановленной картам РИ; пунктирная линия — к карте РИ+ТИ (заметим, что по сравнению с первым экспериментом, эта кривая проходит гораздо ближе к модельной кривой РИ); штриховая линия соответствует карте РИ с нулевыми значениями яркости в местах реальных загрязнений. Дисперсии карт, дающие количественное представление об этом эксперименте, также приводятся в табл. 1



**Рис.1.**

**Таблица 1.** Дисперсии ( $\sigma \times 10^{-5}$ ) карт в экспериментах 1 и 2.

N эксп.	РИ	ТИ	РИ+ТИ	РИ с “дырами”	Ост. карта	Восст. РИ	Ост. карта	Восст. РИ (С/Ш=10)	Ост. карта
1	4.10	4.75	6.23	3.97	0.99	4.10	0.00	4.11	0.31
2	4.10	1.58	4.37	3.97	0.99	4.10	0.00	-	-

Как следует из анализа результатов экспериментов 1 и 2, простое обнуление значений РИ даже в точно определенных местах загрязнений дает ощутимую ошибку восстановления углового спектра мощности, особенно на малых угловых масштабах. Если же участки загрязнений занимают большую площадь (см. рис.1(д) и 2(б)), то ошибка определения искомого углового спектра мощности будет еще больше, что приведет к значительным ошибкам и в определении космологических параметров.



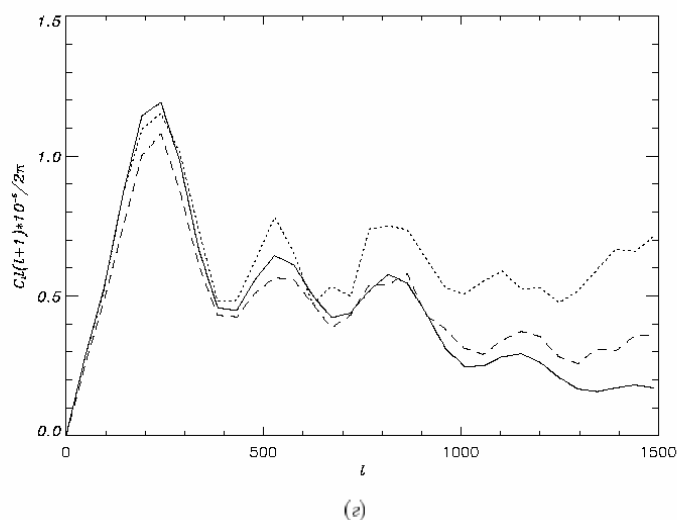
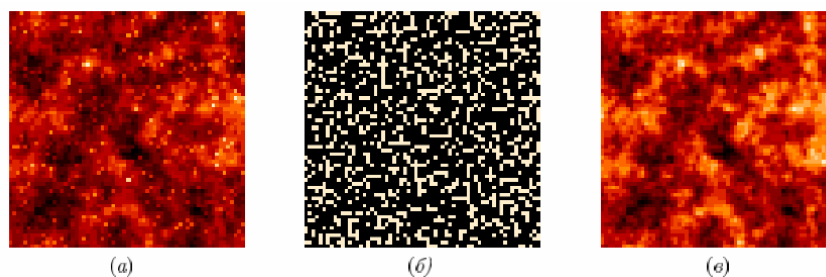


Рис.2.

Таким образом, в рассмотренных экспериментах, проведенных без учета реального разрешения системы и входного инструментального шума, удалось достичь предельно высокой точности восстановления карты РИ, что свидетельствует, как уже говорилось, о высокой внутренней точности предложенного метода восстановления РИ в “дырах”. При этом необходимо отметить, что сходимость алгоритма к нужному решению может быть достигнута и без использования ограничений на круговую симметрию спектра мощности флуктуаций. Но использование этих ограничений в качестве дополнительных существенно ускоряет процесс сходимости. Как показывает практика, предельная точность восстановления, при условии дискретизации карты с частотой, вдвое превышающей ширину полосы спектра сигнала, достижима только в том случае, если число неизвестных составляет не менее трети от общего числа пикселей на карте. Как было показано в первом эксперименте, метод обеспечивает достаточно высокую устойчивость к шумам во входных данных, т.е. малым изменениям в данных соответствует малое изменение результата восстановления. При больших значениях входного шума следует применять меры по предварительной фильтрации, например, с использованием мощного фильтра (см. раздел 4), как это делается в следующем параграфе.

### 5.2. Восстановление РИ в модели $RI_{изм} = (RI+TI)**ДН+Ш$

Усложним задачу и рассмотрим модель наблюдаемой карты РИ, удовлетворяющую выражению (3), где учитывается и ограниченность разрешения системы, и входной пиксельный шум. В следующих экспериментах размер карты взят равным  $128 \times 128$ , размер пиксела составляет 3.51 минуты дуги, ширина диаграммы направленности ДН — 10.53 минуты дуги на уровне 1/2 от ее максимума. Этому разрешению при диаметре антенны 1 м соответствует частота наблюдений 98 ГГц. Отметим, что выбранные нами

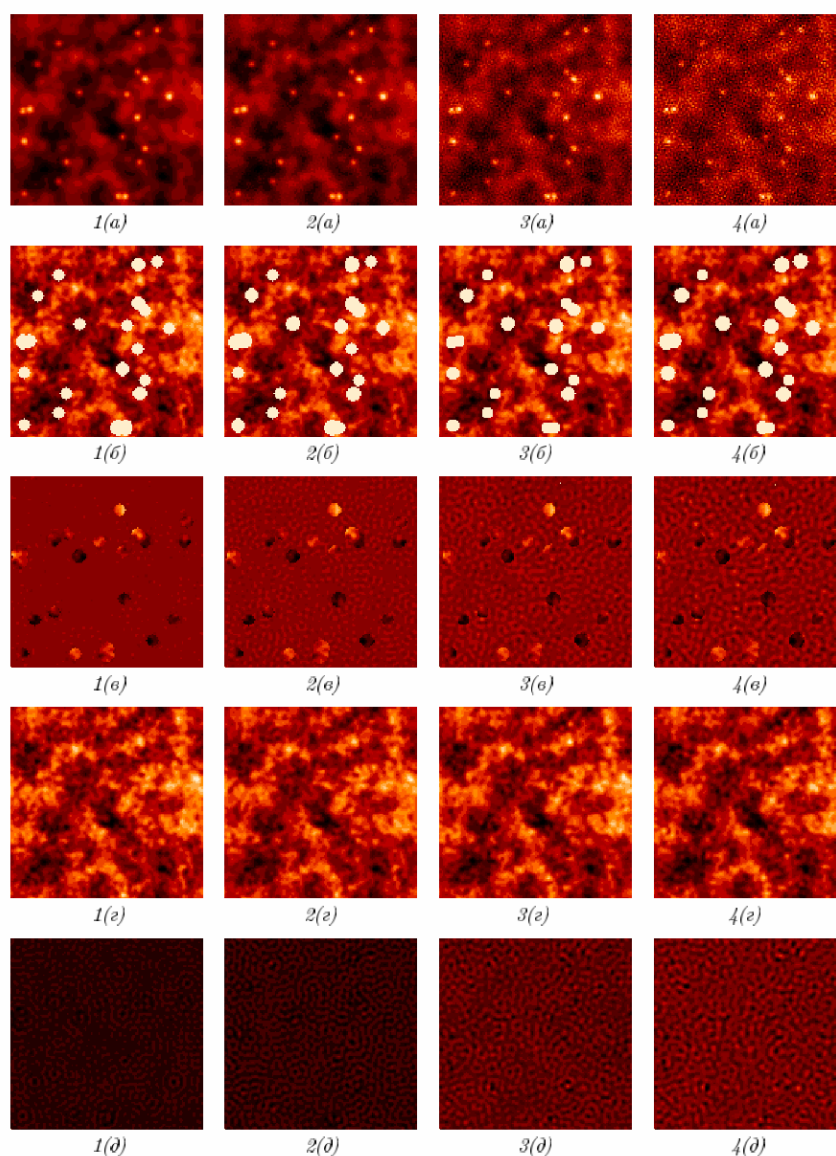
параметры системы близки параметрам одного из каналов миссии PLANCK (Насельский и др., 2003а).

В рамках указанных параметров было проведено четыре эксперимента с различным уровнем “белого” пиксельного шума, начиная с нулевого уровня. Дисперсии исходных, шумовых, восстановленных и остаточных карт, дающих представление о точности восстановления анизотропии РИ, приводятся в табл.2. Карты приводятся на рис.3, где цифры указывают на номер эксперимента, а буквы — на физический смысл карты: (а) — измеренная карта РИ, удовлетворяющая соотношению (3), (б) — восстановленная карта РИ с “дырами” в местах локализованных загрязнений с учетом размера ДН; (в) — остаточная карта, равная разности заданной карты РИ и восстановленной, показанной на рисунке (б), (г) — восстановленная карта РИ, полученная с использованием предложенного метода интерполяции функции в “дырах”, (д) — остаточная карта, равная разности заданной и восстановленной (г) карт РИ. Очевидно, каждая колонка приведенных на рисунке карт соответствует своему заданному уровню пиксельного шума.

Представленные на рис.3 результаты были получены с использованием варианта фильтрации пиксельного шума, обозначенного как Мед-МФ (см. раздел 4), использующего медианный фильтр для предварительной оценки шума. Характеристики результатов восстановления, полученных с использованием как варианта МФ (предполагающего априорное знание дисперсии шума), так и Мед-МФ, приводятся в табл.2, откуда видно, что они достаточно близки. Восстановление карты за диаграмму направленности производилось с использованием регуляризованного инверсного фильтра, содержащего регуляризирующий параметр, зависящий от уровня остаточного после фильтрации шума (Тихонов, Арсенин, 1986). (Отметим, что предыдущая эффективная фильтрация шума как раз и позволила использовать такой простой способ деконволюции как инверсный фильтр.)

Как показывает анализ приведенных на рис.3 результатов, основным достоинством предложенного метода устранения точечных источников является то, что остаточные карты, показанные на рисунках (д), свободны от всяких негауссовостей, представляя собой остаточный гауссов шум, величина которого зависит от уровня входного гауссова шума (см. дисперсии в табл.2). Традиционный же метод, предполагающий исключение из карт загрязненных пикселей РИ, как видно из рисунков (в), не устраняет в полной мере вклад точечных источников, который проявляется в виде небольших негауссовостей, определяемых величиной флуктуаций РИ в местах загрязнений. Кроме того, резкие края вырезанных участков приводят к высокочастотному шуму, простирающемуся далеко за пределы граничной частоты, соответствующей в данном случае  $\ell_{max}=1536$ .

Чтобы оценить эффект от применения предложенного метода в чистом виде, обратимся к рис.4, где показаны на верхнем рисунке (а) угловые спектры мощности свернутой карты РИ\*\*ДН без “дыр” (сплошная кривая) и с “дырами” (штриховая линия), размер которых определяется основанием диаграммы направленности, а на нижнем рисунке (б) — то же самое, только для исходной карты РИ. Как видно из кривых, наличие “дыр” на картах приводит примерно к 13% ошибке определения углового спектра мощности РИ в диапазоне мультиполей  $\ell=200-300$  и к 30% ошибке в диапазоне  $\ell=450-550$ . На больших  $\ell$  относительная ошибка еще больше.



**Рис.3.**

Отметим, что несмотря на то, что исходные радиоисточники являются точечными, т.е. фактически  $\delta$ -функциями, мы считаем загрязненными не только их координаты, но и окрестности, определяемые характеристикой инверсного фильтра, который не обеспечивает идеального восстановления  $\delta$ -функций. Наличие малейшего входного шума требует регуляризации алгоритма, что приводит к получению решения лишь с конечным разрешением. Для надежного исключения всех загрязненных пикселей, мы считаем, что область, искаженная каждым точечным источником, занимает площадь, равную площади основания ДН антенны, что несколько увеличивает общую площадь выброшенных отсчетов РИ. Но в нашем методе это не страшно, поскольку далее мы восстанавливаем истинные значения РИ в образовавшихся “дырах”.

Максимальный эффект от восстановления РИ в местах загрязнений, очевидно, достигается в отсутствие пиксельного шума. С увеличением уровня пиксельного шума количественный эффект снижается, хотя качественный эффект, приводящий к полному устранению негауссовостей из карт РИ, сохраняется и при достаточно больших уровнях шума.

На рис.5 (а) и (б) представлены угловые спектры мощности сигналов, относящихся к экспериментам 1 и 4 соответственно. Результаты, полученные в экспериментах 2 и 3, занимают промежуточные положения, поэтому не приводятся. На представленных графиках сплошной линией показан угловой спектр мощности исходной карты РИ, пунктирной — измеренной карты РИ, удовлетворяющей формуле (3), штриховой линией — угловой спектр восстановленной карты РИ с обнуленными значениями пикселей, искаженных точечными источниками, штрихпунктирной линией — карты РИ с восстановленными значениями флуктуаций в местах искажений.

**Таблица 2.** Дисперсии ( $\sigma \times 10^{-5}$ ) карт в эксперименте 3.

№ эксп.	Наименование карты	Дисперсия карты	Дисперсия карты с “дырами”	№ эксп.	Наименование карты	Дисперсия карты	Дисперсия карты с “дырами”
	РИ	4.10	3.10		РИ**ДН	4.51	4.29
	ТИ**ДН	1.99	0.00		(РИ+ТИ)** **ДН	4.93	4.29
3.1	Ш	0.00	-	3.3	Ш	2.61	-
	(РИ+ТИ)** **ДН+Ш	4.93	-		(РИ+ТИ)** **ДН+Ш	5.58	-
	РИ-Мед-МФ	4.09	3.89		РИ-Мед-МФ	4.27	4.10
	Ост.карта	0.39	1.28		Ост.карта	1.17	1.59
	РИ-МФ	4.10	3.91		РИ-МФ	4.31	4.13
	Ост.карта	0.15	1.24		Ост.карта	1.17	1.58
3.2	Ш	0.65	-	3.4	Ш	5.23	-
	(РИ+ТИ)** **ДН+Ш	4.97	-		(РИ+ТИ)** **ДН+Ш	7.19	-
	РИ-Мед-МФ	4.05	3.86		РИ-Мед-МФ	4.14	3.93
	Ост.карта	0.74	1.38		Ост.карта	1.47	1.84
	РИ-МФ	4.07	3.87		РИ-МФ	3.94	3.72
	Ост.карта	0.75	1.39		Ост.карта	1.38	1.76

Как видно из рис.5(а), в отсутствие пиксельного шума удается почти идеально восстановить карту РИ. Ошибка восстановления определяется только ошибкой инверсной фильтрации. Эффект от применения предложенного метода в этом случае близок эффекту, продемонстрированному на рис.4.

Как видно из рисунка 5(б), большой уровень пиксельного шума приводит к значительной потере точности восстановления углового спектра мощности РИ как в случае простого исключения участков загрязнения, так и в случае восстановления РИ в “дырах”. Но точность во втором случае все-таки выше, причем существенно в диапазоне мультиполей  $l=24 \div 500$ . При этом дисперсия карты остаточного шума, при заданном уровне входного пиксельного шума ниже на 25-27% (см. табл.2) из-за полного устранения точечных источников из карт РИ.

Хотя, как показывает моделирование, эффект от применения предложенного метода естественным образом уменьшается с возрастанием уровня пиксельного шума, но он все-таки обещает остаться достаточно высоким при тех шумовых характеристиках системы, которые запланированы в миссии PLANCK (Берсанелли и др., 1996; Насельский и др., 2003а).

Предложенные в данной работе методы восстановления РИ могут найти также применение в сопутствующих задачах по построению каталогов точечных радиоисточ-

ников. Для этого достаточно из оценки карты РИ+ТИ вычесть восстановленную карту РИ.

### 5.3. Восстановление анизотропии РИ в широкой области карты

С точки зрения повышения точности оценки углового спектра мощности по измерениям РИ на всей небесной сфере представляет интерес задача восстановления РИ в зоне Галактики, где наблюдаются мощнейшие негауссовы помехи.

По традиционной стратегии эта область неба просто не учитывается, что несомненно, приводит к потере точности определения углового спектра мощности РИ по сравнению с использованием полного набора неискаженных данных. В связи с этим рассмотрим аналог задачи восстановления РИ в зоне Галактики на примере карты РИ, уже использованной в предыдущем эксперименте. Пусть помехи занимают среднюю часть карты и представляют собой полосу, вытянутую в горизонтальном направлении. Вырежем из карты загрязненную область и восстановим в ней недостающие компоненты РИ, пользуясь предложенным методом восстановления.

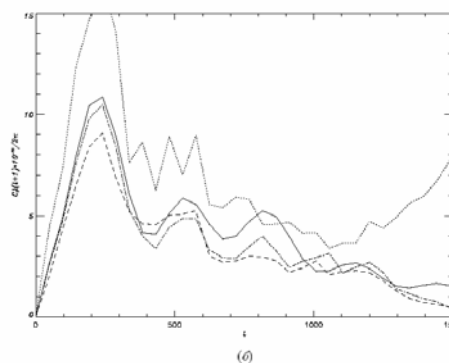
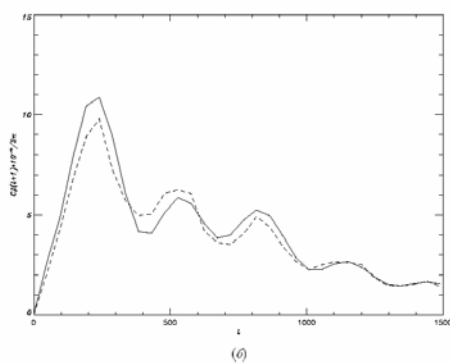
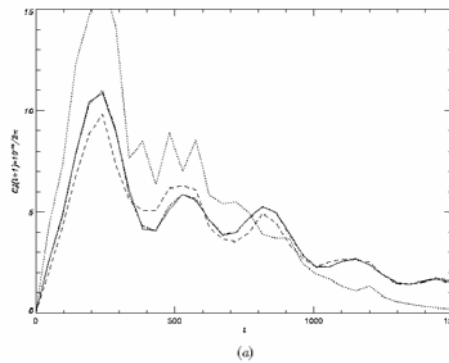
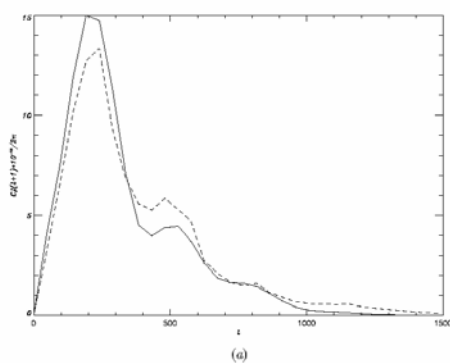


Рис.4.

Рис.5.

Моделирование показывает, что вплоть до ширины полосы, составляющей треть от линейного размера карты, удается получить практически точное восстановление РИ. Дальнейшее увеличение размера полосы приводит к возрастанию ошибок восстановления. Результаты моделирования для ширины полосы, составляющей около 30% от линейного размера карты, представлены на рис.6, где (а) — исходная карта РИ, (б) — карта РИ с вырезанной полосой, (в) — восстановленная карта РИ. Угловые спектры мощности изображены на рисунке (г), где сплошная линия соответствует исходной карте РИ, штриховая линия — карте с вырезанной полосой, штрих-пунктирная линия — восстановленной карте РИ. Дисперсии карт приводятся таблице 3.

Из анализа кривых, приведенных на рисунке (г), следует, что выбрасывание участков РИ значительной площади приводит к существенным ошибкам определения уг-

лового спектра мощности, достигающим, 50% (например, в диапазоне мультиполей  $\ell=200\div 300$ ). Применение же предложенного подхода привело практически к точному восстановлению.

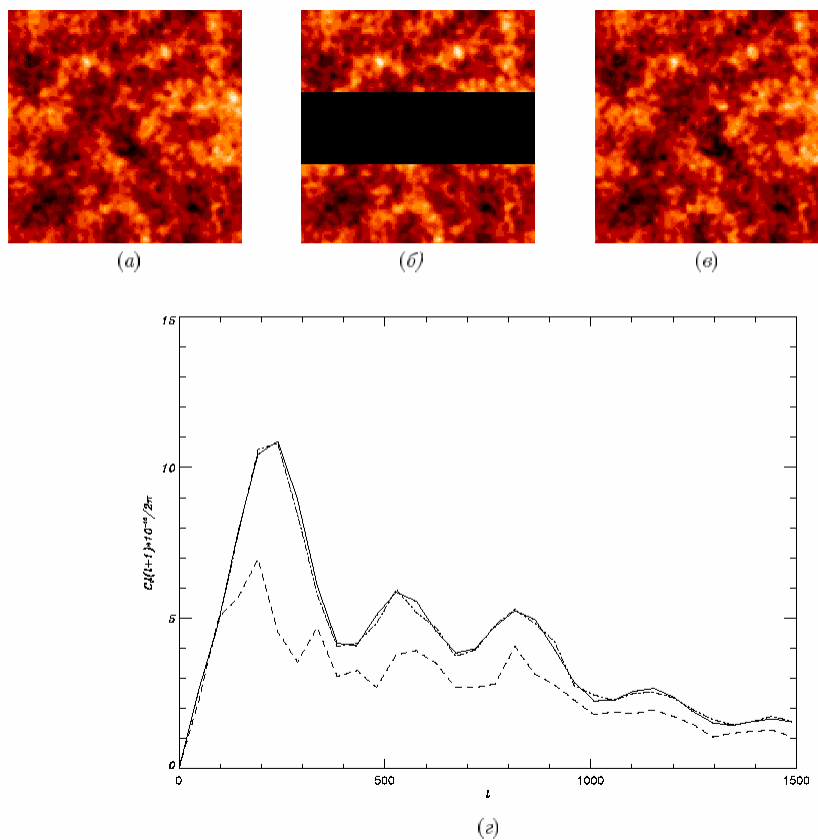


Рис.6.

Таблица 3. Дисперсии ( $\sigma \times 10^{-5}$ ) карт в экспериментах 4 и 5.

N эксп.	РИ [	ТИ	РИ+ТИ	РИ с “дырами”	Восст. РИ	Ост. карта
4	4.10	-	-	3.14	4.11	0.83
5.1	4.10	-	-	2.40	4.10	0.00
5.2	4.10	5.52	6.88	2.30	4.10	0.00

Таким образом, проведенный эксперимент позволяет надеяться, что восстановление РИ в зоне Галактики по реальным измерениям на всей небесной сфере может существенно повысить точность определения реального углового спектра мощности РИ.

#### 5.4. Восстановление РИ по отрицательным значениям флуктуаций

Как показано в предыдущих разделах, в силу свойства аналитичности флуктуаций РИ, обладающих пространственно ограниченным спектром, неизвестная часть компонентов может быть восстановлена по известной с использованием сравнительно простых методов аналитического продолжения. Нельзя ли этот факт использовать для восстановления флуктуаций РИ по заведомо известной неискаженной части. В случае точечных источников, которые, как правило, превышают по амплитуде флуктуации РИ, в основном оказываются искаженными те значения загрязненной карты, которые имеют положительный знак. Значения карты с отрицательным знаком чаще всего оказываются

неискаженными или искаженными в пренебрежимо малой степени. Если возможно восстановление распределения РИ по отрицательным значениям карты, то, очевидно, отпадает предшествующая операция локализации участков загрязнений, что не только упрощает метод, но и может повысить его точность из-за исключения возможности пропуска источников.

Рассматриваемая в данном разделе задача, результаты которой приводятся на рис.7, разделена на две части. В первой части решается задача восстановления флуктуаций с положительным знаком по флуктуациям с отрицательным знаком при отсутствии всяких фоновых загрязнений. Во второй части решается задача восстановления РИ при добавлении неразрешенных фоновых источников.

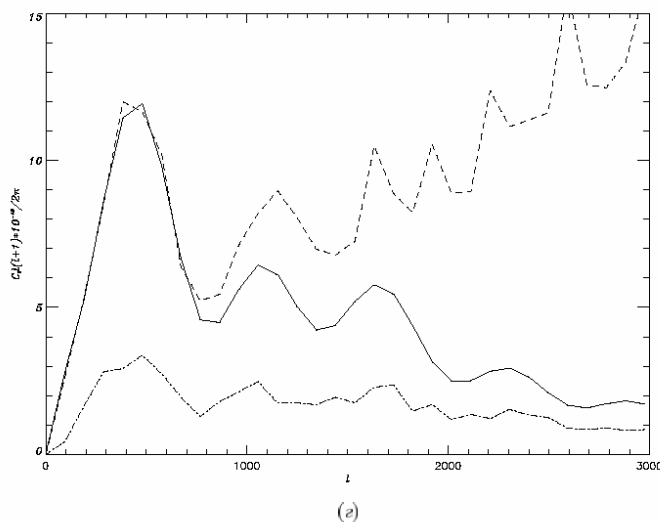
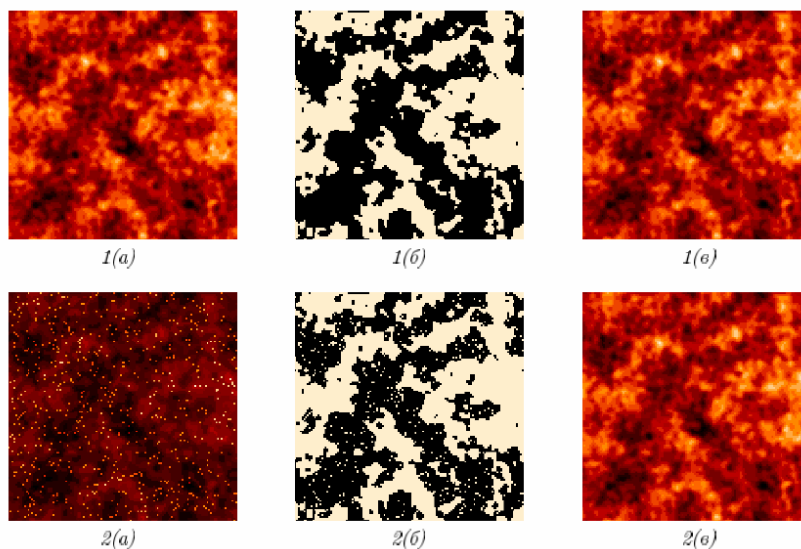


Рис.7.

Поскольку гауссово распределение флуктуаций РИ с нулевым средним приводит к тому, что площадь участков с положительным знаком примерно равна площади участков с отрицательным знаком, то частота дискретизации карт должна превышать найквистовскую как минимум вдвое. В этом случае появляется дополнительное число ограничений на нулевые значения спектра в области пространственных частот, что компенсирует недостаток информации в пространственной области. Результаты моделирования этой задачи представлены на рис.7, где  $1(a)$  — исходная карта флуктуаций

РИ;  $I(b)$  — участки искомым флуктуаций с положительным знаком (белый цвет);  $I(e)$  — результат восстановления РИ (восстановленная карта практически не отличается от заданной). Угловые спектры мощности карт изображены на рисунке ( $z$ ), где сплошной линией показаны угловые спектры мощности заданной и восстановленной карт (они сливаются), штриховой линией показан угловой спектр мощности флуктуаций с отрицательным знаком, которые служат в качестве входной информации при восстановлении.

Во второй части эксперимент усложнен путем добавления к исходной карте 680 точечных неразрешенных источников с амплитудой, равной пиковому значению РИ, распределенных по всей карте по закону Пуассона. Поскольку амплитуда точечных источников не меньше по абсолютной величине значений флуктуаций РИ, то серьезно поврежденными оказываются только положительные значения результирующей карты. Результаты восстановления недостающих значений флуктуаций РИ по отрицательным значениям измеренной карты приводятся также на рис.7, где  $2(a)$  исходная загрязненная точечными источниками карта РИ;  $2(b)$  — участки карты (белый цвет), в которых необходимо восстановить истинное распределение флуктуаций РИ;  $2(e)$  — восстановленная карта РИ, практически не отличающаяся от заданной; на рисунке ( $z$ ) пунктирной линией изображен угловой спектр мощности загрязненной карты, угловой спектр мощности восстановленной карты РИ совпадает с исходным. Дисперсии карт, дающие представление о точности восстановления, представлены в табл.3.

### Заключение

Таким образом, в работе исследована принципиальная возможность повышения точности оценки углового спектра мощности РИ путем восстановления анизотропии РИ в местах загрязнений точечными радиоисточниками и другими высокочастотными помехами. На ряде примеров продемонстрирован эффект от применения предложенного подхода по сравнению с общепринятой в настоящее время стратегией простого исключения участков загрязнений РИ.

Предложенный метод восстановления основывается на свойстве аналитичности флуктуаций РИ, обладающих пространственно ограниченным спектром. Практический алгоритм заключается в модификации хорошо известного в радиоастрономии алгоритма Фьенапа, предназначенного для решения фазовой проблемы. Использование дополнительного свойства круговой симметрии спектра мощности флуктуаций, подчиняющихся гауссовой статистике, существенно увеличивает скорость сходимости метода к требуемому решению. Для эффективной локализации точечных источников применена процедура двумерной медианной фильтрации.

Показано, что в отсутствие инструментального шума предложенный метод обеспечивает предельно высокую точность устранения точечных источников и других негауссовых высокочастотных помех и достаточно устойчив к шумам в данных.

Метод исследован также для общепринятой модели наблюдаемых карт РИ, учитывающей реальное разрешение системы и входной шум. Для фильтрации входного пиксельного “белого” шума, дисперсия которого априори не известна, предлагается использовать сочетание медианного фильтра, служащего для предварительной оценки шума, и известной модификации фильтра Винера (мощностного фильтра), не искажающего форму углового спектра мощности РИ. Показано, что применение предложенной процедуры фильтрации позволяет в дальнейшем эффективно использовать регуляризованную процедуру инверсной фильтрации для решения задачи деконволюции измеренных карт РИ диаграммой направленности антенны.

Основным достоинством предложенного метода является полное устранение негауссовостей из карт РИ, в то время как простое исключение мест загрязнений не дос-



тигает этой цели. За счет полного устранения из карт остатков точечных источников удается существенно понизить дисперсию остаточного шума даже при относительно высоком уровне входного пиксельного шума. Как показывает моделирование, эффект от применения предложенного метода, естественным образом понижающийся с возрастанием уровня входного шума, все-таки остается достаточно высоким при тех шумовых характеристиках, которые планируются в миссии PLANCK.

Показана принципиальная возможность повышения точности оценки углового спектра мощности РИ за счет восстановления анизотропии РИ в зоне Галактики, где наблюдается наиболее сильное фоновое загрязнение, а также возможность восстановления флуктуаций РИ только по отрицательным значениям карты, искаженным в существенно меньшей степени по сравнению с положительными. Такой подход позволяет опустить предшествующую операцию локализации участков загрязнений.

Предложенные в данной работе методы восстановления могут найти также применение в задачах, сопутствующих каждому эксперименту по измерению РИ, по построению каталогов точечных радиисточников.

Благодаря применению таких быстрых алгоритмов цифровой обработки сигналов как медианная фильтрация и быстрое преобразование Фурье, метод обладает высокой вычислительной производительностью, что имеет большое значение при обработке больших массивов данных.

### Литература

1. *Байкова А.Т.*, Изв. Вуз. Радиофиз. **45**, 909 (2002).
2. *Берсанелли и др.* (M. Bersanelli, *et al*), *COBRAS/SAMBA, ESA Report D/SCI* (1996).
3. *Бонд, Ефстатхи* (J.R. Bond and G. Efstathiou), *MNRAS* **281**, 655 (1987).
4. *Василенко Г.И., Тараторин А.М.*, *Восстановление изображений* (М.: Радио и связь, 1986).
5. *Виелва и др.* (P. Vielva, E. Martinez-Gonzalez, L. Cayon *et al*), *MNRAS* **326**, 181 (2001).
6. *Вио и др.* (R. Vio, L. Tenorio, and W. Wamsteker), *astro-ph/0204101* (2002).
7. *Гавайзер, Силк* (E. Gawiser and J. Silk), *astro-ph/0002044* (2000).
8. *Горски* (K.M. Gorski), *astro-ph/9701191* (1997).
9. *Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д.*, *Реликтовое излучение Вселенной* (М.: Наука, 2003а).
10. *Насельский и др.* (P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, L-Y. Chiang *et al*), *astro-ph/0310235* (2003б).
11. *Насельский и др.* (P. Naselsky, D. Novikov, and J. Silk), *astro-ph/0007133* (2000).
12. *Новиков и др.* (D.I. Novikov, P. Naselsky, H.E. Jordensen *et al*), *astro-ph/0001432* (2000).
13. *Санз и др.* (J.L. Sanz, R.B. Barreiro, L. Cayon *et al*), *Astron. Astrophys.* **140**, 99 (1999).
14. *Силк* (J. Silk), *Nature* **215**, 1155 (1967).
15. *Столяров и др.* (V. Stolyarov, M.P. Hobson, M.A.J. Ashdown *et al*), *MNRAS* **336**, 97 (2002).
16. *Тегмарк, де Оливейра-Коста* (M. Tegmark and A. de Oliveira-Costa), *Astrophys.J.* **500**, L83 (1998).
17. *Тегмарк и др.* (M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, A. Hamilton), *Phys.Rev.* **D68**, 123523 (2003).
18. *Тегмарк, Ефстатхи* (M. Tegmark and G. Efstathiou), *MNRAS* **281**, 1297 (1996).
19. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.*, *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1986).
20. *Тян Ш.-Г.*, *Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений* (Ред. Т.С.Хуанг, М.: Радио и связь, 1984), с.191.

21. **Фьенуп** (J.R. Fienup), Opt. Lett. **3**, 27 (1978).
22. **Хобсон и др.** (M.P.Hobson, R.V.Barreiro, L.Toffolatti *et al*), astro-ph/9810241 (1998).
23. **Хургин Я.И., Яковлев В.П.,** Финитные функции в физике и технике (М.: Наука, 1971).
24. **Юстуссон Б.И.,** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений (Ред. Т.С.Хуанг, М.: Радио и связь, 1984), с.156.

## A METHOD FOR REMOVING POINT SOURCES FROM THE CMB DETECTED MAPS

**Vajkova A.T.**

### *Summary*

*In order to increase the accuracy of the CMB angular power spectrum evaluation we propose a new method of removing point sources and other non-Gaussian noise. The method is based on reconstruction of the CMB anisotropy in places of the contaminations. Traditionally the places of contaminations are simply eliminated. The possibility of the CMB reconstruction in the "holes" arises from the analyticity property of the CMB fluctuations characterized by the spatial spectrum finiteness (Silk damping frequency). Another useful property is spherical symmetry of the CMB power spectrum which considerably accelerates the process of convergence of the method proposed to the solution sought-for. For realization of the idea proposed we modified a well-known Fienup's algorithm used in Radio Astronomy for solving phase problem. For effective localization of the point-sources contaminations we propose to use two-dimensional median filtering. Simulation of the small sky patches is fulfilled to test the proposed technique and evaluate the precision of the method as compared to the standard ones not assuming reconstruction of the CMB at places of contaminations. The method proposed is inspected also for the CMB reconstruction on data obtained with limited resolution and high level of pixel noise. It is shown that in contrast to the traditional approach it is possible to exclude from the CMB maps the non-Gaussian noise caused by point sources in full extent even in presence of high level of input pixel noise. It is shown that in principal it is possible to increase the accuracy of the CMB angular power spectrum estimation by reconstruction of the CMB anisotropy in Galaxy plane characterized by strong non-Gaussian noise. The possibility of the CMB reconstruction from only the least damaged fluctuations taking a negative sign is considered as well. In addition the method proposed is characterized by high speed due to using fast signal processing algorithms.*

## **РЕШЕНИЕ ФАЗОВОЙ ПРОБЛЕМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

**Байкова А.Т.**

*Предложен новый метод восстановления изображений только по модулю спектра источника, основанный на решении стандартной задачи оптимизации нелинейных теоретико-информационных функционалов с линейными ограничениями, что стало возможным благодаря введению дополнительных переменных, определяющих недостающую спектральную фазу. Предложенный метод заключается в решении выпуклого функционала, что обеспечивает получение единственного с точностью до класса эквивалентных функций (линейного сдвига и поворота изображения на  $180^\circ$ ) решения для сигналов, удовлетворяющих теореме существования. Приводятся результаты тестирования метода, как для модельных, так и реальных РСДБ-данных на примере радиоисточника 2200+420, для которого построены изображения по наблюдениям международных геодезических РСДБ-программ. Разработанный метод предлагается использовать для бесфазового картографирования в системе наземно-космического радиоинтерферометра с высокой орбитой космической станции, когда наблюдается вырождение уравнений замыкания фаз, и применение стандартных методов РСДБ-картографирования становится некорректным.*

### **Введение**

Проблемы бесфазового картографирования применительно к радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), а также вопросы существования и единственности решения задачи восстановления изображения источника только по модулю спектра Фурье, были достаточно подробно рассмотрены автором в статье (Байкова, 2004). Настоящая работа, целью которой является разработка более надежного алгоритма решения фазовой проблемы по сравнению с известным, широко применяемым алгоритмом Фьенапа, является логическим продолжением работы, указанной выше.

Напомним, что в статье Байковой (2004) была предложена стратегия бесфазового РСДБ-картографирования, основанная на:

1) предварительном восстановлении модуля функции видности (спектра) источника на всей  $UV$ -плоскости пространственных частот путем восстановления промежуточного изображения по данным, измеренным на ограниченном множестве точек, с нулевой спектральной фазой;

2) восстановлении искомого изображения по модулю спектра источника, полученному на первом этапе, с использованием методов и алгоритмов, предназначенных непосредственно для решения фазовой проблемы.

Несмотря на принципиальное существование, за исключением вырожденных случаев, определенных на множестве меры нуль, единственного, с точностью до класса эквивалентных функций (линейного сдвига и поворота изображения на  $180^\circ$ ), решения фазовой проблемы для многомерных ( $\geq 2$ ), пространственно ограниченных и неотрицательно определенных сигналов (Брук, Содин, 1979), до настоящего времени не имеется абсолютно надежного практического алгоритма его получения.

Действительно, наиболее эффективные и нашедшие наибольшее применение на практике алгоритмы Фьенапа (Фьенап, 1978; Фьенап, 1982) не обладают свойством сжатия (Василенко, Тараторин, 1986) и поэтому не гарантируют сходимости к правиль-

ному решению, особенно при больших ошибках в данных. В работе Байковой (2004) демонстрируется успешное применение алгоритмов Фьенапа при сравнительно высоких отношениях “сигнал/шум” (около 10) и для сравнительно простых структур источников.

В данной работе делается попытка восполнить этот пробел, и предлагается новый, более надежный метод решения фазовой проблемы, основанный на использовании методов нелинейной оптимизации, обладающих глобальным экстремумом.

Отметим, что методы оптимизации нелинейных функционалов, задающих меру качества восстановления изображения (например, максимум энтропии), получили широкое признание благодаря высокой устойчивости по отношению к шумам и свойству сверхразрешения. В РСДБ-картографировании они нашли применение в качестве процедур деконволюции в цикле адаптивной калибровки, использующей соотношения замыкания фаз и амплитуд (Корнуэлл, Фомалон, 1999).

Целью данной работы является приспособление этих нелинейных процедур для решения задачи бесфазового картографирования, возникающей в ситуации, когда измерение фазы, с одной стороны, сопряжено с большими ошибками, вносимыми средой распространения радиоволн, а с другой, невозможностью использования соотношений для замыкания фаз (Байкова, 2004). Последний недостаток присущ двухэлементному, а также наземно-космическому радиоинтерферометру с высокой орбитой космической станции, превышающей радиус Земли в десятки и более раз. В последнем случае наблюдается вырождение многоэлементного инструмента, по-существу, в двухэлементный интерферометр, и картографирование с использованием стандартных методов адаптивной калибровки становится некорректным.

Такая проблема актуальна и для будущей Российской космической миссии “РАДИОАСТРОН” (Кардашев, 1997), характеризующейся высоким апогеем орбиты космической станции, достигающим 350 тыс. км, и предназначенной для картографирования внегалактических радиоисточников с ультравысоким угловым разрешением, достигающим сотых долей миллисекунды дуги.

В следующих разделах работы приводятся математическая постановка задачи, описание предложенного метода, анализ решения, результаты тестирования метода, в том числе, для картографирования с использованием космической миссии “РАДИОАСТРОН”.

## 1. Постановка задачи

Сформулируем задачу восстановления двумерных изображений в дискретной форме с целью поиска ее решения в дальнейшем с использованием численных методов.

Пусть дискретизация карт произведена в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона, и размер карт составляет  $N \times N$  отсчетов. Спектр объекта (источника) вычисляется как  $N$ -точечное дискретное преобразование Фурье двумерной последовательности  $x_{ml}$ , описывающей объект с конечным носителем:

$$X_{nk} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} x_{ml} \exp(-i \frac{2\pi}{N} (nm + kl)) = A_{nk} + iB_{nk} = M_{nk} \exp(i\Phi_{nk}), \quad (1)$$

где  $A_{nk}$  — вещественная часть,  $B_{nk}$  — мнимая часть,  $M_{nk}$  — модуль,  $\Phi_{nk}$  — фаза комплексного спектра  $X_{nk}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ , причем выполняются соотношения:

$$A_{nk} = M_{nk} \cos \Phi_{nk}, \quad B_{nk} = M_{nk} \sin \Phi_{nk}. \quad (2)$$

Рассматриваемая в данной работе задача формулируется следующим образом: по известным (измеренным) значениям модуля спектра  $M_{nk}$  на некотором множестве то-

чек области пространственных частот  $U$  и  $V$  источника требуется восстановить изображение  $x_{ml}$ . Очевидно, эта задача эквивалентна задаче восстановления спектральной фазы  $\Phi_{nk}$ , поскольку распределение  $x_{ml}$  равно обратному преобразованию Фурье полного спектра  $X_{nk}$  (1), учитывающего как амплитудную, так и фазовую составляющие.

## 2. Описание метода

С учетом (1) и (2), можно записать следующие ограничения на данные измерений  $M_{nk}$ , относящиеся отдельно к вещественной и мнимой частям комплексного спектра:

$$\sum_m \sum_l x_{ml} a_{ml}^{nk} + \eta_{nk}^r = A_{nk} = M_{nk} \cos \Phi_{nk}, \quad (3)$$

$$\sum_m \sum_l x_{ml} b_{ml}^{nk} + \eta_{nk}^i = B_{nk} = M_{nk} \sin \Phi_{nk}, \quad (4)$$

где  $a_{ml}^{nk} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}(mn + lk)\right)$ ,  $b_{ml}^{nk} = \sin\left(\frac{2\pi}{N}(mn + lk)\right)$ , а  $\eta_{nk}^r$  и  $\eta_{nk}^i$  представляют собой ошибки измерения, удовлетворяющие гауссовому распределению с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_{nk}^2$ .

Представим соотношения для спектральной фазы следующим образом:

$$\cos \Phi_{nk} = 2 \cos^2 \frac{\Phi_{nk}}{2} - 1, \quad (5)$$

$$\sin \Phi_{nk} = \left(\sin \frac{\Phi_{nk}}{2} + \cos \frac{\Phi_{nk}}{2}\right)^2 - 1 \quad (6)$$

и введем новые положительно определенные переменные:

$$t_{nk} = 2 \cos^2 \frac{\Phi_{nk}}{2}, \quad (7)$$

$$s_{nk} = \left(\sin \frac{\Phi_{nk}}{2} + \cos \frac{\Phi_{nk}}{2}\right)^2. \quad (8)$$

Тогда предлагаемый метод восстановления изображения  $x_{ml}$  можно представить как решение следующей задачи оптимизации с линейными ограничениями (3)-(4), в которые подставим переменные  $t_{nk}$  и  $s_{nk}$  в соответствии с выражениями (5)-(8):

$$\min Q(x_{ml}, t_{nk}, s_{nk}) + \sum_n \sum_k \frac{(\eta_{nk}^r)^2 + (\eta_{nk}^i)^2}{2\sigma_{nk}^2}, \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_l x_{ml} a_{ml}^{nk} - M_{nk} t_{nk} + \eta_{nk}^r = -M_{nk}, \quad (10)$$

$$\sum_m \sum_l x_{ml} b_{ml}^{nk} - M_{nk} s_{nk} + \eta_{nk}^i = -M_{nk}, \quad (11)$$

$$x_{ml}, t_{nk}, s_{nk} \geq 0, \quad (12)$$

где  $Q$  — нелинейный функционал, определяющий избранный критерий качества восстановления. Второе слагаемое, входящее в оптимизируемый функционал (9), представляет собой оценку расхождения решения с данными измерений по критерию  $\chi^2$ .

Для ускорения сходимости метода целесообразно потребовать также выполнения следующего очевидного нелинейного ограничения на неизвестные  $t_{nk}$  и  $s_{nk}$ :

$$\cos^2 \Phi_{nk} + \sin^2 \Phi_{nk} = (t_{nk} - 1)^2 + (s_{nk} - 1)^2 = 1. \quad (13)$$

При этом предлагается следующая схема решения задачи (9)-(13). Задача с линейными ограничениями (9)-(12) решается стандартным методом прямой оптимизации с использованием множителей Лагранжа (Василенко, Тараторин, 1986). А по ходу чис-

ленных итераций по поиску экстремума соответствующего двойственного функционала (например, по методу покоординатного спуска (Байкова, 1993)) на переменные  $t_{nk}$  и  $s_{nk}$  накладываются нелинейные ограничения (13).

В случае, когда  $Q$  представляет собой функционал энтропии по Шеннону (Фриден, 1972),

$$Q(x_{ml}, t_{nk}, s_{nk}) = \sum_m \sum_l x_{ml} \ln x_{ml} + \sum_n \sum_k (t_{nk} \ln t_{nk} + s_{nk} \ln s_{nk}) \quad (14)$$

имеем метод максимальной энтропии (ММЭ).

Другим хорошо изученным эффективным методом является минимум меры Реньи (Фриден, Байкова, 1995). В этом случае функционал  $Q$  выглядит следующим образом:

$$Q(x_{ml}, t_{nk}, s_{nk}) = \sum_m \sum_l x_{ml}^\alpha + \sum_n \sum_k (t_{nk}^\alpha + s_{nk}^\alpha),$$

где  $\alpha \neq 1$ .

В практике РСДБ-картографирования наибольшее признание среди множества нелинейных функционалов, задающих различные меры качества восстановления изображений, получил функционал Шенноновской энтропии. Поэтому в данной работе рассматривается разработанная версия метода восстановления фазы, основанная именно на ММЭ. Обобщение на метод Реньи тривиально.

### 3. Анализ решения

Применяя к задаче (9)-(12), с учетом (14), стандартный метод множителей Лагранжа, получим следующую задачу безусловной оптимизации:

$$\begin{aligned} \min L = & \sum_m \sum_l x_{ml} \ln x_{ml} + \sum_n \sum_k (t_{nk} \ln t_{nk} + s_{nk} \ln s_{nk}) + \sum_n \sum_k \frac{(\eta_{nk}^r)^2 + (\eta_{nk}^i)^2}{2\sigma_{nk}^2} + \\ & + \sum_n \sum_k \alpha_{nk} (\sum_m \sum_l x_{ml} a_{ml}^{nk} - M_{nk} t_{nk} + \eta_{nk}^r + M_{nk}) + \\ & + \sum_n \sum_k \beta_{nk} (\sum_m \sum_l x_{ml} b_{ml}^{nk} - M_{nk} s_{nk} + \eta_{nk}^i + M_{nk}), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\alpha_{nk}, \beta_{nk}$  — множители Лагранжа, или, двойственные переменные.

Необходимым условием существования экстремума функционала  $L$  является равенство нулю градиента:  $\partial L / \partial y_i = 0$  и положительная полуопределенность матрицы Гессе, составленной из элементов  $\partial^2 L / \partial y_i \partial y_j$  в точке с нулевым градиентом (здесь буквой  $y$  обозначена обобщенная переменная  $x_{ml}, t_{nk}, s_{nk}, \eta_{nk}^r, \eta_{nk}^i$ , а  $i, j$  — обобщенные индексы этих переменных).

Достаточным условием существования локального экстремума является положительная определенность матрицы Гессе. Если матрица Гессе положительно определена всюду, то функционал будет выпуклым, а локальный экстремум — глобальным.

Из необходимого условия существования экстремума функционала  $L$  получим решение для искомого распределения (изображения)  $x_{ml}$ , а также переменных  $t_{nk}, s_{nk}$ , определяющих спектральную фазу:

$$x_{ml} = \exp(\sum_n \sum_k \alpha_{nk} a_{ml}^{nk} + \beta_{nk} b_{ml}^{nk} - 1), \quad (16)$$

$$t_{nk} = \exp(\alpha_{nk} M_{nk} - 1), \quad s_{nk} = \exp(\beta_{nk} M_{nk} - 1), \quad (17)$$

$$\eta_{nk}^r = -\alpha_{nk} \sigma_{nk}^2, \quad \eta_{nk}^i = -\beta_{nk} \sigma_{nk}^2.$$

Как видно из (16) и (17), переменные  $x_{ml}, t_{nk}, s_{nk}$  всегда положительно определены, т.е. условия (12) выполняются автоматически, что является внутренним свойством

решения энтропийного функционала. Нетрудно показать, что матрица Гессе представляет собой диагональную матрицу с положительными элементами, что говорит о том, что она положительно определена всюду, и, следовательно, функционал Лагранжа (15) является выпуклым, а решение — глобальным, т.е. единственным.

Однако единственность решения в данном случае понимается как единственность восстановления только формы объекта. Изображения, полученные в результате линейного сдвига и поворота на  $180^\circ$  решения (16), также удовлетворяют исходным уравнениям (9)-(13), что следует из свойства периодичности тригонометрических функций, определяющих искомую фазу через переменные  $t_{nk}$  и  $s_{nk}$  (см. (7), (8)), поэтому также являются решениями функционала (15). Все эти решения составляют класс эквивалентных функций, отличающихся друг от друга линейным сдвигом и поворотом на  $180^\circ$ .

Таким образом, предложенный метод поиска решения фазовой проблемы обеспечивает единственное решение с точностью до класса эквивалентных функций.

В качестве метода численной реализации задачи безусловной оптимизации (15) мы используем метод покоординатного спуска, подробно исследованный в работе Байковой (1993) для различных функционалов.

#### 4. Тестирование метода

Результаты первого эксперимента, посвященного тестированию предложенного метода с использованием восьми моделей, представлены на рис.1. Пары изображений обозначены буквами (а)-(з), причем модели показаны слева, а восстановленные изображения — справа от обозначения. Приведенные модели отражают различный характер возможных распределений яркости по источнику — от совокупности точечных неразрешенных деталей и гауссиан с различным взаимным расположением компонент — до протяженных распределений с резкими краями. Отметим, что нижний уровень, а также шаг, с которым проводятся контурные линии на всех изображениях, составляет 1% от пикового значения яркости на карте. В качестве входных данных были взяты полные выборки отсчетов модуля спектра без добавления каких-либо ошибок измерения. Сравнение модельных и восстановленных карт дает возможность судить о внутренней точности метода, которая для данных примеров является достаточно высокой и составляет от 1 до 4 процентов. Как видно из рисунков, некоторые объекты восстановлены с точностью до линейного сдвига ((ж) и (з)) и поворота на  $180^\circ$  ((е) и (г)), что не имеет принципиального значения при анализе только структуры источника.

С точки зрения тестирования метода для целей РСДБ-картографирования, интерес представляет заполнение области пространственных частот ( $UV$ -плоскости) с большими пропусками, а также наличие ошибок измерения в данных. В этом случае для ускорения процесса сходимости алгоритма предлагается использовать стратегию, предложенную в работе Байковой (2004) и описанную выше во введении. На первом этапе производится восстановления промежуточного изображения по заданному модулю функции видности (при нулевой спектральной фазе) с использованием обобщенного метода максимальной энтропии (Байкова, 1993) со знакопеременным выходом. А на втором этапе восстановленный таким образом спектральный модуль источника используется в качестве входных данных непосредственно для метода восстановления фазы, предложенного в данной работе.

Следующий эксперимент был посвящен анализу качества восстановления при заполнении  $UV$ -плоскости, приведенном на рис.2(а), где по осям  $U$  и  $V$  отложены пространственные частоты в  $10^6$  единицах длин волн. В качестве модели был выбран ис-

точник, изображенный на рис.1(г), имеющий структуру вида “ядро+джет”, типичную для внегалактических радиоисточников на миллисекундных угловых масштабах.

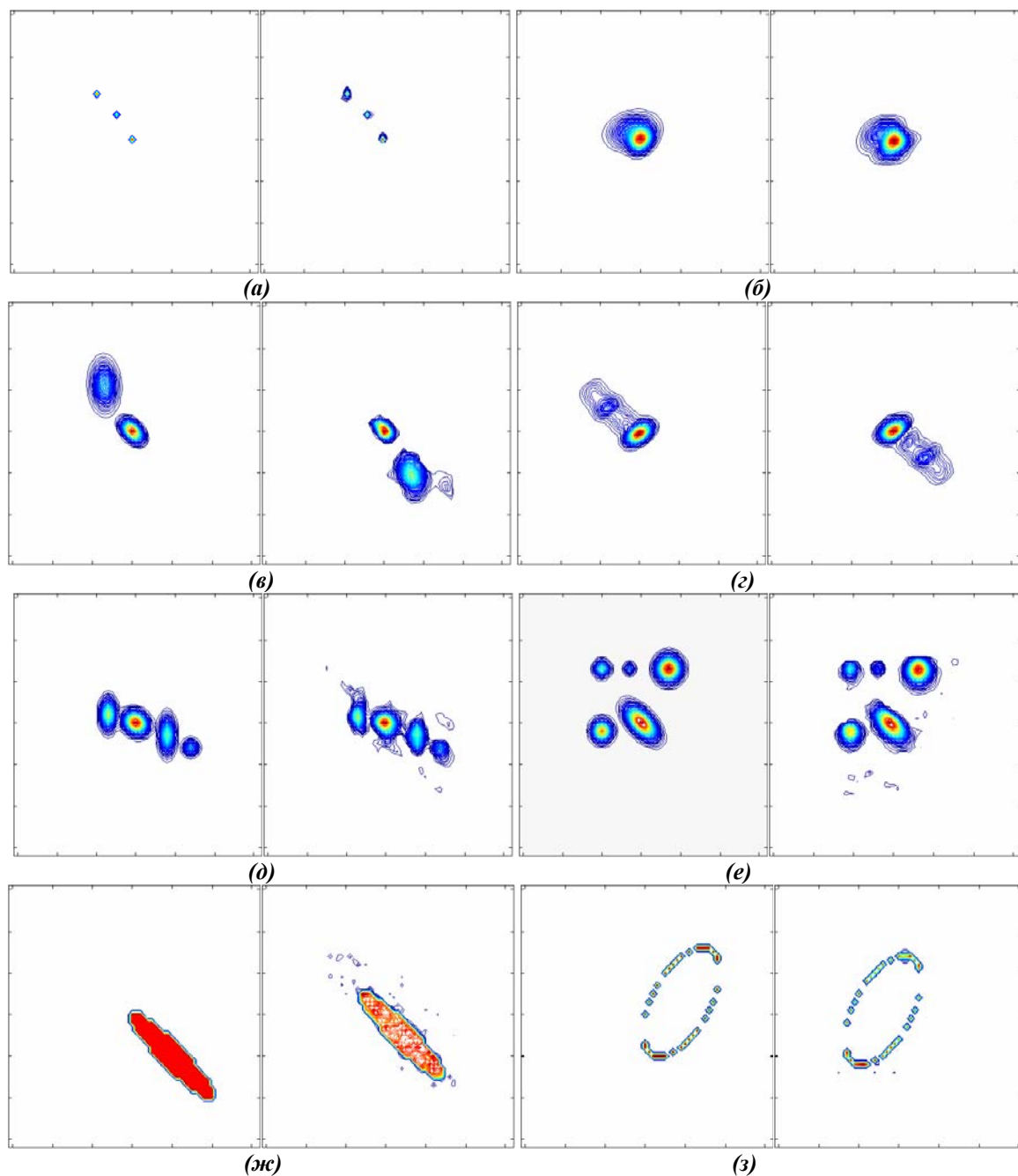
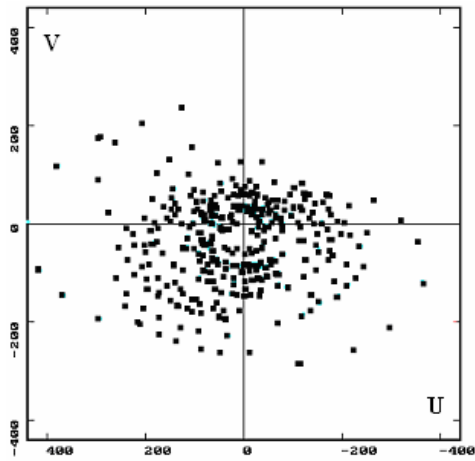


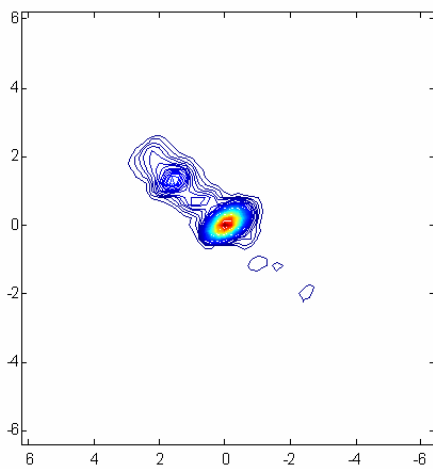
Рис.1.

На рис.2(б), (в), (г) и (д) показаны карты, восстановленные по данным, содержащим различный уровень аддитивного шума с равномерным законом распределения с нулевым средним, в интервале относительных значений  $[-a, a]$ , где  $a=0.01, 0.1, 0.2$  и  $0.5$  соответственно (за единицу принимается амплитуда спектрального отсчета). Отметим, что осям карт, приводимых на рис. 2 и далее в данной статье отложены угловые размеры в миллисекундах дуги (мсд).

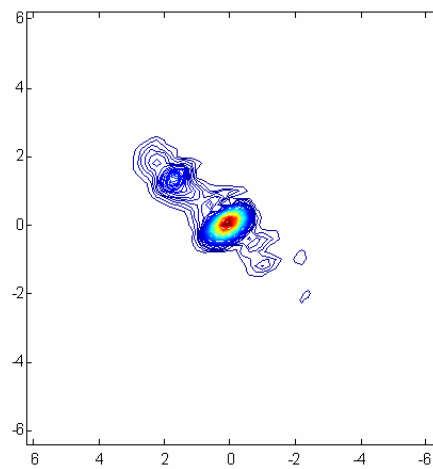




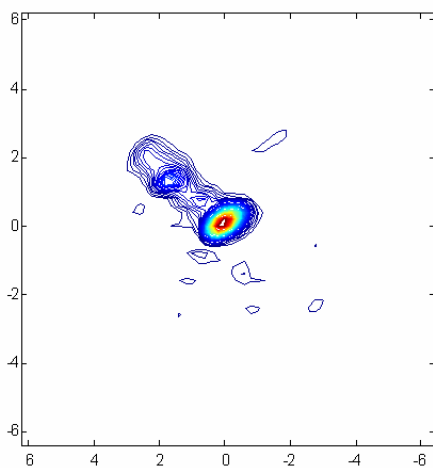
(a)



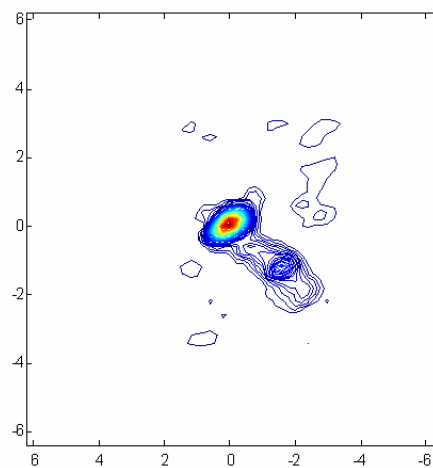
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис.2.

Шумовые характеристики входных данных и восстановленных изображений сведены ниже в таблице 1, в которой приводятся пиковые значения яркости, энтропия карт, а также максимальный уровень ложных деталей. Сравнение полученных значений с модельными дает представление о качестве восстановления. Можно отметить, что в

данных экспериментах увеличение уровня шума приводит к нарушению соотношения яркостей центральной компоненты и компонент джета.

**Таблица 1.** Характеристики данных измерений и восстановленных изображений.

Карта	Пиковое значение шума в относительных единицах	Отношение “сигнал/шум” входных данных	Пиковое значение относительной яркости карты	Значение энтропии карты	Пиковое значение ложной детали (в %)
Модель рис.1(г)	--	--	1.00	-28.65	--
Изображение рис.2(б)	0.01	99.01	0.95	-29.23	3
Изображение рис.2(в)	0.10	12.65	1.05	-29.94	4
Изображение рис.2(г)	0.20	8.97	0.95	-32.63	2
Изображение рис.2(д)	0.50	5.24	0.94	-35.67	2
Изображение-рис.5(г) слева	0.10	11.67	0.93	-31.74	6
Изображение рис.5(г) справа	0.10	10.04	1.06	-33.07	3

Из анализа приведенных изображений, а также таблицы следует, что предложенный метод является достаточно устойчивым к ошибкам во входных данных и дает высокое качество восстановления даже при сравнительно низких значениях “сигнал/шум”.

С целью тестирования предложенного метода применительно к реальным РСДБ-данным, было проведено бесфазовое картографирование радиоисточника 2200+420 по наблюдениям международных астрометрических/геодезических программ на частоте 8.2 ГГц на глобальной РСДБ-сети за период 1996-1997 гг. Заполнения *UV*-плоскости, соответствующие избранному дате наблюдений, а также другие данные экспериментов приводятся в работе Байковой (2004). Восстановленные изображения показаны на рис.3, где над каждой картой указана дата наблюдений. Полученные карты качественно и количественно хорошо согласуются с результатами альтернативных методов картографирования, приведенными в работе Байковой (2004), как бесфазового, использующего метод Фьенапа, так и стандартного метода самокалибровки (значения потоков близки полученным в указанной выше работе и здесь не приводятся).

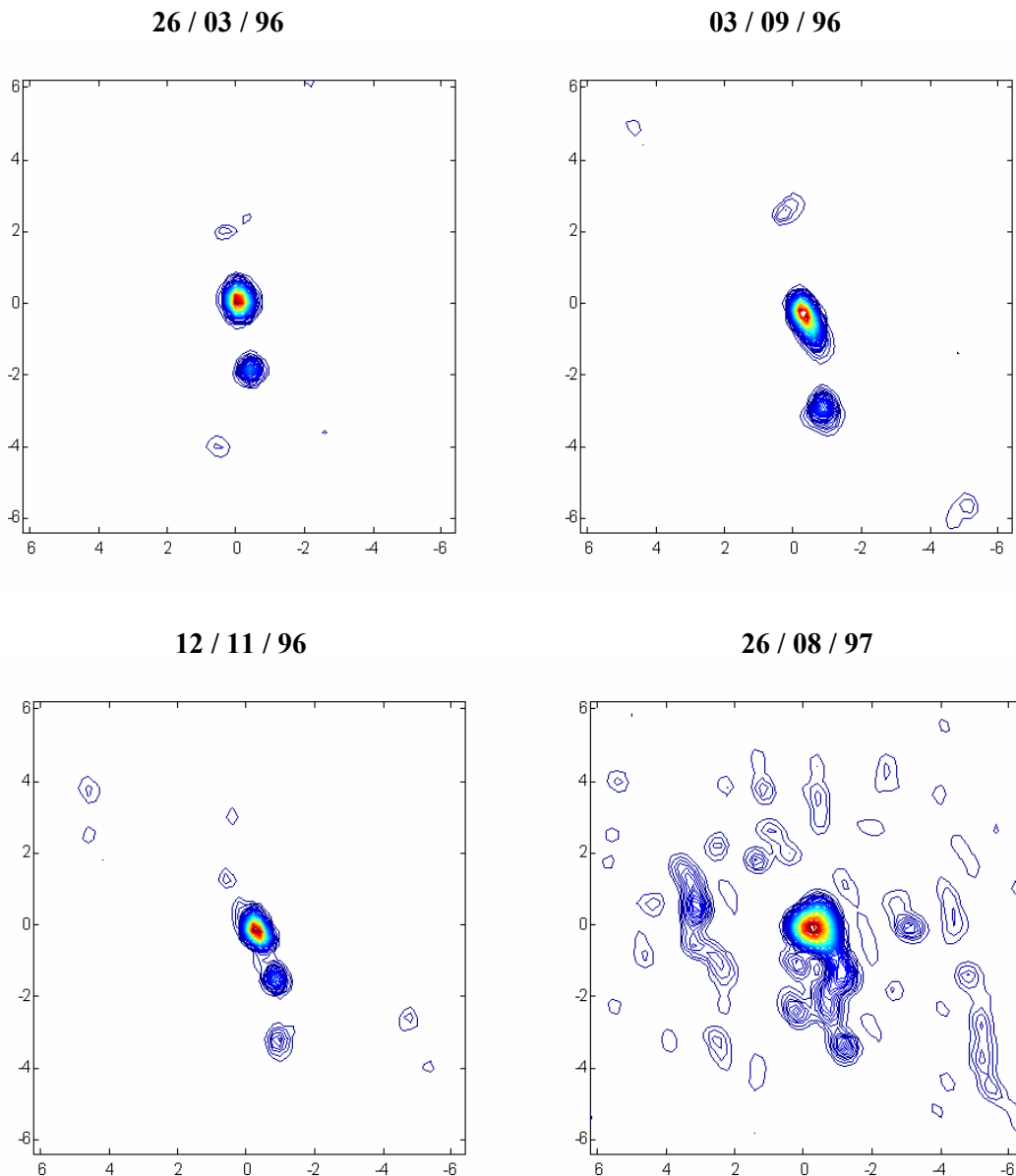


Рис.3.

#### 4. Проблемы картографирования в РСДБ с высокой орбитой космической станции

Вынос хотя бы одной РСДБ-станции за пределы Земли, и, тем самым, увеличение длины базы интерферометра, позволяет существенно повысить разрешающую способность инструмента.

В ближайшем будущем предполагается реализация Российской академией наук, а именно, АКЦ ФИАН, космического проекта “РАДИОАСТРОН” (Кардашев, 1997) по построению наземно-космического радиоинтерферометра для задач картографирования радиоисточников со сверхвысоким разрешением, достигающим сотых долей миллисекунды дуги. Такое разрешение соответствует максимальной базе в 350 тыс. км, достигаемой в апогее космического аппарата, и длине волны принимаемого излучения 1.35 см [13].

Желание реализовать сверхвысокое угловое разрешение за счет увеличения длин баз, соединяющих наземные станции с единственной космической, приводит к определенным математическим проблемам картографирования, связанным с вырождением

многоэлементного наземно-космического радиоинтерферометра, независимо от количества задействованных наземных станций, фактически в двухэлементный (Байкова, 2004). Следствием этого является вырождение соотношений для “замкнутых” фаз, используемых традиционно в РСДБ для корректного восстановления спектральной фазы методами адаптивной калибровки.

Запишем уравнения для “замкнутых” фаз (Корнуэлл, Фомалон, 1999):

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{ijk} &= \tilde{\Phi}_{ij} + \tilde{\Phi}_{jk} - \tilde{\Phi}_{ik} = \\ &= \Phi_{ij} + \Phi_{jk} - \Phi_{ik} + \text{noiseterm} = C_{ijk} + \text{noiseterm}, \end{aligned} \quad (18)$$

причем  $\tilde{\Phi}_{ij} = \Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j + \text{noiseterm}$ , где  $\Phi_{ij}$  — спектральная фаза источника на базе  $(ij)$ ,  $\theta_i, \theta_j$  — фазы комплексных коэффициентов усиления антенн с номерами  $i$  и  $j$ , включающие как инструментальную, так и атмосферную составляющие, которые компенсируются в результате замыкания треугольников;  $\text{noiseterm}$  — случайная остаточная составляющая фазового шума, которая обычно достаточно мала. Здесь тильдой обозначены измеряемые величины.

Вырождение уравнений замыкания фаз является следствием геометрического вырождения треугольников, вершинами которых являются две наземные с номерами  $i, j$  и одна космическая станция с номером  $k$ , сильно удаленная от Земли. В результате, правая часть соотношений (18) практически обращается в ноль независимо от реальной спектральной фазы источника, т.е.  $\tilde{C}_{ijk} \approx \text{noiseterm} \approx 0$ . Очевидно, в такой ситуации применение уравнений замыкания всегда будет приводить к симметричным изображениям независимо от реальной структуры источника.

Проблему бедного заполнения  $UV$ -плоскости, приводящего к большим боковым лепесткам синтезированной диаграммы направленности, удастся частично решить благодаря применению принципа многочастотного синтеза ([12]; Байкова, 1990). Но этого недостаточно для корректного восстановления фазы. Поэтому для восстановления формы источника мы предлагаем использовать метод бесфазового картографирования с применением предложенных методов. Для правильного восстановления пространственной ориентации источника следует использовать в качестве начального приближения решение, получаемое методами адаптивной калибровки из наблюдений наземной (низкочастотной) частью инструмента.

Приведем результаты моделирования наземно-космического РСДБ, использующего космическую миссию “РАДИОАСТРОН”, со следующими параметрами. Пусть станциями наземной части (выбор в рассматриваемом случае не принципиален) являются обсерватории Светлое, Зеленчукская, Бадары радиоинтерферометрического комплекса “КВАЗАР”. Длина волны наблюдений равна 1.35 см. При многочастотном синтезе использована полоса частот, равная 30% от частоты, соответствующей избранной длине волны. Параметры орбиты космической станции [13]: углы Эйлера: наклон плоскости орбиты к плоскости экватора равен  $51.5^\circ$ ; угол от точки весеннего равноденствия до линии узлов равен  $-45^\circ$ ; угол от линии узлов до перигея равен  $30^\circ$ ; период обращения вокруг Земли составляет 9.5 суток; перигей орбиты равен 20 тыс. км; апогей орбиты равен 350 тыс. км. Разрешение системы составляет  $0.01 \text{ мс} \approx$  дуги.

На рис.4 (а) и (б) изображены покрытия  $UV$ -плоскости полученные с использованием принципов как одночастотного, так и многочастотного синтеза соответственно, за время, равное периоду обращения космической станции вокруг Земли. Здесь по осям  $U$  и  $V$  отложены пространственные частоты в единицах  $10^8$  длин волн.

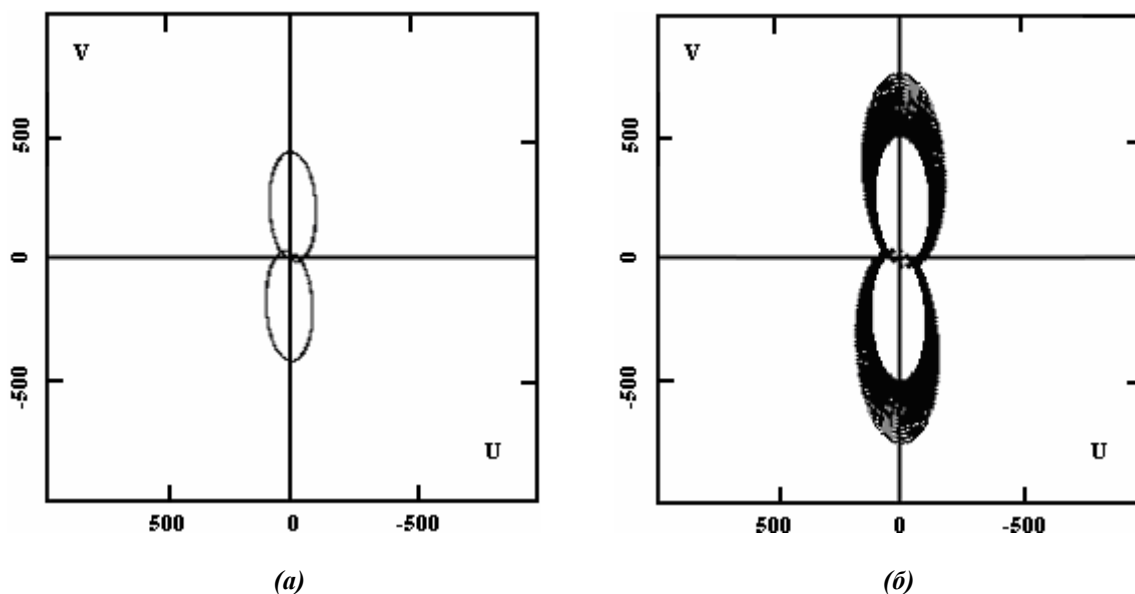


Рис.4.

На рис.5 приводятся изображения восьми источников, рассмотренных в первом эксперименте по тестированию метода (см. рис.1). Здесь буквами (а)-(з) обозначены пары изображений, построенных с использованием одночастотного и многочастотного синтеза, и показанных слева и справа от обозначения соответственно. При этом в данные был добавлен равномерный шум в диапазоне  $\pm 10\%$  от каждого измеренного отсчета функции видности, что обеспечило на входе алгоритма отношение “сигнал/шум”  $\approx 10$ .

Поскольку заполнения области пространственных частот являются достаточно бедными, особенно в случае одночастотного синтеза, то построение изображений выполнено в два этапа: на первом этапе произведено восстановление модуля функции пространственной когерентности на всей  $UV$ -плоскости с использованием обобщенного метода максимальной энтропии; на втором этапе восстановленный модуль спектра источника использован в качестве входных данных для метода (15).

Как видно из результатов, представленных на рис.5, удастся получить изображения приемлемого качества даже в случае очень бедного заполнения  $UV$ -плоскости, соответствующего одночастотному синтезу, особенно для сравнительно простых структур источника типа “ядро+джет” (например, (е)).

При этом надо отметить, что многочастотный синтез обеспечивает более высокую точность восстановления по сравнению с одночастотным, причем, с усложнением структуры источника эффект проявляется сильнее (см. рисунки (д), (е), (ж) и (з)). Во всех восьми рассмотренных случаях многочастотный синтез позволяет более точно восстановить форму источника и соотношение амплитуд компонент, а также обеспечить меньший уровень ложных деталей. Характеристики карт, представленных на изображениях (з), указаны в двух последних строках таблицы 1.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный в работе метод бесфазового картографирования может быть использован для получения изображений со сверхвысоким угловым разрешением и высоким качеством в случае наземно-космического РСДБ с высокой орбитой космической станции, когда применение стандартных методов адаптивной калибровки бессмысленно.

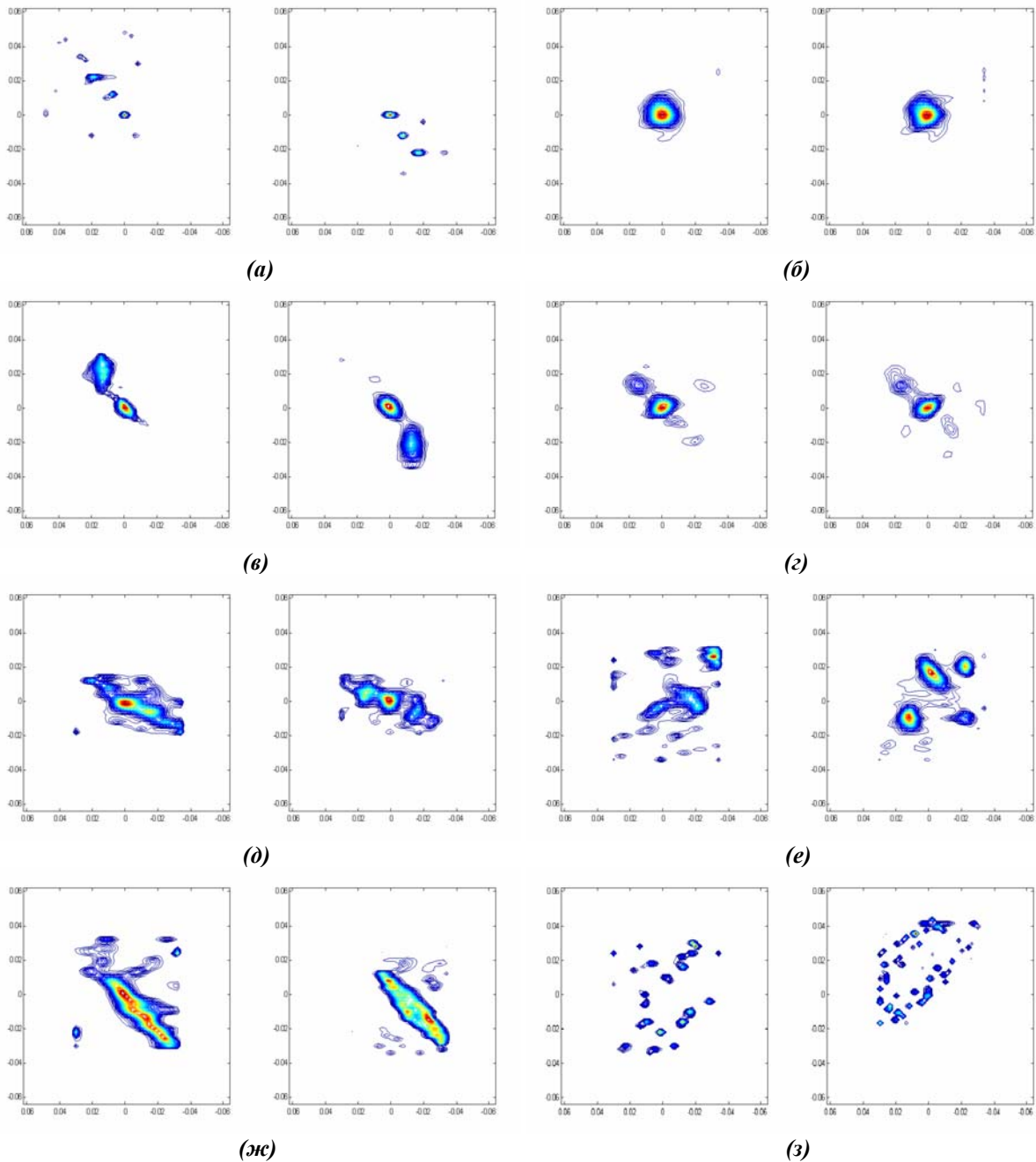


Рис.5.

### Заключение

Предложенный метод восстановления изображений, основывающийся на стандартных методах нелинейной оптимизации, в частности, хорошо разработанном методе максимальной энтропии, обладает более высокой надежностью и устойчивостью к ошибкам в данных по сравнению с алгоритмом Фьенапа, не обладающим свойством сжатия, и может быть эффективно применен для целей бесфазового картографирования в РСДБ. При этом, как показало моделирование метода для объектов различной формы, внутренняя точность восстановления составляет от 1 до 4 %. Анализ метода при различном уровне шумов во входных данных показал возможность достижения высокого качества восстановления изображений при достаточно низких отношениях “сигнал/шум”. Картографирование радиисточника 2200+420 по данным международных

геодезических РСДБ-программ на глобальной сети показало хорошее согласие с результатами, полученными с использованием других методов.

Представляется, что в астрономии задача бесфазового картографирования особенно актуальна в наземно-космической радиоинтерферометрии с высокой орбитой космической станции, в десятки и более раз превышающей радиус Земли. В этом случае наблюдается вырождение соотношений замыкания фаз, так что применение стандартных методов адаптивной калибровки становится неприемлемым. Приведенные в работе результаты моделирования наземно-космического радиоинтерферометра с использованием космической миссии “РАДИОАСТРОН” для картографирования со сверхвысоким угловым разрешением, говорят о возможности достижения приемлемого качества восстановления изображений с использованием методов, предложенных автором как в данной, так и предыдущей работе (Байкова, 2004).

Автор признателен Н.С. Кардашеву и А.В. Степанову за поддержку работы.

#### Литература

1. **Байкова А.Т.**, Письма в Астрон. журн. **30**, 253 (2004).
2. **Байкова А.Т.**, Сообщения ИПА РАН N 58 (СПб.: ИПА РАН, 1993).
3. **Байкова А.Т.**, Сообщения ИПА РАН N 24 (Л.: ИПА АН СССР, 1990).
4. **Брук, Содин** (Yu.M. Bruck and L.G. Sodin), Optics Comm. **30**, 304 (1979).
5. **Василенко Г.И., Тараторин А.М.**, Восстановление изображений (М.: Радио и связь, 1986).
6. **Кардашев** (N.S. Kardashev), Exp. Astron. **7**, 329 (1997).
7. **Корнуэлл, Фомалон** (T.J. Cornwell and E.B. Fomalont), *Synthesis imaging in Radio Astronomy II* (Ed. G.B. Taylor, C.L. Carilli, and R.A. Perley (San Francisco: ASP Conference Series, 1999), p. 187.
8. **Фриден** (B.R. Frieden), JOSA **62**, 511 (1972).
9. **Фриден, Байкова** (B.R. Frieden and A.T. Bajkova), Appl. Opt. **34**, 4086 (1995).
10. **Фьенап** (J.R. Fienup), Opt. Lett. **3**, 27 (1978).
11. **Фьенап** (J.R. Fienup), Appl. Opt. **21**, 2758 (1982).
12. [http://www.asc.rssi.ru/radioastron/description/mfs\\_eng.htm](http://www.asc.rssi.ru/radioastron/description/mfs_eng.htm)
13. [http://www.asc.rssi.ru/radioastron/description/orbit\\_eng.htm](http://www.asc.rssi.ru/radioastron/description/orbit_eng.htm)

## SOLVING THE PHASE PROBLEM ON THE BASE OF NONLINEAR OPTIMIZATION METHODS WITH REFERENCE TO GRAUND-BASED-SPACEBORNE VLBI

Bajkova A.T.

#### Summary

*We propose a new method of image reconstruction from only an object Fourier spatial spectrum magnitude (a well known phase problem). The method is based on the use of information nonlinear optimization functionals, which determine the quality of image reconstruction, with linear constraints to spectrum amplitude due to introducing new unknowns determining the spectral phase sought-for. The algorithm proposed possesses a global extremum what ensures a unique solution within a class of equivalent functions (linear shifting and rotation by 180° of an image) for signals satisfying the theorem of existing the unique solution of the phase problem. We demonstrate both simulation and real VLBI data processing results. We obtained images of source 2200+420 for four dates on geodetic observations on global VLBI. It is proposed to use the method elaborated for ultra-high-resolution mapping on ground-based-spaceborne VLBI data in case of very high orbit of the space VLBI station what leads to the degeneracy of the “closure” phase equations.*

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ФОТОМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

**Галкин В.Д.<sup>1)</sup>, Сальников И.Б.<sup>1)</sup>, Никанорова И.Н.<sup>1)</sup>, Ляйтерер У.<sup>2)</sup>, Ниберт Т.<sup>2)</sup>,  
Алексеева Г.А.<sup>1)</sup>, Новиков В.В.<sup>1)</sup>, Ильин Г.Н.<sup>1)</sup>, Пахомов В.П.<sup>1)</sup>.**

1) Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

2) Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg

*Описан лабораторный комплекс для калибровки фотометров, используемых в системе службы погоды для измерения содержания водяного пара в земной атмосфере. Созданный в ГАО РАН комплекс развивался в рамках сотрудничества между Пулковской обсерваторией и Метеорологической Обсерваторией г. Линденберга (ФРГ). Цель работы комплекса состоит в том, чтобы получить калибровочные зависимости для индивидуальных приборов, разработать и сравнить различные методы построения калибровочных зависимостей, основанные на прямой калибровке фотометров, на использовании спектральных лабораторных функций пропускания водяного пара, на вычислительных методах, использующих спектроскопические базы данных для отдельных линий. Авторы надеются, что учёт детальных свойств аппаратуры и использование новых результатов по поглощательной способности водяного пара позволят достигнуть точности определения содержания водяного пара в атмосфере в 1-2%.*

### **Введение**

Изменение климата на планете, глобальное потепление или похолодание, точный краткосрочный и долгосрочный прогноз погоды - всё это проблемы не отдельной области знания, это общечеловеческие проблемы. Ключевую роль в понимании этих проблем играет водяной пар. Его способность переходить в различные агрегатные состояния, аккумулировать огромную энергию, переносить её на большие расстояния, передавать её океану и получать обратно - все эти уникальные свойства водяного пара тесно связаны с физическими процессами в атмосфере. Точность измерения содержания водяного пара в атмосфере в значительной степени определяет надёжность прогнозирования погоды и возможность выявления долговременных тенденций изменения климата. В настоящее время существуют и разрабатываются различные методы измерения влагосодержания атмосферы. Это микроволновые методы космического и наземного базирования, использование систем глобального определения координат (GPS), лидарные измерения и, конечно, получение информации через сеть станций радиозондирования атмосферы. Особое место среди этих методов занимает оптический метод, когда измеряется величина поглощения света водяным паром в спектрах Солнца или звезд и, на основе калибровочной зависимости поглощения от количества водяного пара на луче зрения, определяется его содержание в атмосфере Земли. Оптический метод является самым старым из методов определения влагосодержания атмосферы [1]. Обычно он реализуется с использованием солнечных фотометров различной конструкции и позволяет получить точность определения содержания водяного пара в атмосфере порядка 10% [2-5]. В ГАО РАН оптический метод был существенно развит и впервые применён для определения ночного влагосодержания атмосферы [6,7] на основе распределений энергии в спектрах звезд с использованием однородного Пулковского спектрофотометрического каталога [8]. В дальнейшем, благодаря многолетнему плодотворному со-



трудничеству с Метеорологической Обсерваторией г. Линденберга (ФРГ), удалось впервые реализовать в Линденберге круглосуточный оптический мониторинг влагосодержания атмосферы с использованием солнечного и звездного фотометров и довести точность определения влагосодержания атмосферы до 3-5% [9-14].

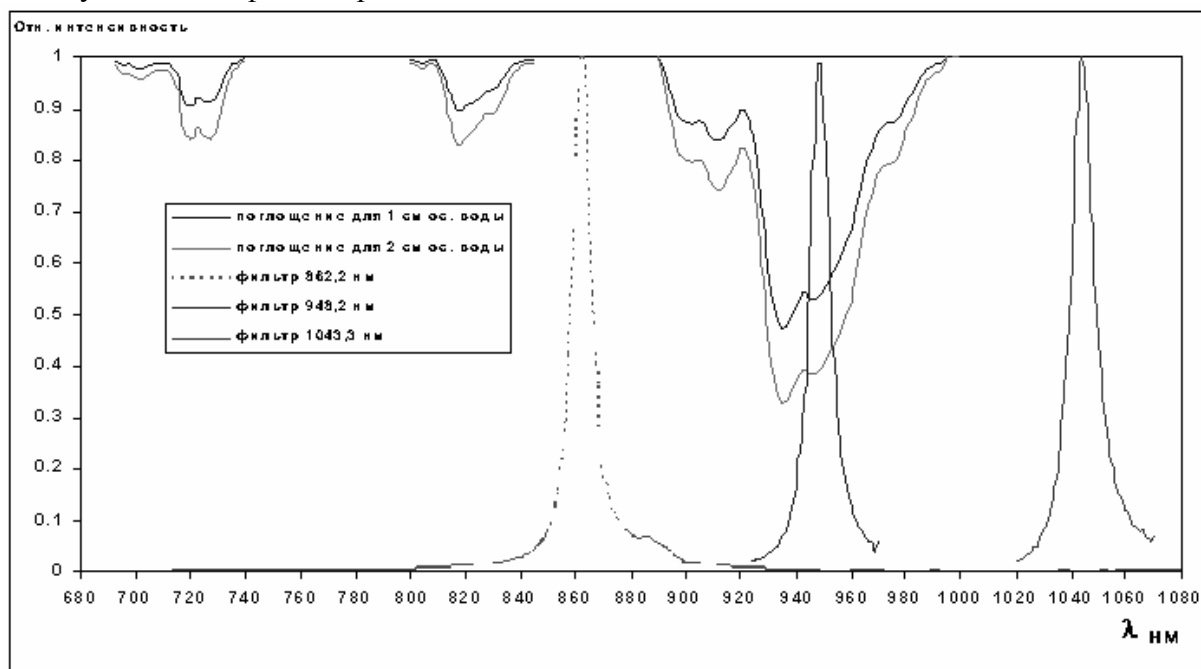
При дифференциальных фотометрических наблюдениях точность порядка 0,5% не является исключительной и, если сохранить такую точность в процессе обработки наблюдений до конечного результата - количества водяного пара на луче зрения - точность определения влагосодержания могла бы составить 1-2%. При достижении такой точности и учёте того обстоятельства, что оптический метод является полностью автономным (т.е. не требует калибровки по внешним данным) полученные с его помощью результаты могут быть использованы для калибровки и контроля других методов.

При определении влагосодержания атмосферы оптическим методом необходимо решить две проблемы: выделить из наблюдаемого ослабления света в атмосфере ту его часть, которая определяется поглощением водяным паром, и получить соотношение между наблюдаемым поглощением и количеством водяного пара на луче зрения. Последнее соотношение может быть получено на основе известных характеристик фильтров и вычисления атмосферного поглощения на основе имеющейся спектроскопической базы данных HITRAN [15] и различных моделей усреднения поглощения типа LOWTRAN, MODTRAN и др. [2-5]. В настоящее время это наиболее распространенный метод калибровки. Другим методом калибровки, который мало используется ввиду его трудоемкости, но который с позиции метрологии более надежен, является прямая лабораторная калибровка зависимости поглощения от числа поглощающих молекул. В последнем случае необходимо обеспечить в контролируемых лабораторных условиях количество поглощающих молекул, эквивалентное их числу в атмосфере при типичных для неё температурах и давлениях. Это может быть достигнуто при оптических путях порядка нескольких километров, что совсем непросто реализовать в лабораторных условиях. Мы использовали уникальную Пулковскую многоходовую вакуумную кювету ВКМ-100 с базовой длиной 96,7 м, в которой, используя систему зеркал для многократного отражения света, можно получать оптические пути порядка нескольких километров. Помимо варьирования длины оптического пути за счет числа проходов, существует возможность изменения концентрации водяного пара в кювете за счет изменения относительной влажности воздуха в кювете, а также измерений при различных давлениях за счёт варьирования степени откачки. Таким образом, имеется возможность воспроизводить различную величину поглощения при типичных для атмосферы значениях физических параметров влажности и давления. Что касается температуры, то пока только для двух значений температуры удалось добиться равномерного распределения температуры вдоль тоннеля – это для  $t = +13^{\circ}\text{C}$  при отключенном паровом отоплении и для  $t = 20^{\circ}\text{C}$  при включенном. Необходимо отметить, что проблема точности определения количества водяного пара связана отнюдь не только с калибровкой, поскольку для достижения точности 1-2% существенна стабильность всей фотометрической системы и ее реакция на изменение внешних параметров. Мы полагаем, что комплексный подход, включающий исследование и контроль инструментальной системы как в лабораторных, так и в натурных условиях, позволит нам решить эту проблему. И важнейшим элементом на этом пути является создание лабораторного комплекса для калибровки и исследования аппаратуры, предназначенной для точных количественных измерений содержания водяного пара в атмосфере Земли.

### **Оптический метод определения количества водяного пара на луче зрения**

Оптический метод определения содержания водяного пара предполагает проведение последовательных или одновременных фотометрических измерений в участках

спектра в пределах полосы поглощения водяного пара и вне её. На рис.1 показано типичное положение фильтров относительно полосы поглощения водяного пара 0,93 мкм для Пулковского фотометра ПЗФ-94.



**Рис.1.** Положение фильтров фотометра ПЗФ-94 относительно полос водяного пара.

При спектрофотометрических наблюдениях положение участков спектра для измерения сигнала определяется положением прямоугольной выходной щели прибора и может быть выбрано оптимальным образом внутри полосы и вне её. Разность измерений в участках, расположенных в полосе поглощения и вне её, исправленная за аэрозольное ослабление, характеризует поглощательную способность водяного пара в данной длине волны и зависит от количества поглощающих молекул водяного пара, давления и температуры в поглощающей среде. Кроме того, наблюдаемая величина поглощения в полосе зависит от свойств используемого фильтра (ширины и формы кривой пропускания). Из всех этих зависимостей самой существенной является зависимость от числа поглощающих молекул. В земной атмосфере содержание водяного пара изменяется от 0,1 до 6 см осажденной воды. Учитывая, что воздушная масса при наблюдениях может достигать 10, можно заключить, что нас интересует зависимость поглощения в полосе от 0,1 до 60 см осажденной воды на луче зрения. Именно для этого диапазона изменения влагосодержания необходимо вычислить или получить лабораторные данные по поглощению. Эффективное давление и температура для атмосферного водяного пара отклоняются в данном месте наблюдения не более чем на 5% от своих средних значений. В оптическом методе фильтр или выходная щель спектрофотометра усредняют поглощение в спектральных линиях, попадающих в усредняемый интервал длин волн. Согласно статистической модели поглощение некоторой совокупностью спектральных линий может быть представлено выражением вида [16]:

$$A = 1 - T = 1 - \exp\{-\sum W_i\}, \quad (1)$$

где  $A$  – поглощение некоторой совокупностью спектральных линий,  $T$  – пропускание,  $W_i$  - эквивалентная ширина отдельной спектральной линии. Выражение (1) позволяет вычислить поглощение совокупностью линий в зависимости от количества водяного пара на луче зрения, давления и температуры, при которых он находится, если известны спектроскопические параметры отдельных линий, необходимые для построения

кривой роста каждой линии. Выражение (1), предоставляя возможность численного вычисления поглощения, не дает аналитической зависимости поглощения от количества поглощающих молекул водяного пара  $\omega$ , его давления  $P$  и температуры  $T$ . Удачным эмпирическим приближением к такой зависимости, по крайней мере от физических параметров  $\omega$  и  $P$ , является степенная зависимость:

$$T = \exp\{-\beta \cdot \omega^m \cdot P^n\}, \quad (2)$$

где  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $n$  - эмпирические параметры. Переходя в выражении (2) к зв. величинам, получим:

$$[m-m_0](\omega) = c \cdot \omega^m, \quad (3)$$

где  $\omega$  - количество водяного пара, измеряемое в см осажденной воды,  $c$  – эмпирический параметр, соответствующий поглощению в звездных величинах при количестве водяного пара на луче зрения 1 см и зависящий от эффективного давления для водяного пара как:

$$c = (-2,5 \cdot \log(e)) \cdot P^n, \quad (4)$$

Эмпирические параметры могут быть получены либо путем аппроксимации поглощения, вычисленного для условий атмосферы с использованием моделей типа LOWTRAN, MODTRAN, HITRAN [2-5], либо путем аппроксимации экспериментально полученного поглощения в условиях лаборатории или природных условиях.

### **Пулковская вакуумная многоходовая кювета ВКМ-100**

В лабораторных условиях мы можем получить величину поглощения, сравнивая фотометрические отсчеты при различном количестве водяного пара на луче зрения с отсчетами, когда водяной пар на луче зрения отсутствует (откачанная кювета). Пулковская многоходовая вакуумная кювета ВКМ-100 (рис.2а) позволяет получать различное количество молекул водяного пара при заданном давлении путем изменения числа проходов света в кювете.

Принципиальная оптическая схема кюветы собранная по схеме Уайта [17], приведена на рис.2б. Сферические зеркала **A**, **B**, **C** с радиусом кривизны 96,5 м устанавливаются таким образом, что зеркала **A** и **B** строят последовательный ряд изображений входной щели на зеркале **C**. Зеркало **C** отображает зеркало **A** на зеркало **B** и наоборот. Входной объектив **O1**, вблизи плоскости которого находится входная диафрагма **E**, отображает источник света, ограниченный диафрагмой **S**, на зеркало **A**. Диафрагма **S** ограничивает размеры светового пучка в кювете телесным углом зеркала **A**, устраняя тем самым лишний рассеянный свет в кювете. Изменение числа проходов света достигается путем изменения относительного положения оптических осей зеркал **A** и **B** и, следовательно, изменения числа изображений на зеркале **C**. Когда расстояние между соседними изображениями укладывается в целое четное число раз на зеркале **C** между входной и выходной щелями, свет выводится из кюветы. В дополнение к схеме Уайта вместо выходной щели добавлено зеркало **D**, которое отображает зеркало **B** на выходной объектив **O2**. Система зеркал многократного прохождения света позволяет увеличивать число проходов света, начиная с минимального 4-х кратного, на число проходов, кратное четырем. Таким образом, в выходном окне кюветы последовательно появляются изображения входной щели после 4, 8, 12, 16 и т.д. числа проходов. Предельное число проходов ограничено числом изображений входной щели, которые могут уместиться на фигурном зеркале **C**, и составляет для кюветы ВКМ-100 сто изображений, что соответствует длине пути 40 км. Однако, значительно раньше, при

меньшем числе проходов, проявляются другие причины, ограничивающие их число. Это ограничения, связанные с потерями света на отражение, которые меняются как  $r^N$ , где  $r$  коэффициент отражения,  $N$  число отражений. На рис.3 показано изменение интенсивности сигнала в звездных величинах для фильтра 672 нм в зависимости от длины пути (числа отражений). Сигнал для 4100 м испытывает ослабление на 6 зв. величин (в 250 раз), что соответствует коэффициенту отражения зеркал 89%.



Рис.2а. Общий вид кюветы ВКМ-100 после реконструкции.

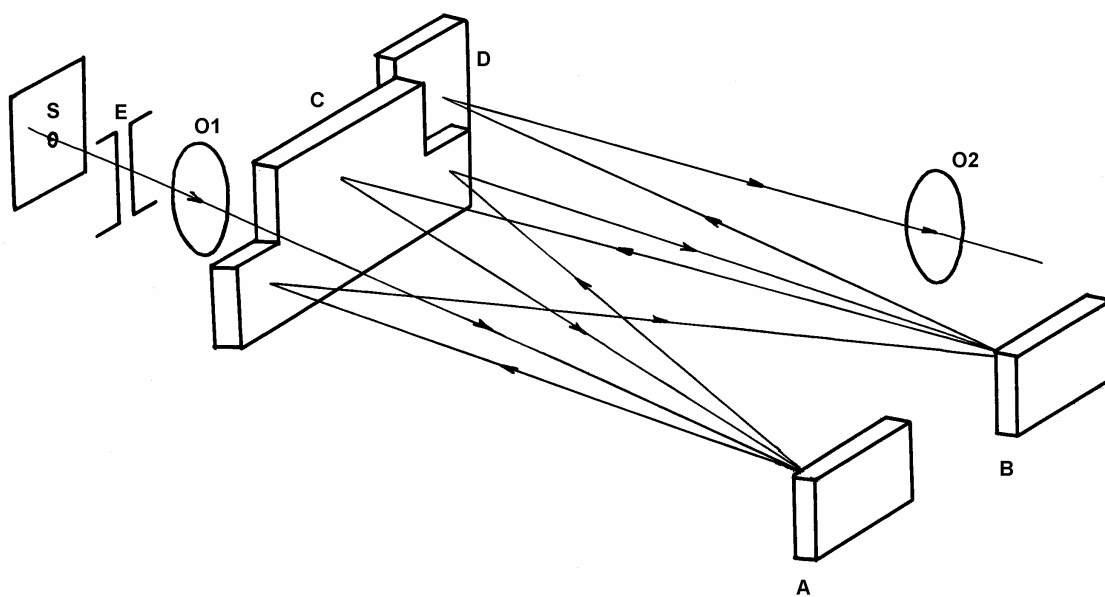


Рис.2б. Принципиальная оптическая схема кюветы ВКМ-100.

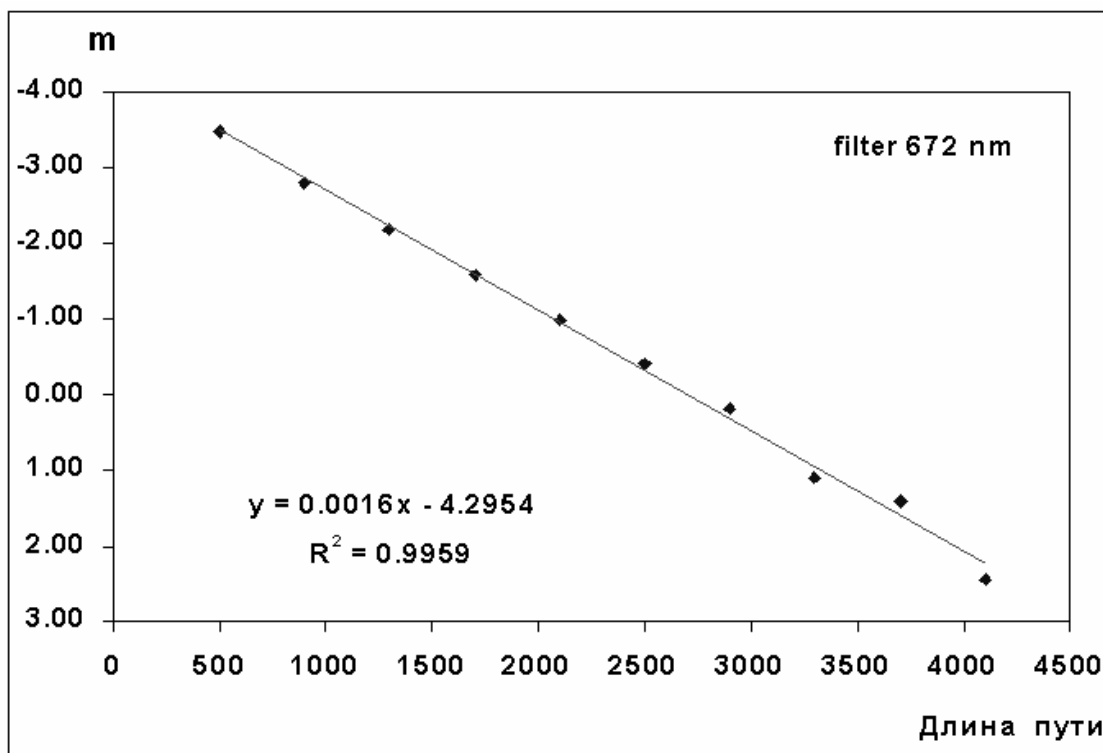


Рис.3. Интенсивность света, прошедшего через кювету, в зависимости от пути.

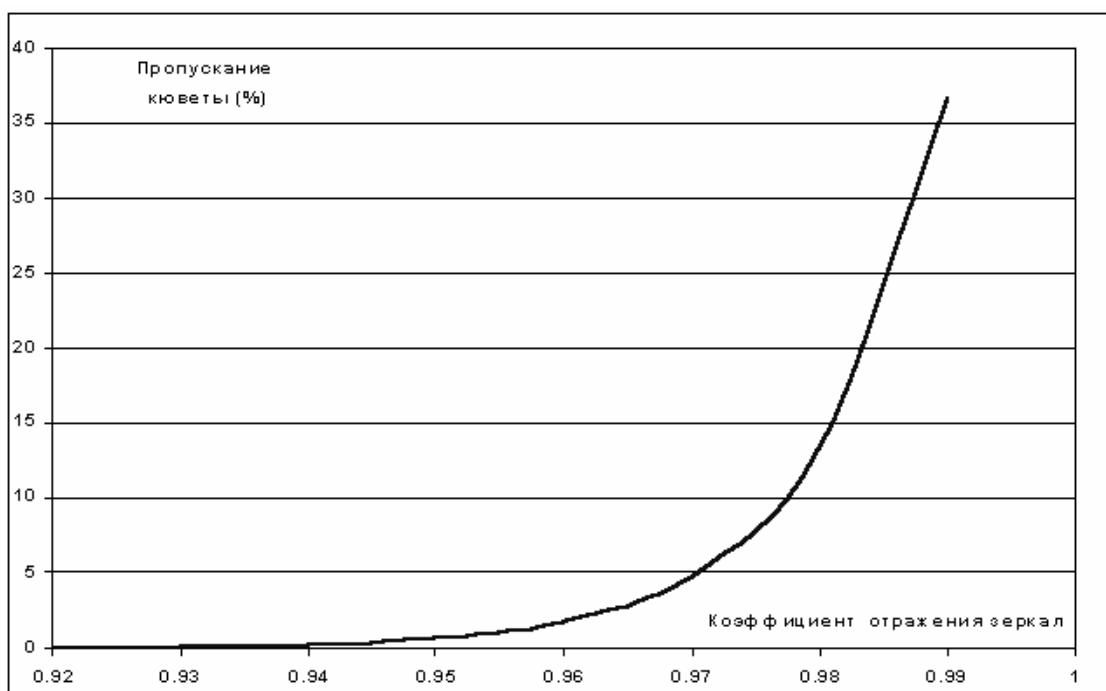


Рис.4. Пропускание кюветы для пути 10 км в зависимости от коэфф. отражения зеркал.

На рис.4 интенсивность сигнала в % показана в зависимости от коэффициента отражения зеркал для пути 10 000 м (100 отражений). Как видно из рисунка, вполне приемлемый уровень сигнала достижим уже при коэффициенте отражения 95-96%, что соответствует посеребренным зеркалам. Другой причиной, ограничивающей предельный световой путь в кювете, является размывание изображения входной щели с увеличением числа отражений, что вызывается недостаточно высоким качеством изготовления

поверхностей зеркал из-за трудностей контроля радиуса кривизны зеркал со столь малой стрелкой прогиба.

Крайне важным обстоятельством является распределение температуры вдоль кюветы. Однородность температурной характеристики легко достигается естественным образом в летнее время, когда отсутствуют неоднородные локальные источники тепла. Стенки туннеля принимают температуру окружающей почвы, и по всей длине кюветы устанавливается температура в пределах 11-13° С, в зависимости от температуры воздуха в летнее время. Во время отопительного сезона образуется перепад температур вдоль туннеля: в южном конце, который находится под зданием, температура устанавливается в районе 20° С, в северном - в зависимости от температуры наружного воздуха, от +10 до -5° С. Чтобы устранить этот перепад температур, были предприняты следующие меры: в северной части туннеля в районе противоударной надстройки был добавлен потолок из наборных шпунтованных досок, кювета отделена от остальных подвальных помещений дополнительными дверями, изменено направление циркуляции горячей воды в батареях отопления, установлены дополнительные нагревательные элементы в северной части туннеля. Предпринятые меры позволили выровнять температурный градиент, как показано на рисунке 5. Температурный контроль осуществляется термометрами, размещенными в туннеле через 10 метров и датчиками температуры, установленными внутри кюветы.

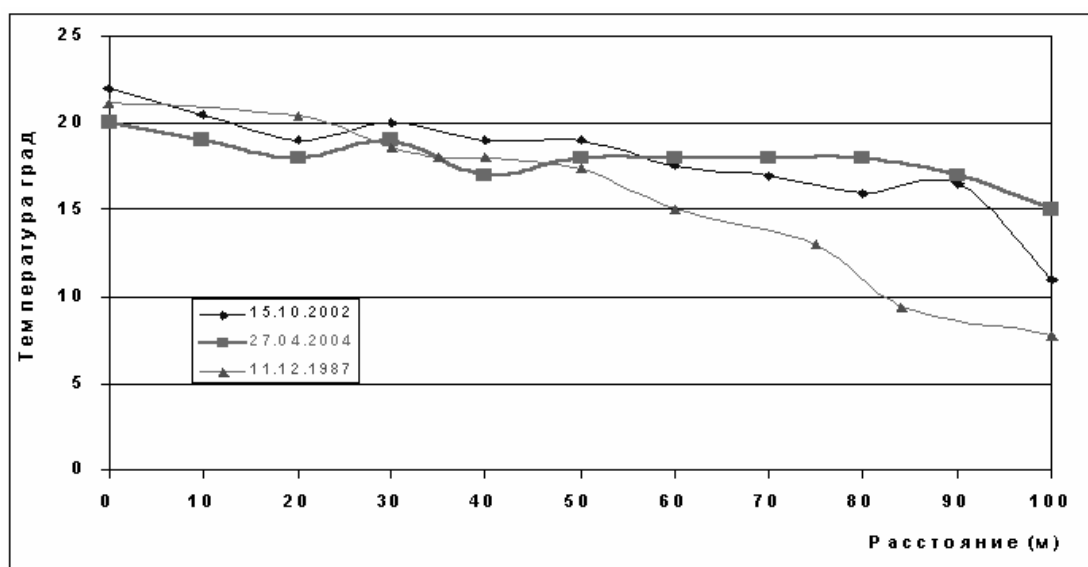
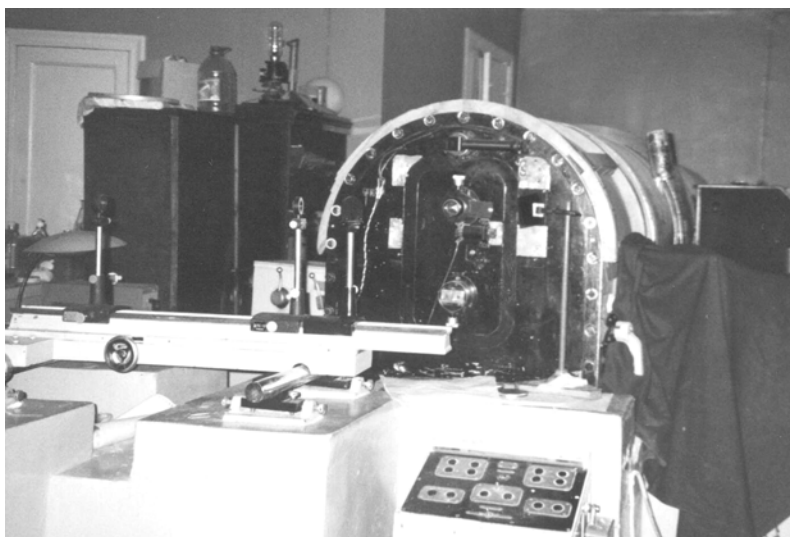


Рис.5. Распределение температуры воздуха вдоль кюветы ВКМ-100.

Поскольку объектом исследования является водяной пар в условиях свободной атмосферы, наполнителем кюветы является воздух с естественным содержанием влаги, либо с добавлением жидкой воды. Давление в кювете устанавливается либо путем откачки объема кюветы, либо впуском дополнительных порций воздуха. Для измерения давления используются образцовые и технические вакуумметры и мановакуумметры.

Количество водяного пара в кювете измеряется с помощью датчиков влажности ИВТМ-7, которые расположены в концах и середине кюветы. Для контроля однородности распределения водяного пара в объеме кюветы используются также наблюдения линии водяного пара 6943,843 Å (с помощью вакуумного дифракционного спектрографа АСП-12 (рис.6) с высоким спектральным разрешением [18], оптически сопряжённого с ВКМ-100).



**Рис.6.** Общий вид вакуумного дифракционного спектрографа АСП-12.

### **Определение содержания водяного пара в кювете**

Определение содержания водяного пара в кювете особенно сложный и трудоемкий процесс. Измерение датчиками влажности относительной влажности требует постоянной проверки их достоверности. Кроме того, измерения носят локальный характер, распространение их на весь объем кюветы в известной степени произвольно, и надежность этой операции трудно поддается оценке. Давление насыщенных паров водяного пара определяется температурой и изменяется на 6% при изменении температуры на 1° С. Принятие средней температуры для кюветы чревато введением дополнительной ошибки в вычисление давления насыщенных паров и, как следствие, в вычисление абсолютной влажности в кювете. Для измерения абсолютной влажности нами использовались сорбционно-емкостные датчики относительной влажности и микропроцессорный измеритель относительной влажности и температуры ИВТМ-7 МК-С, который измеряет относительную влажность и температуру и на их основе дает значения абсолютной влажности. Действие датчиков основано на зависимости диэлектрической проницаемости пленки полимерного сорбента от количества сорбируемой им влаги. Датчики необходимо периодически калибровать по эталонам относительной влажности воздуха. Однако такая калибровка проводится фирмой изготовителем только при атмосферном давлении, что не даёт гарантии в её неизменности при других значениях давления. Проверка калибровки датчиков и сравнение их показаний при различных давлениях были выполнены нами на стенде, созданном для аналогичных целей в Метеорологической Обсерватории г. Линденберга. Для калибровки использовался эталонный солевой генератор влажного воздуха. Принцип действия основан на свойстве насыщенных растворов солей создавать и поддерживать при неизменной температуре постоянную относительную влажность воздуха в замкнутом пространстве. Использование молекулярного поглотителя влажности MERCK, растворов солей LiCl, MgCl, NaCl и двойного дистиллята H<sub>2</sub>O обеспечило создание относительной влажности 0, 11.3, 33.1, 75.5 и 100% соответственно. Результаты измерений для наших датчиков 1087-1 и 65132-2, а также эталонных датчиков фирмы Vaisala, используемых в радиозондах RS80 и RS90, приведены на рис.7. Сравнение показаний наших датчиков с показаниями одного из стандартных датчиков Vaisala при различных давлениях и температурах 10° и 20°С проводилось в климатической камере в Линденберге. Эта камера используется для калибровки датчиков радиозондов, и в ней можно создавать условия с заданными значениями температуры, давления и влажности. Такое сравнение для одного из датчиков представлено на рис.8. Проведенное исследование подтвердило возможность использо-

вания отечественных датчиков для контроля физических условий в кювете и позволило наметить меры, необходимые для повышения точности и надежности этих измерений.

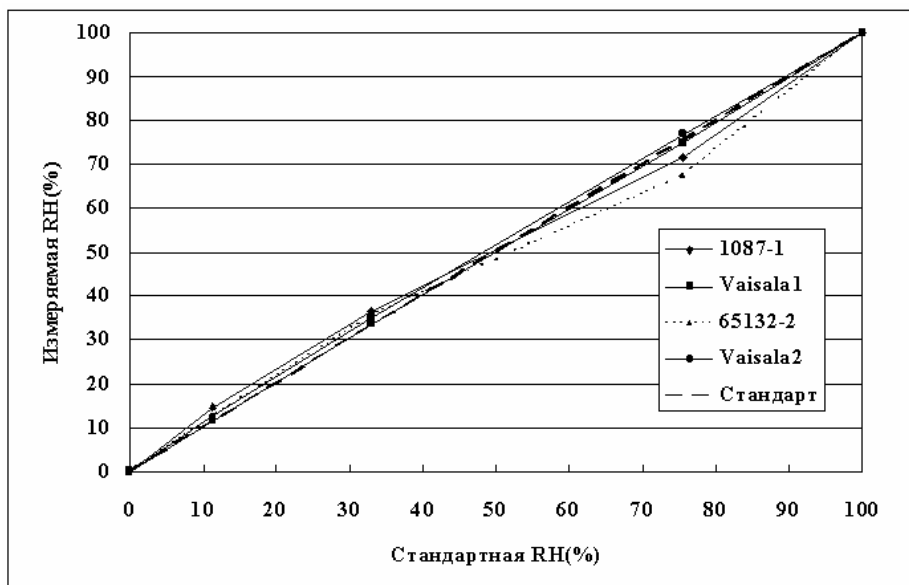


Рис.7. Калибровка датчиков с использованием эталонного солевого генератора влажности.

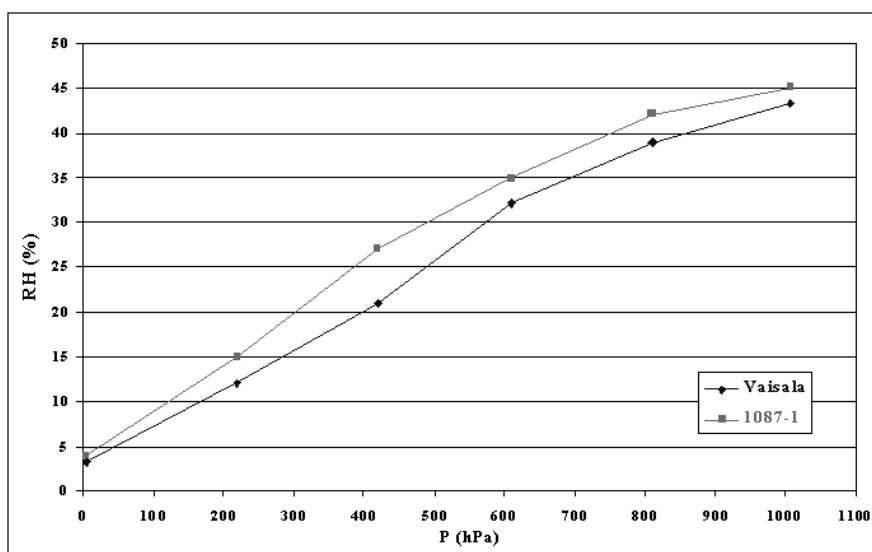


Рис.8. Сравнение показаний датчика 1087-1 с датчиком Vaisala при различном давлении.

Другим методом, позволяющим определить содержание водяного пара в кювете, является оптический метод с использованием линии поглощения водяного пара  $6943,8 \text{ \AA}$  (с помощью спектрографа АСП-12, оптически сопряжённого с ВКМ-100). Этот метод был использован нами в работе [19]. Его достоинством является то, что определяется количество водяного пара, находящегося непосредственно на луче зрения, поэтому существование неоднородностей вдоль трассы несущественно. Однако используемое для определения значение интенсивности линии  $6943,8 \text{ \AA}$  может не соответствовать шкале, которая формируется на основе солевых растворов. Система фотозлектрической регистрации спектра была пересмотрена по сравнению с работой [19] - реализовано введение данных в компьютер в процессе наблюдений, что позволяет проводить оперативную обработку результатов. В дальнейшем предполагается использование обоих методов, при этом с помощью датчиков осуществляется непрерывный контроль физических



условий в кювете, а оптический метод служит средством контроля однородности среды и правомерности распространения данных измерения с датчиками на весь объем кюветы. При этом интенсивность исходной линии будет уточнена и откорректирована на основе показаний датчиков в условиях летнего времени, когда в помещении кюветы устанавливаются стабильные и однородные температурные условия. Такой комбинированный подход позволит использовать единый исходный источник калибровки, как в случае лабораторной калибровки фотометров, так и калибровки датчиков, используемых при зондировании атмосферы.

### Калибровка фотометров

В настоящее время оптический метод определения влагосодержания атмосферы реализуется в основном с использованием солнечных и звездных фотометров, в которых участки спектра выделяются с помощью отдельных фильтров (рис.1) в полосе поглощения  $H_2O$  0.93 мкм и вне её. Фотометр должен быть оптически согласован с кюветой - независимое или оптически сопряженное с фотометром оптическое устройство должно позволять наблюдать положение бликов на главном зеркале кюветы, выделять пучок света, прошедший определенное расстояние, и фиксировать его положение на входном окне фотометра. Процедура наблюдений заключается в последовательном измерении с выбранным комплектом фильтров света, прошедшего через кювету различное число раз при фиксированных давлении и влажности. Такая же процедура затем повторяется при откачанной кювете. Поскольку интенсивность в значительной степени зависит от числа прохождений света, сравнивать можно только наблюдения, полученные для одинакового числа прохождений. Такое сравнение для заполненной и пустой кюветы позволяет выделить величину поглощения, связанную с поглощением в области полосы водяного пара, причем неточности юстировки, которые почти всегда присутствуют, при сравнении наблюдений, выполненных в различное время, устраняются путем совмещения отсчетов для фильтров, расположенных вне полосы поглощения. График зависимости полученного поглощения от длины пути для давления 1 атм. для фильтров из Пулковского фотометра ПЗФ-94 показан на рис.9.

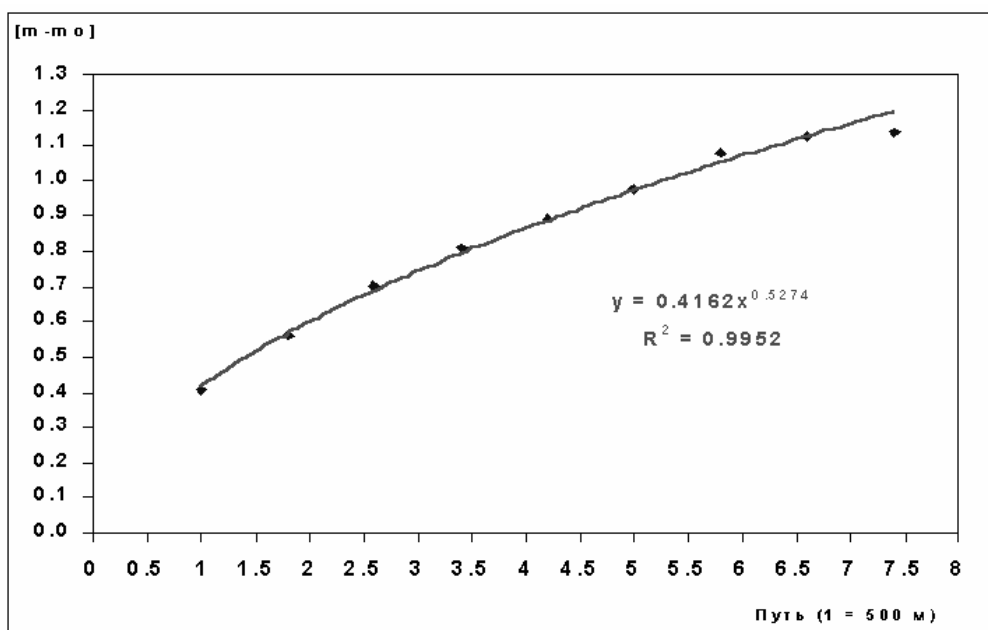


Рис.9. Поглощение водяным паром в зависимости от длины светового пути в кювете.

Здесь поглощение выражено в звездных величинах, длина пути в единицах минимальной длины пути, равной 500 м. Таким образом, рисунок оказывается полностью аналогичным зависимости атмосферного поглощения от воздушной массы, причем единичной воздушной массе соответствует путь 500 метров. Аналогичным образом, подобно тому, как воздушная масса может содержать различное количество водяного пара, длине пути 500 метров также может соответствовать различное количество воды. Аппроксимация данных наблюдений, показанных на рисунке, выражением типа (3) позволяет получить значения параметров  $\epsilon$  и  $\mu$ . Значение параметра  $\epsilon$  соответствует содержанию водяного пара на единичном пути, т.е. 500 м. В данном случае содержание воды менялось от 0,54 до 4 см осажденной воды на луче зрения. Подобные данные были получены и для других условий, которые перечислены в таблице 1.

**Таблица 1.**

Давление (атм)	Серия 1		Серия 2	
	Количество водяного пара на луче зрения $W$ (в см осажденной воды)			
	$W(\min)$	$W(\max)$	$W(\min)$	$W(\max)$
1	0.037	0.306	0.539	4.417
0.9	0.040	0.330	0.526	4.313
0.8	0.043	0.351	0.512	4.201
0.7	0.043	0.355	0.708	5.805
0.6	0.044	0.361	0.638	5.233
0.5	0.032	0.265	0.598	4.907
0.4	0.041	0.340	0.520	4.263
0.3	0.027	0.223	0.477	3.908
0.2	0.034	0.283	0.361	2.958
0.1	0.018	0.146	0.219	1.800

Здесь для различных давлений указаны минимальное и максимальное количество водяного пара на луче зрения, при которых проводились измерения. Измерения были выполнены для трех вариантов фотометров: Пулковского ПЗФ-94 с фотоприемниками ФЭУ и SPCM, и Линденбергского звездного фотометра.

Таким образом, в результате проведенной работы была показана работоспособность комплекса и получены экспериментальные данные по поглощению водяного пара при его содержании на луче зрения от 0,02 до 5,8 см осажденной воды, получены экспериментальные калибровочные зависимости для указанного диапазона влагосодержания. В дальнейшем необходимо более полно смоделировать весь диапазон влагосодержания, который встречается в природных условиях, установить степень надежности выражения (3), выявить границы изменения получаемых эмпирических параметров в зависимости от изменения влагосодержания, изучить трансформацию параметров при изменении давления, оценить надежность перехода от однородного изотермичного слоя воздуха, исследуемого в лаборатории, к условиям реальной неоднородной и не-изотермичной атмосферы.

В случае солнечных фотометров для прямого сравнения данных, полученных на основе лабораторных калибровок, с реальными атмосферными измерениями предполагается дополнить описанный комплекс целостной установкой АЗС-2, которая позволяет проецировать изображение Солнца напрямую на вход вакуумного спектрографа АСП-12. В этом случае становится возможным независимо измерить (по линии поглощения водяного пара  $6943,8 \text{ \AA}$ ) реальное количество водяного пара в атмосфере (на луче зрения) и сравнить его с результатами, полученными одновременно солнечным фо-

тометром с использованием параметров  $\epsilon$  и  $\mu$ , определённых на основе лабораторных измерений и радиозондовых данных.

### Заключение

В настоящей работе описаны основные элементы лабораторного комплекса для калибровки фотометров, используемых в системе службы погоды для измерения содержания водяного пара в земной атмосфере. Созданный комплекс развивался в рамках сотрудничества между Пулковской обсерваторией и Метеорологической Обсерваторией г. Линденберга (ФРГ) и, в первую очередь, предполагается его использование для калибровки и тестирования Линденбергских звездного и солнечных фотометров. Задача заключается не только в том, чтобы получить калибровочные зависимости для отдельных приборов, но разработать и сравнить различные методы построения калибровочных зависимостей, основанные на прямой калибровке фотометров, на использовании спектральных лабораторных функций пропускания водяного пара, на вычислительных методах, использующих спектроскопические базы данных для отдельных линий. В процессе работы предполагается также уточнить данные по поглощательной способности водяного пара, установить возможные пути влияния особенностей кривых пропускания фильтров на эмпирические калибровочные зависимости фотометров, выявить характер влияния температуры и влажности на характеристики инструментальной системы фотометров. Мы надеемся, что учет детальных свойств аппаратуры и использование новых результатов по поглощательной способности водяного пара позволят сохранить фотометрическую точность, достигаемую при наблюдениях (~0,5%), и довести точность определения содержания водяного пара в атмосфере до 1-2%.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Немецкому Научно-исследовательскому Обществу (DFG) и Российскому Фонду Фундаментальных Исследований (РФФИ) за поддержку данной работы соответствующими грантами (гранты DFG- Project 436 RUS 113/76/0, DFG- Project 436 RUS 113/632/0-1 и грант РФФИ 01-05-04000 ННИО-а).

### Литература

1. *Fowle F.E.* Astrophys. J., 1912, 35, pp.149-162.
2. *Halhore R.N. et al.* J. Geophys. Res., 1997, 102, No. D4, pp.4343-4352.
3. *Michasky J.J. et al.* J. Geophys. Res., 1995, 100, No. D12, pp.25995-26003.
4. *Schmid B. et al.* J. Geophys. Res., 1996, 101, No. D5, pp.9345-9358.
5. *Ingold T. et al.* J. Geophys Res., 105, No. D19, pp.24327-24343.
6. *Галкин В.Д., Архаров А.А.* АЖ, 1981, т.58, №. 3, с.636-647.
7. *Галкин В.Д., Архаров А.А.* Астрон. Цирк., 1980, № 1096, с.6-8.
8. *Alekseeva G.A. et al.* Baltic Astronomy, 1996, 5; № 4, pp.603-838; 1997, 6, pp.481-496.
9. *Leiterer U. et al.* Contrib. to Atmosh. Phys., 1995, 68, pp.133-141.
10. *Leiterer U. et al.* Contr. to Atmosh. Phys., 1998, 71/4, pp.401-420.
11. *Leiterer U. et al.* in IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, W.L. Smith and Yu.M. Timofeyey (Eds.). A Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 2001, pp.1144-1146.
12. *Алексеева Г.А. и др.* JENAM 2000. Труды присоединенного Симпозиума "Спектрофотометрические и фотометрические каталоги. Звезды-стандарты и аналоги Солнца", Пулково, 5-8 июня 2000 г., 2000, с.78-94.
13. *Alekseeva G.A. et al.* International Conference ENVIROMIS 2000, Proceeding, ed. by E. Gordov, 2001, pp.38-42, Tomsk, (Environmental Observations, Modeling and Informa-

- tion Systems as Tools for Urban/Regional Pollution Rehabilitation, Tomsk, Russia, 24-28 October 2000).
14. *Алексеева Г.А. и др.* “Петербургские фрагменты научной картины мира”, вып.2, 2003, с.21-43.
  15. *Rothman L.S et al.* The HITRAN Molecular Spectroscopic Database: Edition of 2000 Including Updates through 2001. JQSRT, 2003, 82, pp.5-44.
  16. *Гуди Р.* “Атмосферная радиация”. М., Мир, 1966. 522 с.
  17. *White I.U.* JOSA, 1942, 32, No 5, pp.285-288.
  18. *Митрофанова Л.А. и др.* Изв. ГАО АН СССР, 1967, 24, вып.6, № 182, с.258-264
  19. *Галкин В.Д. и др.* Изв. ГАО РАН, 1994, № 208, с.116-125.

## **LABORATORY COMPLEX FOR CALIBRATION OF PHOTOMETERS USING THE OPTICAL METHOD FOR ATMOSPHERIC WATER VAPOR CONTENT MEASUREMENTS**

**Galkin V.D.<sup>1)</sup>, Sal'nikov I.B.<sup>1)</sup>, Nikanorova I.N.<sup>1)</sup>, Leiterer U.<sup>2)</sup>, Naebert T.<sup>2)</sup>,  
Alekseeva G.A.<sup>1)</sup>, Novikov V.V.<sup>1)</sup>, Il'in G.N.<sup>1)</sup>, Pakhomov V.P.<sup>1)</sup>**

- 1) *Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences*
- 2) *Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Lindenberg*

### **Summary**

*Laboratory complex for calibration of photometers used in Weather Services Net for atmospheric water vapor content measurements is described. The complex created in Pulkovo Observatory was developed in the boards of collaboration between Pulkovo Observatory and Meteorological Observatory Lindenberg (Germany). The complex' predestination is to obtain the calibrate dependences for individual photometers, to devise and compare different calibrate dependences construction methods based on direct photometers' calibration, on laboratory spectral functions of water vapor transmission, on model methods using spectroscopic data bases for individual lines. Authors hope to obtain the final accuracy 1-2% for water vapor contents measurements by means of careful equipments' features analysis and by using of new water vapor absorption ability data.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МАСШТАБА 26" РЕФРАКТОРА ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В ПЕРИОД С 1958 ПО 1997 гг.**

**Горшанов Д.Л.**

*По многолетним рядам наблюдений двойных звёзд 61 Лебеда и ADS 7251 определено поведение геометрического масштаба 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории с 1958 по 1997 гг. Максимальное изменение его за исследуемый период составляет около 0.008"/мм. Масштаб, определённый по пластинкам ряда 61 Лебеда, показывает колебания с периодом около 14 лет и амплитудой около 0.002"/мм. Обнаружена также небольшая зависимость масштаба от температуры.*

### **Введение**

26-дюймовый рефрактор был введён в строй в Пулковской обсерватории в 1957 году. На нём выполнялись и выполняются в настоящее время фотографические наблюдения небесных объектов по различным программам.

Объектив инструмента сконструирован таким образом, чтобы изменения температуры не вызывали изменений его фокусного расстояния (а следовательно, и масштаба изображения в фокальной плоскости). В начале шестидесятых годов А.А. Киселёвым была выполнена работа по определению масштаба 26" рефрактора. Для этого из всех пластинок, отснятых к тому времени на рефракторе, им были отобраны 16 штук, содержащих изображения шести пар звёзд, которые наиболее удачно расположены с точки зрения определения масштаба. Результаты этой работы опубликованы в статье [1]. В ней содержатся характеристики использованных звёзд, методика редукции и результат определения геометрического масштаба, а также делается вывод о независимости величины геометрического масштаба от температуры.

С тех пор специальные исследования масштаба больше не предпринимались. При обработке наблюдений, выполняемых на 26" рефракторе, геометрический масштаб считался постоянным и равным величине, полученной в указанной выше работе ( $19''.8078 \pm 0''.0004$  /мм).

В числе близких двойных звёзд, изучаемых при помощи 26" рефрактора, наблюдается широкая пара 61 Лебеда (ADS 14636), давно вызывающая интерес астрономов из-за предположения о наличии около одной из её компонент невидимого спутника. Её наблюдения выполняются с момента ввода инструмента в строй по настоящее время. Каждый год в период с августа по ноябрь снимается около 10 пластинок. В 1998 году 40-летний ряд этих наблюдений был измерен на автоматическом измерительном комплексе «Фантазия» в Пулковской обсерватории. Эти измерения были подвергнуты анализу с целью изучения относительного движения компонент пары и выявления возмущений от возможного невидимого спутника [2].

В процессе обработки измерений фотопластинок ориентировка осей координат каждой пластинки выполнялась, в том числе, и по получившимся на ней изображениям звёзд, окружающих исследуемую пару. По этим же звёздам можно определить и геометрический масштаб в фокальной плоскости инструмента на момент съёмки пластинок. Также можно поступить и с другими многолетними рядами наблюдений двойных звёзд, некоторые из которых использовались при выполнении указанной работы в качестве контрольных (например, ADS 7251).

В этих рядах наблюдений блеск звёзд, которые могут быть использованы для определения масштаба, на 2–4 звёздных величины слабее блеска центральной двойной звезды, по которому подбиралась длительность экспозиции. Расположение этих звёзд на пластинках не всегда оптимально с точки зрения определения масштаба. По этим причинам такое определение будет, конечно, менее надёжным, чем при использовании пластинок, тщательно отобранных для этой цели. Но зато большой интерес представляет изучение поведения масштаба инструмента на протяжении всего периода его работы.

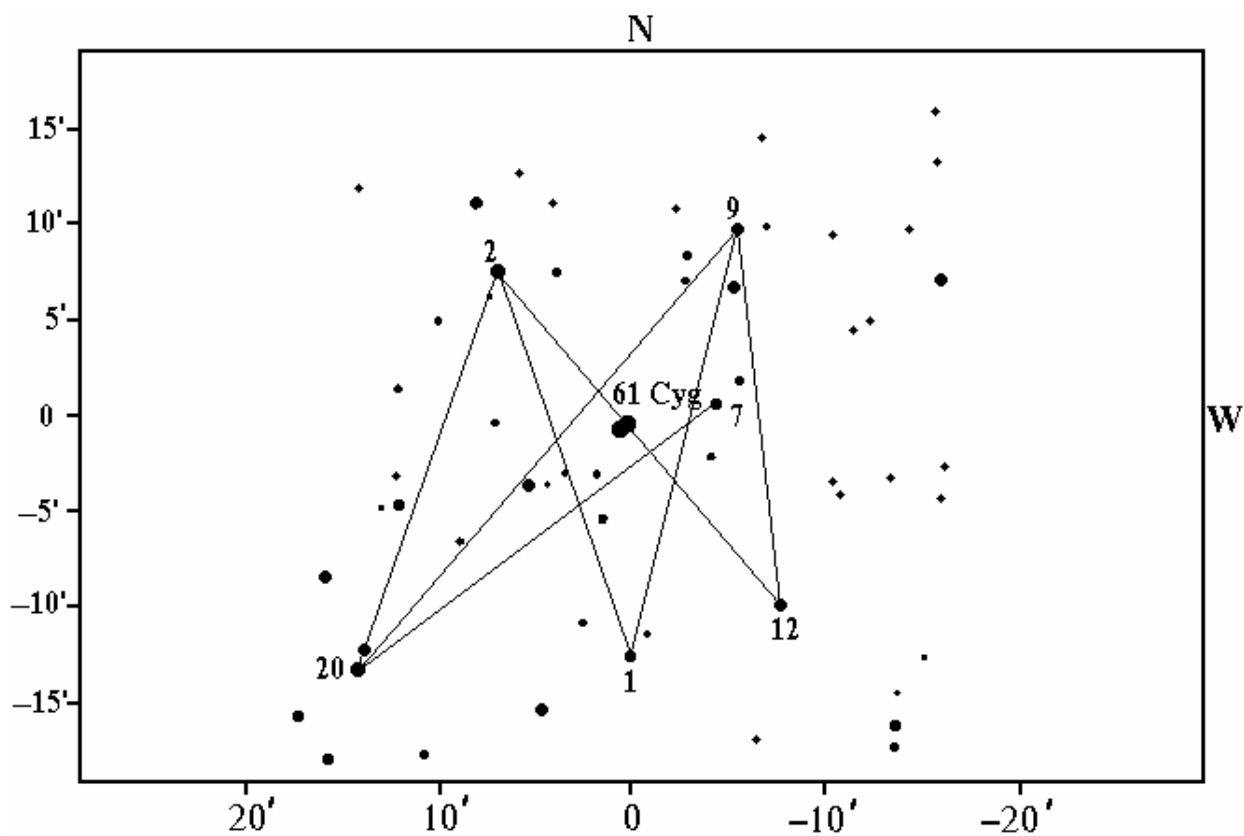
### Краткое описание методики. Звёзды, использованные для определения масштаба

Такая работа была выполнена на материале измерений многолетних рядов наблюдений двух двойных звёзд: 61 Cyg (1958–1997 гг., 340 пластинок) и ADS 7251 (1962–1999 гг., 202 пластинки). Оба ряда фотопластинок были измерены на автоматическом измерительном комплексе «Фантазия» Пулковской обсерватории.

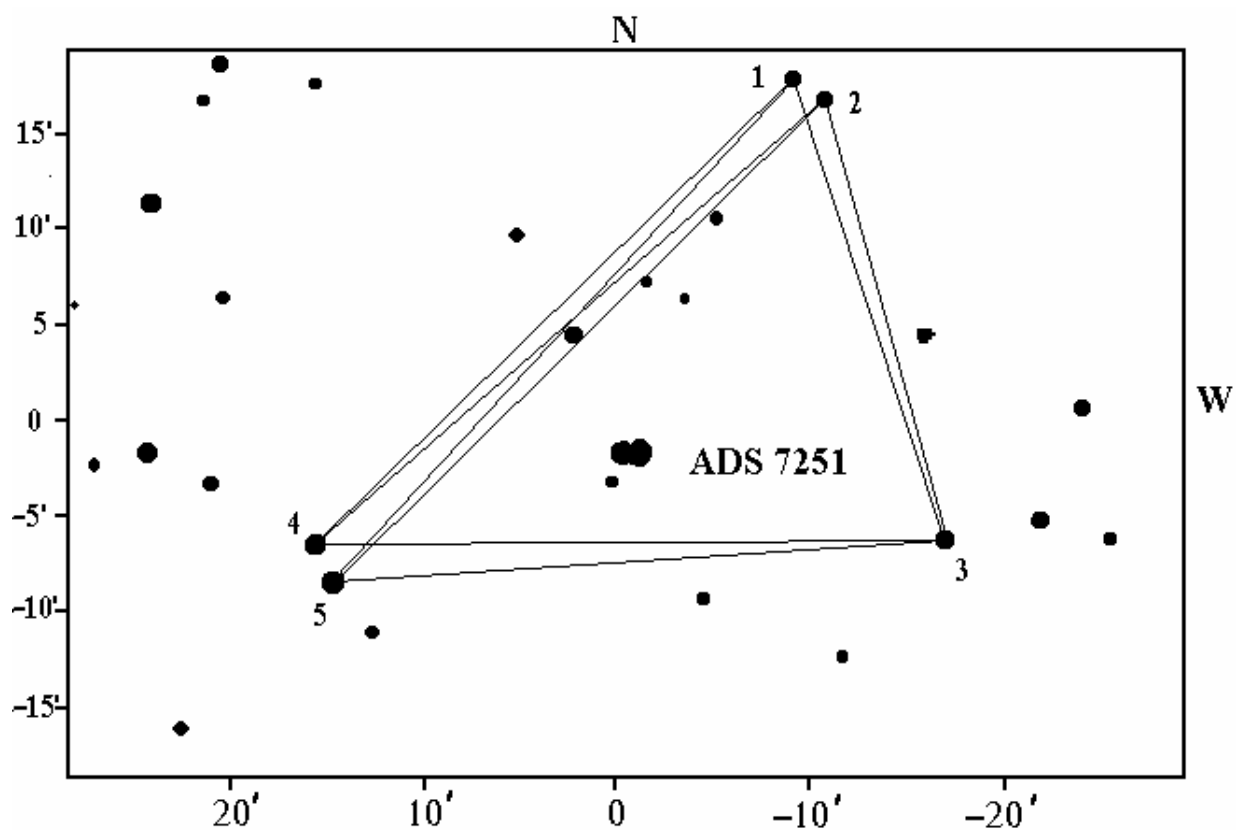
Методика вычисления геометрического масштаба была полностью заимствована из работы А.А. Киселёва [1].

**Таблица 1.** Данные о звёздах, выбранных для определения масштаба в рядах наблюдений 61 Cyg и ADS 7251, взятые из каталога TYCHO-2.

№	$\alpha_{(2000)}$	$\delta_{(2000)}$	$\mu_{\alpha}$ (″/год)	$\mu_{\delta}$ (″/год)	$m_V$	$(B-V)_T$
<b>61 Cyg</b>						
1	21 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> 54.64024 <sup>s</sup> ±0.00060 <sup>s</sup>	+38° 32' 20.5691" ±0.0070	–0.00076 ±0.00011	–0.0078 ±0.0013	8.468 0.012	1.87
2	21 07 30.54857 0.00137	+38 52 24.8245 0.0150	+0.00113 0.00017	–0.0032 0.0019	9.598 0.020	1.67
12	21 06 14.23475 0.00154	+38 35 02.1842 0.0170	+0.00066 0.00013	+0.0047 0.0015	10.225 0.030	0.50
7	21 06 30.68477 0.00137	+38 45 32.0648 0.0150	+0.00098 0.00013	–0.0071 0.0015	9.630 0.021	1.49
9	21 06 25.05849 0.00146	+38 54 33.1110 0.0160	+0.00156 0.00013	–0.0094 0.0015	10.029 0.027	0.59
20	21 08 06.41733 0.00043	+38 31 44.8321 0.0050	+0.00245 0.00011	+0.0021 0.0013	7.778 0.010	0.40
<b>ADS 7251</b>						
1	9 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 29.26780 <sup>s</sup> ±0.00122 <sup>s</sup>	+53° 01' 57.5636" ±0.0110	–0.00001 ±0.00012	–0.0238 ±0.0012	9.310 0.012	0.41
2	9 13 19.19243 0.00233	+53 01 00.9391 0.0210	+0.00027 0.00016	–0.0173 0.0014	9.889 0.030	1.55
3	9 12 34.64962 0.00242	+52 36 25.5585 0.0240	–0.00307 0.00015	–0.0047 0.0013	10.121 0.035	1.08
4	9 16 18.11044 0.00154	+52 36 00.1956 0.0140	–0.00059 0.00013	–0.0445 0.0012	9.448 0.023	0.59
5	9 16 12.20582 0.00110	+52 33 52.3171 0.0100	–0.00237 0.00012	–0.0185 0.0012	8.965 0.017	0.45



**Рис.1.** Расположение масштабных звёзд на пластинках ряда 61 Cyg и пары, образованные из них.



**Рис.2.** Расположение масштабных звёзд на пластинках ряда ADS 7251 и пары, образованные из них.

Для определения масштаба среди звёзд поля, окружающих на фотопластинках каждую из двойных звёзд, подбирались пары, удовлетворяющие следующим условиям.

- 1) Изображения звёзд, составляющих пару, должны располагаться по обе стороны от оптического центра фотопластинки (находящегося примерно в середине между изображениями компонент двойной звезды) возможно дальше от него, а прямая, соединяющая изображения звёзд масштабной пары, должна проходить возможно ближе к оптическому центру.
- 2) Изображения масштабных звёзд должны быть измерены на возможно большем количестве пластинок в течение всего многолетнего интервала наблюдений.
- 3) Звёзды, составляющие пару, должны быть возможно более яркими, чтобы точность их измерения была выше. (Впрочем, неяркие звёзды и удавалось измерить лишь на относительно небольшом числе пластинок.)

По этим критериям были выбраны следующие звёзды (см. Таблицу 1) и из них различными способами были образованы масштабные пары (см. рис.1 и 2). Данные о координатах и собственных движениях, используемые затем при редукции, брались из каталога ТУСНО-2. Двойная звезда 61 Лебеда, обладающая большим собственным движением (около 5" в год), за сорокалетний период наблюдений заметно переместилась среди звёзд фона; поэтому некоторые из них, вполне удобные для определения масштаба, оставили свои изображения на пластинках не на всём протяжении наблюдательного ряда.

Координаты  $(\alpha_1, \delta_1)$  и  $(\alpha_2, \delta_2)$  каждой звезды каждой масштабной пары вычислялись по вышеуказанным данным на равноденствие и эпоху каждой исследуемой пластинки. По этим координатам определялись расстояния на сфере между звёздами масштабных пар, выраженные в секундах дуги:

$$\Delta\sigma_* = \Delta\sigma_1 - 0.0457'' \frac{(\Delta\alpha^{(\circ)} \cos \bar{\delta})^2}{\Delta\sigma_1^{(\circ)}} \left[ (\Delta\alpha^{(\circ)} \sin \bar{\delta})^2 + (\Delta\delta^{(\circ)})^2 \right],$$

где

$$\Delta\sigma_1 = \sqrt{225(\Delta\alpha^{(s)} \cos \bar{\delta})^2 + (\Delta\delta^{(s)})^2}, \quad \Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \quad \Delta\delta = \delta_2 - \delta_1, \quad \bar{\delta} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}.$$

По измеренным координатам  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  изображений звёзд масштабной пары определялось расстояние между ними на пластинке:

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad \text{где } \Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1.$$

Из сравнения этих расстояний с расстояниями между изображениями звёзд каждой масштабной пары, определёнными по измерениям фотопластинок, вычислялся эмпирический масштаб на отрезке между звёздами пары:

$$M_* = \frac{\Delta\sigma_*}{\Delta s}.$$

Далее по методике, описанной в [1], с учётом рефракции совершался переход к геометрическому масштабу в оптическом центре пластинки:

$$M_0 = M_* \left\{ 1 + r'^2 + \frac{\Delta s'^2}{12} - \frac{p'^2}{2} - \beta \left[ 1 + \left( \frac{\Delta x}{\Delta s} k_1 + \frac{\Delta y}{\Delta s} k_2 \right)^2 \right] \right\}.$$



Здесь  $\beta$  – коэффициент рефракции, вычисляемый с учётом температуры и давления в момент наблюдения;

$k_1$  и  $k_2$  – тангенциальные координаты точки зенита в системе пластинки;

$r'$ ,  $p'$  и  $\Delta s'$  – геометрические параметры, характеризующие расположение пар масштабных звёзд относительно оптического центра пластинки.

При наблюдениях двойных звёзд на каждой пластинке снимается несколько экспозиций, обычно 10–20. При вычислении масштаба использовались те экспозиции, для которых удалось измерить изображения всех масштабных звёзд и обеих компонент пары. Значения масштаба, полученные по отдельным экспозициям, усреднялись; при этом значения, отличающиеся от среднего более чем на три стандартных отклонения, отбрасывались.

Какой-либо систематической разницы между значениями масштаба, полученными на одной пластинке по разным масштабным парам, замечено не было (вне зависимости от того, как расположен отрезок, соединяющий звёзды пары: по склонению, по прямому восхождению или по диагонали). Поэтому эти результаты также усреднялись.

И, наконец, проводилось усреднение значений масштаба, полученных по различным пластинкам каждого ряда, снятым в течение одного наблюдательного сезона. Таким образом, получались «среднегодовые» значения.

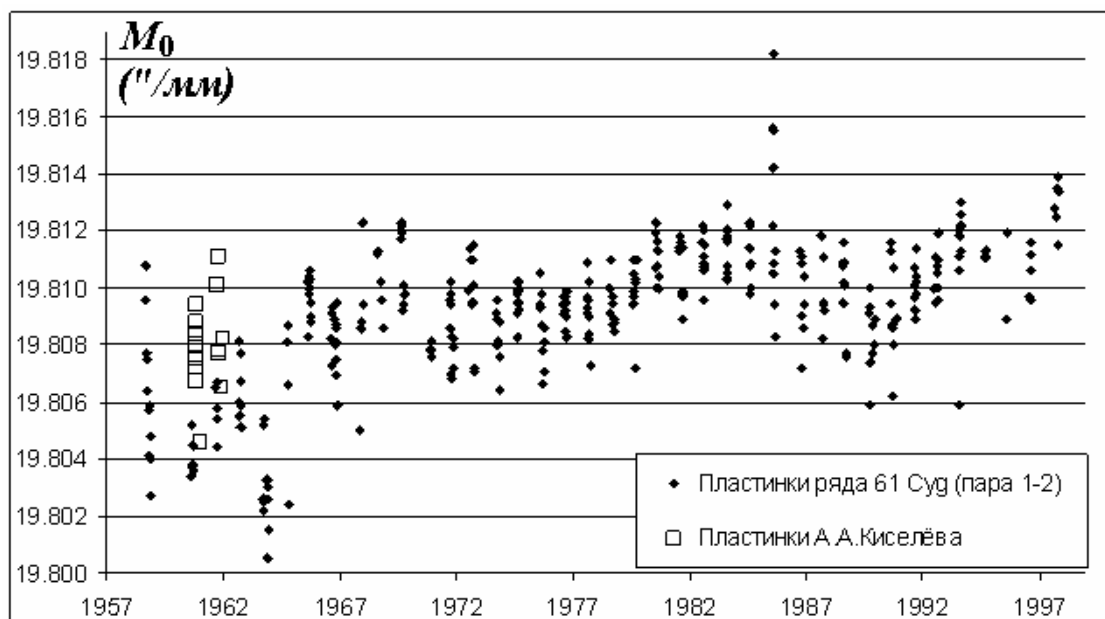
### Результаты

На рис.3 приведены результаты определения масштаба 26" рефрактора для отдельных пластинок ряда 61 Лебеда, полученных с 1958 по 1997 гг. (по одной из масштабных пар). Заметно, что масштаб подвержен изменениям и даже колебаниям. Виден разброс значений, полученных в один наблюдательный сезон по разным пластинкам. Также показаны значения, приведённые А.А.Киселёвым для отдельных пластинок в работе [1].

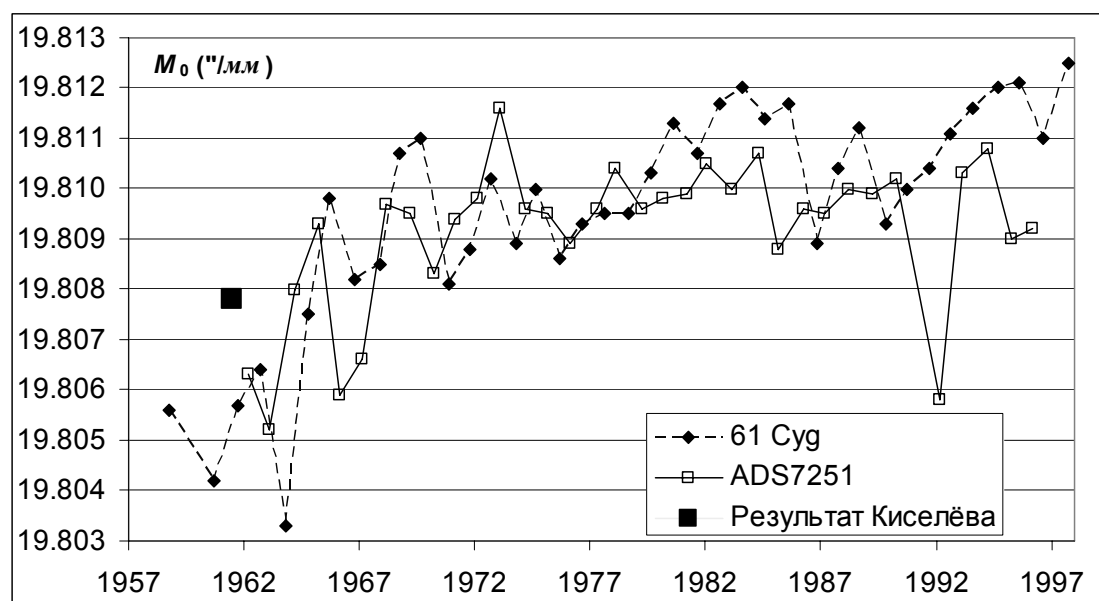
На рис.4 приведены средние результаты для каждого года отдельно для ряда 61 Лебеда и ряда ADS 7251. Видно, что общий ход со временем значений, определённых по двум рядам, очень похож (на некоторых участках похожи и детали кривых). В первое десятилетие наблюдается увеличение масштаба примерно на 0.005"/мм. Затем результаты колеблются вокруг значения 19.810"/мм. Причём, у ряда 61 Лебеда амплитуда колебаний больше (до  $\pm 0.002$ "/мм), и поведение этой кривой позволяет заподозрить некоторую периодичность. Данные же, полученные по ряду ADS 7251, колеблются с меньшей амплитудой и более хаотично.

Для проверки полученных рядов на периодичность был применён метод Скаргла [3,4]. Программа, реализующая этот метод, была любезно предоставлена Н.А. Шахт и немного доработана автором настоящей статьи. Ряд 61 Лебеда показал наличие периодической составляющей с периодом 14.6 года. При анализе значений, полученных по отдельным масштабным парам, этот период меняется от 13.5 до 15.5 года. Ряд ADS 7251 и объединённый ряд значимых периодов не показали. Следует отметить, что эти двойные звёзды наблюдаются в разные сезоны: 61 Лебеда – в «межсезонье», с августа по ноябрь, а ADS 7251 – зимой, с января по апрель. Возможно, с этим связаны их различия.

Не исключено, что выявленные небольшие периодические колебания масштаба 26" рефрактора могут объяснить обнаруживаемые в некоторых рядах наблюдений двойных звёзд изменения исследуемых параметров с периодами 12–15 лет (в том числе, период около 12 лет, проявляющийся в движении компонент 61 Лебеда).



**Рис.3.** Результаты определения масштаба 26-дюймового рефрактора для отдельных пластинок ряда 61 Лебеда (по одной из масштабных пар: звёзды 1 – 2). Показаны также значения, полученные А.А. Киселёвым по отдельным пластинкам [1].

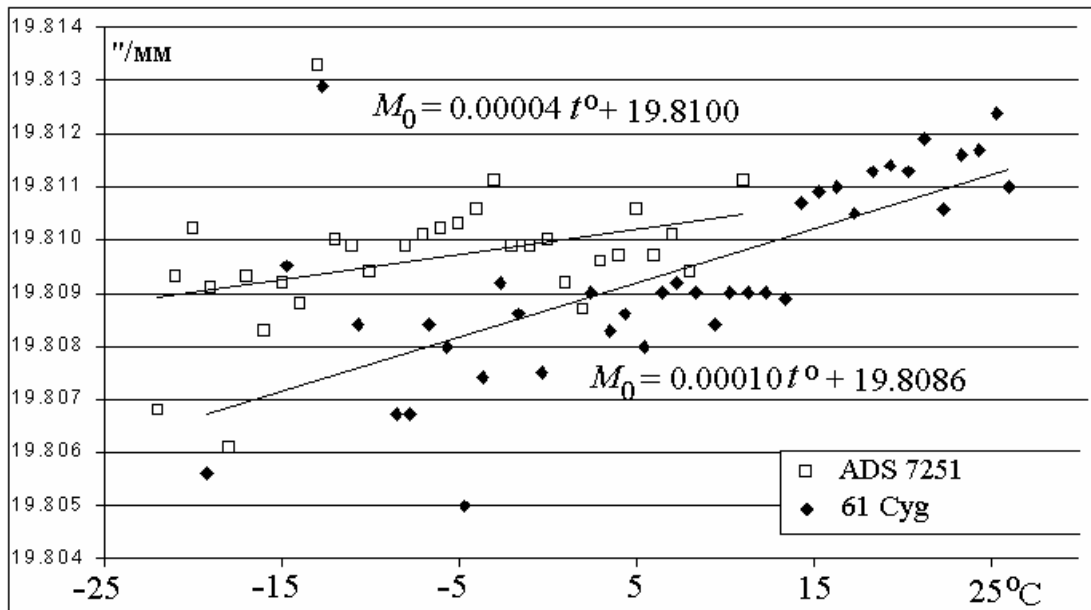


**Рис.4.** Средние за год значения масштаба, определённые по рядам наблюдений 61 Лебеда и ADS 7251. Показано также среднее значение, полученное А.А. Киселёвым [1].

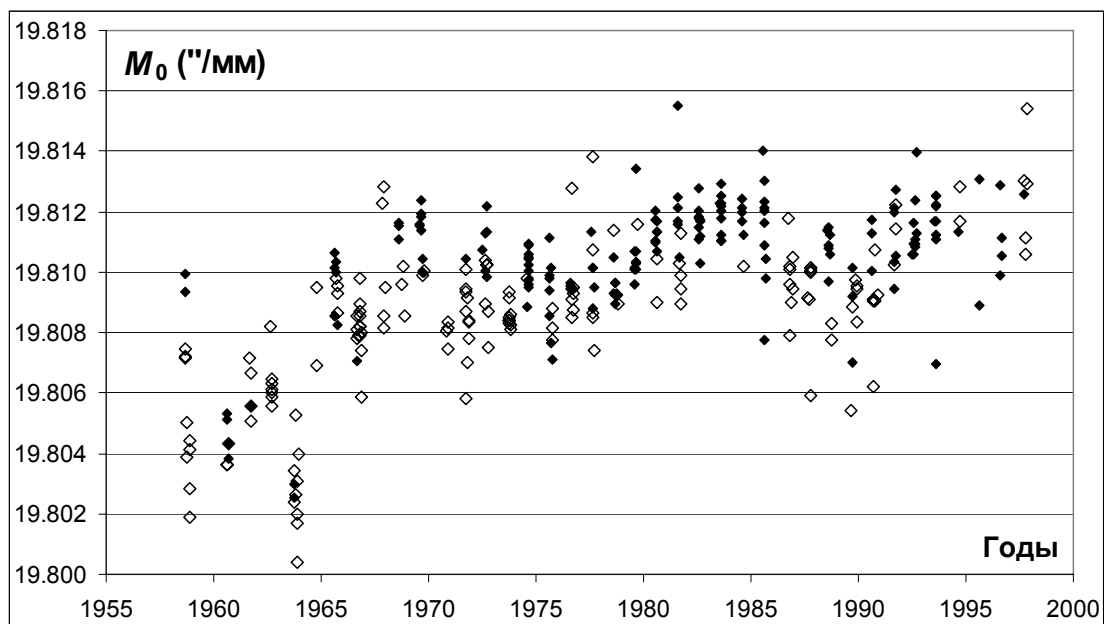
Интересно также было проверить ещё раз, не существует ли зависимости масштаба 26" рефрактора от температуры. За 40 лет наблюдений пластинки снимались при очень широком диапазоне температур: почти 50°C, что может позволить с большей уверенностью выявить температурную зависимость. На рис.5 представлен график зависимости от температуры масштаба, определённого по рядам 61 Лебеда и ADS 7251. Значения масштаба, вычисленные по отдельным пластинкам, группировались по температуре с точностью до градуса и усреднялись — таким путём были получены «среднеградусные» точки на графике. Как видно, небольшая зависимость масштаба от температуры присутствует. Причём, ряд 61 Лебеда показывает больший наклон. Примене-

ние метода наименьших квадратов к объединённому ряду 61 Лебеда и ADS 7251 дало зависимость

$$M_0 = 0.00005 \cdot t^{\circ} + 19.8090 \pm 0.0027 ("/\text{мм}).$$



**Рис.5.** Зависимость масштаба 26" рефрактора от температуры, определённая по рядам наблюдений ADS 7251 и 61 Cyg.



**Рис.6.** Поведение со временем масштаба (среднего по четырём масштабным парам), определённого по пластинкам 61 Cyg, снятым при разных температурах: меньше  $+12^{\circ}\text{C}$  (белые точки) и больше  $+12^{\circ}\text{C}$  (чёрные точки).

При обнаруженной зависимости от температуры необходимо проверить, не вызваны ли колебания масштаба тем, что в разные годы пластинки получались преимущественно при различных температурах. Для этого весь ряд 61 Cyg был разбит на примерно равные части по количеству пластинок так, что в одну часть вошли все пластинки, снятые при температуре воздуха меньшей  $+12^{\circ}\text{C}$ , а в другую – большей  $+12^{\circ}\text{C}$ . На

рис.6 показано, как ведет себя масштаб, определённый по пластинкам этих двух частей ряда. Естественно, заметно, что масштаб, определённый при большей температуре, систематически больше. Но, тем не менее, обе части ряда примерно повторяют колебания общего ряда. Значит, по-видимому, причина колебаний не в температурной зависимости.

Точно такая же картина складывается, если поделить ряд по сезону, в который снимались пластинки: до 15 октября и после 15 октября. Масштаб, определённый в более тёплом сезоне больше, чем масштаб, полученный по пластинкам, снятым в холодный сезон. И каждая часть ряда повторяет колебания целого ряда.

Сравнение изменения масштаба 26" рефрактора со сменой сортов фотографических пластинок, преимущественно используемых в течение каждого наблюдательного сезона, не позволило обнаружить никаких совпадений. Влияние спектральной чувствительности фотопластинок в сочетании с цветами звёзд, составляющих масштабные пары, на получаемые значения масштаба (посредством хроматической рефракции) требует отдельного тщательного исследования.

### Литература

1. **Киселёв А.А.** «Определение масштаба 26" рефрактора Пулковской обсерватории», Известия ГАО, 1964, № 174, с.120–126.
2. **Горшанов Д.Л., Шахт Н.А., Поляков Е.В., Киселёв А.А., Канаев И.И.** «Предварительные результаты обработки пулковского ряда фотографических наблюдений двойной звезды 61 Лебеда, измеренного на автоматической машине "Фантазия"», Известия ГАО, 2002, № 216, с.100–113.
3. **Black D.C., Scargle J.D.** "On the Detection of the Planetary Systems by Astrometric Techniques", Ap.J., 1982, **263**, p.854–869.
4. **Шахт Н.А.** «Исследование рядов фотографических наблюдений двойных и одиночных звёзд с применением методов спектрального анализа», Известия ГАО, 1998, № 213, с.183–201.

## THE RESEARCH OF CHANGES OF SCALE OF 26" REFRACTOR OF PULKOVO OBSERVATORY FROM 1958 TO 1997

Gorshanov D.L.

### Summary

*The changes of the geometrical scale of 26" refractor of Pulkovo observatory is detected by the research of long-term series of observations of two double stars 61 Cygni and ADS 7251 from 1958 to 1997. Maximum change during this period is about 0.008"/mm. The scale determined by 61 Cyg series shows an oscillation with period of about 14 years and amplitude of about 0.002"/mm. The weak temperature dependence is detected.*

## **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ СРЕДНЕПОЛОСНАЯ ФОТОМЕТРИЯ НА ОБЪЕМНЫХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММАХ**

**Гроздилов В.М.**

*Рассмотрена технология изготовления голограммных отражательных фильтров для высокоэффективной среднеполосной фотометрии*

### **Введение**

Голограммные оптические элементы (ГОЭ) давно и успешно применяются во многих областях прикладной науки и техники. В наблюдательной оптической астрономии также весьма эффективны применения разнообразных ГОЭ, особенно на основе объемных фазовых голограмм. Наиболее подходящим, если не единственным, материалом, удовлетворяющим высоким требованиям для астрономических применений, является бихромированная желатина (БХЖ). Этот материал обладает следующими важными свойствами:

- максимально высокое значение коэффициента отражения света, дифракционная эффективность записи почти 100%. Это достигается за счет чрезвычайно малых потерь на поглощение излучения в слое, поскольку регистрация структуры голограммы реализуется в нем за счет плавного изменения показателя преломления в пучностях регистрирующей интерференционной картины.

- минимальный уровень светорассеяния излучения в слое. Это достигается за счет того, что регистрация голограммы осуществляется на молекулярном уровне, в отличие, например, от галоидно-серебрянных слоев, где светочувствительность материалов достигается за счет введения в слой микрокристаллов галоидного серебра.

Однако для изготовления качественного ГОЭ на основе БХЖ, помимо высокоточных оптических установок и специальных лазеров, требуется высокая квалификация и большой опыт работы с этими материалами.

В качестве первой конкретной задачи нами был реализован комплект из десяти голограммных отражательных фильтров (ГОФ) для высокоэффективной среднеполосной фотометрии

### **Выбор фотометрической системы**

В качестве базовой была, естественно, выбрана Вильнюсская семиполосная фотометрическая система, которая чисто фотометрически, без привлечения информации со стороны спектров, способна разобрать любой набор звезд всех спектральных классов, светимостей и пекулярностей при наличии любого межзвездного поглощения. С такой задачей не может справиться ни одна другая среднеполосная система, не говоря уже о широкополосных системах. Эти преимущества системы предопределяют возможные ее применения в астрономических исследованиях [1]:

- определение межзвездного поглощения и экстинкции света в направлении объектов важных с точки зрения звездной эволюции. Это шаровые и рассеянные (открытые) звездные скопления, пульсары, галактики, квазары, новые и сверхновые, некоторые уникальные объекты и т.д.;

- исследование пространственного распределения звезд разных температур, светимостей, химических составов и пекулярностей;

- исследование звездных агрегатов, групп и скоплений;
- обнаружение уникальных объектов и многое другое.

В свое время Яшеком и Франкелем [2] было введено важное понятие критерия чистоты параметров фотометрической системы (качество системы), отражающее способность той или иной системы определять оптимальным образом заданный набор звездных характеристик (и величины межзвездного поглощения) для возможно более широкого интервала спектральных классов (эффективных температур) звезд. Согласно этому критерию к настоящему времени наилучшей системой для указанных целей является семицветная Вильнюсская система UPRXYZVS.

Вильнюсская среднеполосная система несколько уступает широкополосной системе Джонсона (UBVR) по проникающей способности (на  $1^m.5 - 2^m.0$  для стеклянного варианта фильтров и на  $0^m.5 - 1^m.0$  для интерференционных фильтров), но следует учесть, что при использовании широкополосных фильтров объем получаемой конкретной фотометрической информации значительно меньше, поскольку такая информация извлекается из сравнительно узких или относительно слабых деталей спектра (массовое сосредоточение спектральных линий в бленды, молекулярные межзвездные или атмосферные полосы, сильные атмосферные или оболочечные линии, перепады интенсивности у пределов спектральных серий, ультрафиолетовые или инфракрасные избытки и прочее). Выявление и надежное измерение которых при работе с широкими полосами весьма затруднительно, т.е. их информативность весьма мала. Узкополосные системы для определения сравнимого набора фотометрических и физических параметров звезд требуют такого же количества полос, как и среднеполосные, но уступают последним по проникающей способности (на  $1^m.2 - 1^m.8$ ). Следует отметить, что расположение полос Вильнюсской системы вдоль спектра звезд дает возможность перейти от нее к другим среднеполосным и широкополосным фотометрическим системам практически без потери точности. Для расширения возможностей семиполосной Вильнюсской системы нами, во-первых, был добавлен фильтр T ( $\lambda_T = 712$  нм) для выделения M-звезд, и две полосы ( $\lambda_{R'} = 860$  нм и  $\lambda_{I'} = 1020$  нм) для наблюдений в ближнем ИК – диапазоне. Таким образом, мы получили десятиполосную фотометрическую систему в спектральном диапазоне  $0.3 - 1.1$   $\mu\text{m}$ . Бихромированная желатина как записывающий голографический материал позволяет нам расширить наблюдательный спектральный диапазон в ИК область до  $1.7$   $\mu\text{m}$ , добавлением еще двух фильтров ( $\lambda_{J'} = 1250$  нм и  $\lambda_{H'} = 1620$  нм), которые изготавливаются в ГОИ. Тогда в окончательном виде наша фотометрическая система будет иметь двенадцать ГОФ в диапазоне  $0.3 - 1.7$   $\mu\text{m}$ , который мы поделим на четыре поддиапазона тремя дихроичными фильтрами (спектроразделителями), которые тоже делаются в ГОИ, сначала пополам ( $\lambda_{д}^c = 600$  нм), а затем еще пополам ( $\lambda_{д}^k = 435$  нм и  $\lambda_{д}^l = 940$  нм). Каждый из четырех поддиапазонов будет иметь по три ГОФ. В таком случае мы сможем проводить строго одновременные при любых экспозициях наблюдения в двенадцати полосах без дополнительной потери фотонов.

### **Одновременность наблюдений во всех спектральных полосах**

Многоцветная фотометрия требует измерения блеска звезд в нескольких участках спектра, что можно осуществить или последовательно, по очереди меняя необходимые светофильтры в оптическом тракте фотометра, или одновременно, разделив исследуемый поток света на несколько спектральных поддиапазонов с помощью дихроичных спектроразделителей, обладающих высокой дифракционной эффективностью близкой к 100%, направив каждый пучок в свой измерительный канал.

Большинство используемых в настоящее время звездных фотометров реализует первый, последовательный способ измерений, поскольку он требует минимума аппаратных затрат и обладает изумительной гибкостью в применении к конкретной задаче.

Однако многоцветный фотометр с одновременным измерением исследуемого потока в нескольких полосах обладает рядом существенных преимуществ: как правило, уменьшаются затраты времени при наблюдениях, можно получить моментальные цвета быстропеременных объектов и надежные цвета звезд при не очень хороших атмосферных условиях. Можно применять оптимальные для каждого канала приемники, поэтому различными авторами неоднократно разрабатывались многоцветные многоканальные электрофотометры, в которых световой поток от измеряемого объекта делился между спектральными каналами при помощи дифракционных решеток, призм или дихроичных зеркал [3].

Для реализации высокоэффективной среднеполосной двенадцатицветной фотометрии мы пошли несколько иным путем, учитывая опыт предшественников. Во-первых, как уже отмечалось выше, мы разбиваем весь диапазон  $0.3-1.7 \mu\text{m}$  на четыре поддиапазона с помощью трех высокоэффективных дихроичных фильтров. Далее в каждом поддиапазоне поставив вдоль оси с наклоном к ней в  $30^\circ$  по три ГОФ, каждый из которых отводит на свой фотоприемник свою отраженную полосу, пропуская тоже высокоэффективно остальной поток на следующий фильтр, т.е. каждый фотон высокоэффективно доходит до своего фотоприемника через спектроделители и ГОФ, согласно своей длине волны.

Основные отличия от предшествующих конструкций это: ГОФ, реализующие расширенную Вильнюсскую фотометрию на объемных фазовых голограммах в сочетании с небольшим количеством дихроичных спектроделителей. Рассмотрим, как создаются такие фильтры.

### Технология изготовления ГОФ

Такие фильтры представляют собой периодические структуры отражающих излучение плоских микрослоев, ориентированных параллельно поверхности подложки (см. рис.1) Фильтры изготавливают путем регистрации в светочувствительном слое картины интерференции двух плоских волн, падающих на регистрирующий материал симметрично относительно его поверхности с двух противоположных сторон. В качестве регистрирующего материала использовалась модификация БХЖ ДС, разработанная в ГОИ [4].

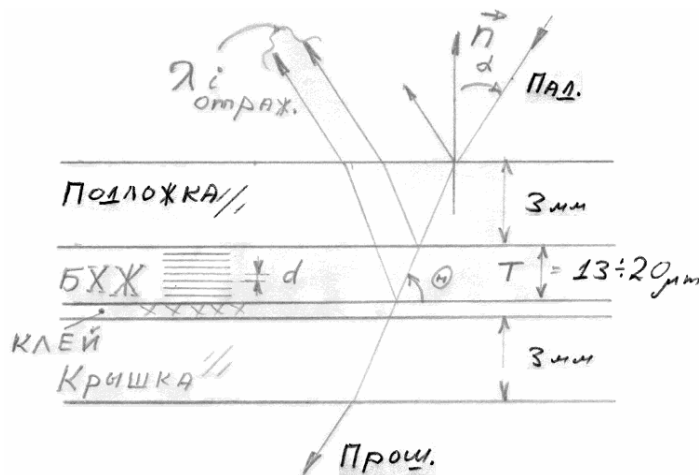


Рис.1.

Структура голограммного фильтра характеризуется следующими параметрами:

- толщиной слоя Т
- периодом интерференционной картины d

- амплитудой модуляции показателя преломления слоя  $n_1$ .

Сочетанием этих параметров обеспечивается получение эффективного отражения света в заданной спектральной полосе при заданном угле падения излучения на поверхность фильтра. В частности изготовленные фильтры предназначены для работы в параллельном пучке света, падающем на поверхность фильтра под углом  $30^\circ$  к нормали.

Принципиальная оптическая схема получения ГОФ представлена на рис.2. В качестве источников излучения использовались лазер на Ar ( $\lambda = 514.5$  nm) для изготовления фильтров на длины волн 1020 nm (Г'), 860 nm (Р'), 712 nm (Т), 655 nm (S), 544 nm (V), 516 nm и He-Cd лазер ( $\lambda = 441.6$  nm) для изготовления фильтра на длину волны 466 nm (У). Более коротковолновые фильтры на длины волн 405 nm (X), 375 nm (P), 345 nm (U) изготавливались с помощью импульсно-периодического эксимерного (Xe-CI) лазера ЭЛИ-94 по однопучковой схеме, предложенной ранее Ю.Н. Денисюком. Подробнее см. [5].



Рис.2.

Период изофазных поверхностей фильтра  $-d$  устанавливался в процессе записи выбором углов падения излучения на поверхность фотопластинки (углов  $-\alpha$ ). Кроме того, фотопластинки перед получением голограммы выдерживались в течение нескольких часов (около 12 часов) в эксикаторе с относительной влажностью 10%. Иммерсионная жидкость в кювете для изготовления ГОФ (ортоксилол) предназначалась для устранения переотраженного света между поверхностями регистрирующего слоя, подложки фотопластинки и зеркала. Отметим, что показатель преломления ортоксилота ( $n = 1.505$ ), БХЖ ( $n = 1.54$ ) и подложки фотопластинки из стекла К8 ( $n = 1.516$ ) были близки.

Слой БХЖ ДС приготавливался в лабораторных условиях путем смешивания водного 6% раствора желатины с бихроматом аммония (светочувствительной компоненты) в количестве 3% от веса желатины. Приготовленный раствор наносился на подложку из стекла К8 на специальном металлическом столике и студенился в течение 2-х часов при температуре  $10^\circ\text{C}$ . После сушки он термозадубливался - выдерживался в термостате при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение 35 мин. Накануне экспонирования слой проходил стадию дополнительного очувствления (гиперсенсibilизации) путем купания в растворе, содержащем бихромат аммония и триэманоломин в течение 7 минут при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Затем пластинки помещали в эксикатор с относительной влажностью 10% на 12 час. И после этого их можно было экспонировать. Процесс проявления заэкспонированных фотопластинок включал следующие основные этапы:

- набухание в буферном растворе с  $\text{pH} = 4.7-8.2$  для разных фильтров



- выдерживание в обезвоживающей ванне с изопропиловым спиртом 75% концентрации при температуре 20<sup>0</sup> С
- прогрев в термостате в течение 1 часа при температуре 100<sup>0</sup> С
- в отдельных случаях использовалось повторное проявление слоя БХЖ, что возможно при работе с таким слоем и позволило увеличить полуширину эффективного отражения света и величину дифракционной эффективности.

**Таблица 1.**

длина волны макс отражения $\lambda$ (nm)	полуширина эффективного отражения $\Delta\lambda$ (nm)	макс значение коэффициента отражения %
345	40	88
375	26	86
405	22	91
466	26	93
516	21	96
544	26	100
655	20	91
712	30	98
860	35	98
1020	40	98

Проявленные фотопластинки хранились в эксикаторе при относительной влажности 10%. В процессе измерения дифракционной эффективности фильтров и их спектральной ширины эффективного отражения использовалось измерительное устройство на основе монохроматора. В этом случае на фильтр направлялся приблизительно параллельный пучок лучей под углом 30<sup>0</sup> к нормали, и измерялось отношение отраженного ГОФ излучения к излучению, падающему на его поверхность (дифракционная эффективность). Измерения проводились с интервалом около 5 nm по длинам волн и ставили своей целью определение максимального значения дифракционной эффективности, длины волны соответствующей этому значению ДЭ, спектрального интервала  $\Delta\lambda$ , в пределах которого ДЭ фильтра уменьшается в два раза относительно своего максимального значения. В процессе измерений фильтр был закрыт защитным стеклом, герметизирован с помощью изоленды с целью исключения попадания влажного воздуха на светочувствительный слой. Рассмотренные выше измерения носили предварительный характер, и длина волны, соответствующая максимальному значению ДЭ, превышала длину волны, для которой предназначался фильтр до 5%. Такое превышение длины волны было связано с избыточной влажностью БХЖ. Для окончательной коррекции толщины слоя, получения максимального значения ДЭ, на нужной длине волны и сохранения параметров слоя в условиях изменяющейся относительной влажности окружающей среды и температуры фильтр прогревался в термостате при температуре 100<sup>0</sup> С и под контролем описанной выше измерительной установки на основе монохроматора и клеивался защитным стеклом. В защищенном виде фильтр сохраняет все свои параметры при воздействии относительной влажности до величины 100% и температуре в интервале -50<sup>0</sup> С до +60<sup>0</sup> С. В таблице1 представлены значения основных параметров некоторых изготовленных фильтров.

### Результаты и перспективы

- впервые создан комплект ГОФ для высокоэффективной десятицветной среднеполосной фотометрии на базе объемных фазовых голограмм, работающий в параллельном пучке диаметром до 40 мм

- собран макет трехканального голограммного спектрофотометра (ГСФ) с ручной установкой фильтров в любой комбинации по три из десяти полос, проведено предварительное лабораторное исследование, макет подготавливается для установки на телескоп АЗТ-7

- спроектирован и изготавливается пятиканальный ГСФ с автоматической установкой фильтров для одновременных наблюдений в любых пяти из десяти полос, ведется подготовка для установки на 100 см рефлектор «Сатурн»

- ведется проектирование и начато изготовление окончательного варианта двенадцатицветного (12 каналов одновременно) ГСФ на базе двенадцати ГОФ и трех дихроичных спектроделителей, рабочий диапазон 0.3 - 1.7  $\mu\text{m}$ .

Два дополнительных ГОФ ( $\lambda_{\text{Г}} = 1250$  нм и  $\lambda_{\text{НГ}} = 1620$  нм) и три дихроичных спектроделителя ( $\lambda_{\text{д}}^{\text{С}} = 600$  нм,  $\lambda_{\text{д}}^{\text{К}} = 435$  нм и  $\lambda_{\text{д}}^{\text{Д}} = 940$  нм) изготавливаются в ГОИ и будут готовы в I-II кв. 2005 г.

Описание оптических схем, конструкции и фотоприемников ГСФ будут даны в следующей работе.

Выражаю благодарность сотрудникам ГАО РАН Р.Н. Ихсанову и Л.Д. Парфиненко за проявленный интерес к работе и постоянную моральную и материальную поддержку в процессе работы, сотрудникам ГОИ особенно Г.Б. Семенову, А.К. Аристову и Т.В. Щедруновой, а также А.В. Варнаеву и А.П. Желвакову за совместную выработку технологии изготовления и за само изготовление полного комплекта для реализации высокоэффективной среднеполосной фотометрии.

Работа частично поддержана РФФИ, грант № 04-07-90254

### Литература

1. *Страйжис В.*, Многоцветная фотометрия звезд, Вильнюс, 1977, 265 с.
2. *Jaschek C., Frankel S.*, The purity parameter of photometric systems, *Astron. Astrophys.*, 158, 1986, p.174.
3. *Корнилов В.Г., Крылов А.В.* Четырехцветный звездный электрофотометр для измерения ярких звезд, *Астрон. журнал*, 1990, т.67, в.1, с.173.
4. *Денисюк Ю.Н., Загорская З.А., Пиляк Л.М., Семенов Г.Б., Шарова А.В.*, Бихром-желатина-регистрирующая среда для голографических оптических элементов, *ЖНиПФиК*, 1985, № 6, с.439-443.
5. *Семенов Г.Ф., Аристов А.К., Варнаев А.В., Гроздилов В.М., Желваков А.П., Щедрунова Т.В.*, Получение голограммных фильтров в УФ диапазоне спектра 320-430 nm (в печати в *Оптическом журнале*).

## HIGH-PERFORMANCE MIDDLE-BAND PHOTOMETRY ON THE VOLUMETRIC PHASE HOLOGRAMS

Grozdilov V.M.

### Summary

*The production process of hologram reflective filters for high-performance middle-band photometry is reviewed.*

## **ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ РОБОТА-ТЕЛЕСКОПА НА БАЗЕ ПАРАЛЛАКТИЧЕСКОЙ МОНТИРОВКИ АПШ-40**

**Гроздилов В.М., Парфиненко Л.Д.**

*В Отделе физики Солнца ГАО РАН создается быстронаводящийся робот-телескоп с голограммным спектрофотометром. Рассмотрены особенности и проблемы проекта.*

### **Введение**

Одной из основных задач данной работы является создание полностью автоматизированной астрофизической информационной системы (робота-телескопа), состоящей из широкоугольной оптической камеры и небольшого телескопа, оснащенного фотометром из среднеполосных голограммных фильтров, отражающих излучение только в своей полосе среднеполосной Вильнюсской фотометрической системы с высокой дифракционной эффективностью ( $> 90\%$ ), пропускающая излучение в остальной части спектра далее на следующий фильтр. Таким образом, все фильтры (или их часть) можно ставить друг за другом под необходимым углом, отводя отраженные пучки каждый к своему приемнику. Подобную процедуру невозможно или очень трудно и неэффективно осуществлять с пропускающими фильтрами. Широугольная камера должна наводиться по триггер-сигналу с гамма-спутника на область предварительной локализации гамма-всплеска за несколько секунд и уточнить локализацию, используя компьютерную базу данных об известных объектах в районе предполагаемого гамма-всплеска. Телескоп, находящийся на этой же монтировке, должен выполнить фотометрию оптической компоненты гамма-всплеска.

Автоматизированные телескопы малого и умеренного размера (20-100 см) после оснащения современной навесной аппаратурой все более широко используются для решения различных задач современной астрономии. На западе работают десятки больших и малых робот-телескопов. Самым совершенным астрофизическим роботом-телескопом нового поколения будет The ROTSE-III Robotic Telescope System (USA), стоящий сотни тысяч долларов и способный наводиться в любую точку неба из положения «зенит» за 4 сек. В России небольшой астрофизический робот-телескоп «МАСТЕР» создан в ГАИШе, а для астрометрических задач – в ГАО РАН [1].

Конструкция добротно сделанных старых параллактических монтировок типа АПШ-40 (рис.1) позволяет оснащать их быстрыми приводами по « $\alpha$ » и « $\delta$ » для автоматического наведения по заданным координатам с высокой точностью. Эффективным способом возможного использования малых телескопов является проведение на них многоцветной среднеполосной фотометрии звезд и других объектов. Высокая точность фотометрического метода и большая проникающая способность фотометрии дает ей преимущества и делает ее важным дополнением к спектральным методам. Многоцветная (8 полос от 0.3 до 1.0  $\mu\text{m}$ ) среднеполосная Вильнюсская фотометрия по информационной способности близка к спектрофотометрии благодаря тщательному подбору полос фильтров на основе анализа огромного количества звездных спектров ее авторами [2].

В данной статье дается краткая информация о работах, выполненных по робот-телескопу на этапе 2004 г.

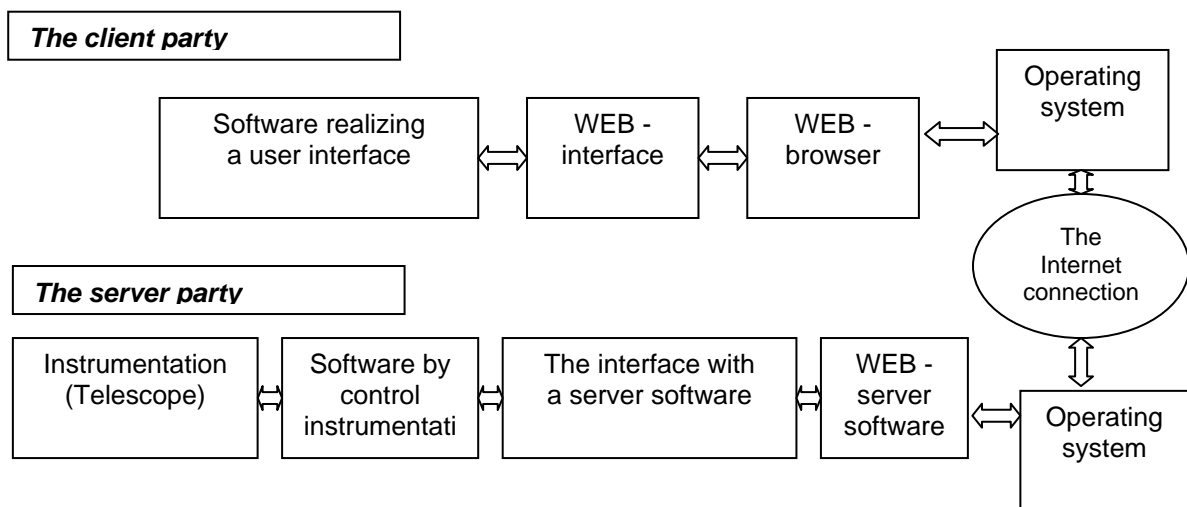
---

*Статья публикуется в дискуссионном порядке.*



**Рис.1.** Параллактическая монтировка АПШ-40 с телескопом АЗТ-7, на базе которой делается робот-телескоп.

Под роботом–телескопом понимается автоматический дистанционно управляемый в т.ч. и через Интернет. Такие телескопы позволяют эффективно решать ряд традиционных задач звездной астрономии и физики звезд. Так наблюдение открытых (рассеянных) звездных скоплений позволяет изучать многообразие физических свойств звезд и их эволюцию. Другой важной задачей является исследование строения и динамики Галактики. Массовое исследование звезд в избранных площадках позволяет существенно увеличить точность определения характеристик и спектральный состав звезд при помощи Вильнюсской фотометрии с голограммными фильтрами с учетом полной одновременности записи во всех фильтрах без потери фотонов. Все это относится также к задаче исследования звездной переменности. Хотя эти задачи уже решались с помощью широкополосной Джонсоновской UVV фотометрии, среднеполосная фотометрия по информативной способности превосходит широкополосную фотометрию, приближаясь к спектрофотометрии.



**Рис.2.** Блок схема системы дистанционного доступа к телескопу через Интернет.

Для расширения возможностей робота-телескопа совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом аэрокосмического приборостроения в отделе физики Солнца модернизирована созданная нами система удаленного доступа через Интернет к телескопу (рис.2). Осуществлен один из возможных вариантов дистанционного доступа к данным, получаемым с CCD матрицы телескопа, с управлением режимом формирования и выборки данных, доставляемых пользователю, и с передачей данных наблюдений по специальному прикладному протоколу в теле HTTP-сообщения. Преимущества Web-технологий для построения системы, обеспечивающей удаленный доступ к какому-либо оборудованию, заключаются во всемирной распространённости Web, в платформенной независимости (прежде всего – клиентской части программного комплекса), в возможности применения любыми пользователями сети Интернет, даже подключающимися к Интернет за защитными брандмауэрами (firewalls) корпоративных сетей. В совокупности это дает возможность обеспечить оперативный доступ к формируемому оборудованием информационным ресурсам по требованию из любой точки земного шара пользователям, работающим практически на любом компьютере, с любым режимом доступа в Интернет [3].

### **О голограммном спектрофотометре**

Для оснащения робот-телескопа нами разработан и изготовлен голограммный спектрофотометр (ГСФ) реализующий 8-цветную среднеполосную систему фотометрии. Фильтры установлены друг за другом под углом  $30^\circ$  и работают строго одновременно, без потери фотонов [4,5]. Основные преимущества нового голограммного спектрофотометра:

- полная одновременность в нескольких областях спектра без потери фотонов,
- большое число звезд одновременно находящихся в исследуемой площадке,
- высокая фотометрическая точность,
- в сочетании с быстрой цифровой обработкой этот метод позволяет проводить массовые исследования площадок одновременно в 8 полосах без потери фотонов.

Все эти преимущества, в сочетании с быстрым наведением в заданную точку неба, позволяют надеяться на эффективное исследование различных быстрых нестационарных объектов, в т.ч. оптического свечения  $\gamma$ -всплесков.

### **Особенности монтажа для регистрации оптического свечения $\gamma$ -всплесков**

Робот-телескоп должен выполнить фотометрию непосредственно от гамма-всплеска, а не от послесвечения. Известно, что прямое оптическое свечение гамма-всплесков в сотни тысяч раз ярче галактик, находящихся на том же (космологическом) расстоянии. Оно может быть доступно для малых телескопов лишь в сам момент гамма излучения, длящегося до 100 сек. Поэтому скорость наведения и полная автоматизация становятся решающим фактором. Из-за огромной механической инерции больших телескопов эта задача скорей всего будет решена именно на малых и средних инструментах. Современные светоприемники настолько быстро совершенствуются и дешевеют, что круг доступных для малых инструментов актуальных задач непрерывно растет. Поэтому, даже если проблему гамма-всплесков решат в ближайшее время, модульный принцип построения системы робота-телескопа позволит использовать его технологию для широкого круга задач наблюдательной астрофизики, для которых необходим дистанционный доступ через Интернет и большая скорость отработки управляющих команд. Известно, что малые телескопы меньше «чувствуют» температурные неоднородности земной атмосферы, которые приводят к тому, что качество ночного изображения на большинстве обсерваторий редко бывает лучше 1", что равно теоретическому разрешению телескопа диаметром всего 12 см.

В последнее время удалось получить на больших инструментах высококачественные спектры нескольких объектов, отождествленных в оптике с гамма-всплесками. Данные наблюдений говорят о вероятной связи длинных гамма-всплесков с определен-

ным типом сверхновых звезд. Однако для коротких гамма-всплесков такой информации получить пока не удалось и остается вероятность, что в некоторых гамма-всплесках мы имеем дело с новым неизвестным явлением Природы, приводящим к мгновенному освобождению энергии в масштабах, которые далеко выходят за рамки современной физики. Речь идет об энерговыделении примерно  $10^{53}$ - $10^{54}$  эрг только в гамма-диапазоне. Это существенно больше, чем оптическое излучение при взрывах сверхновых, что позволяет считать эту задачу по-прежнему исключительно актуальной фундаментальной проблемой сегодняшней астрономии. По мнению академика В.Л.Гинзбурга изучение физики гамма-всплесков, несомненно, составит одно из важных направлений в астрофизике начала XXI века.

Недавно начал работу новый гамма-телескоп SWIFT, который оперативно за 15 сек сообщает на Землю в службу оповещения GCN координаты гамма-всплеска с точностью 0.3-5". До 2000 г. основную информацию о гамма-всплесках получали с гамма-детекторов BATSE, установленных на борту Комптоновской обсерватории (CGRO), которая не могла давать оперативной информации о координатах. Теперь задача регистрации оптического послесвечения существенно облегчается, но даже 15 сек. это много и задача более быстрой наводки на короткий гамма-всплеск полностью не снимается. Поэтому робот-телескоп дополнительно оснащен для уточнения координат первоклассной широкоугольной камерой со светосилой 1:1.4. Благодаря тому, что голограммный спектрофотометр дает информацию одновременно для всех объектов попавших в поле зрения телескопа, точность наводки может быть ниже, чем при спектральных наблюдениях, когда исследуемый объект должен быть точно «посажен» на щель спектрографа. В нашем случае достаточно поймать  $\gamma$ -всплеск в поле зрения телескопа.

Неотъемлемой частью робот-телескопа является навигационная система, принимающая триггер сигнал со спутника и управляющая процессом наведения робот-телескопа на гамма-всплеск, а также аппаратурой спектрофотометра. Для робот-телескопа разрабатывается специальное windows-приложение, созданного в ГАО РАН многофункционального пакета программ для решения эфемеридных задач (авторы - В.Н. Львов, Р.И. Смехачева, С.Д. Цекмейстер [6]), которое показывает все известные астрономические объекты в нужном участке неба на момент наблюдения. В нашем случае основное требование к программе – быстродействие. Оно определяется, прежде всего, промежутком времени от эпохи каталога элементов до заданного момента наблюдений. Задача усложняется для быстроперемещающихся по небесной сфере объектов, сферические координаты которых необходимо получать, численно интегрируя уравнения возмущенного движения объектов. Это значительно медленнее, чем по формулам эллиптического движения.

### **Реконструкция базы червячных винтов по «а» и «б»**

Параллактическая монтировка АПШ-40, рассчитанная на ручное управление, пригодна для автоматизации. Она оснащена двумя зажимными хомутами по «а» и «б» для ручного грубого наведения, двумя ручными механизмами тонкого наведения и червячной парой для часового ведения по «а» с параметрами:  $Z = 288$ ,  $\dot{\varphi}_{\text{ср}} = 321$ ; шаг резьбы червяка 3.5, один оборот червяка  $5^{\text{м}} = 75' = 4500''$ .

Мы оснастили нашу монтировку червячной парой по «б», соответствующей по параметрам паре по «а», но с учетом, что по «б» инерционная масса меньше:  $Z = 270$ ,  $\dot{\varphi}_{\text{ср}} = 258$ , шаг червяка 3.0, один оборот червяка соответствует  $80' = 4800''$ . Для установки червячной шестерни пришлось разобрать все узлы вплоть до диска  $\varnothing 110$  мм на торце «б». Данная червячная шестерня зажимается и отпускается на 0.1-0.2 мм для проскальзывания при коррекции двумя фланцами, укрепленными на диске  $\varnothing 110$  мм с двух сторон электромагнитами и пружинами, что соответствует зажиму-разжиму хомута по «а». Это позволило нам сохранить работу механизмов тонкого наведения в автоматическом режиме, установив на них электродвигатели.

В связи с большими скоростями работы приводов и возросшей нагрузке на отдельные детали произведена переделка и модернизация системы наведения используемой параллактической монтировки. Имевшаяся база червячных винтов удлинена, а сами червячные винты установлены на скользящей посадке на концевые втулки, среднее положение фиксируется пружинами, при резком пуске червячный винт опережает, сжимая переднюю пружину, в ходе движения разница плавно исчезает, при торможении все наоборот, червячный винт отстает, сжимается задняя пружина, затем плавно возвращается. Это предохраняет от ударов и сколов зубья шестерни. Подобный принцип дублируется и электроникой. Подобная идея принадлежит не нам. Вот, например цитата из монографии Н.Н. Михельсона «Оптические телескопы»: «Телескоп обладает инерцией, значительно превышающей инерцию ротора двигателя, вращающего его. В случае внезапного (аварийного) обесточивания двигателя последний быстро останавливается, в то время как телескоп имеет еще запас скорости. Так как червячная пара является необратимой передачей, то на ней возникают перегрузки, которые могут привести к поломке зубьев червячной шестерни. Для исключения этого на вал ротора двигателя ставят маховик. Но большой маховик увеличивает время разгона и выбег телескопа. Поэтому для предотвращения возможной аварии, кроме умеренного маховика применяют *подпружиненный червяк* (курсив наш) или крепят червяк с редуктором на специальном столе, который фрикционно соединен с неподвижным основанием» [7].

Большинство современных автоматизированных телескопов малого и среднего размера выполнены с двумя червячными парами по «а» и «б» и оснащены только шаговыми двигателями, обеспечивающими скорости наведения во всем диапазоне от 0 до  $2^0-3^0$ /сек, что вполне достаточно для большинства астрономических наблюдений. Для быстрого и точного наведения телескопа на заданную площадку  $\leq 1'' \times 1''$  одного даже самого совершенного шагового двигателя типа P852 недостаточно. Он либо обеспечит быстрое наведение небольшого телескопа  $\sim 60^0$ /сек, если его поставить прямо на ось червяка при точности наведения 1-2', либо при установке через дополнительную червячную пару он даст необходимую точность, но не даст необходимую скорость. В любом случае для решения задачи требуется как минимум два двигателя, подключенные к двум концам оси червяка. Один для быстрого, но грубого наведения, работающий непосредственно на главный червяк. Второй точный шаговый двигатель, работающий через дополнительную червячную пару с необходимым для нужной точности передаточным числом и соединительную муфту для расцепления от главного червяка при работе грубого привода. При работе точного привода отсоединять грубый двигатель не обязательно, т.к. это незначительная дополнительная нагрузка, если двигатель безредукторный и не шаговый. Рационально в качестве двигателя грубого движения ставить двигатель постоянного тока средней мощности 200-1000 Вт, он плавно регулируется по скорости и мощности величиной напряжения.

Обе сборки ставятся на соответствующие основания на фланцах осей «а» и «б» и тщательно подгоняются к червячным шестерням. По оси «а» на ось ставится звездочка и через цепочку соединяется со второй звездочкой установленной на оси двигателя МУ-431 (400 w, 27 v, 3000 об/мин), который установлен на обратной стороне фланца «а» параллельно оси червяка. На ось через порошокую муфту сцепления ставится сборка малого червячного редуктора ( $Z = 30$ ) и шагового двигателя ДШИ-200. По оси «б» установка аналогична оси «а».

На обратных от червячных пар сторонах осей «а» и «б» установлены в защитных стаканах датчики угла с разрешением 11 дв. разрядов = 2048 бит (точность 10,5'), достаточным для попадания заданной площадки  $10' \times 10'$  на растр ПЗС матрицы с угловым полем  $20' \times 20'$  с помощью двигателя МУ-431. По оси «а» скорость грубого наведения до  $62.5^0$ /сек, по оси «б» скорость наведения до  $66^0$ . При точном наведении двигателем ДШИ-200 при тактовой частоте 1.2 кГц скорость по «а» – 15 '/сек, точность 1 шаг =  $\frac{3}{4}$  ", по «б» – 16 '/сек и 4/5" соответственно. Если телескоп в исходном состоянии смотрит в зенит, и с учетом того, что небо у горизонта в пределах  $20^0-30^0$  даже в хорошую по-

году малоприспособно для наблюдений, и нам доступен сферический сегмент неба в  $120^{\circ}$ , т.е. максимум  $\pm 60^{\circ}$  от зенита в любую сторону, то с учетом затухания вибраций трубы телескопа и навесной аппаратуры робот телескоп выходит в заданную площадку неба за 3–5 сек.

В настоящее время в качестве телескопа использован кассегреновский вариант 20 см телескопа АЗТ-7. Быстрое вращение астрономического купола из-за большой массы невозможно, поэтому робот-телескоп установлен на откатной части солнечного телескопа, где он постоянно имеет круговой обзор неба, исключая север.

Таким образом, создание астрофизического робота-телескопа является сложной многоплановой задачей. Наш проект имеет жесткие сроки выполнения 2004-2006 гг. В работе участвует большой коллектив специалистов разных учреждений, а именно:

1. Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова
2. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
3. Петербургский завод ТЕХМАШ и ООО «ТОПАЗ».

Научное руководство и координацию работы осуществляет отдел физики Солнца ГАО РАН.

В работе участвуют сотрудники других научных отделов ГАО РАН, а также Опытное производство ГАО РАН.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН А.М. Черепашуку за помощь, которую оказывает ГАИШ данной работе.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ, грант № 04-07-90254, «Создание на основе Интернет-технологий оперативной системы наземного обеспечения космических наблюдений  $\gamma$ -всплесков (робот-телескоп)»

#### Литература

1. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П. и др.*, Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320. Изв. ГАО РАН, № 216, 2002, с.128.
2. *Страйжис В.*, Многоцветная фотометрия звезд, Вильнюс, 1977, с.311.
3. *Бобков Е.В., Парфиненко Л.Д., Соченов А.С., Шейнин Ю.Е., Ульянов И.А.*, Дистанционный доступ к солнечному телескопу через Интернет, Изв. ГАО РАН, № 216, с.505.
4. *Гроздилов В.М.*, Высокоэффективная среднеполосная фотометрия на объемных фазовых голограммах (настоящий сборник).
5. *Семенов Г.Б., Аристов А.К., Варнаев А.В., Гроздилов В.М., Жевлаков А.П., Щедрунова Т.В.*, Получение голограммных фильтров в УФ диапазоне спектра 320-430 нм, журнал ОПТИКА, 2004 (в печати).
6. *Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекместер С.Д.*, 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.
7. *Михельсон Н.Н.*, Оптические телескопы, Москва, Наука, 1976, 374 с.

#### ROBOT-TELESCOPE ON THE BASE OF EQUATORIAL MOUNT APH-40

Grozdilov V.M., Parfinenko L.D.

#### Summary

*The rapid telescope - robot with holographic spectrophotometer is created. The features of high-speed driving gear are considered.*



## **АВТОМАТИЗАЦИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЗЕРКАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ ЗА-320м. II**

**Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В.,  
Куприянов В.В., Бехтева А.С.**

*Проведена модернизация и дальнейшая автоматизация телескопа ЗА-320м. Приводится описание модернизированных и автоматизированных узлов телескопа ЗА-320м, электронного оборудования и программного обеспечения.*

### **Введение**

На автоматизированном комплексе ЗА-320м в 2002-2004 гг. была продолжена работа по модернизации и автоматизации его узлов. В частности была заменена труба телескопа, изготовлена и введена в строй дополнительная аппаратура: датчик ясного неба, ограничитель наклона трубы телескопа, фокусирующее устройство. Также, было разработано новое и усовершенствовано имеющееся электронное оборудование. Для повышения надежности отсчета лимба были разработаны новые алгоритмы и создано новое программное обеспечение. Была, также, проведена большая работа по совершенствованию программного обеспечения системы управления телескопом.

### **1. Модернизация и автоматизация телескопа**

#### **1.1. Новая труба телескопа**

В июле 2004 года в автоматизированном комплексе зеркального астрографа ЗА320м была заменена телескопическая труба, в свое время любезно предоставленная ГАО РАН астрономом-любителем Р.Х. Бекашевым (Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В. и др., 1998). Вместо нее на модернизированную монтировку АПШ-5 (Канаев И.И., Девяткин А.В. и др., 2002) была смонтирована новая труба ЗА-320м, разработанная и изготовленная в ГАО РАН. С прежней трубы заимствована оптическая схема, ее оптические детали – главное и вторичное зеркала и некоторые узлы приемной части. В остальном – корпусом трубы, оправой главного зеркала, держателем вторичного зеркала, - идеологически и конструктивно она отлична от трубы ЗА320М. В новой трубе существенно изменены крепления оптических деталей в оправе и системы опорно-разгрузочных устройств. Применены устройства, компенсирующие термические деформации металлических корпуса трубы и оправы главного зеркала, блокирующие влияние этих деформаций на стабильность оптической схемы телескопа. Что касается новых корпусных конструкций и держателя вторичного зеркала, а они – сварные, то технологией их изготовления были предусмотрены и осуществлены приемы, исключившие их деформации как при сборке, так и при дальнейшей эксплуатации.

После сборки (электросварки) узлы были подвергнуты стабилизирующей термообработке – низкотемпературному обжигу (Я.М.Довгалецкий, 1962). Последующей механической обработкой был затронут минимум поверхностей. “Успокоению” материала способствовал затянутый срок изготовления узлов. При этом узлы прошли курс так называемого “старения”. В результате, контрольные измерения размеров, форм и взаимного положения ответственных элементов этих изделий перед их сборкой не показали отступлений от ранее исполненных в пределах назначенных допусков.

Наибольшего внимания заслуживают узлы и системы новой трубы ЗА320м.

**Корпус трубы** представляет собой сварную цельнометаллическую конструкцию. Ее основой является труба, свальцованная из листовой стали толщиной 3 мм. В месте прикрепления трубы к оси склонений монтировки, называемом “средником” (Н.Н. Михельсон, 1976), труба опоясана двумя наружными кольцевыми ребрами жесткости. К ним, параллельно образующей цилиндра трубы, приварен стыковочный фланец, и, поодаль от него, две продольные пластины для установки на них искателя и гида. По торцам труба оформлена фланцами специального назначения. Фланец входного торца имеет необходимые конструктивы для закрепления держателя вторичного зеркала и деталей, с помощью которых производились необходимые регулировочные работы по совмещению оси вторичного зеркала с оптической осью системы. К фланцу выходного торца трубы крепится оправа главного зеркала. В этом месте какие бы то ни было устройства для подвижек и наклонов оправы с зеркалом не предусмотрены, так как они замещены заложенными в проект и корпуса, и оправы, и, исполненными при их изготовлении, технологическими допусками.

Механическая обработка элементов корпуса трубы была проведена с соблюдением жестких требований по допускам на размеры, форму и взаимное положение поверхностей. На выходном фланце особое внимание было уделено изготовлению посадочного места оправы главного зеркала и привалочной плоскости для нее. Эта плоскость была использована как базовая для обработки фланца трубы на “среднике”.

**Оправа главного зеркала** представляет собой чашеобразную конструкцию из листовой стали. На стороне открытой части этой чаши имеется фланец, которым она соединяется с выходным фланцем корпуса трубы. Днище и фланец соединены обечайкой, диаметр которой меньше внешнего диаметра днища. В центральной части днища размещается втулка, несколько распространяющаяся за внешнюю плоскость днища. В ней имеется отверстие для пропуска светового пучка, а ее основное назначение – служить местом для прикрепления к оправе с внешней стороны механизма фокусировки изображений, блока светофильтров и приемника света, а также отсекаателя.

Для придания конструкции жесткости днище и фланец в стыке с обечайкой и днище в стыке с внутренней втулкой соответствующим образом оребрены.

Механической обработке оправа подверглась в части образования на фланце посадочного буртика для стыковки с выходным фланцем корпуса трубы, привалочной плоскости того же назначения и центральной втулки на днище. На последней обработана, с жестким допуском на параллельность относительно привалочной плоскости фланца, плоскость, выходящая за внешнюю поверхность днища и центральное отверстие с образованием двух “чистых” соосных отверстий. Одного - внешнего - для посадки механизма фокусировки, другого – внутреннего – для крепления отсекаателя.

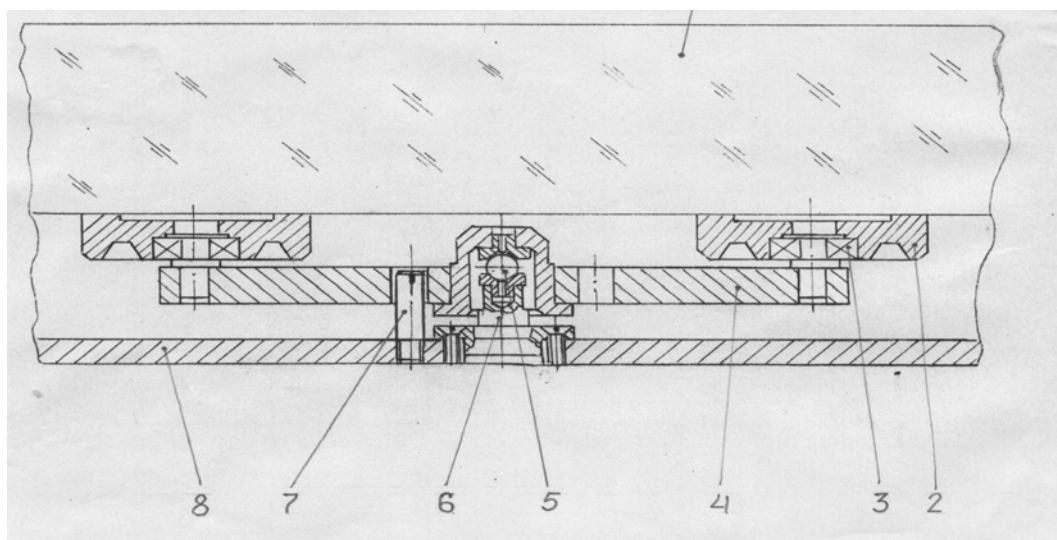
Кроме того, в днище изготовлены отверстия для установки в них деталей опорно-разгрузочных устройств и три проходных отверстия под штыри вспомогательного монтажного устройства - “съемника”. Оно входит в комплект ЗИП и предназначено для помещения зеркала в оправу и его извлечения из нее.

Здесь следует отметить, что обработанные “чисто” плоскости и поверхности оправы были использованы, как и задумывалось, в качестве базовых при центровке зеркала в оправе и регулировке его наклона.

**Главное зеркало** из ситалла установлено в оправе на специальных опорно-разгрузочных устройствах: на шести осевых (торцовых) – с тыльной стороны зеркала и шести радиальных – по его боковой цилиндрической поверхности. Шесть **осевых опор** равномерно распределены на одной окружности, диаметр которой рассчитан по рекомендации Е.Г. Гроссвальд (Н.Н. Михельсон, 1976). Для того чтобы положение зеркала в пространстве определялось тремя точками, использована известная “система разгрузки Гребба” (Н.Н. Михельсон, 1976). По ней шесть торцовых опор разбиты на три груп-

пы по две опоры в каждой. В каждой группе пятаки 2 (рис.1), служащие опорами зеркала 1, шарнирно посредством сферических шарикоподшипников 3 оперты на коромысло 4 по его краям. Коромысло 4 на середине расстояния между осями шариковых опор 3 пятак 2 шарнирно (шарик 5) опирается на стойку 6, закрепленную на днище 8 оправы зеркала. Общее число таких шарнирных опор равно 5, как и коромысел – равно 3. Они располагаются “в вершинах равностороннего треугольника, центр которого совпадает с центром оправы” (Н.Н. Михельсон, 1976). Примененная система опор (каждая группа в ней) самоустанавливается относительно тыльной поверхности зеркала.

Показанных на рис.1 конструкций шарнирных опор коромысел 4 в оправе главного зеркала две. Как видно, они имеют фиксированное расстояние от днища 8 до центра шарика (шарнира) 5, то есть неподвижны. Третья опора (здесь не показана) – регулируемая. Конструктивно она отличается тем, что в ней шарик 5 размещен на конце винта. Этой опорой производилась выверка положения (наклон) оптической оси зеркала относительно базовых поверхностей оправы. Для воспрепятствования поворотам коромысел 4 на шарнирах 5 вокруг осей, перпендикулярных тыльной плоскости зеркала (во время укладки зеркала в оправу или по каким-либо иным причинам) служат сторожки 7 – по одному на коромысло. Это стержни, ввинченные в днище оправы на расчетных местах так, чтобы они свободно, с зазорами, проходили в отверстия, специально для них изготовленные в коромыслах.

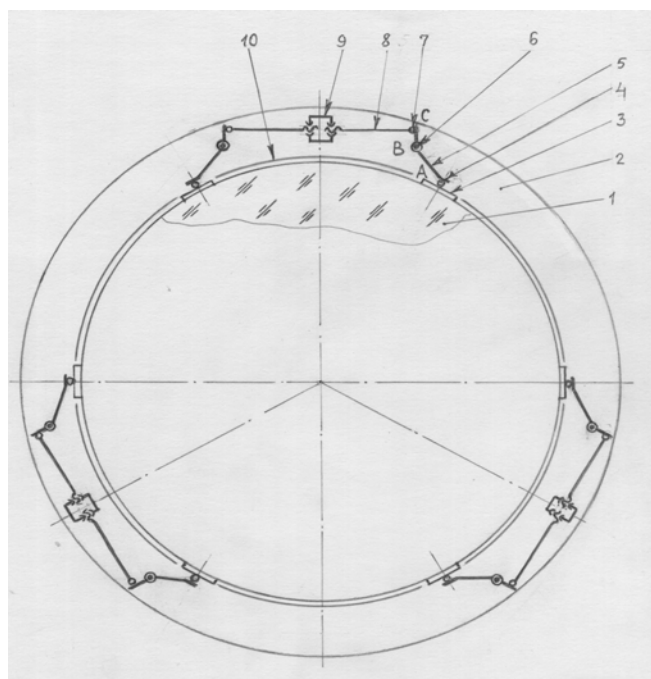


**Рис.1.** Система осевой разгрузки главного зеркала.

Для предотвращения подвижек зеркала в осевом направлении при случайных или вынужденных наклонах трубы ниже горизонта предусмотрено его крепление со стороны отражающей поверхности прижимными планками. Три планки равномерно распределены по окружности зеркала. Они крепятся на оправе и контактируют с плоской кольцевой каемкой зеркала через прокладки из станиоля.

Проблема **радиальной разгрузки** главного зеркала ЗА-320м решена аналогично тому, как она была разрешена в конструкциях таких зеркально-линзовых телескопов, как МТМ-500 (ГОМЗ) и Лунно-планетный (ГАО АН СССР): в МТМ-500 для радиальной главного зеркала, в ЛПТ для разгрузки менисков. В них четное число, равномерно размещенных на боковых поверхностях зеркала и мениска, опорных подушек было разбито на пары шарнирно-рычажных механизмов (Артоболевский, 1979), схожих, по виду и составу звеньев, с механизмами двухколодочных тормозов. Однако их различия существенны. Во-первых, функциональными назначениями, во-вторых, объектами

влияния, в-третьих, принципами и характерами работы, и, в-четвертых, взаимодействием составляющих их звеньев. Схема радиальной разгрузки главного зеркала ЗА-320м представлена на рис.2. По этой схеме шесть опорных подушек 3, равномерно размещенных на боковой поверхности зеркала, объединены в три группы, по две опорных подушки в каждой. Каждая из подушек группы в точке А контактирует через шарик 4 с одним из плечей жесткого двуплечего рычага 5. Последний в точке В насажен на ось 6 и может на ней вращаться. Ось 6 закреплена консольно на днище 2 оправы зеркала с наружной стороны цилиндра 10, соединяющего днище 2 с фланцем оправы (не показан). Опорой второго плеча рычага 5 в точке С (через невыпадающий шарик 7) служит стержень 8. На него же и так же опирается одноименное плечо симметрично расположенного рычага. Таким образом стержень 8 является звеном, замыкающим механическую систему группы. Две другие группы опорных устройств построены идентично описанной.



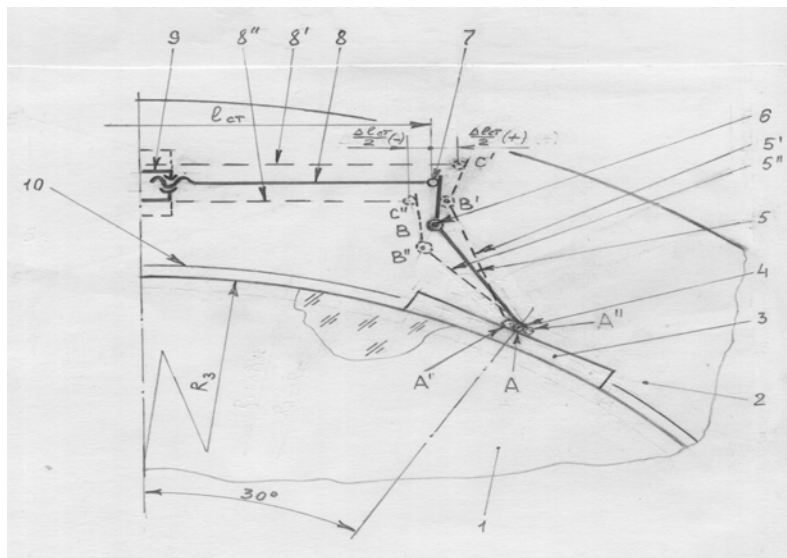
**Рис.2.** Схема радиальной разгрузки главного зеркала ЗА320м.

Для удобства монтажа опорных групп и регулировки взаимных контактов, входящих в системы звеньев, стержень 8 разделен на две части. По концам, не контактирующим с плечами рычагов, обе части стержня имеют резьбы разного направления витков на которые навинчивается гайка-муфта 9. Ею стержень 8 соединяется в единое целое, а также регулируется его длина. Второе функциональное назначение стержня 8 в том, что он, будучи изготовленным из материала, тепловой коэффициент линейного расширения которого больше, чем тот же коэффициент материалов зеркала – в общем случае, оправы и рычагов, является компенсатором деформаций, возникающих в перечисленных деталях при перепаде температур воздуха в павильоне телескопа.

Механизм работы описанной системы (рис.2) применительно к конкретному изделию – то есть к ЗА-320м - показан на рис.3. На ней в крупном масштабе изображен фрагмент (половина) одной из опорных групп. Показаны изменения (в утрированном виде для большей наглядности) положений его звеньев при перепаде температуры воздуха от среднего (нулевого) значения. Нумерация элементов соответствует указанной на рис.2.

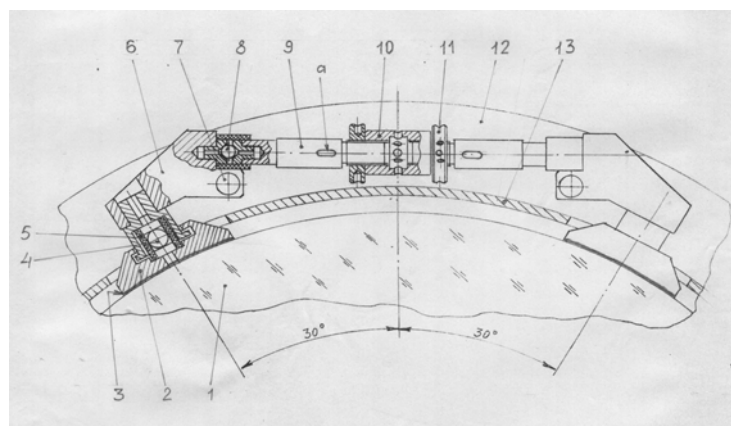
В основу построений и последующих расчетов положены известные предположения: термические деформации круглых деталей распространяются по их радиусам

(от центра к периферии и наоборот), а деталей с линейными размерами – вдоль их протяженности. Деформациями зеркала пренебрегли, так как в нашем случае оно изготовлено из ситалла и его тепловой коэффициент линейного расширения ничтожно мал.



**Рис.3.** Механизм работы разгрузки главного зеркала ЗА-320м.

Как видно на схеме рис.3, температурная деформация оправы 2 в пределах допустимых температур  $\pm\Delta t$  вызывает перенос точки В закрепления рычага 5 при нагревании в точку В', при охлаждении – в точку В''. При этом, если стержень 8 не удлинится на  $+\Delta l$  или не укоротится на  $-\Delta l$ , система опор 3 либо рассыплется, так как рычагам 5 будет дана свобода поворотов вокруг оси 6, либо приведет к местным перенапряжениям в материале зеркала 1. В обоих случаях произойдет расстройство оптической схемы телескопа: в первом случае – от возможных подвижек зеркала, во втором случае – от искажения формы отражающей поверхности. Таким образом, задача заключается в расчете длины стержня 5 с прогнозом его удлинения или укорочения вслед за изменением температурного режима с учетом компенсации им деформаций оправы, плечей рычагов, направлений этих деформаций и поворотов рычагов вокруг осей 5 при появлении этих деформаций. При решении параллельных задач: выбор места расположения осей 5 и определение размеров плечей рычагов.



**Рис.4.** Конструкция опорно-разгрузочных устройства с термокомпенсаторами оправы зеркала трубы ЗА-320м.

На рис.4 представлена конструкция одной из трех типовых групп опорно-разгрузочных устройств с термокомпенсаторами оправы зеркала трубы телескопа ЗА-320м. Опорные подушки 2 примыкают к боковой поверхности зеркала через прокладки 3 из станиоля. Двуплечие рычаги 6 посажены на оси 7, заделанные в днище оправы 12. Плечами, обращенными к опорным подушкам 2, рычаги 6 контактируют через шарики 4 с опорными подушками 2, а противоположными плечами, через шарики 8 – со стержнями 9, выполняющими роль термокомпенсаторов (они изготовлены из сплава D16). Шарики 4 имеют опорными, с двух сторон, плоскости и могут кататься по ним в небольших пределах внутри эластичных трубок-ограничителей 5. Шарики 8 с двух сторон опираются на конические поверхности, выполненные в плечах рычага 6 и по концам стержней 9. Здесь шарики 8 неподвижны и выполняют роль шарнирных соединений плеч рычагов со стержнями 9. От выпадения из гнезд шарики 8 предохраняют втулки из эластичного материала. Стержни-компенсаторы 9 по конструктивным и технологическим соображениям (учет удобства монтажа систем, возможность регулировки длин стержней и пр.) состоят из двух частей (на встречных концах стержней выполнены резьбы разных направлений витков), соединенных муфтой 10. Для предотвращения поворотов противоположных пар частей стержней во время навинчивания на их концы муфты 10, в стержнях изготовлены сквозные пазы “а”, в которые во время регулировок вставляются выступы специального пластинчатого ключа. Стяжку 10 вращают бородком, который вставляют в специально для этого изготовленные отверстия. По окончании регулировок резьбовые соединения на стержнях 9 контрятся круглыми гайками 11. В обечайке 13, которой днище 13 соединяется с привалочным фланцем оправы, имеются проходные отверстия, через которые опорные подушки 2 устанавливаются на боковой поверхности зеркала 1, размещенного внутри обечайки. Узлы и детали радиальных опорно-разгрузочных устройств размещены, в основном, снаружи обечайки 13 и доступны для монтажа по месту, регулировок и профилактики. От внешних воздействий любого толка они защищены глухим легким кожухом.

**Узел вторичного зеркала** несет на себе вторичное зеркало, удерживая его на оптической оси системы в проходящем на главное зеркало пучке света. Его основной элемент – вторичное зеркало с устройствами и приспособлениями, обеспечивающими стабильность функционирования зеркала в оптической системе телескопа, смонтировано на традиционной для телескопических труб подобного типа конструкции – держателе (или спайдере) и посредством ее крепится на входном торце корпуса трубы.

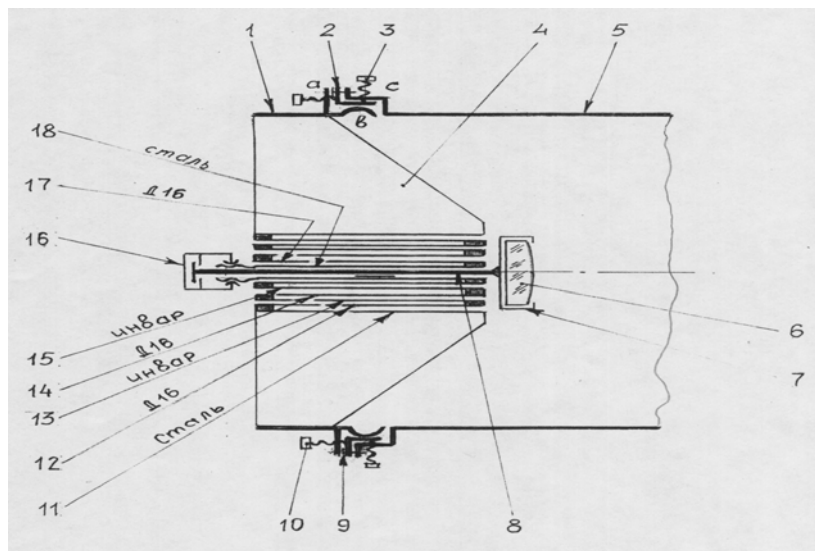
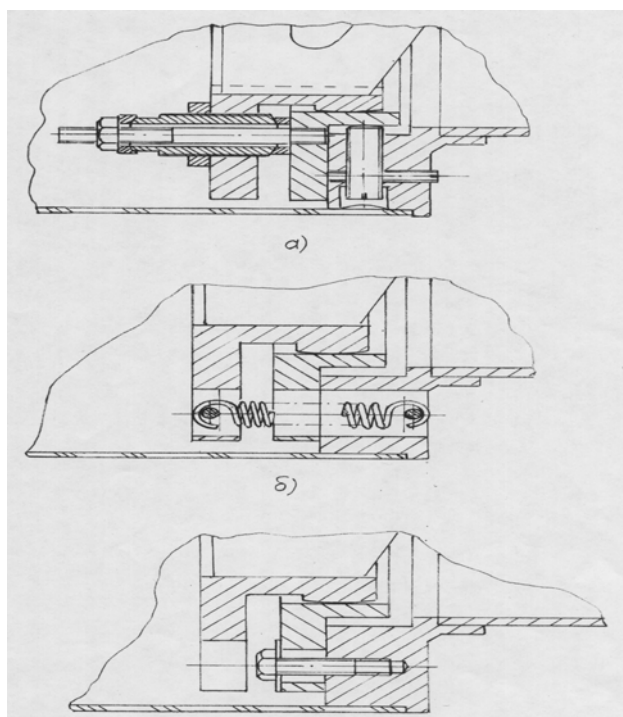


Рис.5. Узел вторичного зеркала.

Принципиальная схема узла, с некоторым упрощением, показана на рис.5. Зеркало 6 в оправе 7 жестко состыковано с соосным ему штоком 8 и может на нем перемещаться возвратно-поступательно (вдоль оптической оси) во втулке 18. Источником перемещений штока 8 (и зеркала 6) является гайка 16, навинчиваемая на резьбовой конец втулки 18. Конструкция гайки 16 такова, что она может свободно вращаться на гладком свободном конце и, вместе с тем, связана с ним. Поэтому она увлекает шток 8 вслед за своим перемещением по резьбе втулки 18. От поворотов вокруг оси вслед за вращением гайки 16 шток 18 предохраняет направляющее устройство, выполненное в конструкции, но на рисунке не показанное.

Втулка 18 через систему втулок 17, 15, 14, 13 и 12 (об их назначениях будет сказано позже) соединена со стаканом 11. Он является центровочным в конструкции держателя и его деталью. Он соединен четырьмя “растяжками” (Н.Н.Михельсон, 1976 г.) – пластинчатыми ребрами – крест-накрест в радиальных направлениях – с ободом 1. Обод 1 в месте соединения с корпусом трубы 5 имеет фланец “а” и сферический поясок “в” на выступе, направленном в сторону фланца “с” корпуса трубы 5. Этим пояском обод 1 опирается на внутреннюю цилиндрическую поверхность промежуточного кольца 2 и может на нем покачиваться (наклоняться) во всех направлениях. Кольцо 2 плоскостью своего фланца, обращенной к фланцу “с” корпуса трубы 5, плотно прилегает к нему, а наружной цилиндрической поверхностью выступа входит в проточку фланца “с” корпуса трубы с большим зазором. Пакет: фланец “а” обода 1 – промежуточное кольцо 2 – фланец “с” корпуса трубы 5, стянут четырьмя цилиндрическими пружинами растяжения, размещенными равномерно по окружности – см. рис.6б. На фланце “а” обода 1 помещены равномерно четыре регулировочных устройства 10. Подробности их конструкции см. на рис.6а. С помощью этих устройств держатель с зеркалом 6 можно покачивать на кольце 2 или – регулировать наклон оптической оси зеркала относительно оптической оси системы.



**Рис.6.** Конструкция держателя вторичного зеркала

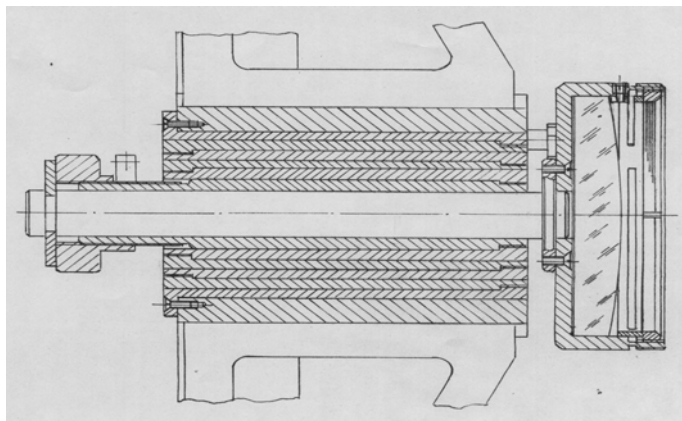
Кольцо 2 четырьмя взаимно перпендикулярными лысками, изготовленными на наружной цилиндрической поверхности ее выступа, опирается на четыре регулировоч-

ных винта 3 (подробнее – на рис.6а). Этими винтами кольцо 2 и вместе с ним держатель зеркала 6 можно перемещать поперек оптической оси системы, иными словами, регулировать соосность оптических осей вторичного зеркала 6 и главного зеркала телескопа. По окончании регулировки кольцо 2 наглухо прижимается к фланцу “с” корпуса трубы 5 болтами 9 (см. также рис.6в).

Система промежуточных, между втулкой 18 и стаканом 11 держателя, втулок 17, 15, 14, 13 и 12 образует так называемый термокомпенсатор (Л.М. Латыев, 1985). Его назначение – компенсировать температурные деформации (по длине) корпуса трубы телескопа суммой противоположно направленных температурных деформаций набора втулок, собранных в особом порядке. Как видим в схеме на рис.5, указанные втулки собраны с последовательным (“змейкой”) соединением друг с другом. Кроме того, они изготовлены из разных материалов с разными коэффициентами линейного расширения: стакан 1 держателя, втулка 18 и шток 8 – и стали ( $\alpha=13 \cdot 10^{-6}$  1/град), втулки 12, 14 и 17 – из сплава D16 ( $\alpha=23.0 \cdot 10^{-6}$  1/град), втулки 13, 15 и 18 – из инвара ( $\alpha=1.6 \cdot 10^{-6}$  1/град).

Механизм работы таким образом составленного термокомпенсатора состоит в следующем. При изменении температуры суммарные деформации корпуса трубы 5 (сталь), держателя (сталь), и втулок 13 и 15 (инвар) будут направлены в одну сторону. При этом суммарные деформации втулок 12, 14, 17 и штока 8 – в противоположную. Длины втулок набора рассчитаны из условия уравнивания разнонаправленных деформаций при колебаниях температуры  $\pm 30^\circ\text{C}$ .

Последовательные соединения втулок термокомпенсатора между собой, по представленной схеме, выполнены на резьбах. Посадки втулок одна в другую обеспечивают минимальные зазоры между ними при колебаниях температуры в заданном диапазоне. Это сделано во избежание заклинивания втулок от температурного изменения их диаметров. Поверхности втулок выполнены с чистотой тонкого точения, а при сборке втулок на них нанесена смазка, заполнившая зазоры. Исполненная конструкция термокомпенсатора для трубы телескопа ЗА-320м в сборе с вторичным зеркалом показана на рис.7.



**Рис.7.** Термокомпенсатор вторичного зеркала.

**Комплектация трубы.** Телескопическая труба ЗА-320м укомплектована, как и ее предшественница, труба ЗА-320 (Бекашев Р.Х., Канаев И.И. и др., 1998 г.), длиннофокусным гидом с окулярным микрометром и искателем, изготовленным на базе объектива МТО-1000. Кроме того, на приемной части новой трубы телескопа смонтированы модернизированный узел фокусировки (выдвижка) с электроприводом, прежний (с трубы ЗА-320) узел светофильтров и ПЗС-камера ST-6. На наружной поверхности трубы смонтирован ограничитель наклона трубы.



## 1.2. Узел фокусировки изображения (выдвижка) с электромеханическим приводом

Существовавший, до принятия решения о необходимости модернизации, узел фокусировки изображения с ручным приводом перемещений при помощи внеосевой винтовой пары вполне удовлетворял своему функциональному предназначению по качествам и пределам подачи. Основная трудность решения данной задачи состояла в способности вписать новый привод в хитросплетение электромеханических устройств, принадлежащих ранее автоматизированному узлу светофильтров (см. Канаев, Девяткин, 2002, п.1.2), которыми выдвижка была забаррикадирована.

Эта задача была выполнена с использованием, как основы, прежних конструкций: втулка, скользящая во втулке, как привод перемещений, с небольшой их доработкой. В результате чего стало возможным подключить к ходовому винту редуктор, построенный на тонкой, но достаточно жесткой плате с вытянутой „ в струну ”- в одну линию, цепью зубчатых пар с шаговым электродвигателем, вынесенным за пределы габарита корпуса узла светофильтров.

Схема осуществленного привода представлена на рис.8. Здесь втулка – держатель 1, закрепленная на оправе трубы телескопа, несет, могущую перемещаться в ней поступательно, втулку 2 - держатель всех последующих (по ходу светового пучка) приборов 15 приемной части трубы телескопа. К наружной поверхности втулки 1 прикреплена жестко ходовая гайка 3. К внешнему торцу выдвижной втулки 2 жестко пристыкована плата 4, на которой и размещены все кинематические элементы электропривода. Это: ходовой винт 5 с трибкой 6, промежуточная (паразитная) трибка 7, два сдвоенных зубчатых колеса с венцами 8-9 и 10-11 и шаговый электродвигатель 13 с зубчатым колесом 12 на валу.

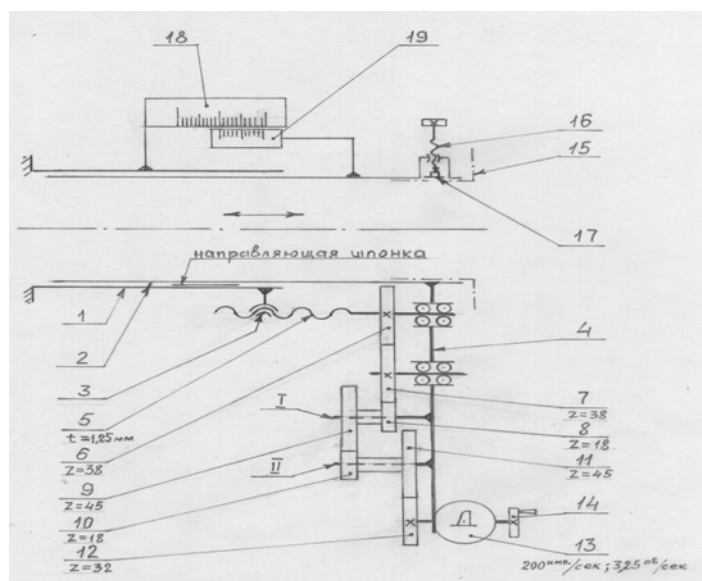


Рис.8. Привод узла фокусировки

Валики ходового винта 5 с трибкой 6 и трибки 7 консольно опираются, каждый, на сдвоенные радиальные шарикоподшипники. Пары 8-9 и 10-11 посажены на консольные, запрессованные в плату 4 оси I и II и на них свободно вращаются. На свободный конец валика электродвигателя 13 насажен маховичок 14, позволяющий производить, в случае необходимости, ручную подвижку втулки 2. Кроме этого нами была изменена конструкция фиксирующего (зажимного) устройства на втулке 2 и улучшена система визуальных измерений величин перемещений втулки 2.

Простой зажимной винт, точно фиксирующий закрепление во втулке 2 узел светофильтров и приемника излучений, заменен на устройство 16-17, в котором винт 16 сцепляет присоединяемую деталь 15 втулкой 2 через сухарь 17 (Ф.Л. Литвин, 1964). Он выполнен в виде сегмента радиусом, равным внутреннему диаметру посадочного места втулки 2, заложен в специальное углубление в плате 4 (со стороны, противоположной той, на которой размещен редуктор). Сухарь связан с винтом 16 шарнирно, что позволяет ему самоустанавливаться на поверхности сопрягаемой детали. Не менее важным достоинством такого вида фиксирования является то, что сопрягаемая деталь здесь предохраняется от точечного смятия, нарушения формы поверхности, ее чистоты и пр.

В системе визуальных измерений подвижек втулки 2 применено двухшкальное линейное устройство. В нем отсчет шкалы 18 (цена деления 1 мм.), закрепленной на неподвижной втулке 1, производится с помощью нониуса 19 с точностью цены его деления 0,1 мм. Нониус 19 закреплен на подвижной втулке 2.

В приводе устройства и его частично модернизированных узлах применены некоторые стандартизированные и серийно выпускавшиеся отечественной промышленностью изделия. Из них можно назвать такие, как сдвоенные зубчатые колеса 8-9 и 10-11, а также оси I и II из редуктора электродвигателя РД-09 (СД-54), шкала 18 и нониус 19 от штангенциркуля, шаговый электродвигатель ПБМГ-200-265, радиальные шарикоподшипники миллионной серии.

Привод, при максимальной приемистости шагового электродвигателя, равной 200 имп/сек ( $n = 3,25$  об/сек), сообщает втулке 2 скорость линейного перемещения  $V = 0,55$  мм/сек.

### 1.3. Ограничитель наклона трубы телескопа вблизи уровня горизонта

Схема устройства представлена на рис.9 и 10. Оно состоит из платы 2, в центре которой закреплена неподвижная ось „0”, служащая подшипником маятника 3. К свободному концу маятника прикреплен постоянный магнит 4. В зонах действия магнитного поля магнита 4, зеркально, под определенными углами  $\alpha$  к одному из диаметров, описываемой свободным концом рычага 3 окружности, касательно к ней, на плате 2 размещены два магнитоуправляемых контакта (МК) 5 и 6. (Канаев И.И., Девяткин А.В., 2002). На плате 2, также с внешних сторон угла  $180^\circ - 2\alpha$ , имеются упоры 7 и 8, ограничивающие поворот маятника 3 за пределы обозначенного угла.

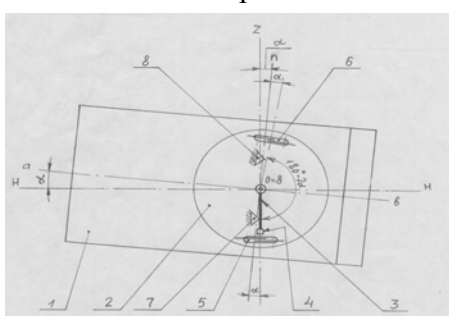


Рис. 9. Ограничитель наклона трубы

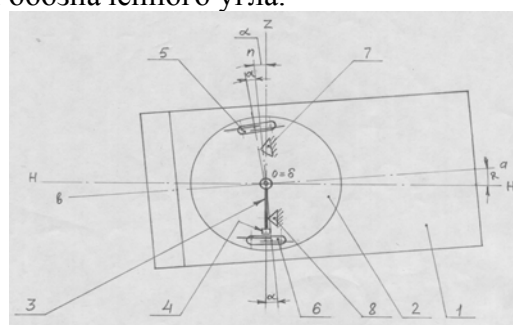


Рис.10. Ограничитель наклона трубы

Плата 2, с закрепленными на ней деталями и приборами, монтируется на внешней поверхности трубы телескопа в любом месте с соблюдением следующих условий:

- ось „0 ” подшипника маятника 3 должна быть параллельна оси  $\delta$  (оси склонений) трубы телескопа;
- раствор угла  $180^\circ - 2\alpha$ , ограничивающий зону качания маятника 3, должен быть направлен в сторону, противоположную входному отверстию трубы телескопа, а его биссектриса должна быть параллельна оси трубы телескопа  $a - в$ . Следует заметить, что

показанное на рис.9 и 10 совпадение осей „0” (центра устройства) и  $\delta$  (оси склонений) условно. Угол  $\alpha$  может быть назначен сколь угодно малым, в зависимости от того, насколько оптико-механическая система трубы телескопа, рассчитанная на работу в направлении ее оси  $a - b$  в зонах выше горизонта, гарантирована от расстройств при приближении к нему (горизонту).

Функционирование описанного устройства заключается в том, что при наклоне оси трубы 1 на угол  $\alpha$ , маятник 3 с постоянным магнитом 4 встает напротив МК (на рис.9 он обозначен поз. 5) и, воздействуя магнитным полем, замыкает его контакты, давая этим сигнал управляющей системе на остановку приводов либо установочного поворота трубы 1 по оси склонений  $\delta$ , либо микрометрической ее подачи вокруг той же оси. При перекладке трубы телескопа входным отверстием „ $\alpha$ ” через зенит Z в положение, показанное на рис. 10, поворачивается вместе с ней и система, закрепленная на плате 2, на зеркально отраженную относительно нормали „n” к оси  $a - b$  трубы. При этом маятник 3 описывает дугу с центром в точке „0” внутри угла  $180-2\alpha$ . При наклоне оси трубы телескопа  $a - b$  на угол  $\alpha$  по отношению к горизонту H маятник 3 так же, как и в варианте, описанном для рис. 9, войдет во взаимодействие с МК 6 со всеми последующими реакциями на него управляющей системы соответствующих приводов.

Настоящее устройство для трубы телескопа 3А-320 было спроектировано и изготовлено опытным производством ГАО и успешно эксплуатируется с середины 2002 года. В нем были применены такие унифицированные (с некоторыми доработками) детали и узлы, как: постоянный магнит, оправа для него и две платы с герконами МКА-10701В.

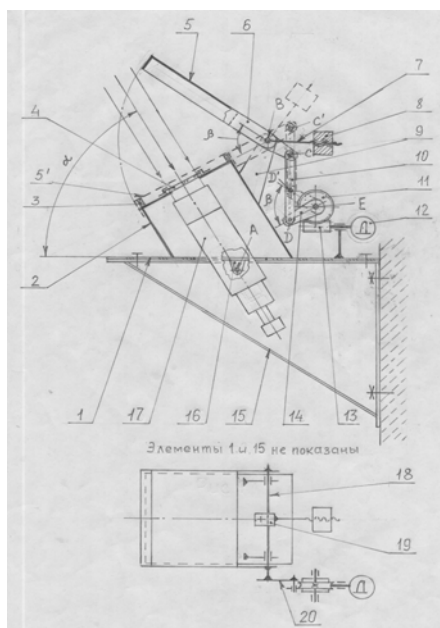
С целью уменьшения внешнего габарита конструкции, она сконструирована так, что магнит 4 в зоне взаимодействия с МК располагается не по касательной к их ампулам, а над ними. Платы с МК и упоры-ограничители перемещений рычага снабжены соответствующими регулировочными устройствами.

#### ***1.4. Оптико-механическое устройство службы „Ясное небо”***

Устройство предназначено для систематического отслеживания в автоматическом режиме видимости Полярной звезды и, как следствие, оценки состояния неба (оно „есть” или его „нет”) в пункте проведения астрономических наблюдений.

Принципиальная схема устройства представлена на рис.11. Основанием прибора служит горизонтальная плата 1. На ней в плоскости меридиана под углом географической широты места  $\alpha$  установлена оптическая трубка 17. Будучи направленной на север, она принимает световой поток от Полярной звезды. В качестве приемника изображения звезды в трубке применена ПЗС - камера. Оптическая система трубки рассчитана так, что на матрице ПЗС-камеры помещается все поле суточного движения звезды. Опорными элементами трубки являются две цилиндрические цапфы - полуоси А, закрепленные по бокам ее корпуса, и собственно опоры 16, одна из которых снабжена фиксатором - зажимом. Опоры 16 прикреплены к плате 1 снизу для удобства работы (обслуживания) опоры с зажимом во время юстировки прибора. Цапфы А соосны, их общая ось перпендикулярна оптической оси трубки 17 и обе лежат в одной плоскости.

Верхняя часть трубки 17, несущая объектив, заключена в водонепроницаемую защитную камеру 2. Ее внешний торец наклонен под углом  $90-\alpha$  к плоскости платы 1 и накрыт пластиной с отверстием, соосным с оптической системой трубки 17. Это отверстие предназначено, в основном, для пропуска светового пучка от Полярной звезды, но диаметр его увеличен до размера, который позволяет иметь доступ к объективу оптической трубки 17 для его профилактики. Отверстие закрыто защитным стеклом 4, гидроизолированным по контакту с плоскостью заглушки.



**Рис.11.** Прибор для наблюдений Полярной звезды.

Для предотвращения излишних загрязнений защитного стекла 4, в периоды между наблюдениями и в ненастья, прибор оборудован дополнительным защитным устройством – откидной крышкой 5. Процессы накрывания крышкой торца защитной камеры и удаления крышки из поля зрения трубки 17 механизированы и происходят без физического участия оператора. Для этого, во-первых, крышка 5 „привязана” к прибору и, во - вторых, она снабжена специальным приводным механизмом, управляемым дистанционно. „Привязка” крышки 5 к прибору заключается в том, что она жестко соединена через кронштейны 6 (продолжений продольных отбортовок крышки 5) с валиком 18 и вместе с ним может поворачиваться на некоторый угол  $\beta$  в отверстиях опор - кронштейнов 9. Последние жестко закреплены на тыльной стенке защитной камеры 2. Угол  $\beta$  достаточен для того, чтобы световой пучок от наблюдаемой звезды беспрепятственно прошел к объективу трубки 17.

Приводом крышки 5 для ее поворота на угол  $\beta$  является кривошипно-шатунный механизм с червячной парой и шаговым электродвигателем. Кривошипно-шатунный механизм составлен из кривошипов 14 (закреплен на червячном колесе 11) и 20 (жестко связан с валиком 18), и шатуна 10, шарнирно соединяющего кривошипы через пальцы, соответственно D и C. Плечи кривошипов 14 и 20 равны ( $DE = BC$ ). Поэтому и углы их поворотов равны.

Червячная пара 13-11 приводится в действие шаговым электродвигателем 12, управляемым дистанционно с пульта. Системой управления шаговым электродвигателем предусмотрен поворот его вала так, чтобы червячное колесо 11 (с учетом редукции червячной пары) повернулось на угол  $\beta$ .

Следует заметить, что с целью облегчения чтения кинематической схемы привода, она на рис.11 изображена зеркально относительно действительного ее размещения. В исполненном приборе привод закреплен на боковой стенке защитной камеры 2. Оси кривошипов 14 и 20 при этом параллельны. Однако указанное несоответствие не меняет сути решения проблемы, но исполненное, на наш взгляд, удовлетворяет условию рациональной компоновки устройства.

Электродвигатель 12 и червячная пара 13–11 защищены от атмосферных осадков кожухом.

Момент от веса крышки 5, нагружающий привод, уравновешен противовесом 8.

Поскольку настоящий прибор предназначен для эксплуатации на открытом воздухе, при силовом расчете привода крышки были учтены как собственные (постоянные) нагрузки (вес крышки плюс вес противовеса), так и нагрузки от внешнего воздействия – ветровые и снеговые. За максимальную расчетную скорость ветра принята ее прогнозируемая величина, по которой дается штормовое предупреждение – 25 м/с.

Нормативная снеговая нагрузка, принятая, как расчетная, для района Санкт-Петербурга равна  $100 \text{ кг/м}^2$  при коэффициенте перегрузки, равном единице (Тахтамашев, 1955).

Для предотвращения удара крышки 5 о торцовую поверхность камеры 2 с защитным стеклом 4, а также для демпфирования возможного выбега приводной пары 13-11, торцовая поверхность камеры 2 обрамлена амортизатором из морозостойкой микропористой резины.

Прибор платой 1 закреплен на двух кронштейнах 15 и, посредством анкерных болтов, - к наружной поверхности стены (северной) строения, выбранного для его установки. Нижняя часть прибора (полость под платой 1 внутри кронштейнов 15) ограждена от атмосферных осадков, ветра и пыли брезентовым пологом с соответствующими затяжками и застежками (на схеме рис.1 не показан).

Юстировка прибора производится:

- по широте – наклоном оптической трубки 17 в опорах 16 с закреплением (фиксированием) ее положения зажимом одной из полуосей в ее опоре, имеющей зажим;
- по азимуту – поворотом всей системы в горизонтальной плоскости на кронштейнах 15, имеющимися приспособлениями (на схеме рис.11 не показаны).

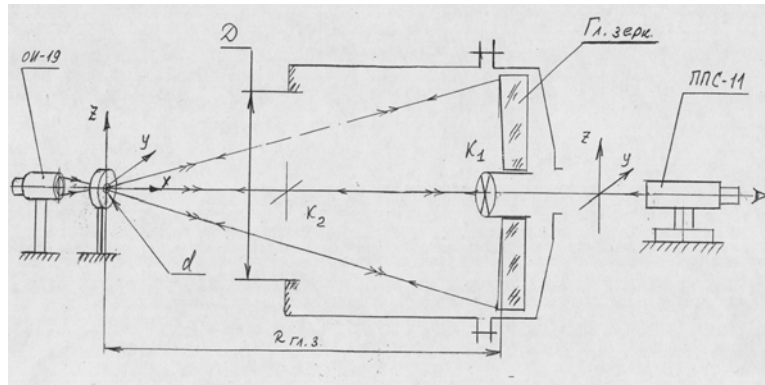
Оптическая система трубки 17 составлена из готового объектива ( $D_{\text{св.}} = 36 \text{ м; } f = 90 \text{ мм}$ ) и ПЗС камеры WAT 902A (размер рабочей площадки матрицы  $5,0 \times 6,4 \text{ мм}$ ).

В приводе использована червячная пара с редукцией  $1/30$  при модуле зацепления  $m = 0,5 \text{ мм}$  и шаговый электродвигатель ДШИ 300/300 –А. При частоте, питающей электродвигатель, 200 имп/с привод обеспечивает рабочий цикл (подъем или опускание крышки 5 на угол  $\beta = 65^\circ$ ) за 5-6 секунд.

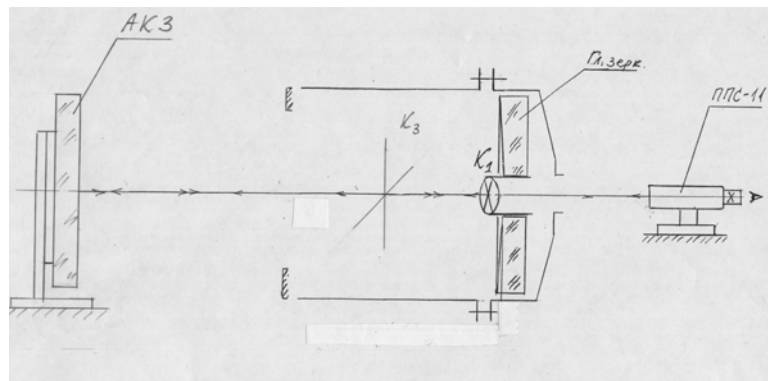
### **1.5. Юстировка оптической системы телескопа**

Методика юстировки оптической системы ЗА-320м заключается в следующем. Главное зеркало укладывается в оправу и регулировочными винтами торцевых опор горизонтируется так, чтобы его верхний край был параллелен плоскости посадочной поверхности фланца с точностью  $\Delta = 0.1-0.2 \text{ мм}$ . Далее с помощью упоров радиальной разгрузки зеркало центрируется с точностью  $\Delta$  в оправе. Таким образом, параболическая поверхность главного зеркала принимается нами за базовую. Перед установкой оправы с зеркалом на трубу в отверстие зеркала вставляется центрировочная втулка с перекрестием  $K_1$ , точность установки которого  $\Delta$ . После установки оправы с зеркалом на входном торце трубы натягивают перекрестие  $K_2$ , центр которого выставляется с точностью  $\Delta$  относительно диаметра проточки для помещения промежуточного кольца спайдера вторичного зеркала. Для лучшей видимости нити перекрестий должны быть белыми и подсвечиваться дополнительным источником света. Центры перекрестий  $K_1$  и  $K_2$  задают направление геометрической оси трубы телескопа.

За оправой главного зеркала телескопа на расстоянии 500-600 мм устанавливается прибор ППС-11, который позволяет визировать любые марки путем перефокусировки на расстояниях от 0.4 м до  $\infty$ , сохраняя при этом постоянство направления линии визирования. Юстировочными подвижками перекрестие сетки окуляра ППС-11 совмещается с крестами  $K_1$  и  $K_2$ . В результате визирная ось прибора ППС-11 совмещается с геометрической осью трубы.



**Рис.12.** К юстировке оптической системы (определение инструментально-оптической оси).



**Рис.13.** К юстировке оптической системы.

Далее определяется положение инструментально-оптической оси главного зеркала. Для этого перед трубой устанавливается рельс оптической скамьи и на нем ставится рейтер с непрозрачным белым экраном и осветителем. В центре экрана имеется диафрагма  $d$  с отверстием диаметром 1.0-1.5 мм. Перемещая рейтер вдоль оптической оси и в перпендикулярных направлениях, добиваемся резкого изображения диафрагмы и совмещаем изображение диафрагмы с отверстием в самой диафрагме. Далее юстировочными подвижками совмещаем перекрестие сетки окуляра ППС-11 с крестом  $K_1$  и центром диафрагмы  $d$ . Таким образом определяется положение инструментально оптической оси главного зеркала. Эта ось проходит через 3 точки: через центр перекрестия окуляра трубы ППС-11, через центр перекрестия  $K_1$ , который практически близок к вершине параболической поверхности главного зеркала и через центр кривизны этой поверхности, материализуемый центром диафрагмы  $d$ . Необходимо, также, убедиться в том, чтобы эта ось была близка к оси, задаваемой перекрестиями  $K_1$  и  $K_2$ , т.к. это может привести к большой коллимационной ошибке установки трубы. В нашем случае, при изготовлении трубы технологически были выдержана параллельность и перпендикулярность фланцев на уровне 0.01 мм.

Далее, крест  $K_2$  удаляется, а внутри трубы натягивается перекрестие  $K_3$ , центр которого должен находится на инструментально-оптической оси. Рейтер с экраном и осветителем удаляется и перед трубой устанавливается плоское автоколлимационное зеркало АКЗ на платформе, имеющей юстировочные подвижки. В трубе ППС-11 включается подсветка автоколлимационной марки, и прибор переводится в режим формирования на выходе из него параллельного пучка. Юстировочными подвижками плоскость зеркала АКЗ выставляется перпендикулярно инструментально-оптической оси.

После этого на трубу монтируется блок спайдера с вторичным зеркалом. На вторичном зеркале заранее в его геометрическом центре ставится метка белого цвета. С

помощью юстировочных подвижек спайдера метка на зеркале совмещается с инструментально-оптической осью главного зеркала. Затем юстировочными подвижками осуществляется совмещение центров отраженного изображения креста  $K_3$  с крестами  $K_3$  и  $K_1$ . Дальнейшая юстировка осуществлялась по изображению автоколлимационной марки прибора ППС-11.

### **1.6. Совершенствование электронного оборудования**

В процессе эксплуатации комплекса произведены доработки некоторых узлов электронного оборудования с целью повышения их надежности, устранены выявленные недочеты аппаратного и программного обеспечения, добавлены новые узлы:

- установлены концевые выключатели для ограничения движения трубы в режиме грубого наведения, и произведена соответствующая доработка схем БКУ (Блок Коммутации и Управления);
- введен узел переключателя режимов работы УПП (Устройство Плавного Пуска) привода купола для изменения режима пуска двигателя (грубее-плавнее), что в свою очередь зависит от текущего состояния механики привода (например, при низкой температуре разгон осуществляется тяжелее, при высокой – легче);
- разработаны схемы узлов автофокусировки и затвора включающие в себя фотодатчики концевиков и шаговые двигатели;
- разработан Блок Расширения (БР) БКУ, позволяющий подключить к комплексу два дополнительных привода с шаговыми двигателями – узел автофокусировки и узел затвора. Управление этими приводами осуществляется так же, как и остальными – с помощью БКУ и БУ ШД АГАТ (Блок Управления Шаговыми Двигателями);
- разработан новый вариант датчика вращения купола с температурной стабилизацией и улучшенной чувствительностью;
- разработано автоматическое устройство для обогрева павильона телескопа при уровне влажности, близком к 100%.

Произведены изменения и доработки программного обеспечения (ПО) низкого уровня (микропрограммы БКУ и БУ ШД АГАТ на ассемблере микроконтроллера PIC16).

## **2. Совершенствование программного обеспечения для отсчета лимбов**

### **2.1. Об использовании лимбов в астрометрии и приборов для их отсчета**

В астрометрии с незапамятных времен используются разделенные лимбы для определения углов между звездами и другими направлениями. В качестве прибора для получения отсчета лимба использовался глаз человека. В середине XX века в практику астрометрических наблюдений на меридианных инструментах, оснащенных лимбами, были внедрены фотокамеры (см., например, Багильдинский, 1967). Для измерения снимков лимба создавались специальные машины, такие как машины Стафеева (Стафеев, 1967), Сухарева и Шкутова (Сухарев, Шкутов, 1967), Платонова и др. В дальнейшем были созданы фотоэлектрические приборы для получения отсчета лимбов, например для ФВК (Багильдинский, 1978). Появление ПЗС-приемников позволило решать эту проблему на более высоком уровне. На телескопе МК-200 в Пулкове в середине 1980-х годов была создана система на базе ПЗС-линейки, которая была успешно апробирована и были получены надежные результаты (Михельсон, 1989). При проектировании телескопа МАГИС в конце 1980-х годов было решено использовать ПЗС-матрицы для отсчета круга (Канаев и др., 1997). Ранее, в середине 1980-х годов, в США в Морской обсерватории во Флафстафе была создана такая же система. Было разработано программное обеспечение для распознавания цифр и получения отсчета лимба. Для решения

аналогичной задачи для МАГИСа Г.А. Гончаровым было создано соответствующее матобеспечение (Канаев и др., 1997).

Впервые для параллактической монтировки АПШ-5 подобная система была создана на телескопе ЗА-320м. При этом использовались стеклянные лимбы, посаженные жестко на оси параллактической монтировки. Надо отметить, что В.А. Чернобай в конце 1980-х годов первым для монтировок типа АПШ-5 и АПШ-6 использовал стеклянные лимбы для отсчета показаний часового угла.

При создании датчика угла поворота для автоматизированной системы ЗА-320 именно на опыт указанных выше разработок опирались наши работы (Бекашев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин А.В., 1998; Канаев И.И., Девяткин А.В., 2002)

В работе (Поляков, 2002) указывается, что «алгоритм чтения цифр успешно внедрен в систему управления пулковским телескопом ЗА-320», что не соответствует истине. Все разработки на ЗА-320 созданы авторами и являются оригинальными. Программное обеспечение было создано на языках высокого уровня (C/C++, Ada'95, Delphi и Python) без привлечения чьих-либо программ невысокого (или высокого) уровня и очевидных алгоритмов.

## **2.2. Новое программное обеспечение для отсчета лимбов**

Задача определения положения трубы ЗА-320 сводится к задаче программного распознавания отсчета соответствующего круга. Данная задача была реализована Э.В.Корниловым и использовалась при наблюдениях на ЗА-320 (Канаев, Девяткин и др., 2002), но давала сбои в распознавании цифр (до 10%). В связи с этим было решено написать новый вариант программного распознавания отсчетов лимбов.

**Стратегия новой реализации** осталась прежней:

- снятие фона, нормирование изображения;
- обнаружение цифр и штрихов в кадре;
- распознавание цифр и определение целой части отсчета;
- определение дробной части отсчета по расположению цифр и штрихов относительно центра картинki.

На рис.14 приведен пример ПЗС-кадра с изображением шкалы лимба часового угла.

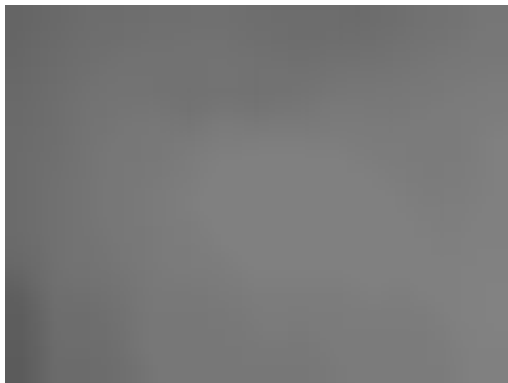


**Рис.14.** ПЗС-кадр с изображением шкалы лимба.

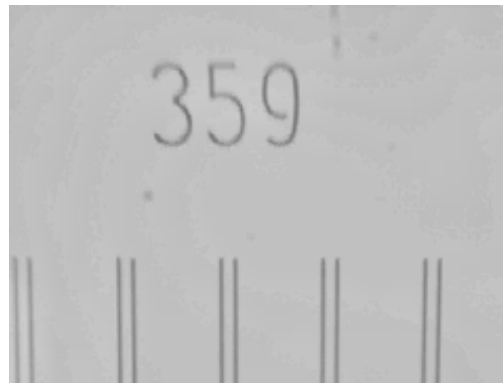
Как видно, на изображении шкалы лимба имеется значительный фон, а также пятна “грязи”. В данной реализации фон изображения находится как неоднородное поле методом оценки неоднородности поля по большой поверхности. Выделенный фон в виде изображения представлен на рис.15. После снятия найденного фона изображение становится гораздо более гладким и контрастным (см. рис.16). Остаточные значения составляющей фона малы по сравнению со значениями сигнала на значимых пикселях картинki.



Заслуживает внимания наличие “грязи” в кадре в виде пятен и крупных точек, которые могут помешать корректному распознаванию цифр и двойных штрихов на изображении шкалы лимба. Местоположение “грязи” в кадре каждого лимба постоянно или меняется крайне редко, что делает возможным учесть ее при распознавании отсчетов.

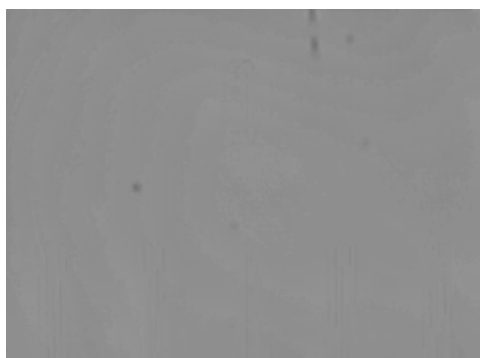


**Рис.15.** Фон изображения.

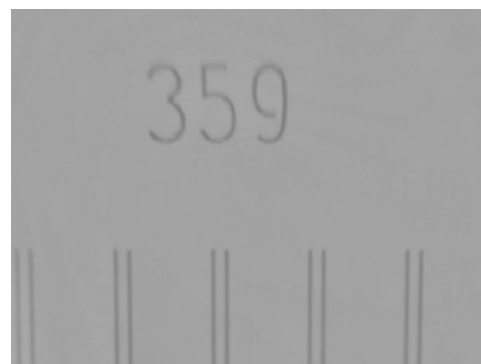


**Рис.16.** Изображение шкалы лимба после снятия фона.

“Грязь” исключается из рассмотрения при помощи заранее созданных “шаблонов грязи”, которые накладываются на изображение. “Шаблон грязи” создается заранее для каждого лимба и выглядит, как показано на рис.17. Изображение после наложения на него “шаблона грязи” показано на рис.18.



**Рис.17.** Шаблон “грязи”.



**Рис.18.** Изображение, после вычитания “грязи”.

После удаления фона и “грязи” в изображении можно приступить к распознаванию отсчета отдельного лимба, что сводится к выделению штрихов и распознаванию цифр над ними. Штрихи ищутся в нижней трети изображения как области связанных между собой пикселей, с величиной сигнала, превышающей заданный порог, начиная от центра изображения поочередно вправо и влево. Так как интерес представляют только двойные штрихи, то при обнаружении очередного штриха ищется следующий в том же направлении (в начале прохода находятся три штриха в одном направлении, чтобы определить, какая пара из них является двойным штрихом). Над очередным найденным двойным штрихом выделяется область, которая проверяется на возможность наличия в ней цифр. Цифры ищутся также как области связанных между собой пикселей, количество которых должно быть сравнимо с заранее вычисленным количеством значимых пикселей в одной из цифр “1” отсчета 111. Однако, после исключения “грязи”

зи” из изображения, область связанных пикселей любой длины может считаться значимой. Если возможных цифр в выделенной области не обнаружено, алгоритм меняет направление поиска двойных штрихов на противоположное. Это сделано затем, чтобы при наличии на изображении шкалы лимба двух чисел принять к рассмотрению то из них, которое располагается ближе к центру картинке и, следовательно, должно быть видно целиком и менее искажено.

Если в выделенной области над двойным штрихом найдены цифры, можно приступить к их распознаванию. Для этого область, содержащая цифры, сначала обрезается по крайним пикселям, содержащим сигнал выше порогового значения, а затем сравнивается поочередно с шаблонами отсчетов, заготовленными заранее, для каждого лимба отдельно. Обрезанная по крайним пикселям область показана на рис.19.



**Рис.19.** Область цифр

В предыдущей реализации каждая цифра целой части отсчета распознавалась отдельно, что, возможно, и влекло за собой ошибки. В настоящей реализации было решено распознавать целую часть отсчета целиком, как число, и, соответственно, изготовить должное количество шаблонов – по 360 для каждого лимба. Шаблоны изготавливаются заранее с использованием специально созданного программного обеспечения, и представляют собой простую базу данных, каждый элемент которой включает изображение отсчета, обрезанное по крайним значимым пикселям, а также рассчитанный центр тяжести этого изображения, номер отсчета, которому соответствует шаблон, и дополнительную справочную информацию.

Алгоритм сравнения изображений совмещает центры масс распознаваемой области и шаблона, и начинает сравнивать два изображения попиксельно, методом concentric squares, от меньшего к большему, начиная от центра масс, подсчитывая при этом количество несоответствующих пикселей. Как только это количество превысит допустимое значение - а значит распознаваемая картинка не соответствует данному шаблону, - алгоритм прекращает дальнейшее сравнение и берет к рассмотрению следующий шаблон. Это сделано для сокращения времени анализа каждого шаблона. Если количество несоответствующих пикселей после сравнения всего изображения с шаблоном не превысило допустимое значение, шаблон считается соответствующим распознаваемому числу и его номер и есть искомая целая часть отсчета. Следует также отметить, что если двойной штрих, над которым были обнаружены цифры, был выделен справа от центра изображения, то целая часть отсчета будет на единицу меньше номера соответствующего ей шаблона. Для определения дробной части отсчета строятся кривые нормального распределения сигналов пикселей обоих штрихов, составляющих двойной штрих, над которым расположено определенное ранее число отсчета. Затем ищется абсцисса этого числа как геометрический центр между высшими точками кривых нормального распределения. Дробная часть отсчета вычисляется относительно центра анализируемого изображения, с учетом того факта, что по шкале лимбов расстояние между двумя двойными штрихами составляет 20 угловых минут.

### **3. Программное обеспечение системы управления**

Программное обеспечение системы управления автоматизированным комплексом ЗА–320 (пакет **TelescopeControl / CameraControl**) претерпело также ряд изменений. Модульный подход к разработке программного обеспечения полностью оправдал себя

в ходе эксплуатации и модернизации комплекса. Он позволил, в частности, реализовать поддержку новых аппаратных узлов (таких, как блоки автогидирования и фокусировки) и алгоритмов работы без заметной модификации существующего программного кода и интерфейсов оператора. Это значительно снизило время, затрачиваемое на отладку и тестирование.

Среди других изменений, коснувшихся многих компонентов программного комплекса, можно упомянуть введение модулей эмуляции аппаратного обеспечения, позволяющих проводить отладку других модулей системы без подключения к реальной аппаратуре. Данный подход значительно ускоряет отладку системы в целом и позволяет осуществить проверку ее функционирования в различных нештатных ситуациях, которые трудно или нежелательно осуществить на практике.

### 3.1. Подсистема точного времени

**Подсистема точного времени** AccuTime реализована в виде самостоятельного программного пакета, содержащего комплект разработчика приложений (SDK) для языков C/C++, Ada'95, Delphi и Python. Это позволяет использовать AccuTime в составе других программных комплексов и адаптировать ее к различным источникам временного сигнала.

### 3.2. Служба ведения журнала

В самостоятельную подсистему в составе комплекса была выделена **служба ведения журнала**. Посредством простого API каждый компонент комплекса, работающий на любой управляющей станции (LCU) локальной сети ЗА–320, имеет возможность регистрировать события в едином журнале, расположенном (в текущей конфигурации) в каталоге с наблюдениями на каждую дату. В журнале, в порядке прибытия, регистрируются все сообщения, с указанием времени возникновения, источника сообщения, его типа (ошибка, предупреждение, информация, отладочное сообщение и т. д.) и текста. При использовании файловой системы (ФС), поддерживающей систему безопасности (большинство ФС ОС семейства Unix и NTFS в Windows) файл журнала защищен от непреднамеренной модификации наблюдателем. Подсистема содержит также модуль графического пользовательского интерфейса (GUI) для визуального контроля событий системы в реальном времени.

The screenshot shows a window titled "Datalogger" with a menu bar containing "File" and "Tools". Below the menu bar, it displays "Messages: 7682 (149 errors)". The main area contains a table with the following data:

Time	L	Source	Message
2004-10-26 19:17:08.535		telctl	TelescopeControl 1.2 Revision 1 (build 267)
2004-10-26 19:17:08.536		telctl	Copyright © 2001-2004 V. Kouprianov, Photometry lab, Pulkovo Observatory (v.k@bk.ru)
2004-10-26 19:17:08.536		telctl	Host OS: Windows 2003 Enterprise Edition (version 5.2, build 3790H)
2004-10-26 19:17:08.536		AccuTime	<telctl>Initializing library
2004-10-26 19:17:08.559		telctl	Timer: Parallel Port Interface to External Time Source v1.2.3.52
2004-10-26 19:17:08.560		telctl	Module loaded: AGATE/BKU Control System (Ada95)
2004-10-26 19:17:10.296		telctl	Module loaded: ZA-320 Ephemeris Interpolation Module
2004-10-26 19:17:12.071		telctl	Ephemerides calculated (184 objects).

### 3.3. Подсистема управления телескопом

Наиболее существенные изменения коснулись **подсистемы управления узлами телескопа** TelescopeControl. Это связано с введением полностью **автоматического**

режима работы комплекса, который является в настоящее время основным. В нашей терминологии,

- ручной режим предполагает **полный контроль** оператора над ходом наблюдений, локальный или удаленный, с явным указанием координат объектов и последовательности операций (наведение, включение часового ведения и автогидирования, установка купола, выбор фильтров, фокусировка, выбор параметров и запуск экспозиции и т. д.) посредством элементов управления пользовательского интерфейса системы; этот режим может применяться для выполнения некоторых нестандартных видов наблюдений, не поддающихся алгоритмизации;
- полуавтоматический режим подразумевает **самостоятельное** выполнение системой **стандартной последовательности** перечисленных выше действий для каждого объекта наблюдательной программы; при этом оператору предоставляется возможность выбора последовательности наблюдений объектов, а в случае возникновения ошибки системой выводится диагностическое сообщение, и дальнейшая работа приостанавливается;
- в автоматическом режиме **система управления** берет на себя также **выбор** последовательности наблюдения объектов в течение ночи, исходя из требования **оптимальных** условий наблюдения для каждого объекта и **приоритетов**; в задачи оператора входит включение аппаратуры и запуск системы в начале ночи, слежение (удаленное, с использованием протокола RDP) за ходом наблюдений с возможной приостановкой их при ухудшении метеоусловий и остановка системы по окончании наблюдений;
- в автономном режиме комплекс функционирует неограниченно долго без вмешательства наблюдателей, в промежутках между наблюдениями находясь в ждущем режиме; включение аппаратуры, подготовка к наблюдениям, их проведение, слежение за метеоусловиями и остановка с переходом в ждущий режим осуществляются системой автоматически; обслуживание комплекса при этом сводится к периодической профилактике и проверке функционирования аппаратных узлов и корректировке списка наблюдаемых объектов.

Для реализации автоматического режима работы в подсистему управления телескопом введен интерфейс управления списком объектов. Он осуществляет связь с модулем расчета эфемерид, позволяющим вычислять экваториальные координаты, блеск и видимую скорость движения каждого объекта на любой момент времени. Кроме того, данный интерфейс отвечает за выдачу расширенных характеристик каждого объекта:

- 1) название (идентификатор) объекта,
- 2) тип объекта (планета, спутник, астероид, комета, Солнце, Луна, «звезда»),
- 3) число и длительность требуемых экспозиций,
- 4) набор фильтров, в которых нужно наблюдать объект,
- 5) относительный приоритет объекта в общей программе наблюдений.

При отсутствии явного указания параметров экспозиции они выбираются автоматически, в соответствии с блеском объекта и скоростью его движения.

Реализован модуль расчета эфемерид методом интерполяции протабулированных значений координат, содержащихся во внешних файлах. Сами значения рассчитываются заранее, на определенный временной интервал, при помощи программной системы **EPOS**. В дальнейшем, по мере появления версии **EPOS** под ОС Windows, предполагается прямая интеграция системы **EPOS** в программный комплекс управления ЗА–320 в качестве модуля расчета эфемерид.

В связи с обширностью наблюдательной программы, в настоящее время на телескопе ЗА–320 задействован имеющийся в подсистеме управления ПЗС-камерой режим **библиотеки темновых кадров**. В этом режиме темновой кадр для заданной продолжительности экспозиции и температуры камеры снимается не непосредственно перед экс-

позицией, а заранее, до начала наблюдений, и используется затем в течение всей ночи. Практика показала, что, при условии сохранения первоначально заданной температуры камеры, данный режим не влияет на качество получаемых кадров, позволяя существенно сократить потери наблюдательного времени. Подсистема TelescopeControl содержит средства для автоматизированной подготовки библиотеки темновых кадров для всех используемых длительностей экспозиции.

**Выбор последовательности наблюдения объектов в автоматическом режиме работы** осуществляется на основании текущих координат объектов и их приоритетов. Основным требованием при этом является обеспечить наблюдение каждого объекта, по возможности, вблизи верхней кульминации. В настоящее время для этого используется следующая логика сортировки объектов:

1. Объекты наблюдаются в порядке убывания *приоритетов*. Объекты с более низким приоритетом наблюдаются, только если в данный момент нет объектов с более высоким приоритетом, пригодных к наблюдениям по приведенным ниже критериям.
2. *Ненаблюдаемыми* в данный момент считаются объекты с зенитным расстоянием  $z > 76^\circ$  (все числовые значения здесь и далее являются параметрами системы управления и могут быть изменены) и блеском  $m > 18.5^m$  (этот параметр может корректироваться также в соответствии с погодными условиями).
3. Первыми наблюдаются *заходящие* объекты, в порядке убывания зенитного расстояния  $z$ .
4. По исчерпанию списка заходящих объектов, наблюдаются объекты в интервале  $\pm 1^h$  от *меридиана*, в порядке убывания часовых углов.
5. По исчерпанию списка объектов в кульминации, наблюдаются те *восходящие* объекты, текущее  $z$  которых не превосходит  $50^\circ$ , либо  $z$  в верхней кульминации  $+5^\circ$ .
6. Если таковых нет, и отсутствуют пригодные к наблюдениям объекты с более низким приоритетом, система переходит в *ждущий режим*.

### Другие новые возможности подсистемы TelescopeControl

❖ Поддержка автогидирования → компенсация неточности установки телескопа и часового ведения → увеличение максимальной продолжительности экспозиции. В *ручном* режиме может при необходимости включаться оператором перед началом экспозиции.

В остальных режимах оно включается *автоматически* для экспозиций продолжительностью больше заданной (обычно  $300^s$ ).

В настоящее время — модуль автогидирования на основе дополнительной ПЗС-камеры *SBIG ST-6*.

- *Перед началом* гидирования — однократная экспозиция всего поля;
- автоматически *выделяются* все *звезды*,
- среди которых *выбирается* гидирующая звезда. Критериями выбора служат: удаленность от краев поля, хорошее качество изображения звезды (отсутствие насыщения, хорошее отношение «сигнал/шум», малая асимметрия профиля) и отсутствие в непосредственной близости других звезд.
- При необходимости, поле гида может быть *выведено на экран*, а выбор гидирующей звезды скорректирован *вручную*.
- *В ходе* экспозиции — с заданной периодичностью делается снимок *небольшой* области вокруг гидирующей звезды,
- определяется *центр тяжести* по этой области (в случае ПЗС-камеры ST-6 данная операция реализована в программе *CPU* самой *камеры* и *не требует загрузки* изображения в управляющий компьютер)

- и дается команду на *отработку* требуемой поправки приводами *тонкого движения*.

Усовершенствован также **алгоритм наведения на объект**.

- Текущий объект находится достаточно *близко* к предыдущему → наведение *только* приводами *тонкого движения* → существенное *ускорение* наведения для групп близко расположенных объектов (например, спутников планет).
- **Компенсация** возможных ошибок *датчика положения* трубы на основе информации о текущем положении и предсказания ожидаемых значений отсчетов датчика.
- Объекты, находящиеся в данный момент *на западе*, низко над горизонтом → *восточное* положение трубы (круг E); *на востоке* → *западное* положение трубы (круг W); объекты вблизи *меридиана* могут наблюдаться при *любом* круге. В соответствии с этим требованием — автоматическая перекладка инструмента перед наведением.
- Автоматическая **выборка люфтов** привода тонкого наведения — осуществляется при каждой *смене направления движения* по соответствующей оси ( $t, \delta$ ).
- ❖ Значительно увеличена надежность системы управления по отношению к аппаратным сбоям — определяющий фактор для реализации **автономного** режима работы системы.
  - **несколько попыток** повтора операции;
  - **корректирующие шаги** — возврат трубы в нормальное положение при наезде на концевик, реинициализация датчика положения купола, сдвиг трубы при попадании в область неустойчивого распознавания изображений лимбов и т. д.;
  - при **неудаче** всех попыток скорректировать ошибку система переходит к следующему объекту; по завершении программы делается повторная попытка наблюдения того же объекта.

### Автономный режим

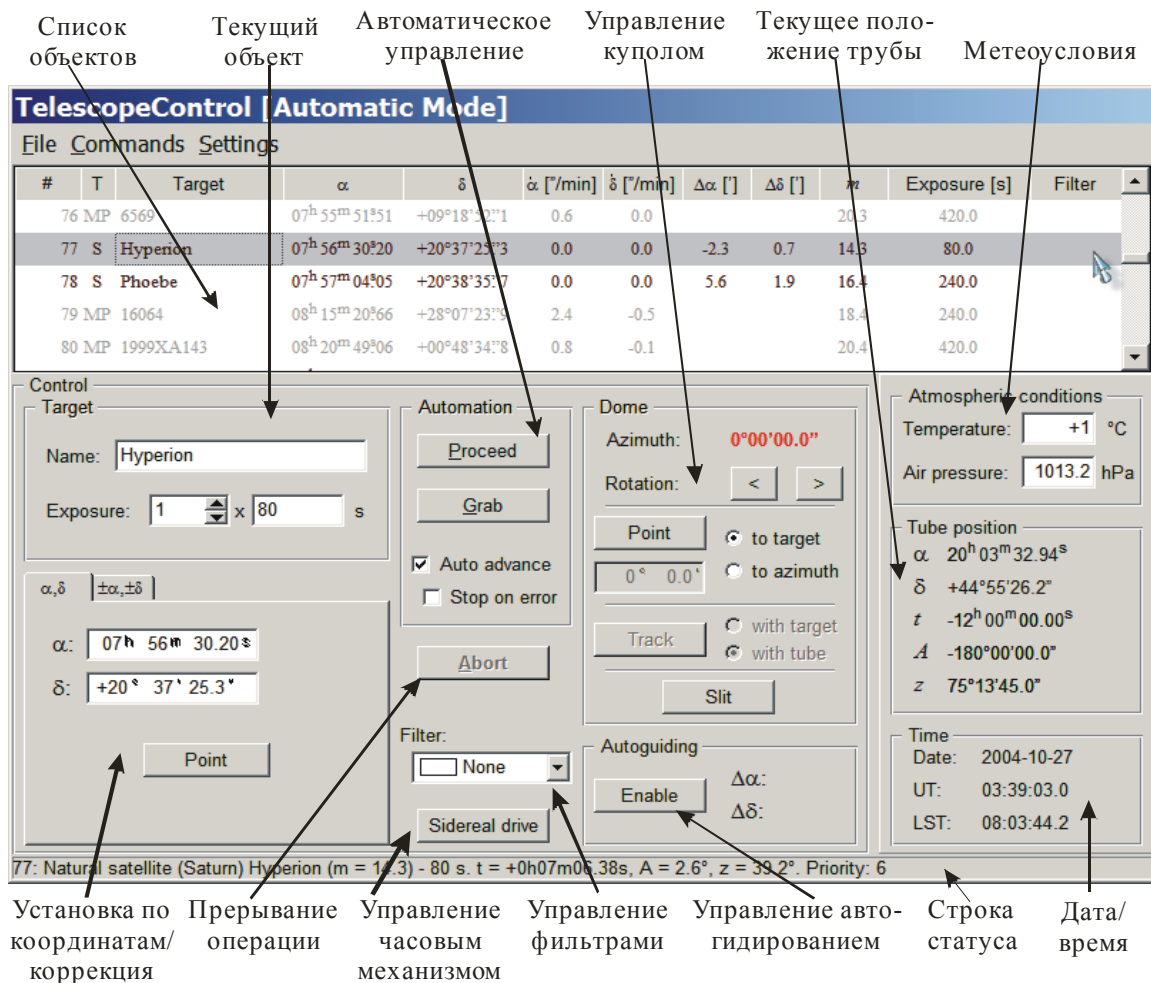
В стадии реализации — полностью автономный режим работы программной системы управления комплексом ЗА–320.

Основной программный компонент — **многоканальная метеосистема**. С ее помощью производится сбор информации о погодных условиях:

- прозрачность атмосферы,
- облачность,
- осадки.

На основании этой информации делается вывод о возможности проведения наблюдений. Кроме того, информация о метеоусловиях, дополненная значениями текущей высоты Солнца и долготы и фазы Луны, позволяет автоматически корректировать список наблюдаемых объектов и параметры экспозиции. Источниками информации могут служить, например,

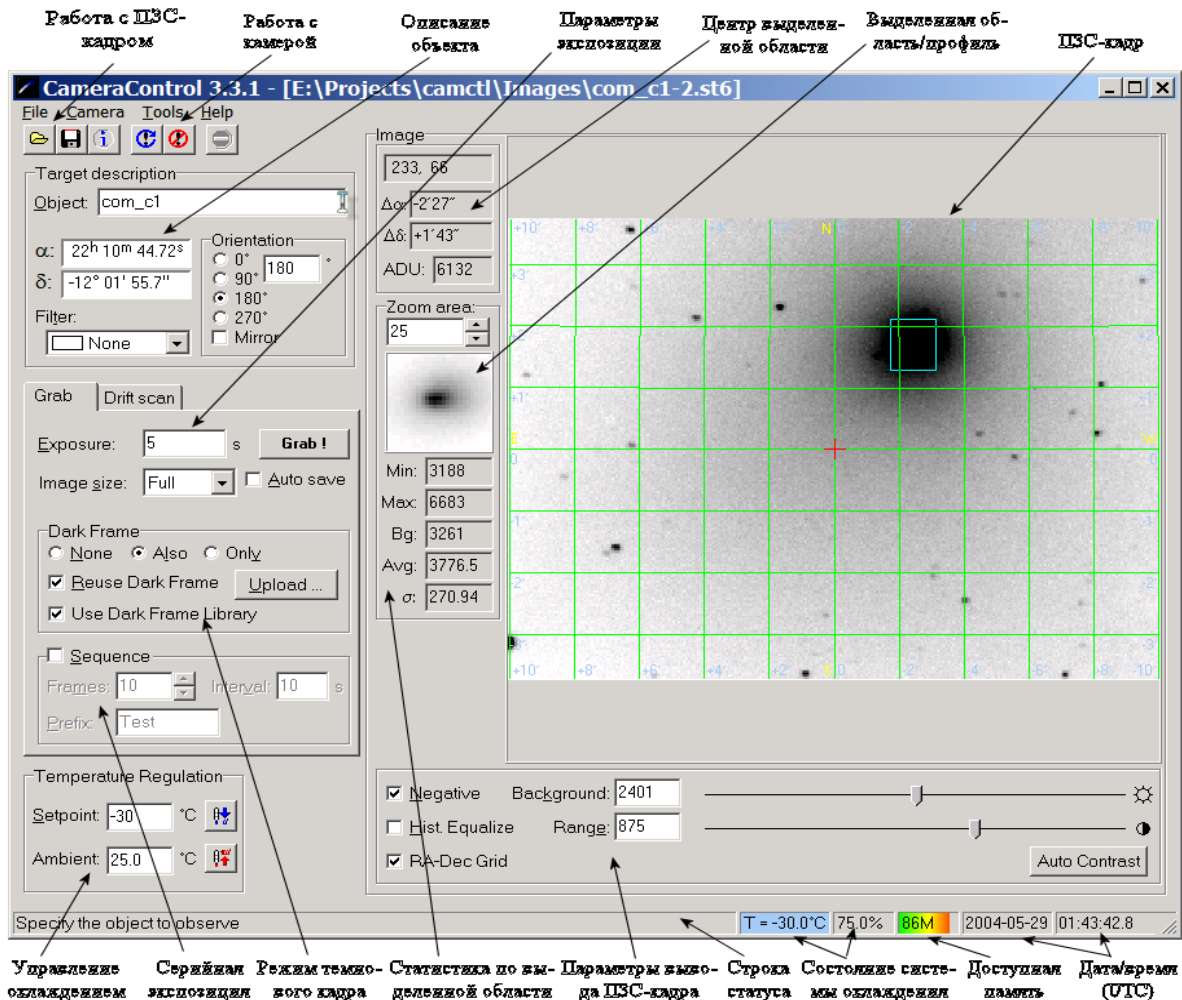
- устанавливаемые на телескопе датчики температуры и давления с подключением через блок БКУ,
- встроенные датчики температуры ПЗС-камер,
- серийная автономная метеостанция,
- датчик прозрачности и фона неба на основе небольшого телескопа с ПЗС-камерой, направленного на Полярную звезду,
- METAR- или SYNOP-коды и TAF-прогнозы других метеостанций (прежде всего, Пулковского аэропорта), получаемые через сеть Интернет.



### 3.4. Подсистема управления ПЗС-камерой

Основные изменения в подсистеме управления ПЗС-камерой CameraControl (текущая версия 3.3.2):

- ❖ введение интегрированного интерпретатора языка **Python**. Он служит для автоматизации операций управления камерой, создания стандартных сценариев работы и обеспечивает программируемость данной подсистемы и возможность удаленного управления. Язык Python был выбран как универсальный, высокоуровневый, объектно ориентированный язык написания сценариев (scripting language), обладающий ясным синтаксисом и богатой библиотекой функций, легко встраиваемый в другие приложения и расширяемый модулями, написанными на различных языках.
- ❖ поддержка режима *дрейфового сканирования* (ВЗН). При работе камеры в режиме дрейфового сканирования возможен просмотр кадра в реальном времени, по мере поступления данных от камеры. Режим опробован и используется на ПЗС-камере КЕВЛАР производства ООО НПФ ЗАРЯД-Т.



- ❖ поддержка **дополнительных информационных полей** ПЗС-кадра. В них сохраняется информация об экспозиции, специфичная для используемой ПЗС-камеры, и состояние системы управления телескопом на момент проведения экспозиции (режим работы, положение трубы и купола, состояние привода часового ведения и автогидирования, метеоусловия и др.).
- ❖ возможность съемки **произвольного фрагмента кадра**.
- ❖ функции **расчета статистики** по области кадра, выделенной курсором, и отображения ее в виде **поверхности  $I(X,Y)$**  в GUI CameraControl.

В настоящее время вся основная функциональность подсистемы управления ПЗС-камерой реализована командами языка Python. Наряду с разработкой TCP-сервера для протокола удаленного управления камерой и соответствующего модуля клиентской части, это позволило осуществить автоматизированное проведение экспозиций. Фактически, в настоящее время GUI CameraControl используется только для визуального контроля получаемых кадров. Задание на экспозицию, включающее параметры экспозиции, характеристики объекта и дополнительную информацию о состоянии комплекса, помещаемую в ПЗС-кадр, целиком формируется подсистемой управления телескопом. В ручном режиме работы для проведения экспозиции достаточно выбрать требуемый объект и нажать кнопку Grab на передней панели GUI подсистемы TelescopeControl. При этом сохраняется возможность полного контроля над ПЗС-камерой при помощи GUI CameraControl.



### Основные результаты

1. Проведена модернизация телескопа ЗА-320м. Силами Отдела астрономического приборостроения и Лаборатории наблюдательной астрометрии ГАО РАН сконструирована, изготовлена и установлена новая труба телескопа. Конструкция трубы имеет термокомпенсационные узлы. Выполнена юстировка оптической системы.
2. Введена в строй дополнительная аппаратура: датчик ясного неба, ограничитель наклона трубы телескопа, фокусирующее устройство.
3. Разработано новое и усовершенствовано имеющееся электронное оборудование ЗА-320м.
4. Разработано новое программное обеспечения для датчиков угла поворота.
5. Усовершенствовано программное обеспечение системы управления телескопом.

Авторы выражают свою благодарность А.А. Ильину, Н.А. Шкутовой, И.Н. Тихоновой, В.П. Колосову, Г.В. Васильеву, О.П. Русакову, Ю.Г. Остренскому за участие в работах по конструированию и изготовлению узлов телескопа.

### Литература

1. *Артоболевский И.И.* Механизмы в современной технике, т.1, М., Наука, 1979, 495 с.
2. *Багильдинский Б.К.* Система и точность отсчета лимбов фотографического вертикального круга// Труды 17 АК, 1967, Л., с.149-169.
3. *Багильдинский Б.К., Гумеров Р.И., Сергеев А.В., Шорников О.Е.*, Фотоэлектрическая система отсчета лимбов ФВК// Труды 20 АК, Л., Наука, 1978, с.149-153.
4. *Бекяшев Р.Х., Канаев И.И., Девяткин 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.
5. *Добровольский В.В.* Теория механизмов. Машгиз, М., 1951, 465 с.
6. *Довгалевский Я.М.* Справочник термиста, Саратовское книжное изд-во, 1962, 420 с.
7. *Канаев И.И., Кирьян Т.Р., Шкутова Н.А., Гончаров Г.А., Девяткин А.В. и др.* Проект МАГИС (Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент им. Л.А. Сухарева)// Отчет по НИР, ГАО РАН, 1997, 67 с.
8. *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.
9. *Канаев И.И., Девяткин А.В., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Виноградов В.С., Курьянов В.В., Корнилов Э.В.* Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320 // Изв. ГАО, 2002, №216, с.128–156.
10. *Латыев С.М.*, Компенсация погрешностей в оптических приборах, Машиностроение Л., 1985, 248 с.
11. *Левин И.Я.*, Справочник конструктора точных приборов, 3 издание, М., Машиностроение, 1967, 744 с.
12. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы, теория и конструкция, М., Наука, 1976, 512 с.
13. *Михельсон Н.Н., Соснина М.А., Стрелецкий Ю.С.* Астрономическое приборостроение в ГАО АН СССР// В кн. 150 лет Пулковской обсерватории, 1989, Л., Наука, с.277-292.
14. *Поляков Е.В.* Компьютерное чтение оцифрованных шкал (на примере спирального микрометра)// Изв. ГАО, 2002, № 216, с.235–240.
15. *Сварка в машиностроении.* Справочник, т.3, Машиностроение М., 1979, 567 с.
16. *Справочник конструктора оптико-механических приборов*, Л., Машиностроение, 1980.

17. **Стафеев А.М.** Полуавтоматический прибор для измерения пленок, полученных при фотографическом отсчете лимба// Труды 17 АК, 1967, Л., с.178-181.
18. **Сухарев Л.А., Шкутов В.Д.** Фотоэлектрическая машина для измерения снимков лимба фотографического вертикального круга// Труды 17 АК, 1967, Л., с.142-149.
19. **Шарловский Ю.В.**, Регулировочные устройства приборов и их элементы, М., Машиностроение, 1976.
20. **Справочник конструктора точного приборостроения**, под ред. Ф.Л. Литвина, М.-Л., Машиностроение, 1964, 943 с.
21. **А.Г. Тахтамышев**, Стальные конструкции, ГИЗ Литературы по строительству и архитектуре, М. 1955.

## **AUTOMATION OF ASTRONOMICAL OBSERVATIONS ON THE MIRROR ASTROGRAPH ZA-320. II.**

**Devyatkin A.V., Kanaev I.I., Kulish A.P., Rafalsky V.B., Shumacher A.V.,  
Koupriyanov V.V., Bekhteva A.S.**

### *Summary*

*The automation of ZA-320 telescope is made. The modernized nodes of the telescope, electronic equipment and software are described.*

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ В СОЛНЕЧНОМ СПЕКТРЕ**

**Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д.**

*Рассмотрена методика получения лучевых скоростей из цифрового изображения солнечного спектра.*

### **1. Особенности матрицы цифровой камеры**

При регистрации солнечного спектра мы имеем в фокальной плоскости спектрографа освещенность достаточную для нормальной работы матрицы современной цифровой камеры. Например, 4-5 мегапиксельная камера дает при достаточном уровне освещения отличное качество изображения, превосходящее то, что дают компьютерные WEB-камеры, обычные видеокамеры и простые астрономические матрицы.

Цифровой фотоаппарат – это позиционно-чувствительный светоприёмник (обычно ПЗС-матрица) с оптической системой фокусировки изображения.

Астрономическая ПЗС или в латинской транскрипции CCD–матрица отличается от матрицы цифровой камеры наличием режима длительной экспозиции (во многих фотоаппаратах его также можно реализовать, но в пределах 16 сек), а также параметрами самой системы (соотношением «сигнал/шум», наличием специального охлаждения и т.д.). Кроме того, обычные цифровые камеры и видеокамеры дают цветное изображение и поэтому имеют ненужную для астрономических целей внутреннюю систему микролинз и светофильтров, расположенную перед матрицей, что может привести к цветовым искажениям, хроматическим aberrациям и муарам. Существенное различие между обычными цифровыми камерами и астрономическими ПЗС-матрицами – это специализированная система считывания и преобразования сигнала с матрицы. При этом для астрономической ПЗС-камеры прежде всего важна точность регистрации, вследствие чего делают они это медленно, (пиксель матрицы в пиксель изображения) и довольно точно, а обычные цифровые камеры должны осуществлять это очень быстро, формируя один пиксель изображения из смежных четверок чувствительных элементов ПЗС-матрицы. При регистрации солнечного спектра для получения хорошего пространственного и временного разрешения необходимы именно короткие экспозиции.

Шумы на темном в электронном изображении обусловлены в основном нагревом матрицы и различием физических характеристик пикселей. Они наиболее заметны на больших выдержках и при регистрации солнечного спектра незначительны. Кроме того, эти шумы носят случайный характер, что позволяет снизить их влияние. Достаточно при фотографировании снять темновой кадр с теми же параметрами, которые использовались для съемки объекта, и вычистить его из каждой фотографии. Эту операцию позволяют выполнить большинство специализированных программ, например, Registax.

Шумы, заметные на сером поле электронного изображения обусловлены ошибками при считывании и усилении сигнала, они случайны, проявляются и на малых выдержках. Именно эти шумы наиболее заметны при регистрации солнечного спектра. Для их уменьшения желательна короткая экспозиция (меньше 0.01сек) и минимальная чувствительность матрицы, которая измеряется, как и фотографии в единица ISO.

Для регистрации солнечного спектра мы применили 4.1 мегапиксельный цифровой фотоаппарат Minolta DiMAGE S414, работающий в ручном режиме. Фотоаппарат имеет 12-ти битный аналого-цифровой преобразователь. Изображение получалось без

сжатия и черно-белое. Чувствительность выбиралась минимальная ISO64, выдержка 0.004-0.01 сек. Использовался афокальный режим, при котором изображение спектра из фокальной плоскости спектрографа телескопа АЦУ-5 перебрасывалось высококачественным объективом ( $D = 40\text{мм}$ ,  $F = 80\text{мм}$ ) на объектив фотоаппарата, установленный на «бесконечность». Для устранения винитирования применялся оптический зум фотоаппарата.

Типоразмер матрицы  $1/1.8'$ , что соответствует линейным размерам  $7.18\text{ мм} \times 5.2\text{ мм}$ , максимальное разрешение снимка в пикселях составляет  $2272 \times 1704$  (это пиксель оцифровки, а не реальный пиксель на матрице), тогда размер пикселя:

$$L = 7.18 / 2272 = 0.0032\text{ мм.}$$

Это означает, что матрица фотоаппарата совершенно не ограничивает ни оптическое, ни спектральное разрешение астрономической информационной системы атмосфера-телескоп-спектрограф-матрица-компьютер (масштаб на щели спектрографа  $11''/\text{мм}$ , дисперсия спектра в IV порядке  $3.7\text{ мм}/\text{Å}$ ).

Примерные размеры файлов					
Качество	Размер кадра	2272 X 1704	1600 X 1200	1280 X 960	640 X 480
		Super fine	12MB	5.6MB	3.6MB
Fine	2MB	1.0MB	0.66MB	0.27MB	
Standard	1MB	0.6MB	0.41MB	0.2MB	
Economy	0.68MB	0.38MB	0.29MB	0.15MB	
Приблизительное число изображений, которое может быть записано на 16 Мб CompactFlash карту.					
Super fine	1	2	4	15	
Fine	7	14	21	48	
Standard	12	23	33	65	
Economy	20	36	46	79	

Мы применяем при наблюдении 512MB Compact Flash карту, позволяющую получать без сбрасывания информации на компьютер 2-х часовую серию цифровых спектрограмм, с интервалом каждые 15 сек. Фотоаппарат имеет компьютерный интерфейс USB 1.1.

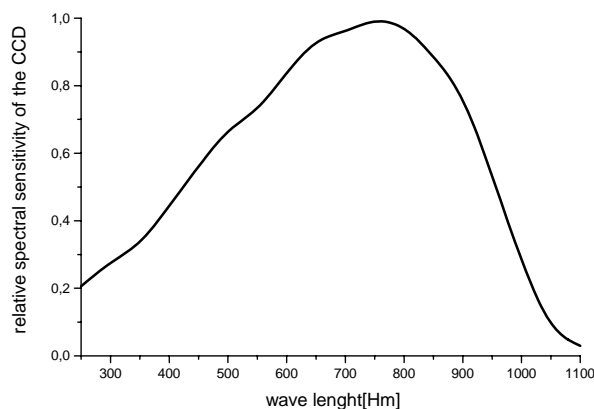


Рис.1.

На рис.1 изображена примерная спектральная чувствительность матрицы. К сожалению, красная граница матрицы цифрового фотоаппарата очень резко сходит на ноль, «недотягивая» примерно  $5\text{Å}$  до важной ИК линии гелия  $\text{HeI } 10830\text{Å}$ , уступая в этом CCD-матрице черно-белой видеокамеры, применяемой нами в видеоманометре [1]. Но в голубой части спектра (линия H и K CaII) цифровой фотоаппарат имеет лучшую чувствительность и дает более высокое отношение сигнал/шум.

## 2. Методика определение доплер-скоростей по смещениям линий поглощения в спектре Солнца

Измерение лучевых скоростей в атмосфере Солнца, как известно, основано на определении смещений спектральных линий, обусловленного эффектом Доплера:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{v}{c} * \lambda_0, \quad (2.1)$$

где  $\Delta\lambda$  – измеренное смещение линии в спектре, обусловленное движением источника излучения относительно наблюдателя – доплеровское смещение;

$\lambda', \lambda_0$  – значение длин волн движущегося и неподвижного источника, соответственно;

$v$  – собственно лучевая скорость (проекция скорости на луч зрения);

$c$  – скорость света.

Использование теллурических линий ограничено, как правило, красной областью спектра – это вносит дополнительные неудобства. Мы используем метод, при котором измеряются абсолютные координаты центра тяжести линии и затем, при помощи компьютерной программы обработки полученного ряда данных убираем как наклон линии в спектре, так и крупномасштабный тренд, искажающий ее вследствие дисторсии. Как правило, смещения определяются относительно реперных линий, в качестве которых используются либо опорные прямые искусственно проведенные на фотоматериале, либо теллурические линии водяного пара образующиеся в атмосфере Земли. Оба способа вносят дополнительные ошибки в измерения смещений из-за установки 0-пункта изображения щели спектрографа и неразрешенной макротурбулентности (как колебательные, так и гидродинамические движения, масштаб которых превышает размеры исследуемой поверхности Солнца, попадающей на щель спектрографа).

На рис.2 для примера приведено изображение цифровой спектрограммы, полученной 19 июля 2004 г. на спектрографе солнечного горизонтального телескопе АЦУ-5 в области 6493А - 6500А, помещающей целиком на матрице. Снята область фотосферы с пятном. Линии образуются на различной высоте атмосферы Солнца от 190 км до 535 км.

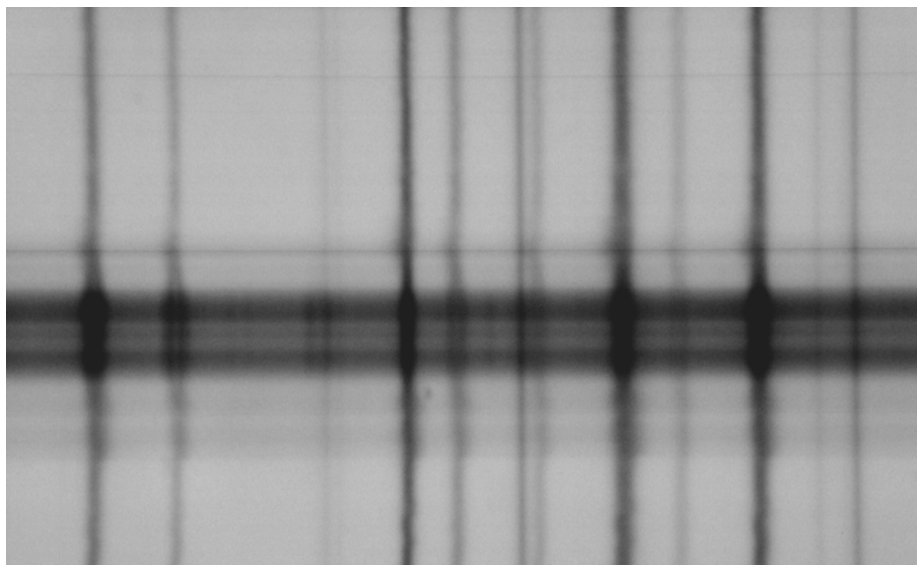


Рис.2.

Если исходный материал для обработки – фотоспектрограмма, то доплер-смещения определяются с помощью механического сканирования на фотометрическом комплексе МФК-200. В данном случае исходный материал – битовая карта с изображением спектрограммы, и аналогичное сканирование осуществляется на программном уровне (специализированная программа “SFS”, созданная в ЛФС ГАО РАН). Кратко опишем методику получения результатов обработки спектрограммы для одной спектральной линии:

1. **Инвертация** (при необходимости). Спектральная линия должна иметь максимум потока в центре контура линии.
2. **Оцифровка**. Проводим оцифровку битовой карты спектрограммы на “серый” интервал [0-255] и определяем номера пикселей – границы стрипа.
3. **Формирование стрипа**. Вырезаем стрип с N разрезами поперек линии и M отсчетами в каждом разрезе, используя номера пикселей со спектральной линией так, чтобы она не выходила за его границы, и так, чтобы в этот стрип попадала только одна линия.
4. **Сканирование**:
  - программно сканируем, (вдоль дисперсии) определяя контур спектральной линии. Далее находим значение максимального потока, а его координату переопределяем в стартовую точку отсчета ( $dx_1=0$ ) относительно которой рассчитываем все смещения контуров в других сканах. Центральную часть контура линии аппроксимируем полиномом 4-го порядка (или параболой), а точки захвата крыльев контура определяем с помощью так называемого “прицельного” параметра (отношение потока в точках захвата к максимальному), регулирующего ширину аппроксимационной части контура линии;
  - переходим к другому скану определяя пару значений (величину смещения контура; величину потока в максимуме.)

Таким образом, дойдя до последнего скана, формируем два файла: файл **доплер-смещений** Lndat.dx и файл **поточковых значений** в центральной части спектральной линии Lndat.df.

Учитывая дисперсию в данной области спектра, получаем файл **доплер-скоростей**.

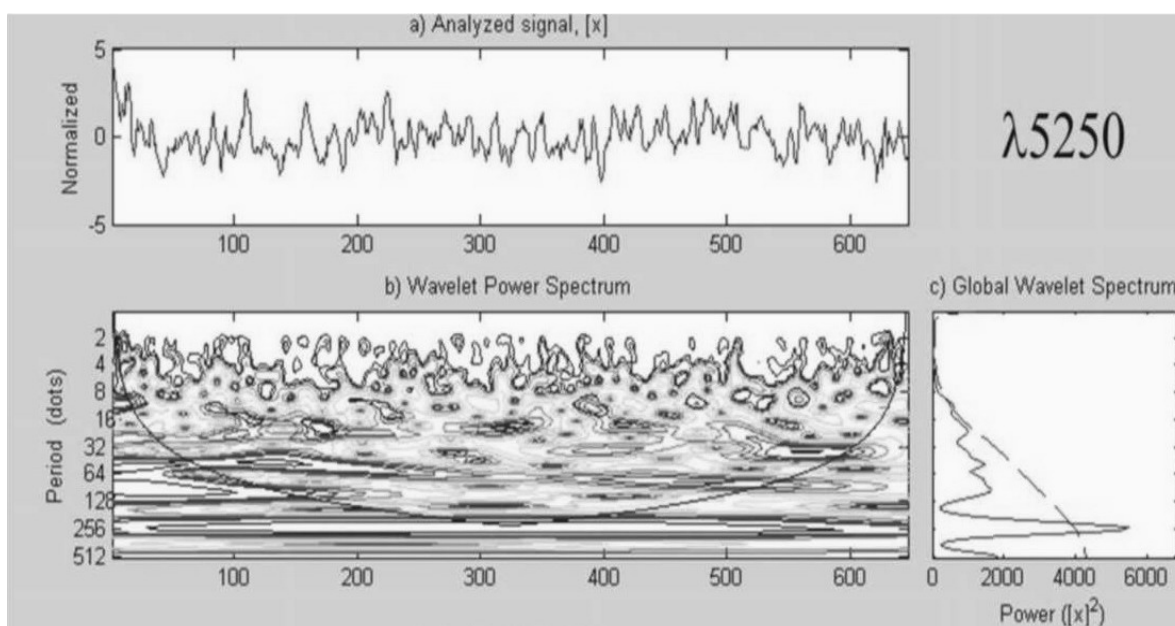


Рис.3.

На рис.3а приведены полученные таким методом лучевые скорости в линии  $\lambda 5250\text{\AA}$  (файл доплер-смещений в линии  $\lambda 5250\text{\AA}$ ). По оси ординат – величина скорости в км/сек., по оси абсцисс – развертка вдоль щели спектрографа (120")

На рис.3б приведена Вейвлет-карта спектра мощности сигнала (комплексный вейвлет Морле)

На рис.3с приведен глобальный вейвлет-спектр.

На вейвлет-карте построенной с использованием комплексного вейвлета Морле для линии  $\lambda 5250\text{\AA}$  видны зоны стационарности (см. табл. 1):

**Таблица 1.**

Скейлинг, (в точках реализации)	Размер структуры	Длина зоны стационарности (в точках реализации)	Коэффициент
12	2"	25	2
22	3,8"	70-90	3-4
60-66	10-11"	200	3-4

То есть зона стационарности – область пространства, на котором структура достаточно устойчива, превышает саму структуру в 3-4 раза.

Собрав вместе результаты обработки всех кадров полученной серии, мы имеем двухмерную цифровую матрицу. По одной координате получено калиброванное распределение скоростей вдоль щели спектрографа, по другой координате мы имеем временную развертку скоростей во времени. В пробных наблюдениях 2004 года получены серии из 256 цифровых кадров с интервалом 15 сек. Это позволяет изучать колебательные процессы строго одновременно для всех линий попадающих на матрицу, т.е. можно определять сдвиг фазы скорости с высотой в атмосфере Солнца.

Таким образом, получаются спектрограммы с высоким пространственным разрешением, что устойчиво видно по зигзагообразности солнечных линий. Для сравнения: время экспозиции при фотографировании этой красной области спектра на астропластинки в IV порядке достигало 1 сек, на телевизионном CCD спектрогелиографе время экспозиции равно времени телевизионного кадра, т.е. 0.04 сек. На цифровой камере время экспозиции регулируется и его можно снизить до 0.004 сек. Благодаря применению современных цифровых двухмерных приемников появляется возможность систематически изучать тонкую структуру атмосферы Солнца по спектрам, используя малосветосильные классические солнечные телескопы горизонтального типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 04-07-90254.

### **Литература**

1. *Parfinenko L.D.*, Solar Physic. vol. 213, № 2, april 2003, p.291.

## **OPERATION TESTING OF A DIGITAL PHOTOGRAPHIC CAMERA FOR REGISTRATION OF RADIAL VELOCITIES IN THE SOLAR SPECTRUM**

**Efremov V.I., Parfinenko L.D.**

### *Summary*

*The technique of reception of radial velocity from the digital image of a solar spectrum is considered.*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ**

**Измайлов И.С., Виноградов В.С., Румянцев К.В.,  
Шумахер А.В., Бубнов Ю.А., Бубнова Н.Н.**

*Выполнен цикл работ по автоматизации 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории. Приводится схема модернизации, а также основные алгоритмы работы системы автоматических наблюдений.*

### **Введение**

26-дюймовый рефрактор был получен по репарациям из Германии взамен разрушенного во время Великой Отечественной войны 30-дюймового рефрактора и начал работать в Пулковской обсерватории в 1957 году. Фокусное расстояние телескопа составляет 10436 мм, что соответствует масштабу – 19.808 угловых секунд на миллиметр. Уже на этапе его изготовления было предусмотрено, что все движения телескопа, как по прямому восхождению, так и по склонению, а также повороты купола будут осуществляться электромоторами.

В 60-х годах был проведен ряд исследований, которые показали хорошее качество оптики и механики телескопа [1,2,3,4]. Одним из важнейших результатов этих исследований является постоянство геометрического масштаба с достаточно высокой степенью точности, в частности, масштаб очень слабо зависит от температуры [5].

Телескоп с момента установки активно используется для фотографических наблюдений. За период эксплуатации было получено порядка 22000 фотопластинок. В основном, эти пластинки получены в рамках двух программ: наблюдения визуально-двойных звезд и наблюдения спутников больших планет.

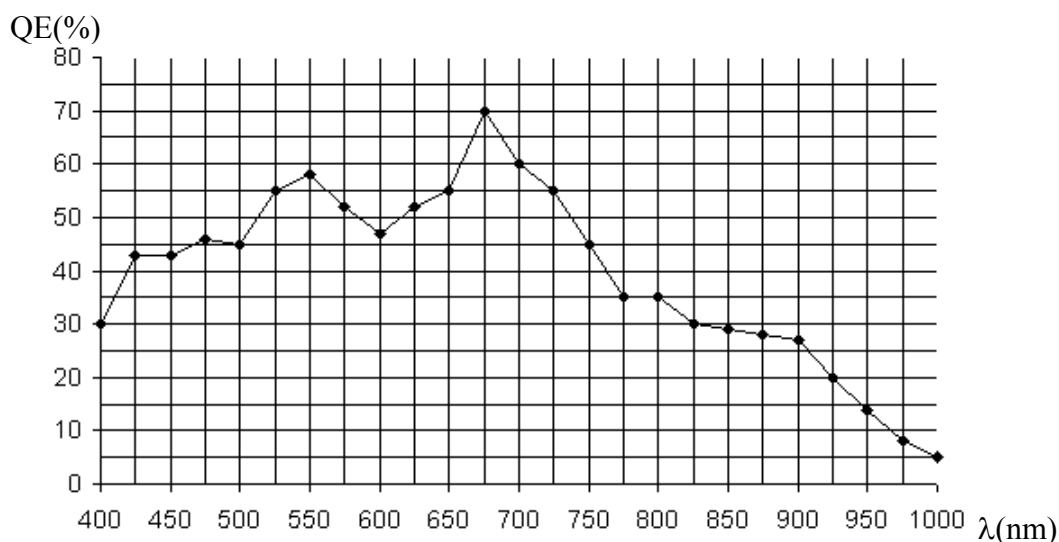
В 1995 году на 26-дюймовом рефракторе была установлена ПЗС-камера ST-6, обладающая следующими характеристиками:

Наименование ПЗС-матрицы	ТС-241.
Число пикселей	242×375.
Размер пиксела	0.023×0.027 мм.
Размер поля	8.625×6.534 мм.
Темновой ток	10 е/ пиксел /сек при -30° С
Размер пиксела	0".46 × 0".53.
Размер поля зрения	170" × 129".

Зависимость квантовой эффективности от длины волны приведена на рис.1 [6].

Уже первый опыт ПЗС-наблюдений показал крайнюю неэффективность использования пригодного для наблюдений времени. В среднем на объект затрачивался примерно один час. При этом большая часть времени уходила на наведение телескопа, а непосредственно на получения экспозиций примерно 10 минут, которые, как показывает практика, без особого ущерба для точности можно сократить до 5. К тому же, производительность труда наблюдателя можно было значительно увеличить за счет упрощения интерфейса управления ПЗС-матрицей, заранее перед наблюдениями определив для каждого объекта необходимую экспозицию, число ПЗС-кадров, путь и названия файлов на жестком диске компьютера, в которых будут храниться полученные кадры и т. д.





**Рис.1.** Зависимость квантовой эффективности (QE) от длины волны ( $\lambda$ ) для ПЗС-камеры ST-6.

### Техническое решение

Суть выбранной нами схемы автоматизации заключается в следующем. Необходимо вывести управление всеми необходимыми механизмами инструмента на компьютер, сюда же на компьютер вывести и изображения шкал, посредством которых осуществляется контроль текущего положения телескопа. Далее должна быть создана программная система, которая будет наводить телескоп на заданный объект и получать необходимое число ПЗС-экспозиций, т.е. по существу выполнять наблюдения. При этом контроль со стороны наблюдателя может быть минимальным.

Отметим, что данная схема уже использовалась в Пулковской обсерватории [7,8].

Описанная схема была реализована следующим образом. Усилиями отдела астрономического приборостроения ГАО был создан “блок управления”, который команды с компьютера (запись в порты ввода-вывода процессора соответствующих байтов) реализует во включение грубого и тонкого движения по часовому углу и склонению. Для получения изображений шкал используются две видеокамеры WATT-660 со следующими характеристиками

Число пикселей	537×597
Размер пиксела	7.3×4.7μ
Минимальная освещенность	0.8 лк
Отношение сигнал/шум	46 дБ
Выходной сигнал	Видеосигнал, 1в, 75 Ом
Питание	9В 110 мА
Размер	30×30×18 мм
Вес	30 г
Диапазон рабочих температур	− 20° +40°

Данные камеры дают аналоговый видеосигнал, для оцифровки изображения и ввода его в компьютер мы использовали так называемое устройство “видеозахвата”.

### Получение отсчетов шкал

При выбранном пути автоматизации наблюдений первый необходимый элемент программного обеспечения – это алгоритм, позволяющий получить по видеоизображе-

нию отсчеты шкал. Для этого, во-первых, необходимо измерить положения штрихов, во-вторых, распознать числа на шкале (рис. 2).

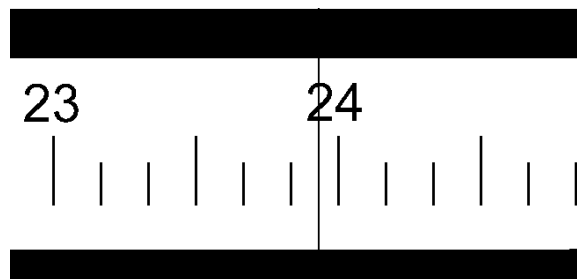


Рис.2. Пример изображения шкалы.

Алгоритм измерения штрихов имеет следующие этапы.

1. Измерение положения шкалы в вертикальном направлении. Это необходимо, поскольку, как правило, все шкалы имеют достаточно большой эксцентриситет круга, т. е. не совпадение оси вращения и центра круга. Например, на 26-дюймовом рефракторе при повороте от экватора до полюса смещение шкалы склонений составляет порядка 20 пикселей.

Поскольку изображение шкалы представляет собой белую полосу на черном фоне, указанное смещение мы измеряем так: берется сумма отсчетов яркостей двух точек, разнесенных в вертикальном направлении точно на размер шкалы. Далее находится максимум этой суммы при движении точек в том же вертикальном направлении. Смысл этой процедуры в том, что существует единственное положение точек, когда обе они находятся на светлом фоне. В любом другом положении, либо верхняя либо нижняя точки находятся на темном фоне.

2. Поиск штрихов. При этом вычисляется сумма отсчетов яркостей столбца изображения шкалы, причем столбец по вертикали ограничен зоной, где расположены штрихи. Штрих находится там, где данная сумма имеет минимум. Для ускорения анализа находится один штрих, положение остальных определяется по положению найденного и расстоянию между штрихами.

3. На этом этапе измеряется положение штриха в каждой отдельной строке. Отсчеты яркости в каждой строке зоны занятой изображением штриха, представляются квадратичным многочленом. По коэффициентам многочлена определяется положение минимума яркости, которое и будет измеренной величиной положения штриха.

4. Вычисляется наклон штриха и его положение в горизонтальном направлении на некотором нулевом уровне. Это делается посредством представления набора положений штриха в каждой строке, полученных на предыдущем этапе алгоритма, прямой линией. Подобным образом, измеряются все штрихи, присутствующие на изображении шкалы.

5. Находится линейная зависимость отсчета по координате  $x$  для штриха в зависимости от номера штриха. После этого вычисляется номер штриха для середины изображения шкалы. В общем случае данный номер будет дробным, исключая ситуацию, когда какой-то штрих попадает точно на середину изображения.

Как показывает практика, вышеописанный алгоритм позволяет измерить шкалу с точностью до 0.1 пикселя, что для шкал 26-дюймового рефрактора составляет примерно 1 угловую секунду.

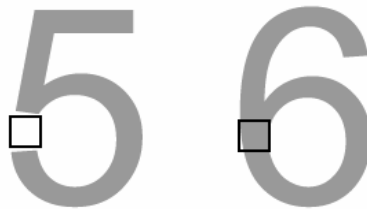
Далее необходимо распознать число над штрихом, либо убедиться в отсутствии числа над этим штрихом. Применяемый нами алгоритм распознавания имеет следующие особенности.

1) Все составные (двузначные и трехзначные) цифры распознаются как единое целое (без разделения на составляющие знаки).

2) Составляется таблица распознавания, где для любой возможной пары чисел даны координаты нескольких участков, разность между яркостями на которых на изображениях соответствующих чисел максимальна. Т. е. у одной цифры в этом месте зачерненный участок, а у другой нет (см. рис.3). Координаты в таблице даются относительно измеренного положения штриха по  $x$ . Также приводится среднее значение яркости для этих двух цифр. С помощью таблицы можно вычислить показатель

$$P^{nm} = \sum_{i=1}^K (I(x_i^{nm} + x_s, y_i^{nm}) - S_i^{nm}) l_i^{nm};$$

где  $P^{nm}$  - искомый показатель для чисел  $n$  и  $m$ ,  $K$  – число используемых участков,  $I$  - отсчет яркости изображения распознаваемого числа при координатах  $x_i^{nm} + x_s, y_i^{nm}$ ,  $x_i^{nm}, y_i^{nm}$  - координаты участка из таблицы распознавания,  $x_s$  - координата штриха,  $S_i^{nm}$  - средняя яркость из таблицы,  $l_i^{nm} = 1$  либо  $l_i^{nm} = -1$  в зависимости ярче ли на изображении  $n$   $i$ -й участок, чем на изображении  $m$ , либо наоборот.



**Рис. 3.** Изображения цифр 5 и 6 имеют один участок (отмечен прямоугольником), такой, что у одной цифры в этом месте он зачернен, а у другой нет.

Если  $P^{nm} > 0$ , то на распознаваемом изображении скорее  $n$  чем  $m$ , и наоборот  $P^{nm} < 0$ , то скорее  $m$ , чем  $n$ .

3) “Пустое” изображение (т. е. над штрихом нет цифры) тоже введено в таблицу и распознается совершенно так же, как все остальные цифры.

Работу нашего алгоритма распознавания поясним на примере. Пусть для простоты у нас участвуют только 4 числа – 1, 2, 3, 4, и на исходном изображении – 3.

1-й шаг алгоритма: вычисляем  $P^{12}$ , получаем, что  $P^{12} < 0 \Rightarrow$  на изображении скорее 2, чем 1, исключаем из рассмотрения 1,

2-й шаг  $P^{23} < 0 \Rightarrow$  исключаем 2,

3-й шаг  $P^{34} > 0 \Rightarrow$  исключаем 4,

4-й шаг, т. к. 1, 2, 4 исключены, то вероятнее всего на изображении 3.

Алгоритм закончен.

По номеру штриха для середины изображения и по распознанному числу над одним из штрихов вычисляется значение отсчета шкалы.

Например, для шкалы склонений имеем

$$\delta_o = N + \frac{T - T_N}{6},$$

где  $N$  - распознанное число,  $T$  - номер штриха для середины изображения (дробный),  $T_N$  - номер штриха, над которым находится  $N$ ,  $\delta_o$  - отсчет в градусах.

### Калибровка шкал

Как известно, чтобы точно установить телескоп, необходимо знать, как соотносятся отсчеты шкал с экваториальными координатами звезд. Поскольку в работе [4], было

показано, что одна из составляющих поправок, переводящих отсчеты в координаты, а именно — гнутые трубы 26-дюймового рефрактора носит плохо предсказуемый характер, данные поправки были определены эмпирическим методом. Для чего мы провели наблюдения 30 звезд с известными координатами. При этом для каждой звезды определялись отсчеты шкал, и снимался ПЗС-кадр, для учета положения звезды внутри кадра. Т. к. в основном, наблюдения на 26-дюймовом рефракторе ведутся около меридиана, то и эти калибровочные измерения производились около меридиана.

Как и ожидалось, заметная зависимость поправок к отсчетам шкал существует только от склонения. На рис.4 приведена зависимость поправки к шкале часового угла от склонения звезды, а на рис.5 поправки к шкале склонения.

### Алгоритм установки

Установка телескопа на выбранную звезду начинается с грубого движения по склонению, алгоритм которого заключается в следующем.

1. По известному склонению звезды  $\delta$  вычисляется  $\delta_o$  — отсчет шкалы.
2. Опрашивается шкала склонений, если полученное значение  $\delta_i$  недостаточно (т. е. возможна ошибка распознавания), запрашивается подтверждение наблюдателя.
3. Определяется разность  $\Delta\delta = \delta_i - \delta_o$ , между текущим и устанавливаемым положением инструмента. Если  $|\Delta\delta| < 2^\circ$ , то алгоритм завершен.
4. По  $\Delta\delta$  вычисляется время, на которое необходимо включить двигатель грубого движения.
5. Происходит отработка двигателя грубого движения.
6. Снова опрашивается шкала, т. е. переходим к п.2 алгоритма.

Далее последовательно, по аналогичным алгоритмам выполняется,

- тонкое движение по склонению,
- грубое движение по часовому углу,
- тонкое движение по часовому углу.

Затем снимается пробный кадр, на этом кадре отождествляется звезда и происходит установка звезды по центру кадра.

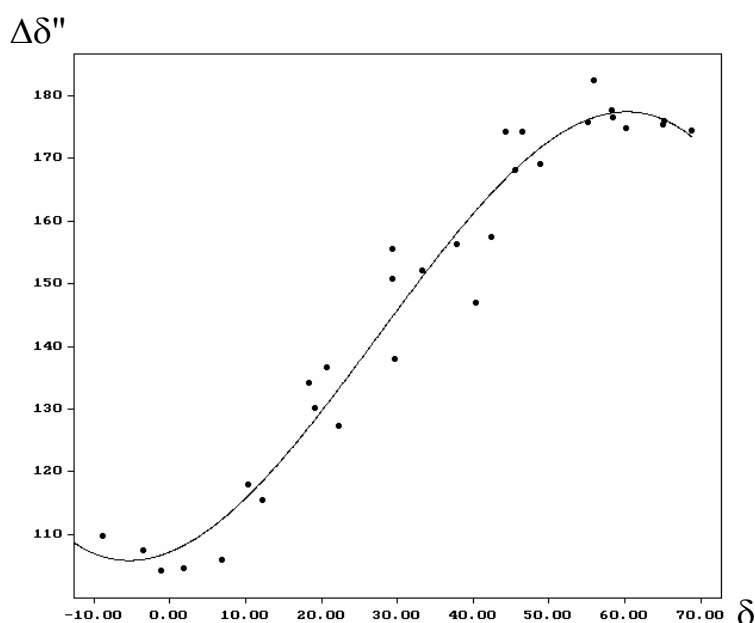


Рис.4. Зависимость поправки к шкале часового угла от склонения звезды.

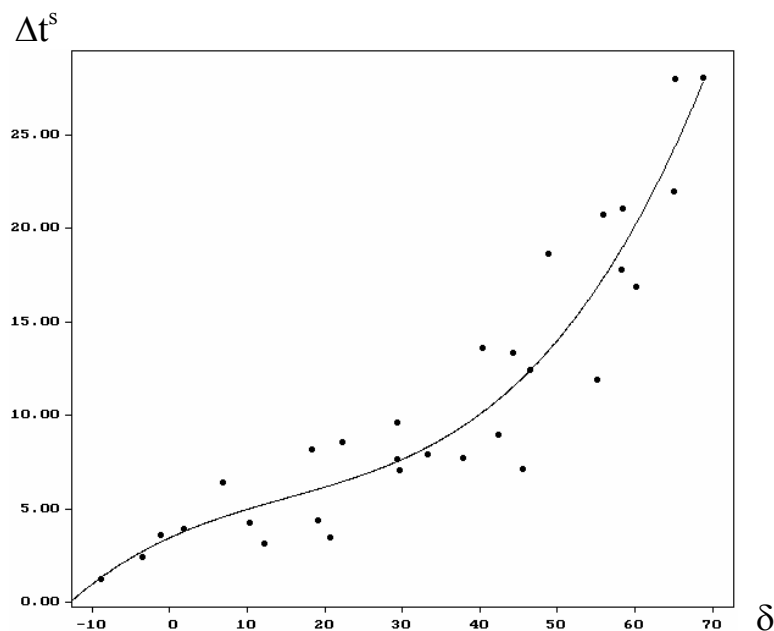


Рис.5. Зависимость поправки к шкале часового угла от склонения звезды.

### Наблюдения в автоматическом режиме

В настоящее время на 26-дюймовом рефракторе ПЗС-наблюдения производятся полностью в автоматическом режиме. Функции наблюдателя сведены к контролю систем телескопа, а также к разрешению ситуаций, когда возможна какая-либо ошибка со стороны программного комплекса.

Список объектов, которые будут наблюдаться в данную ночь, готовится заранее. В нем, помимо прочего указываются экваториальные координаты, звездные величины, экспозиции и число ПЗС-кадров. Данный список для исключения простоев телескопа должен быть “избыточным”, т.е. в этом списке должно быть больше объектов, чем возможно отнаблюдать.

Кроме того, в списке для каждого объекта задается приоритет - от 0 до 9. В первую очередь наблюдаются объекты с наивысшим приоритетом.

Алгоритм работы программной системы, при автоматических наблюдениях следующий.

1. Выбираются объекты с наивысшим приоритетом из всех возможных для наблюдений в данный момент. Далее из них выбирается ближайший к текущему положению инструмента.
2. Производится установка телескопа на выбранный объект, включая установку по центру кадра.
3. Снимается серия ПЗС-кадров и по окончании съемки выбирается следующий объект и т. д.

В созданной системе на наведение затрачивается 4-5 минут. Т. к. съемка тоже занимает в среднем 5 минут, на один объект затрачивается около 10 минут наблюдательного времени. Отметим также значительное облегчение труда наблюдателя, что тоже сказывается на увеличении числа наблюдений.

В результате использования данной системы на 26-дюймовом рефракторе с апреля 2003 года (предварительное окончание работ по автоматизации) по октябрь было выполнено 680 отдельных ПЗС-наблюдений, тогда как за весь предыдущий период эксплуатации ПЗС-матрицы с апреля 1996 по апрель 2003 года было сделано примерно столько же – 615 наблюдений.

### **Заключение**

Разработанная система позволяет производить автоматические астрономические наблюдения на 26-дюймовом рефракторе. Выполненная работа существенно облегчила как труд наблюдателя, так и значительно, практически на порядок, позволила увеличить число наблюдений.

### **Литература**

1. **Плюгин Г.А.**, Об определении коэффициента атмосферной дисперсии для 26" рефрактора ГАО АН СССР, Изв. ГАО АН СССР, 1968, № 183, с.133-140.
2. **Канаев И.И.**, Коэффициент атмосферной дисперсии для 26" рефрактора ГАО АН СССР, Изв. ГАО АН СССР, 1968, № 183, с.141-142.
3. **Канаев И.И.**, Исследование объектива 26" рефрактора ГАО АН СССР, Изв. ГАО АН СССР, № 166, с.176, 1960.
4. **Киселев А.А., Плюгин Г.А.**, Определение оптического центра 26" рефрактора, Изв. ГАО АН СССР, № 174, с.127, 1964.
5. **Киселев А.А.**, Определение масштаба 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории, Изв. ГАО АН СССР, № 174, с.120, 1964.
6. **Santa Barbara Instrument Group**, [www.sbig.com](http://www.sbig.com).
7. **Канаев И.И. и др.**, Автоматизация астрономических наблюдений на зеркальном астрографе ЗА-320, Изв. ГАО РАН, № 216, 2002, с.128-156.
8. **Поляков Е.В.**, Компьютерное чтение оцифрованных шкал (на примере спирального микрометра), Изв. ГАО РАН, № 216, 2002, с.235-240.

### **AUTOMATION OF ASTRONOMICAL OBSERVATIONS ON 26-INCH REFRACTOR**

**Izmailov I.S., Vinogradov V.S., Rumjancev K.V.,  
Shumacher A.V., Bubnov U.A., Bubnova N.N.**

#### **Summary**

*The automation of 26-inch refractor of Pulkovo observatory is made. The scheme of modernization and the basic algorithms of system of automatic observations are described.*

## ОСОБЕННОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ЗЕНИТ-ТЕЛЕСКОПА ЗТФ-135

Наумов В.А.

*О систематической ошибке определения широты с помощью зенит-телескопов, возникающей из-за неперпендикулярности горизонтальной оси инструмента и оси ампулы талькоттовского уровня, сообщается. Особенность конструкции зенит-телескопа Фрейберга заключается в том, что зенит-телескоп Фрейберга конструктивно лишен этого недостатка. При регулировке наклонности у него не нарушается перпендикулярность горизонтальной оси инструмента и оси ампулы уровня.*

В 1940 году в бюллетене АОЭ № 19 появилась статья казанского астронома Бельковича И.В. «Об одной систематической ошибке зенит-телескопа». В этой статье речь шла об ошибке определения широты из-за неперпендикулярности оси ампулы талькоттовского уровня и горизонтальной оси зенит-телескопа. Во второй половине XX-го столетия об этой ошибке появилось несколько статей астрометристов и геодезистов, таких как Агафонов Г., Филиппов А.Е., Колупаев А.П., Мауерер В.Г., Старостин А.Л. и Федоров Е.П. (со ссылкой на статью Бельковича И.В.). Предложено несколько способов определения этой ошибки.

Приведем формулу Бельковича:

$$\Delta\varphi = \Delta I = (I_e + I_w)/2 \times \beta/3438 \quad (1),$$

где  $\Delta\varphi$  – систематическая ошибка определения широты,  $\Delta I$  – ошибка наклонности в меридиане,  $(I_e + I_w)/2$  – ошибка наклонности в плоскости, перпендикулярной плоскости измерения,  $\beta$  – угол отклонения от перпендикулярности осей: горизонтальной оси инструмента и оси ампулы уровня (оси симметрии ампулы уровня). Здесь широта и наклонность выражены в секундах дуги,  $\beta$  – в минутах дуги.

Суть этой ошибки заключается в следующем: высокоточные уровни телескопа обычно устроены таким образом, что ампула уровня помещается во внутренний кожух, один конец которого оканчивается шаром, другой – оканчивается стержнем. Стержень в сечении, перпендикулярном оси уровня, имеет вид четырехугольника. Внутренний кожух шаром входит с небольшим трением во внешний кожух, который на противоположном конце имеет два горизонтальных и два вертикальных винта, являющихся парно винтами-антагонистами. С помощью этих винтов можно управлять положением четырехугольного стержня внутреннего кожуха вместе с ампулой, при этом сначала слегка освобождается четырехугольный стержень горизонтальной парой винтов, затем устанавливается необходимая наклонность вертикальными винтами. При этом внутренний кожух вращается вокруг центра шаровой поверхности. Затем закрепляются горизонтальные винты, по возможности, без смещения внутреннего кожуха. (К сожалению, часто происходит смещение). Выполняя ряд последовательных регулировок, наблюдатель со временем смещает один конец ампулы уровня случайным образом (на восток или на запад), нарушая тем самым перпендикулярность оси ампулы уровня и горизонтальной оси инструмента.

В действительности оказалось, что эта же ошибка по той же причине может привести к аналогичным ошибкам определения зенитных расстояний на меридианных и вертикальных кругах, на универсалах и теодолитах, а также при наблюдении времени или прямых восхождений звезд на пассажном инструменте. Не на всех пассажных ин-

струментах имеется возможность покачать подвесной (накладной) уровень относительно горизонтальной оси, чтобы при необходимости удерживать угол  $\beta = 0$ .

Прежде чем выработать общую формулу влияния ориентации оси уровня на наклонность, условимся считать основной плоскостью ту плоскость, в которой происходит точное измерение наклонности. Например, для зенит-телескопа, вертикального круга – это плоскость меридиана. Для переносного пассажного инструмента основная плоскость – это плоскость первого вертикала. Для универсала и теодолита – это плоскость вертикала, в котором производятся измерения зенитных расстояний. Плоскость, перпендикулярную плоскости точного измерения наклонности, будем считать вспомогательной.

При принятии этих условий сформулируем правило: если ось ампулы уровня находится под углом к плоскости измерений (т.е. к основной плоскости), то возникает систематическая ошибка наклонности, определяемая формулой

$$\Delta I = I_{вс} \times \beta / 3438, \quad (2),$$

где  $\Delta I$ ,  $I_{вс}$  – наклонность в основной плоскости и наклонность во вспомогательной плоскости соответственно.

Оценим допустимое значение искомого  $\beta$ , исходя из условий  $\Delta I \leq 0.01''$ ,  $I_{вс} \leq 5''$ . Получаем следующее требование:  $\beta$  составляет угол около  $7'$ .

Особенность зенит-телескопа Фрейберга заключается в том, что этот инструмент снабжен уровнями, не имеющими выше упомянутых горизонтальных винтов, а четырехугольный стержень при регулировке уровня вертикальными винтами скользит с небольшим трением между двумя плоскостями, не позволяющими ему перемещаться в горизонтальном направлении. Имеется более сотни инструментов – зенит-телескопов, пассажных инструментов, универсалов и теодолитов с точными уровнями, все они снабжены четырьмя винтами для регулировки наклонности. Уровни ЗТФ-135 были приобретены у К. Райхеля в Берлине вместе с талькоттовской рамой [6]. В этом случае при правильной сборке узла «талькоттовская рама с уровнями» можно избежать возникновения описанной в данной статье ошибки. Иначе может возникнуть постоянный угол  $\beta$  – отличие от перпендикулярности горизонтальной оси и осей уровней и эта ошибка будет постоянной. Можно утверждать, что многократные специальные исследования зенит-телескопа ЗТФ-135 методом, описанным в статье [7], показали, что угол  $\beta$  у этого телескопа равняется практически нулю в течение многих лет. Встречаются, конечно, особенности и у других уровней, поэтому не всегда требуется проводить специальное исследование. В итоге, в день столетия со дня ввода инструмента в регулярную службу широты мы с благодарностью отмечаем, что инструмент ученого-механика пулковской обсерватории Генриха Андреевича Фрейберга прекрасно работал в течение 100 лет без капитального ремонта и внес большой вклад в службу широты, позволив создать практически непрерывный широтный ряд, который отличается своей длительностью, однородностью и стабильностью.

В заключение выражаю благодарность Кулишу А.П. за помощь, оказанную мне при написании исторической части статьи о покупке уровней.

### Литература

1. **Белькович И.В.** Об одной систематической ошибке зенит-телескопа. Бюллетень АОЭ, № 19, Казань, 1940.
2. **Агафонов Г., Белькович И.** Добавление к предыдущей статье. Там же.
3. **Филиппов А.Е.** Об одной возможной причине систематических ошибок при определении широты. Тр. Полтавской Грав. обсерв. т.VII., изд. АН УССР. Киев, 1958, с.111-118.



4. **Колупаев А.П., Мауерер В.Г., Старостин А.Л.** Практическое руководство по геодезической астрономии. Тр. ЦНИИГАиК, вып. 148, Геодезиздат, М., 1962, с.15-16.
5. **Агафонов Ю.Н.** О поверке Талькоттовского уровня. Геодезия и картография, № 3, 1985, с.45-49.
6. **Ausan A.** Das grosse Zenittelescop der Nicolaihauptsternwarte, Mitteilungen der Nicolaihauptsternwarte zu Pulkovo, № 4, Band I, 1905.
7. **Наумов В.А.** Изв. ГАО, № 213, Санкт-Петербург, 1998. с.264-268.

## THE PECULIARITY OF THE ZENITH-TELESCOPE ZTF-135

Naumov V.A.

### *Summary*

*The systematic error of latitude determination by means of zenith-telescopes is discussed. The construction of the zenith-telescope ZTF-135 is analyzed.*

## **ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ШКАЛЫ ДЛЯ СКАНЕРОВ**

**Поляков Е.В.<sup>1</sup>, Поляков В.В.<sup>1</sup>, Федотова Л.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория (ГАО РАН)

<sup>2</sup> Ленинградское Оптико-Механическое Объединение (ЛОМО)

*Оцифровка фотопластинок астрометрического ряда с помощью сканеров не обеспечивает сохранения высоких метрологических характеристик снятой информации в силу конструктивных особенностей этих устройств. Предлагаемые высокоточные измерительные шкалы позволят превратить сканер в эффективный измерительный прибор, не уступающий по точностным характеристикам специализированным астрографическим машинам типа "Ас-корекорд".*

### **Введение**

В последние годы астрономическое сообщество озаботилось проблемой сохранения фотографического наблюдательного материала, имеющего почти полуторавековую историю [1]. Для решения указанной задачи наиболее подходящим средством являются Автоматизированные Измерительные Комплексы (АИК) – "Galaxy", РММ, СОМОS, "Фантазия" [2-5]. Однако количество таких систем в мире исчисляется единицами и для большинства стеклотек (архивов стеклянных пластинок) они недоступны, поскольку АИК являются стационарными установками, а доставка к этим установкам на обработку массивов из десятков тысяч пластинок весом в тонны оказывается, как правило, непосильным мероприятием.

В России имеется лишь одна астрографическая машина высокого класса. Это АИК "Фантазия", установленная в Пулковской обсерватории. Здесь же, в Пулковской стеклотекке, хранится около 50 тысяч астронегативов, что составляет не более 5-7 процентов от общего фонда астрономических фотоматериалов, накопленных в стране. В 2004-2004 годах в ЛАНИ выполнен первый этап проекта по оцифровке и переписи всего содержимого стеклотекки на электронные носители [6]. В работе использовались планшетные сканеры UMAX-1200 и UMAX-2400 с адаптером для прозрачных носителей (рис.1, 2). Сканирование выполнялось с разрешением от 600 до 1200 dpi. Полученные электронные копии фотопластинок являются подготовительным материалом для второго этапа: дальнейшей, уже высокоточной, оцифровки содержимого стеклотекки на АИК "Фантазия". На завершение проекта потребуется несколько лет.

Аналогичные работы начаты в 2004 году в крупнейших российских астрономических фотоархивах в ИНАСАН, ГАИШ МГУ и других. Оцифровку планируется выполнять на планшетных сканерах высокого разрешения. Однако само по себе высокое разрешение не гарантирует сохранения точностных характеристик фотоматериала в силу конструктивных особенностей сканеров, а именно, отсутствия контроля за положением светоприемника (ПЗС-линейки) в процессе сканирования.

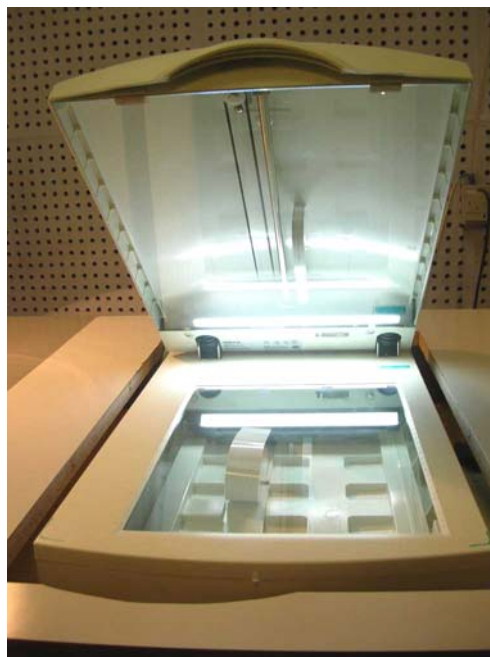
### **Конструктивные особенности планшетных сканеров**

Сканер для оцифровки прозрачных носителей (рис.1, 2) комплектуется из двух функционально схожих блоков – из собственно сканера (нижняя часть) и адаптера для прозрачных носителей (верхняя часть). В обоих блоках смонтированы системы позиционирования кареток с осветителем (адаптер, рис.3) и светоприемником (сканер,

рис.4), движение которых в процессе съемки синхронизировано. Осветитель оснащен газоразрядной лампой высокой светимости, светоприемник состоит из зеркально-линзовой системы, щелевых диафрагм и ПЗС-линейки, на которую построчно проецируется изображение.



**Рис.1.** Сканер UMAX 1200 с адаптером.



**Рис.2.** Осветитель включен.

Обе каретки перемещаются шаговыми двигателями в прерывистом режиме. Каждая из них смещается параллельно самой себе. Параллельность обеспечивается втулками, впрессованными в каретки и скользящими по стальным направляющим. Направляющие осветителя и светоприемника располагаются по-разному: у первого - близко к середине каретки, у второго - с одного края, другой край свободен и движется, опираясь на ролик, по горизонтальной полочке. Точки приложения тяги находятся вблизи втулок. В качестве движителя используется зубчатый ремень. Положение каретки определяется номером шага двигателя. Сканы формируются в моменты пауз в движении. Таким образом, шаг сканирования вдоль оси X определяется оптическими, а вдоль оси Y - механическими характеристиками устройства. Рабочие плоскости сканера и адаптера ограничены стеклянными пластинами, объемы обоих блоков в значительной степени защищены от попадания загрязнений извне.

### **Источники ошибок сканирования**

В нескольких последних фразах содержится в неявном виде почти весь список источников погрешностей сканирования. При тех требованиях, что предъявляются к астрометрическому материалу, - в субмикронном диапазоне величин - направляющие придется считать непрямолинейными, втулки и шестерни - допускающими значительный люфт, шкивы и ролики - имеющими эксцентриситет, зубчатый ремень - подверженным растяжению, положение светоприемника во время оцифровки строк изображения - нестабильным и т.д. Однако самым серьезным недостатком сканеров является отсутствие контроля за положением светоприемника в процессе сканирования. Здесь следует заметить, что сохранение астрометрического качества сканируемых материалов не входит в список задач, для решения которых предназначены неспециализированные сканеры. С этой точки зрения указанный недостаток не является таковым. Действительно, интегральная погрешность, порождаемая перечисленными выше причинами, в среднем не

превышает 4-7 микрон, т.е. относится к субпиксельным эффектам даже при задании весьма высокого разрешения, например, 2400 dpi, которому соответствует элемент сканирования размером чуть более 10 микрон. Исключение составляют погрешности  $\Delta y$  в области  $y=y_{\max}$ , могущие достигать значений  $|\Delta y| \approx 20 \div 30$  мкм.



**Рис.3.** Система позиционирования осветителя.



**Рис.4.** Система позиционирования светоприемника.

В настоящей работе метрологическое тестирование сканера выполнено на основе измерения положения штрихов четырех шкал, снятых с измерительных машин "Аско-рекорд". Все четыре шкалы, распределенные в рабочем поле сканера, сканировались с разрешением 1200 bpi многократно с интервалами времени от съемки к съемке в пределах 0-30 минут. Всего получено 12 файлов объемом по 115 МБ, содержащих цифровые копии изображений формата А4. Шкалы в эксперименте считались идеальными, их погрешности не исследовались, а принимались равными нулю. Тепловое расширение-сжатие шкал в процессе эксперимента не учитывалось. Искажения, порождаемые оптической системой светоприемника считались постоянными и на данном этапе во внимание не принимались. Основное внимание было уделено механике прибора.

Анализ результатов измерений позволил выделить две группы несанкционированных движений каретки светоприемника - смещения и перекосы, приводящие к субпиксельным искажениям изображения, выявляемым лишь путем позиционных измерений его отдельных элементов. Не останавливаясь на подробном анализе процессов формирования погрешностей, перечислим основные из них, укажем на их источники, приведем оценки величин.

1. Погрешности в координате X:

- 1.1. Непрямолинейность или прогиб направляющей в вертикальной плоскости,  $|\Delta z| < 30$  мкм; следствие – наклон ПЗС-линейки относительно плоскости сканируемой пластинки на угол  $\psi \approx \Delta z/L$ ,  $\psi \ll 1^\circ$ , погрешность  $\Delta x \approx h\psi$ , где L - длина линейки,  $h \approx 45$  мм – расстояние от пластинки до призмы.
- 1.2. Непрямолинейность направляющей в горизонтальной плоскости на величину  $\Delta x$ ; следствие - смещение линейки на  $\Delta x$ ,  $|\Delta x|_{\max} < 10 \div 15$  мкм.

1.3. Эксцентриситет ведомого ролика на свободном конце каретки светоприемника. Эффект тот же, что в 1.1.

Этим, в основном, ограничивается перечень причин (без учета оптики), приводящих к искажению изображений вдоль координаты X. Поскольку развертка изображения по X выполняется ПЗС-линейкой, характерной погрешностью является смещение строки в целом, без изменения взаимных положений отдельных ее элементов. Иначе обстоит дело с механической разверткой, порождающей Y-искажения, связанные с перекосами каретки в процессе ее перемещения и ошибками позиционирования.

2. Погрешности в координате Y:

- 2.1. Непрямолинейность направляющей в горизонтальной плоскости на величину  $\Delta x_b$ , где  $b$  - расстояние между ведущими втулками (см. рис.4); следствие - перекос линейки на угол  $\varphi \approx \Delta x_b/b$ ,  $\varphi \ll 1^\circ$ ,  $|\Delta x_b|_{\max} < 10 \div 15$  мкм,  $\Delta y \approx x\varphi$ ,  $|\Delta y|_{\max} < 3 \div 5$  мкм. Величина погрешностей возрастает с удалением от оси направляющей.
- 2.2. Наибольший вклад в суммарную погрешность  $\Delta y$  обеспечивают люфты втулок, приводящие к еще большему перекосу линейки, чем описано в п. 2.1: по непосредственным измерениям с помощью микрометрического индикатора ошибки в зоне высоких значений X достигают величины 25 и более микрон.
- 2.3. Ошибки позиционирования (каретка не выходит в заданное положение) связаны с люфтом шестерен силовой передачи, эксцентриситетом натяжного шкива и растяжением зубчатого ремня (рис.5-7). Этот вид погрешностей достигает максимальных величин –  $20 < |\Delta y|_{\max} < 30$  микрон - в зоне высоких значений Y, причем, по мере износа элементов механической части ситуация ухудшается.

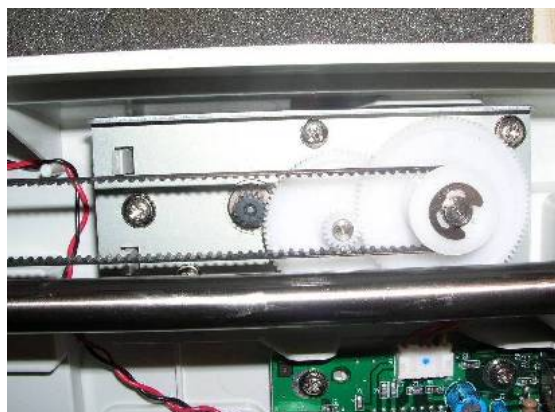


Рис.5. Силовая передача, ременный привод, направляющая.



Рис.6. Шаговый электродвигатель и шестерни силовой передачи.



Рис.7. Натяжной шкив, зубчатый ремень, крепление направляющей.

Приведенные значения ошибок позиционных измерений астрофотографий на сканере, правильнее говоря, измерений изображений, искаженных в процессе сканирования, согласуются с оценками, полученными другими авторами и по иным методикам [7,8].

Попытки применения сканеров для оцифровки астронегативов предпринимаются с момента появления самих сканеров. Для получения предварительных координат объектов на фотопластинках в ЛАНИ в середине 90-х годов применялся даже ручной сканер. Несмотря на быстрый прогресс в области сканирующих устройств и успешное применение сканера для решения узкого класса задач астрометрии [7], эта техника при наличии в ГАО измерительной машины "Фантазия" рассматривалась и применялась нами лишь как вспомогательное оборудование. Однако растущий интерес к возможности использования сканеров в непрофильной для них сфере - создания электронных астрометрических коллекций [8] - побудил нас, используя накопленный опыт в области оцифровки фотоматериала и имеющуюся прецизионную установку - АИК "Фантазия", предложить дешевый и, надеемся, эффективный вариант дооснащения сканера и превращения его в измерительный прибор с высокими метрологическими свойствами.

Казалось бы, при современном развитии технологий в электронике и микромеханике, наличии миниатюрных датчиков положения поставленная задача легко выполнима, и это действительно так, если не принимать во внимание стоимость датчиков, на порядок с лишним превышающую стоимость самого сканера. Предлагаемое дешевое решение опирается на применение шкал специальной разметки, превращенных в высокоточный инструмент путем предварительного исследования и сертификации их с использованием дорогих прецизионных датчиков.

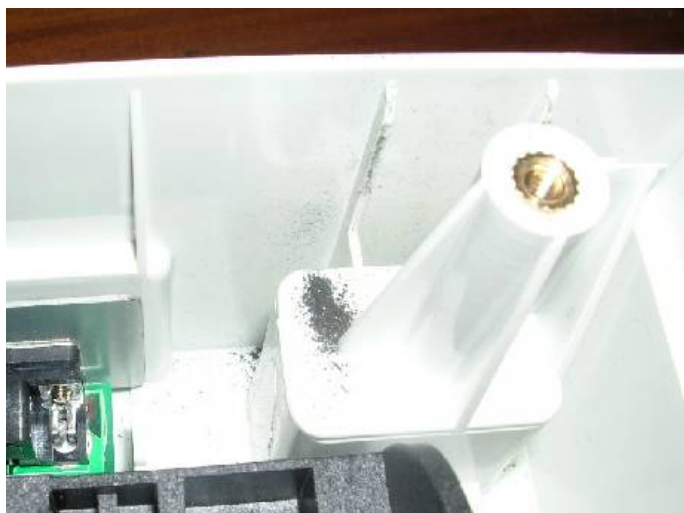
### **Источники помех на изображениях**

Здесь нелишне и к месту будет упомянуть о наиболее часто встречающихся помехах на изображениях. Их источниками, как правило, являются царапины, ворс, пылинки на предметном стекле, и, самое неприятное и трудноудаляемое, - частицы стираемых деталей сканера. Первая группа факторов при поддержании чистоты в рабочем помещении и использовании персоналом защитной одежды может быть сведена к минимуму. Тем не менее, даже в минимальных объемах внешние источники помех доставляют беспокойство, поскольку то, что не только не будет замечено, но даже с трудом обнаружено на обычных фотографиях, на астронегативах сформирует дополнительные изображения, часто неотличимые от изображений звезд. Поэтому пластинки перед сканированием следует промыть спиртом или спиртоэфирной смесью со стороны стекла, продуть воздухом из резиновой груши или обмести очень мягкой кистью со стороны эмульсии, протереть замшей предметные стекла сканера и адаптера.

Гораздо сложнее обстоит дело с внутренними источниками частиц. В нашем случае это частицы черного пластика от подпружиненных опор адаптера и белого пластика из осей натяжных шкивов (рис.8, 9).

И те, и другие частицы перемещаются по внутренней поверхности предметных стекол под действием электризации, вызываемой работой сканера. Удаляются они пылесосом, для чего необходимо выполнить частичную разборку устройства.

И, наконец, представитель третьей группы помех, вошедших в словарь компьютерной техники и в ее историю с первых дней - bug (рис.10), встреченный в нашей практике единственный раз, извлеченный из самых недр сканера, но не причинивший никакого вреда ни оцифрованным изображениям, ни технике.



**Рис.8.** Частицы пластика от истираемых опор адаптера, проникшие во внутренний объем сканера.



**Рис.9.** Частицы пластика от истираемой оси натяжного шкива, прилипшие к электризованному предметному стеклу адаптера.



**Рис.10.** Bug.

Наилучшим решением проблемы помех окажется, по-видимому, изъятие из сканера предметных стекол и замена их на кассету для крепления пластинки со стороны нижней части устройства, т.е. со стороны блока светоприемника, и установка в адаптер узких стеклянных линеек или тросовых направляющих, поддерживающей края каретки осветителя снизу. Таким образом, из шести поверхностей, подверженных загрязнению, останутся две - стекло и эмульсия самой фотопластинки.

### Разметка шкалы

Проблемы, связанные с использованием планшетных сканеров для астрометрических работ, и методы их решения известны. Это, во-первых, получивший развитие в давние времена метод измерения с помощью однокоординатных приборов, когда выполняется двукратное сканирование фотопластинки с поворотом ее на 90 градусов с объединением результатов измерения вдоль точной оси в последующей обработке и, во-вторых, метод замешивания в исходное изображение эталонных маркеров, положение которых известно с высокой точностью, и в систему которых редуцируются результаты измерения исследуемого материала. Оба эти метода аккуратно исследованы в работе [7].

Предлагаемый нами третий метод основывается на применении двух эталонных шкал (рис.11). Шкалы располагаются по краям исследуемого изображения и сканируются вместе с ним. Это, по сути, является расширенным вариантом второго из перечисленных подходов, но представляется более эффективным и лишенным недостатков предшественника, а именно: позволит непосредственно измерять погрешности для каждого скана в отдельности, т.е. не редуцировать измерения по ограниченному числу опорных маркеров, а компенсировать искажения изображения с высокой степенью детализации, прямо вычисляя позиционные поправки для каждого из элементов изображения. При этом принимается допущение, что ПЗС-линейка является твердотельной, неизгибаемой, положение ее пикселей остается неизменным относительно основы, искажения, порождаемые оптической системой светоприемника постоянны, что на микронном уровне точности является справедливым.

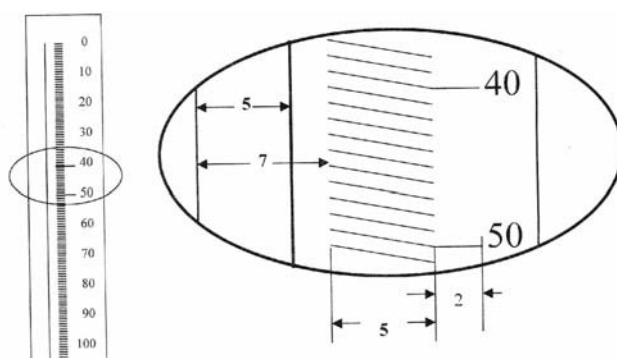


Рис.11. Схема разметки эталонной шкалы для сканера.

Состав штрихов и линий разметки шкалы позволяет отслеживать положение каждого из сканов по обеим осям. Сплошные вертикальные линии (направляющие) двух шкал служат для определения смещений ПЗС-линейки вдоль оси X. Эволюции светоприемника по Y фиксируются относительно наклонных штрихов, нанесенных так, чтобы любая горизонтальная линия при любом значении ординаты всегда имела бы не менее одной точки пересечения с системой штрихов. Иными словами, ПЗС-линейка в любой ее позиции в пределах рабочего поля сканера будет иметь отметки на штрихах обеих шкал и, таким образом, с учетом принятого допущения может быть определено по-



ложение любого из элементов оцифрованного изображения относительно исходного на фотопластинке. Кроме того, использование наклонных штрихов в качестве нониуса позволяет существенно повысить точность измерения положения светоприемника по Y.

Шкалы изготавливаются на стеклянной основе путем нанесения штрихов с использованием фотолитографической технологии. Фотолитография применяется для образования рельефа пленки металла. В нашем случае это тонкая пленка хрома толщиной 0,1 мкм, нанесенная вакуумным напылением на поверхность стеклянной линейки. Фотолитографический метод основан на том, что некоторые виды высокомолекулярных соединений обладают способностью изменять свои свойства под действием света. При условии устойчивости пленок этих соединений (фоторезистов) к травителям, применяемым в процессе фотолитографии, они могут быть использованы для защиты при формировании рельефа. Экспонирование пленки фоторезиста, нанесенной на поверхность металлизированной стеклянной линейки, производится через стеклянную маску-фотошаблон с системой прозрачных и непрозрачных штрихов -будущих штриховых элементов линейки. При последующем проявлении происходит удаление с подложки ненужных участков пленки фоторезиста и образование защитной маски с рисунком и размерами, обусловленными рисунком на фотошаблоне. Фотошаблон линейки изготовлен с помощью оптического генератора изображений, управляемого компьютером. Генератор использует остросфокусированный луч света, который сканирует площадь фотопластинки в соответствии с заданной программой, создавая структуру заданной топологии. Минимальный размер элементов изображения составляет единицы микрон при точности позиционирования 0,2-0,5 мкм. Однако для работы на сканерах с разрешением 1200-2400 dpi, т.е. при размере элементов изображения 20-10 мкм, ширина штрихов и сплошной линии шкалы (рис. 11) была выбрана, во избежание субпиксельных эффектов, 30 и 50 мкм соответственно.

### **Сертификация шкалы**

Изготовленные шкалы сертифицируются на АИК "Фантазия" путем высокоточных измерений положения наклонных штрихов и сплошной линии (направляющей). Для каждой из шкал составляется электронный паспорт, представляющий собой файл, содержащий поправки направляющей за непрямолинейность, координаты положения штрихов относительно направляющей, координаты особых точек - помех, дефектов, утолщений, разрывов штрихов и линий. Паспорта шкал используется программой коррекции оцифрованного изображения.

### **Применение шкал**

Шкалы укладываются параллельно краям фотопластинки с достаточно свободными допусками. Разность нуль-пунктов шкал и отклонение их от направления оси Y определяются и компенсируются программой в процессе обработки. Фотопластинка сканируется вместе со шкалами и составляет с ними единое цифровое изображение. Корректировка изображений на основе измерения шкал осуществляется либо непосредственно при позиционных измерениях объектов, либо на этапе подготовки изображения к измерениям с получением его исправленного варианта. Для каждого из подходов имеются аргументы за и против. В первом случае ни в один из элементов изображения не вносятся никаких изменений, содержимое файла остается нетронутым, каждая из точек, составляющих измеряемый объект, участвует в измерении со своим значением плотности и точными координатами. При втором подходе создается новый файл, элементы которого представляют собой результат билинейной или бикубической интерполяции, что приводит к некоторому сглаживанию изображений, практически незаметному на характерных для астрофотографий объектах. Этот вариант обработки эффективен

при экстрагировании отдельных изображений из общей картины, при совместной обработке нескольких изображений, поскольку в координаты каждого из их элементов внесены поправки.

### Заключение

В работе освещены вопросы, поднимавшиеся в процессе обсуждения выполняемых и планируемых мероприятий по созданию электронных копий стеклотек астрономических обсерваторий России. В связи с актуальностью проблемы мы решились на публикацию статьи до завершения всесторонних исследований предлагаемой методики и средств дооснащения сканеров с тем, чтобы предупредить приложение усилий, результаты которых впоследствии могут оказаться неудовлетворительными.

### Литература

1. *Safeguarding* the information in photographic observations, Resolution B3, XXIVth IAU GA, 2000.
2. *Pratt N.M.* The Performance of GALAXY. - Automation in Optical Astrophysics, The proc.of Colloquim No. 11 of the IAU, Edinburgh, 1970, p.109-118.
3. *Pier J.R. and Monet D.G.* The USNO Precision Measuring Microdensitometer Project to Measure the Two Epoch Plate Sets of the Palomar Observatory Sky Survey. – Workshop on Databases for Galactic Structure A.G.D Philip, B. Hauck and A.I Upgren, eds, p.161-166, 1993, L. Davis Press.
4. *Pratt N.M.* The COSMOS Measuring Machine. – Vistas in Astronomy, 1977, Vol.21, pp.1-42. Pergamon Press.
5. *Поляков Е.В., Герасимов А.Г., Пикин Ю.Д., Савастеня А.В., Соколов А.В.* Координатно-измерительная машина "Фантазия" для автоматического измерения положений звезд на астронегативах. - ж. "Измерительная техника", № 3, М., 1994, с.9-11.
6. *Поляков Е.В., Канаева Н.Г., Канаев И.И., Пугач Т.Н.* ЭКЗИП - Электронная Коллекция Звездных Изображений Пулковской Стеклотеки. - Изв. ГАО РАН, №216, СПб, 2002, с.241-251.
7. *Измайлов И.С.* Применение сканера общего назначения для позиционных измерений астрофотографий. - Изв. ГАО РАН, № 214, СПб, 2000, с.533-545.
8. *Barbieri C. et all.* Digitization and Scientific Exploitation of the Italian and Vatican Astronomical Plate Archives. Experimental Astronomy, vol.15, No.1, 2003, pp.29-43, Kluwer Academic Publishers logo. [www.skyarchive.org/recent\\_pub/barbieri\\_EA.pdf](http://www.skyarchive.org/recent_pub/barbieri_EA.pdf)

## PRECISION MEASURING SCALES FOR SCANNERS

**Poliakow E.V.<sup>1</sup>, Polyakov V.V.<sup>1</sup>, Fedotova L.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Central (Pulkovo) astronomical observatory (GAO RAS)*

<sup>2</sup> *Leningrad OptoMechanical Association (LOMO)*

### Summary

*The digitization of astrometric photoplates with the aid of scanners does not ensure saving high metrological characteristics of the scanned information by virtue of design features of these devices. The offered precision measuring scales will allow to convert the scanner into the effective measuring instrument which is not worse on its accuracy than specialized astrographics mashines such as "Ascorecord".*

## **МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЛЕСКОВ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ ГОРНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ГАО НА ВОЛНЕ 5.1 см**

**Шрамко А.Д.**

*Представлено описание радиотелескопа для наблюдений излучения Солнца на волне 5.1 см и методики автоматизации системы регистрации и обработки. Приводятся методики ежедневной калибровки и калибровки по Луне. Даны примеры регистрации радиоизлучения некоторых мощных вспышек 2003 и 2005 гг. Поток излучения от вспышки 23.10.2003 был порядка  $4 \times 10^4$  с.е.п.*

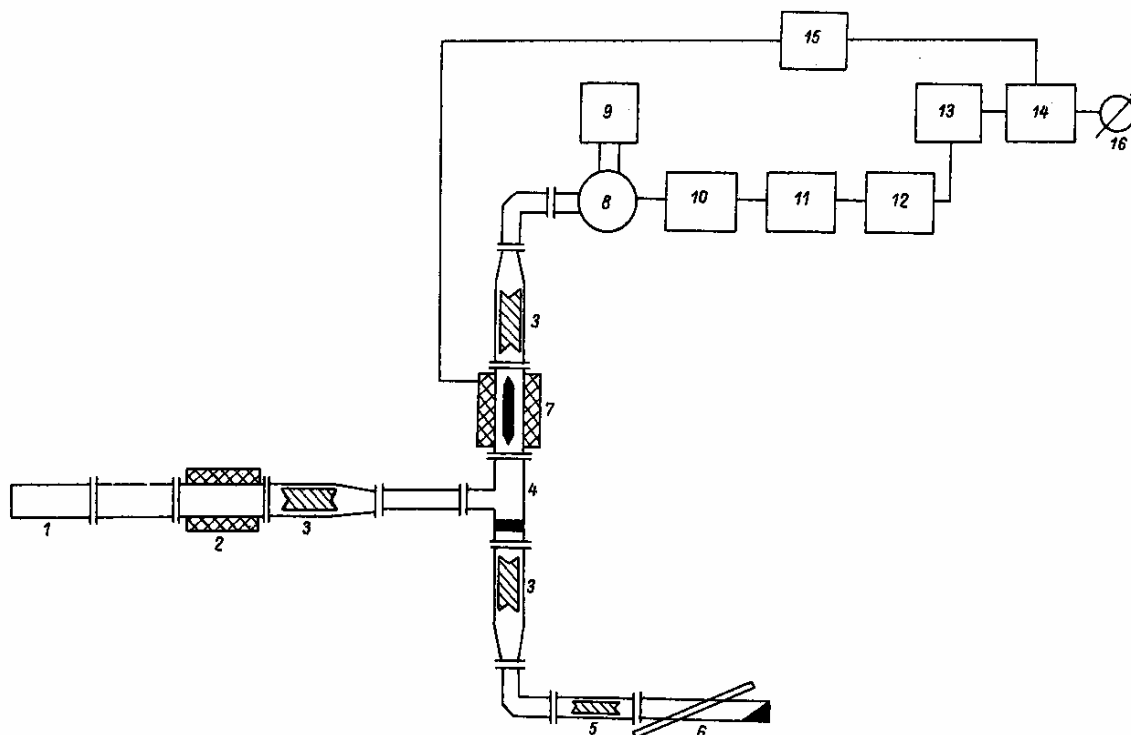
### **Введение**

Регулярные наблюдения радиоизлучения Солнца дают важную информацию об уровне солнечной активности и быстропротекающих процессах в солнечной атмосфере. Радиотелескопы, регистрирующие полный поток радиоизлучения Солнца (full disc) могут использоваться как для мониторинга вспышечных процессов, так и для исследовательских задач по изучению динамики солнечных вспышек и квазипериодических явлений в солнечной атмосфере. Использование современных методов регистрации радиоизлучения позволяет автоматизировать систему обработки радиосигнала. До сентября 1994 г. на ГАС ГАО РАН проводились регулярные наблюдения, однако затем в силу различных причин они были заморожены. В период 2001-2002 годов на ГАС была проведена работа по возобновлению наблюдений и после модернизации системы регистрации сигнала, наблюдения стали регулярными. Целью данной статьи является описание проведенных работ, а также методы наблюдений и обработки при регулярных радионаблюдениях Солнца на Горной Астрономической Станции ГАО.

### **1. Описание радиотелескопа**

С апреля 2002 г. на Горной астрономической станции ГАО РАН (ГАС) после модернизации радиотелескопа возобновились регулярные наблюдения Солнца на волне 5.1 см. Наблюдения выполняются на параболическом зеркале диаметром 3 м, облучаемом открытым концом круглого волновода с помощью отражающего диска диаметром 350 мм. Монтажная экваториальная, сопровождение обеспечивается электроприводом с точностью до 2' в час. Ежечасно корректируется наведение антенны по сигналу. Используется модуляционный радиометр с супергетеродинным приемником. Полоса УПЧ равна 200 МГц, полная ширина шумовой дорожки при  $T = 1$  с не хуже чем 1°К. Суточная нестабильность коэффициента усиления не больше 1%. Блок-схема радиотелескопа приведена на рис.1. Здесь 1 - облучатель, 2 - пустая секция, 3 - анализатор - переход с круглого волновода на прямоугольный, 4 - волноводный тройник, 5 - аттенюатор, 6 - источник компенсирующего сигнала, 7 - ферритовый модулятор, 8 - смеситель, 9 - гетеродин, 10 - усилитель промежуточной частоты (УМ), 11 - детектор, 12 - усилитель низкой частоты, 13 - узкополосный фильтр частоты модуляции, 14- синхронный детектор, 15 - генератор напряжения частоты модуляции, 16 – регистрирующий прибор. В основу методики измерения потоков радиоизлучения Солнца был положен метод, описанный в работе [1]. Измерения антенной температуры Солнца проводятся путем сравнения измеряемого сигнала с сигналом шумовой трубки. Значения антенной темпера-

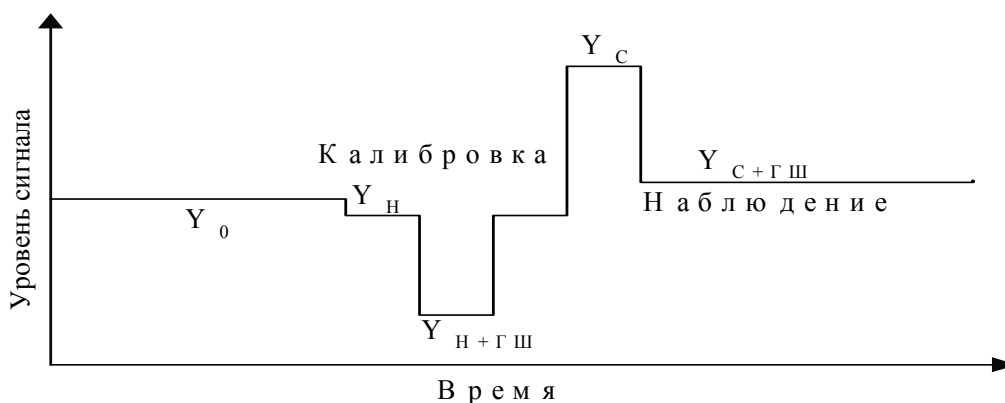
туры затем пересчитываются в потоки излучения с использованием переводного коэффициента, получаемого из измерений эффективной площади антенны по сигналу от Луны.



**Рис.1.** Блок-схема радиотелескопа ГАС ГАО РАН на волне 5.1 см.

Такая последовательность калибровок позволяет снизить влияние как нестабильности усиления приемника, так и сезонных изменений коэффициента поглощения атмосферы, изменений затуханий в волноводных трактах и других медленно меняющихся параметров аппаратуры, влияющих на абсолютные измерения.

На рис.2 схематично показана процедура измерений, производимых для определения антенной температуры Солнца. Обозначим антенную температуру при наведении антенны на небо как  $T_{АН}$ , на Луну -  $T_{АЛ}$ , на Солнце -  $T_{АС}$ . Сигнал из тракта эквивалента равен либо температуре эталона  $T_{Э}$ , находящегося при температуре окружающего воздуха  $t_B$  ( $^{\circ}C$ ):  $T_I = T_{Э} = 273 + t_B$ , либо при включенном генераторе шума:  $T_I = T_{Э} + T_{ш}$ .



**Рис.2.** Пример диаграммы калибровочной процедуры для определения антенной температуры.

На рис.2 отсчеты выходного прибора обозначены следующим образом,  $Y_0$  - "нулевой сигнал", отсчет выходного прибора, когда сравниваемые модулятором сигналы равны, например  $T_A = T_I = T_{\Sigma}$  для данной аппаратуры он совпадает с отсчетом, получаемым путем выключения модулятора;  $Y_H$  - при наведении антенны на небо,  $Y_0 - Y_H \sim T_{\Sigma} - T_{АН}$ ;  $Y_{Н+ГШ}$  - при наведении антенны на небо и при включенной ГШ  $Y_0 - Y_{Н+ГШ} \sim T_{\Sigma} - T_{ГШ} - T_{АН}$ ;  $Y_C$  - при наведении антенны на Солнце и выключенном ГШ,  $Y_C - Y_H \sim T_{АС} - T_{АН}$ ,  $Y_{С+ГШ}$  - при наведении антенны на Солнце и включенном ГШ (основной режим наблюдений),  $Y_{С+ГШ} - Y_0 \sim T_{АС} - T_{\Sigma} - T_{ГШ}$ . При записи уровня  $Y_H$ , антенна направляется к зениту на  $40'$  от Солнца.

Антенная температура Солнца определяется формулой:

$$T_C = k(Y_C - Y_H) = (T_{\Sigma} - T_{АН}(h_H)) \cdot \frac{Y_C - Y_H}{Y_0 - Y_H}, \quad (1)$$

или для основного режима наблюдения:

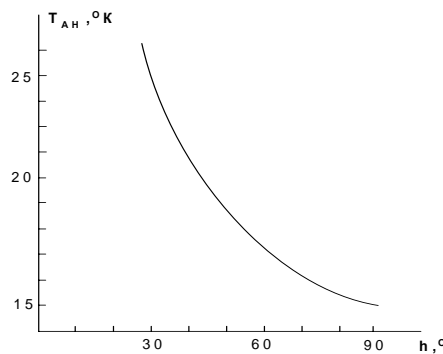
$$T_C = \kappa(Y_{С+ГШ} - Y_{Н+ГШ}) = (T_{\Sigma} - T_{АН}(h_H)) \cdot \frac{Y_{С+ГШ} - Y_{Н+ГШ}}{Y_0 - Y_H}. \quad (2)$$

Температура воздуха на площадке антенны измеряется в момент калибровки. Значения  $T_{АН}(h_H)$  берутся из рис.3. Кривая на рис.3 строится по экспериментальным точкам  $T_{АН}(h_H) - T_{АН}(90^\circ)$ .

Учет атмосферного поглощения в зависимости от высоты Солнца над горизонтом при  $h_H > 10^\circ$  производится с помощью выражения:

$$T_C^0 = T_C(h_C) \cdot (1 + a \cdot \cos ec(h_C)). \quad (3)$$

Коэффициент поглощения атмосферы  $a$ , характеризует поглощение радиоизлучения молекулами воды и кислорода [2]. В силу благоприятных климатических условий и того, что Горная астрономическая станция ГАО расположена на высоте около 2100 м над уровнем моря, поглощение сигнала Солнца в большинстве случаев (около 90% времени) на волне 5,1 см (но не на более коротких волнах) оказывается незначительным.



**Рис.3.** Экспериментальная кривая изменения радиотемпературы неба, от высоты над горизонтом

Измерение антенной температуры Луны состоит в многократном наведении и отведении антенны от Луны. Аналогично (3) антенная температура Луны равна:

$$T_L^0 = T_L(h_L) \cdot (1 + a \cdot \cos ec(h_L)), \quad (4)$$

где

$$T_L(h_L) = (T_{\Sigma} - T_{АН}(h_H)) \cdot \frac{Y_L - Y_H}{Y_0 - Y_H}. \quad (5)$$

Наблюдения Луны выполняются в ясную погоду и в периоды, когда  $h_{\text{Л}} > 80^\circ$ , т.е. Луна проходит зенитную область. В эти же периоды обычно проводятся наблюдения для построения кривой на рис.3.

Поток радиоизлучения Луны рассчитывается согласно результатам работы [3], интерполяция которых на  $\lambda = 5,1$  см дает выражение для средней яркостной температуры Луны:

$$T_B = 212^0 - 9.5 \cdot \cos(\Phi - 45^0),$$

где  $\Phi$  - фаза Луны. Тогда

$$F_{\text{Л}} = \frac{2kT_B}{\lambda^2} \pi (r_{\text{Л}}^T)^2,$$

где  $r_{\text{Л}}^T$  - топоцентрический радиус Луны.

Поток радиоизлучения Солнца определяется по формуле:

$$F_C = \frac{F_{\text{Л}} T_C^0}{T_{\text{Л}}^0} = g T_C^0. \quad (6)$$

Дальнейшая процедура сводится к выявлению и обработке быстропротекающих процессов на Солнце, наблюдаемых в радиодиапазоне в виде всплесков. Их классификация соответствует принятой в НИРФИ [4] классификации для всплесков на фиксированных частотах.

## 2. Примеры наблюдений

Регистрируемый сигнал вводится в персональный компьютер с помощью 12-разрядного АЦП (плата L-154) со временем преобразования 1.7 мкс. Программа регистрации считывает сигнал с частотой 30 кГц и находит среднее значение за 0,5 с, которое фиксируется. Сравнительно большая частота считывания позволяет уменьшить влияние различных электрических наводок, низкой частоты (50 Гц и др.), на регистрируемый сигнал

Сигнал радиоизлучения Солнца, записанный таким образом, далее обрабатывается по специально созданной программе, которая учитывает изменение коэффициента усиления и фазы сигнала и которую можно изменить на  $180^\circ$ , «переворачивая» сигнал. Пример калибровки, проведенной 14 января 2003 года, приведен на рис. 4. Здесь «Солн» (сигнал Солнца без ГШ) записан при «нормальной» фазе и усилении равном 2, «Н(+))» - сигнал неба, записан при той же фазе и усилении, «Н(-))» - сигнал неба, при «обратной» фазе и коэффициентах усиления равных 10 и 20, это позволяет более точно померить сигнал антенны-неба. Далее, «Ноль» это сигнал при выключенной модуляции. «ГШ» – сигнал генератора шума наложенный на сигнал неба при «обратной» фазе и усилении равном 2.

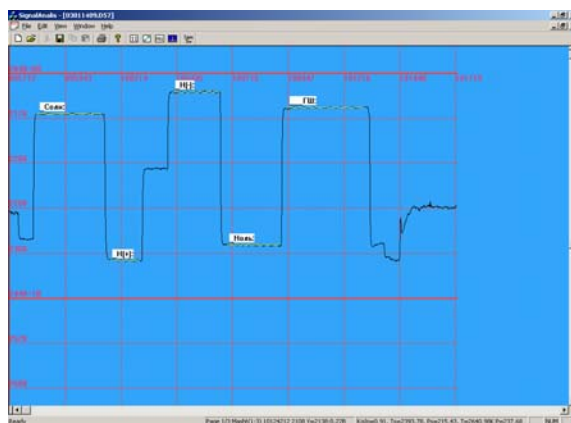
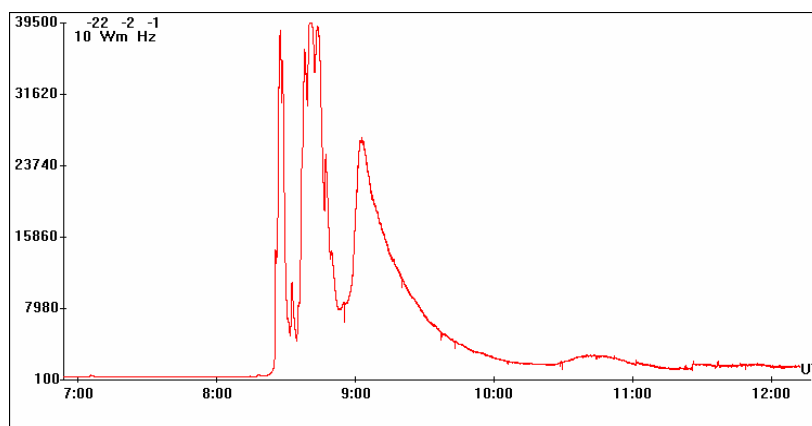
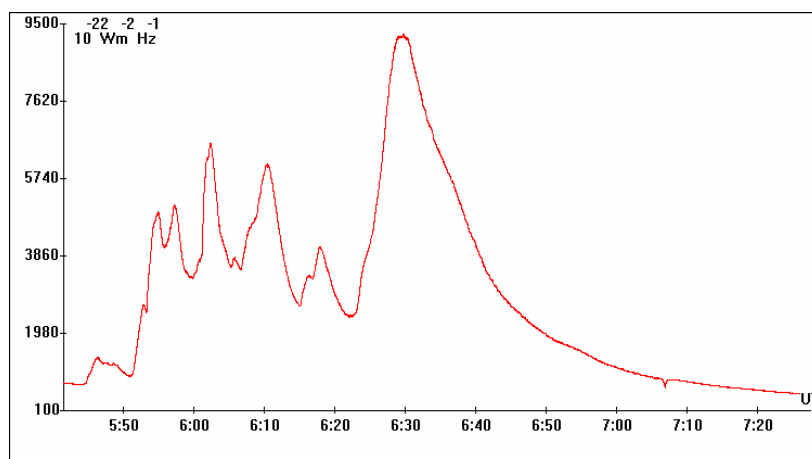


Рис.4. Пример калибровки радиотелескопа, проведенной для 14.01.2003.

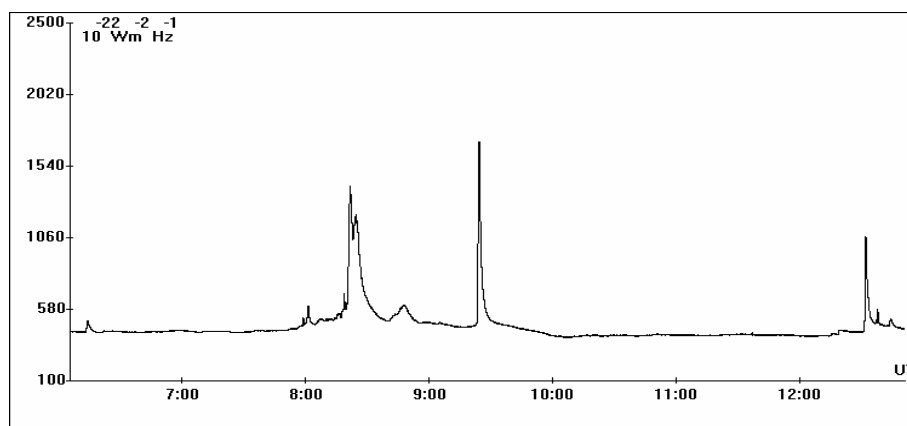
С учетом коэффициентов усиления и фаз радиотемпература спокойного Солнца равна 2393°K. Учитывая коэффициент  $g$  из (6), который для данного радиотелескопа равен  $0.09 \frac{\text{С.Е.П}}{\text{град}}$ , получим, что поток радиоизлучения спокойного Солнца равен 215 С.Е.П. ( $1 \text{ СЕП} = 10^{-22} \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ). На рис.5-9 приведены большие всплески, которые наблюдались в 2003 и 2005 годах на радиотелескопе ГАС ГАО РАН на волне 5,1 см.



**Рис.5.** Временной профиль всплеска радиоизлучения при вспышке 23.10.2003 (время в UT).



**Рис.6.** Вспышка 26.10.2003 года.



**Рис.7.** Серия вспышек 27.10.2003 года.

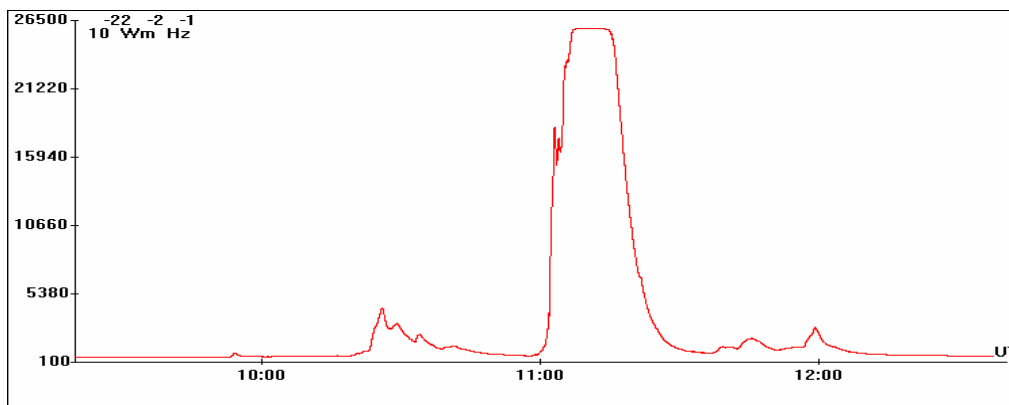


Рис.8. Изменение потока радиоизлучения для вспышки 28.10.2003.

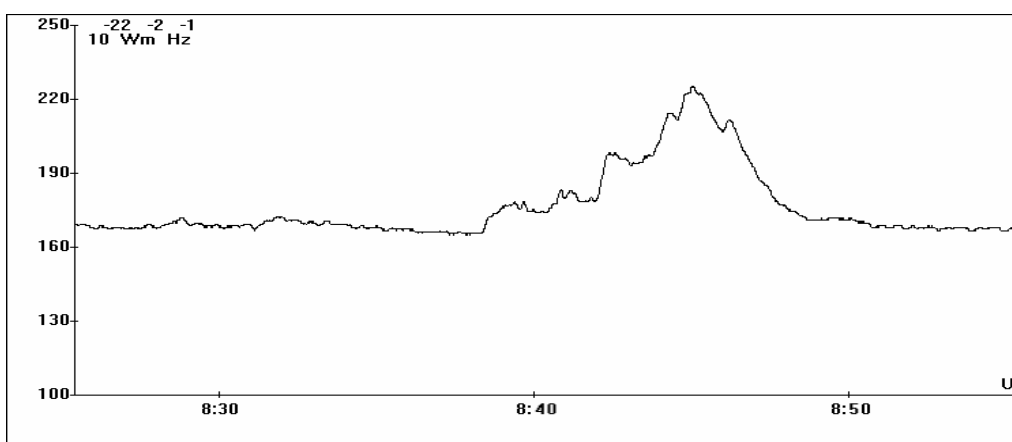


Рис.9. Вспышка 09.01.2005.

Результаты обработки всплесков представлены в таблице 1. В ней также приводятся данные, полученные спутником GOES (всплески в диапазоне рентгена в полосе 1-8 ангстрем) взятые с сайта <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/solar.html>. Всплески 23 и 28 октября очень мощные, это одни из самых больших всплесков Солнечной активности за всю историю радионаблюдений. Они вышли за пределы порога регистрации и можно говорить, что их поток больше чем, мы его наблюдали. Из таблицы видно, что имеет место хорошее совпадение радиовсплесков в диапазоне 5.1см и всплесков в рентгене, как по времени, так и по потоку излучения.

Таблица 1. Результаты обработки радионаблюдений.

Дата или номер вспышки	Время начала вспышки (UT)		Время конца вспышки (UT)		Время максимума вспышки (UT)		Тип всплеска и мощность	
	5.1 см, ГАС	Рентген, GOES	5.1 см, ГАС	Рентген, GOES	5.1 см, ГАС	Рентген, GOES	5.1 см ГАС, $10^{-22} \frac{Wm}{m^2 Hz}$	Рентген, GOES
<b>23.10.2003</b>								
1	6 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup>	3S, 37	M 32
2	8 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 19 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>	47GB,	X 54
3	10 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 19 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup>	>39250	M 27
<b>26.10.2003</b>							20GRF, 146	
1	5 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	5 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 33 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 29 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup>		X 12



<b>27.10.2003</b>							47GB, 9235	
1	6 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>	6 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup>		C 90
2	7 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup>	7 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 33 <sup>m</sup>	3S, 73	M 27
3	9 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 23 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup>	47GB, 936	M 50
4	12 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 55 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup>	47GB, 1246	M 67
<b>28.10.2003</b>							47GB, 628	
1	8 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 33 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup>		C 87
2	9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup>	12 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup>	11 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup>	11 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup>	11 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup>	22GRF, 82	X 127
<b>9.01.2005</b>							47GB, >24741	
1	8 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup>	8 <sup>h</sup> 55		M34
							4S, 52	

#### 4. Заключение

Модернизированная система регистрации позволяет регистрировать динамику энерговыделения Солнце в радиодиапазоне с хорошим временным разрешением, что позволит глубже изучить природу вспышек и других проявлений солнечной активности.

Например, на рис.6, 8 и 9 (вспышки 26.10.2003, 28.10.2003 и 9.01.2005) видна модуляция излучения с временным масштабом 2-8 мин перед главным максимумом. Такую модуляцию можно связать с осцилляциями вещества протуберанца или хромосферы (баллонная мода), периодически вторгающегося в токовый канал вспышечной арки и приводящими в итоге к резкому увеличению диссипации электрического тока – вспышке [7].

В дальнейшем предполагается развитие приемной части радиотелескопа, в частности введение канала круговой поляризации (параметр Стокса V) и повышение временного разрешения инструмента до 20-100 мс.

Таким образом, проведенная модернизация позволяет использовать радиотелескоп не только для мониторинга Солнца, но и для наблюдений по специальным программам. В частности, при наблюдениях солнечного затмения в марте 2006 г. на ГАС ГАО (полная фаза), при наземной поддержке космических миссий (КОРОНАС, SOLAR-B) и в программе «Международный гелиофизический год (ИГУ-2007)».

Данные доступны в Internet на сайтах <http://www.gao.spb.ru/>, <http://www.solarstation.ru>.

Количество дней наблюдений в год в среднем составляет 320-340.

Автор благодарит А.В. Степанова и А.Г. Глатова за замечания.

Работа поддержана грантами РФФИ № 03-02-16091 и № 02-02-16035 и Программой Президиума РАН «Нестационарные явления в астрономии».

#### Литература

1. Гельфрейх Г.Б., Кинёнес Х.А., Коржавин А.Н., Перес Х., Сантос Х., Сид М.А., Солнечные данные, № 9, 1974.
2. Жевакин С.А., Наумов А.Н., Изв. ВУЗов, Радиофизика, 9, № 3, 1966.
3. Троицкий В.С., Тихонова Т.В., Изв. ВУЗов, Радиофизика, 8, № 9, 1970.
4. Радиоизлучение Солнца. Станция Зименки, январь 1969.
5. Ермошенко В.Л., Солнечные данные, № 10, 1979.
6. Астрахан М.И., Гольнев В.Я., Петерова Н.Г., Позо Э.дель, Сориа С., Сото Ф., Солнечные данные, № 9, 1974.
7. Zaitsev V.V., Urpo S., Stepanov A.V. Astron. Astrophys. **357**, 1105, 2000.

**METHODS OF OBSERVATION AND PROCESSING OF SOLAR RADIO BURSTS  
AT 5.1 CM WAVELENGTH IN THE KISLOVODSK MOUNTAIN STATION  
OF THE PULKOVO OBSERVATORY**

**Shramko A.D.**

*Summary*

*The description of a radiotelescope for supervision of radiation of the Sun on a wave 5.1 cm and techniques of automation of system of registration and processing is submitted. Techniques of daily calibration and calibration on the Moon are resulted. Examples of records of a stream of a radio emission of powerful flashes are resulted during October, 2003. Capacity of the maximal flash 23.10.2003 has made, more than  $39250 \cdot 10^{-22} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Gz}^{-1}$ .*

# ИСТОРИЯ НАУКИ



**ПАМЯТИ ПУЛКОВСКИХ ШИРОТНИКОВ  
С.В. РОМАНСКОЙ (1886-1969), А.Я. ОРЛОВА (1880-1954),  
В.Р. БЕРГА (1891-1942), В.И. САХАРОВА (1911-1991)**

**Костина Л.Д.**

*Статья посвящается памяти пулковских широтников С.В. Романской, А.Я. Орлова, В.Р. Берга, В.И. Сахарова. Статья написана в связи с исполнившимся 19 сентября 2004 г. столетием пулковской службы широты.*

19 сентября исполнилось 100 лет со дня первого наблюдения за изменчивостью широты Пулкова с большим пулковским зенит-телескопом, что знаменует собой начало работы пулковской службы широты. Строго говоря, наименование «служба широты» стало употребляться в Пулкове спустя несколько десятилетий. В 1899 г. директор Пулковской обсерватории академик О.А. Баклунд (1846-1916) предложил пулковскому учёному механику Г.А. Фрейбергу-Кондратьеву спроектировать и изготовить в пулковской механической мастерской светосильный зенит-телескоп для использования в наблюдениях вместо пассажного инструмента, установленного в первом вертикале. Кроме оптики и уровней зенит-телескоп был собственноручно изготовлен Г.А. Фрейбергом-Кондратьевым и его 6-ю учениками. Большой пулковский зенит-телескоп до 1939 г. был единственным самым светосильным и крупным по размерам зенит-телескопом в мире.

Этот инструмент благодаря особенностям его конструкции оказался очень устойчивым и давал результаты высокой точности. С 1956 г. по предложению В.И. Сахарова большой пулковский зенит-телескоп для краткости стал называться ЗТФ-135, что означает: зенит-телескоп Фрейберга-Кондратьева, диаметр объектива 135 мм.

Несмотря на недостатки пулковской службы широты, её можно считать уникальным явлением. Её уникальность состоит, в частности, в длительности времени наблюдений с зенит-телескопом ЗТФ-135 почти без перерывов за исключением перерыва, вызванного Великой Отечественной войной, а также перерывов, вызванных неполадками инструмента, в самоотверженной работе наблюдателей на самой северной параллели, и значит самой холодной по сравнению с другими более южными индивидуальными широтными станциями, в трудности наблюдений в период белых ночей, во введении новых научных инициатив в работу службы широты, например, наблюдение широт по расширенной программе в 1915-1928 гг. и 1955-1961 гг., в наличии в разные годы двух самых крупных в мире зенит-телескопов, создание которых связано с Пулковской обсерваторией, в восстановлении службы широты в полностью разрушенной Пулковской обсерватории и т.д. Длинные пулковские широтные ряды наблюдений позволяют выполнять большой круг исследований. Результатами наблюдений широт с ЗТФ-135 пользуются для своих исследований многие астрономы, не работающие в Пулковской обсерватории. Многого из перечисленного нет ни на одной другой индивидуальной станции. У нас, у пулковских широтников есть все основания, чтобы гордиться столетним юбилеем службы широты ГАО. Столетняя творческая работа с зенит-телескопом ЗТФ-135 серьёзный повод, чтобы написать монографию о ней. Такую попытку сделал в свое время В.И. Сахаров, но кроме составления плана эту работу закончить не удалось.

В период с 1978 по 2001 г. я наряду со своей плановой работой занималась также историко-астрономическими исследованиями, часть из которых была посвящена пул-

ковским широтникам Софье Васильевне Романской, Александру Яковлевичу Орлову, Виктору Рудольфовичу Бергу, Владимиру Ивановичу Сахарову. Память о каждом из них жива по-разному. Здесь добавлены новые материалы, а также то, что мне удалось сделать для увековечения памяти названных астрономов. Хочется также отметить мою добрую память об академике Александре Александровиче Михайлове (1888-1983), возглавлявшем наш отдел астрономических постоянных и движения полюсов Земли, за его тёплое, поддерживающее меня отношение. К сожалению, с моей стороны Александру Александровичу посвящена только многостраничная биография в пулковской стенгазете в связи с его 95-летием.

В течение ста лет на пулковской службе широты работало много квалифицированных специалистов. Необходимо хотя бы некоторым из них посвятить особые исследования: В.Р. Бергу, И.Ф. Корбуту, Н.Р. Персияниновой, Е.И. Крейнину и другим.

### **Софья Васильевна Романская (1886-1969)**

Софье Васильевне я посвятила две статьи. Одна была написана вскоре после смерти Софьи Васильевны по просьбе А.Н. Дадаева и опубликована в [1]. Вторая опубликована в «Историко-астрономических исследованиях» в 1988 г. [2] в связи со столетием со дня рождения С.В. Софья Васильевна с молодых лет мечтала поступить на работу в Пулковскую обсерваторию. Это удалось осуществить в 1908 г. В 1918 г. она приступила к программным наблюдениям широты с зенит-телескопом ЗТФ-135. В обсерватории проработала 51 год, выйдя на пенсию в 1959 г. по состоянию здоровья. Из-за трудностей жизни закончила Высшие женские (Бестужевские) курсы уже после поступления на работу в Пулковскую обсерваторию, спустя 4 года. Её важным вкладом в науку является:

1) получение из наблюдений с зенит-телескопом ЗТФ-135 рекордного количества высокоточных значений широт – более 20 тысяч. Такого количества широт в момент ухода Софьи Васильевны на пенсию никто ещё из пулковских широтников не получал;

2) участие в наблюдениях широт с ЗТФ-135 по расширенной программе в 1918-1928 гг. и 1955-1956 гг.;

3) определение постоянной абerrации по данным наблюдений широт с ЗТФ-135 с 1929 по 1941 г.:  $20.511''$  [3];

4) определение постоянной нутации оси вращения Земли в пространстве по данным наблюдений широт с ЗТФ-135 за время с 1915 по 1941 г.:  $9.2055''$  для средней эпохи наблюдений [4]. Этот результат является частью докторской диссертации Софьи Васильевны, закончить которую она не успела из-за болезни;

5) определение суточного члена в колебаниях широт:  $\Delta\varphi = 0.036'' (t + 7.2^h)$  [5].

После выхода Софьи Васильевны на пенсию я её навещала, мы часто беседовали по телефону. Она рассказывала мне о своей жизни, бестужевских курсах, о трудностях жизни во время Великой Отечественной войны. К сожалению, я тогда ещё не занималась историей астрономии. Как бы мне пригодилась её информация о бестужевских курсах, с изучения которых началась моя работа по истории астрономии спустя 9 лет! Я работала с Софьей Васильевной в одном отделе всего 3.5 года и мне захотелось узнать о ней побольше. Я обращалась ко многим людям, знавшим Софью Васильевну в прошлом, с просьбой рассказать мне о ней, о её деятельности. Услышанное дополняло мое хорошее представление об этой замечательной женщине. Однажды в вагоне метро я встретила П.Н. Сергееву, работавшую в Восточном корпусе Пулковской обсерватории. Она оказалась жительницей села Пулково. П.Н. Сергеева рассказала мне, каким жизнерадостным человеком была Софья Васильевна, как она могла расшевелить каждого, как дважды в неделю устраивала вечера в клубе Пулковской обсерватории, в которых она и сама принимала участие. У Софьи

Васильевны был хороший голос. Она устраивала танцы на открытом воздухе. В предвоенные годы П.Н. посещала этот клуб.

А вот высказывания о Софье Васильевне других современников: 1) ученый секретарь Пулковской обсерватории А.А. Кондратьев (1867-1935) – «неунывающая россияночка» (со слов его внучки Н.Н. Сафоновой, работавшей в Пулковской обсерватории); 2) д-р физ.-мат. наук, сотрудник института теоретической астрономии Д.В. Загребин – «жизнеутверждающая»; 3) старшие научные сотрудники ИТА А.Г. Малькова и Н.А. Бохан – «жизнерадостная, неунывающая, общительная, энергичная»; 4) Д.Д. Романский – племянник С.В. Романской: «Софья Васильевна – это тип русской женщины с открытым добрым характером. Среди наших родственников она как магнит привлекала всех к себе. Когда на душе было грустно, то стоило приехать в Пулково и попасть в семью Софьи Васильевны, то настроение сразу менялось. Она умела подобрать к каждому ключ. Всех родственников она принимала очень радушно, даже когда была занята чем-то очень важным». Какие единодушные высказывания!

Я очень рада тому, что моя инициатива по присвоению имени Романская какой-нибудь малой планете в честь столетнего юбилея Софьи Васильевны была осуществлена, правда, с задержкой – только в 1995 г. Это планета № 3761, открытая в Симеизе в 1936 г. Г.Н. Неуйминым, ставшим через 8 лет директором Пулковской обсерватории. Мне было приятно узнать, что наши пулковские астрономы её наблюдают. Чисто пулковская планета! Мы снова встретились с Софьей Васильевной.

#### **Александр Яковлевич Орлов (1880-1954)**

С 16 января 1907 г. по 26 февраля 1908 г. на зенит-телескопе ЗТФ-135 работал в качестве штатного сотрудника выпускник Петербургского университета Александр Яковлевич Орлов, впоследствии ставший крупным астрономом и геофизиком, членом-корреспондентом АН СССР, академиком АН УССР. А.Я. Орлов проработал в Пулковской обсерватории чуть немного больше года, а затем покинул Пулковскую обсерваторию и уехал в г. Юрьев. В это время он пишет в письме к С.К.Костинскому [6], что работу на зенит-телескопе он не считает научной, что это «труд чернорабочего», что необходима новая программа или следует видоизменить текущую. Он имел в виду сомнения или странные явления, заметить которые удалось, но объяснить которые не хватило материала. И хотя это было высказано с юношеской запальчивостью, критические замечания А.Я. Орлова справедливы. Наблюдательский труд первых двух программ в 1904-1915 гг. был нелегким. Наблюдения в течение каждых двух лет производились только одним наблюдателем, который должен был сам обрабатывать свои наблюдения. Так как А.Я. Орлов вместо двух лет наблюдал только один год, то видимо по этой причине следующему наблюдателю Л.И. Семенову пришлось наблюдать три года. В первых двух программах для широтных наблюдений для некоторых часов по прямому восхождению широтные пары отсутствовали. Однако, практика наблюдений с ЗТФ-135, по-видимому, пригодилась А.Я. Орлову для исследования проблемы изменчивости широт и движения полюсов Земли. Он использовал пулковские наблюдения как на меридианных инструментах, так и на ЗТФ-135. Число таких исследований, в основе которых лежат пулковские наблюдения, составляет 1/3 от общего списка трудов по астрометрии. Все статьи А.Я. Орлова написаны легким языком. Я обратила внимание на его работу [7], выполненную по круглосуточным наблюдениям с ЗТФ-135 яркой зенитной звезды  $\delta$  Cassiopeiae. Александр Яковлевич и сам наблюдал эту звезду в Пулкове. Он отмечает эти наблюдения как замечательные. В этой работе Александр Яковлевич выявил в кривой изменения широты, полученной по наблюдениям  $\delta$  Cas, две волны с малыми амплитудами и периодами 2 и 4 года. Такие волны отсутствуют в кривых по данным наблюдений широтных пар. Полученные Александром Яковлевичем результаты

побудили меня предпринять меры для выяснения причин этого явления. Например, я говорила об этом со ст.н.с. Пулковской обсерватории И.М. Копыловым. Он проверил вычисления в статье, построил свою теорию и предложил проверить всё на 6-ти метровом телескопе и т.д. Но всё было тщетно. В каталоге Hipparcos звезда  $\delta$  Cas представлена как одиночная звезда. «Явление Орлова» осталось загадкой.

Дважды мне пришлось коснуться неизвестных для нас материалов о жизни Александра Яковлевича. Однажды ко мне обратился директор Главной астрономической обсерватории АН УССР академик Е.П. Федоров с вопросом, не имеются ли в Ленинградском отделении Архива АН СССР материалы об А.Я. Орлове. Там оказались написанные А.Я. Орловым 42 письма к С.К. Костинскому, 10 писем к А.А. Белопольскому и другим астрономам, а также письма к членам Центральной постоянной сейсмической комиссии.

В 1980 г. на совместном заседании Ученых советов Главной астрономической обсерватории АН УССР и института геофизики АН УССР им. О.И. Субботина, посвященного столетию со дня рождения А.Я. Орлова, я сделала доклад о письмах Александра Яковлевича к С.К. Костинскому и А.А. Белопольскому, а также прочитала «Воспоминания об Александре Яковлевиче Орлове», написанные Н.М. Штауде [8,9] по нашей просьбе специально для этого заседания. Как пишет Нина Михайловна в «Воспоминаниях», А.Я. Орлов сохранил ей жизнь. В 1931 г. она, как и другие члены РОЛМ («Русское общество любителей мироведения») была репрессирована и сослана в г. Рыбинск, где жила в очень тяжелых условиях. А.Я. сумел добиться переезда Нины Михайловны в Полтаву, в Полтавскую гравиметрическую обсерваторию, директором которой А.Я. Орлов являлся. Оба эти доклада опубликованы в свое время не были. В 1998 г. в [10] в моем переложении эти «Воспоминания» были опубликованы. Нина Михайловна – крупный специалист в нескольких областях астрономии. Как пишет Н.Н. Парийский в [8], «основным направлением научной деятельности Н.М. Штауде были наблюдения солнечных затмений, метеорная астрономия, фотометрические наблюдения сумерек». Я полностью разделяю высказывание В.А. Бронштэна [9] о том, что «в истории советской науки она по праву должна занять достойное место».

### **Виктор Рудольфович Берг (1891-1942)**

Данью памяти о Викторе Рудольфовиче Берге, прекрасном специалисте-широтнике, последнем довоенном заведующем зенит-телескопом ЗТФ-135 можно рассматривать мою статью «О работе В.Р. Берга «Поправки  $\Delta\delta_\alpha$  фундаментальных систем GC и FK3 на основании широтных рядов Пулкова, Гринвича и Международной службы» [11]. В работе [12] В.Р. Берг впервые в мире определил поправки вида  $\Delta\delta_\alpha$  к фундаментальной системе FK3, основываясь на результатах широтных наблюдений. Он определил в этой работе также поправки  $\Delta\delta_\alpha$  к каталогу GC, но первоначально такую работу сделал другой автор. В качестве исходного материала для исследований послужили широтные ряды Пулкова 1915-1928 гг., Гринвича 1911-1936 гг., Международной службы широты 1922-1931 гг. Для контроля полученных В.Р. Бергом значений поправок  $\Delta\delta_\alpha$  я сопоставила их с разностями между каталогами FK4 и FK3, FK4 и GC для эпох сравниваемых каталогов. Поправки  $\Delta\delta_\alpha$  (FK4-FK3) и  $\Delta\delta_\alpha$  (FK4-GC) хорошо согласуются с поправками  $\Delta\delta_\alpha$ , полученными по пулковским и гринвичским широтным рядам. Это подтверждает вывод В.Р. Берга о возможности уверенного определения поправок  $\Delta\delta_\alpha$  к фундаментальным каталогам на основании широтных рядов. Полученные в [12] данные показывают хорошее качество широтных рядов Пулкова и Гринвича и высокую точность результатов В.Р. Берга.



В журнале наблюдений с зенит-телескопом ЗТФ-135 В.Р. Берга я нашла печальную запись от 10 июля 1941 г. о том, что инструмент демонтирован согласно приказу директора обсерватории С.И. Белявского.

Умер В.Р. Берг 3 января 1942 г. в осажденном Ленинграде от голода.

### **Владимир Иванович Сахаров (1911-1991)**

Одно из особых мест в истории пулковской службы широты занимает научная деятельность д-ра физ.-мат.наук Владимира Ивановича Сахарова. Он являлся одним из ведущих специалистов в СССР по изучению проблемы изменчивости широт и движения полюсов Земли, его с полным правом можно считать геодинамиком. В связи с 90-летием со дня его рождения в 2001 г. я опубликовала тезисы о его научной деятельности [13], а в 2004 г. подготовила для «Историко-астрономических исследований» статью «О научном пути В.И. Сахарова (1911-1991) в исследовании проблемы изменчивости широт и движения полюсов Земли» [14].

Как и Софья Васильевна Романская, Владимир Иванович мечтал работать в Пулковской обсерватории. Это удалось осуществить не сразу. После окончания в 1940 г. Ленинградского государственного университета на его заявление с просьбой принять его на работу в Пулковскую обсерваторию Владимиру Ивановичу ответили, что нет свободной вакансии. Ещё не демобилизовавшись после Великой Отечественной войны, участником которой В.И. был, он опять подает свое заявление о принятии его в обсерваторию. В устройстве В.И. на работу горячее участие принял директор обсерватории Г.Н. Неуймин (1886-1946), через Президиум АН СССР согласно Указу Президиума Верховного совета В.И. был демобилизован из армии и направлен в ГАО АН СССР. «Пулковский стаж» В.И. начался 1 июля 1946 г. и продолжался 42 года, что к моменту выхода его на пенсию составило половину времени существования пулковской службы широты. Все эти годы В.И. занимался исследованием проблемы изменчивости широты и движения земных полюсов.

Послевоенная пулковская служба широты прошла заново тот же путь становления, как это было в начальном периоде её существования – все надо было начинать заново: восстановить павильон, выполнить исследования инструмента, организовать наблюдения, отработать методику наблюдений и их обработку. Все это выполнили С.В. Романская, В.И. Сахаров и И.Ф. Корбут. Последующие поколения широтников следовали установленными ими принципами работы. Поскольку вклад В.И. Сахарова в исследование проблемы изменчивости широты и движения полюсов Земли отражен в [13] и [14] я сделаю в этой статье акцент на неповторимом стиле работы Владимира Ивановича. Он поступил на работу в Пулковскую обсерваторию в возрасте 35 лет. Чтобы разобраться в проблеме изменчивости широт и движения полюсов Земли, В.И. изучает литературу по вопросам исследования инструмента и работы с ним, труды своих предшественников, историю изучения проблемы в Пулкове. Позднее изучает теории вращательного движения небесного тела, созданные крупными математиками, геофизиками, астрономами. В то же время он много наблюдал с ЗТФ-135 и исследовал результаты наблюдений. Он был первоклассным наблюдателем (точность его наблюдений достигала  $\pm 0.12''$ ) и искусным исследователем зенит-телескопа. С.В. Романская, руководитель группы ЗТФ-135, отметила в 1952 г. его «чрезвычайную целеустремленность» [15]. В.И. изучал методы математической статистики, спектральный анализ, методы выравнивания широтных рядов. Он не только творчески применял их, но в некоторых случаях и развивал эти методы. У В.И. был глубокий интерес к науке, широкая эрудиция, незаурядный ум, который позволял ему находить оригинальные методы исследования. Он самостоятельно ставил задачи и самостоятельно находил нестандартные, новые спосо-

бы их решения. Ряд результатов В.И. получил впервые в мире. Вся научная деятельность В.И. выполнялась в традициях пулковской астрометрической школы.

В.И. вел дневники, в которых наряду с конспектами прочитанных статей и расчетами содержатся размышления по научным вопросам и сочиняемые им стихи. В будущем необходимо просмотреть их более детально. Дневники вела и С.В. Романская, но у нас их пока нет.

По поводу семидесятилетия со дня рождения В.И. видный полтавский специалист Н.А. Попов отмечал: «Ваши наблюдения и глубокий анализ результатов вошли в золотой фонд астрометрической науки» (домашний архив В.И. Сахарова).

Владимир Иванович закончил работу в Пулкове в 1988 г. двумя итоговыми статьями. Правильная оценка результатов, полученных В.И. за 42 года, должна исходить из учета качества исследуемых материалов (в частности различия систем склонений звезд в разных широтных программах) и современного исследователю состояния науки.

Я очень благодарна Владимиру Ивановичу за нашу многолетнюю, начиная с середины 70-х годов, совместную творческую работу и также за то, что благодаря нему, я поверила в свои силы как ученого.

В книге «Астрономы» [16] кроме С.В. Романской, А.Я. Орлова и краткого упоминания о работе с зенит-телескопом Б.В. Нумерова нет информации о других пулковских широтниках. Мне, уже не в первый раз, хочется отчасти заполнить этот пробел.

Особую благодарность выражаю В.Б. Капцюгу за просмотр и ценные замечания к этой статье.

#### Литература

1. **Костина Л.Д.** Софья Васильевна Ворошилова-Романская. Земля и Вселенная, 1972, № 4, с.50-51
2. **Костина Л.Д.** К 100-летию со дня рождения С.В. Романской. Историко-астрономические исследования. М., Наука, 1988, XX, с.323-335.
3. **Романская С.В.** Результаты наблюдений на большом зенит-телескопе в Пулкове с 1929 янв.5 по 1941 июля 9. Тр. ГАО АН СССР, 1954, 70, сер.2, с.3-68.
4. **Романская С.В.** Дискуссия объединенного пулковского широтного ряда 1915-1941 гг. «Предварительные результаты исследований колебаний широт и движения полюсов Земли». Сб. №2. М., изд. АН СССР, 1961, с.81-87.
5. **Voroshilova-Romanskaja S.V.** Results of Observations with the Large Pulkovo Zenith-Telescope for 1920-1925. Тр. ГАО, 1938, 52, с.5-44.
6. **Петербургское отделение архива АН СССР.** Ф.703, оп.2, с.52-54.
7. **Орлов А.Я.** Лунные и некоторые другие периодические члены в наблюдениях  $\delta$  Cassiopeiae. Избр.тр. К., изд. АН УССР, 1961, 1, с.38-79.
8. **Штауде Н.М.** Автобиография. На рубежах познания Вселенной. Историко-астрономические исследования. М., Наука, 1990, XXII, с.395-466.
9. **Бронштэн В.А.** Восстанавливая страницы истории. Очерк шестой. Нина Штауде. Земля и Вселенная. 1991, № 5, с.58-74.
10. **Костина Л.Д.** Воспоминания об Александре Яковлевиче Орлове, написанные Н.М. Штауде. СПб. Наука и техника: Вопросы истории и теории. Тезисы XIX годичной конференции Санкт-Петербургского отделения Российского Национального комитета по истории и философии науки и техники (23-28 декабря 1998 г.). 1998, выпуск XIV, с.41.
11. **Костина Л.Д.** О работе В.Р. Берга «Поправки  $\Delta\delta_\alpha$  фундаментальных систем GC и FK3 на основании широтных рядов Пулкова, Гринвича и Международной службы. Изв. ГАО. 1972, № 187, с.141-143.

12. **Берг В.Р.** Поправки  $\Delta\delta_\alpha$  фундаментальных систем ГС и FK3 на основании широтных рядов Пулково, Гринвича и Международной службы. Цирк. ГАО АН СССР, 1941, № 31, с.29-51.
13. **Костина Л.Д.** К 90-летию со дня рождения В.И. Сахарова (1911-1991). СПб. Наука и техника: Вопросы истории и теории. Тезисы XXII годичной конференции Санкт-Петербургского отделения Российского Национального комитета по истории и философии науки и техники (5-6, 8-9 ноября 2001 г.). 2001, выпуск XVII, с.59.
14. **Костина Л.Д.** О научном пути В.И. Сахарова (1911-1991) в исследовании проблемы изменчивости широт и движения полюсов Земли. Историко-астрономические исследования. 2004. В печати.
15. **Архив ГАО РАН.** Ф. 1, оп.1, ед.хр. 221, л.12.
16. **Колчинский И.Г., Корсунь А.А., Родригес М.Г.** Астрономы. Биографический справочник. К., Наукова думка. 1977. 416 с.

**TO THE MEMORY OF THE PULKOVO SCIENTISTS  
S.V. ROMANSKAJA (1886-1969), A.JA. ORLOV (1880-1954),  
V.R. BERG (1891-1942), V.I. SAKHAROV (1911-1991)**

**Kostina L.D.**

***Summary***

*This article is devoted to the memory of the Pulkovo scientists S.V. Romanskaja, A.Ja. Orlov, V.R. Berg, V.I. Sakharov who were dealing with the problems of the latitude variability and the motion of the Earth poles. The article is written in the connection of the one hundredth anniversary of the Pulkovo latitude service dated from September, 19 of the 2004.*

## К 100-ЛЕТИЮ БОЛЬШОГО ПУЛКОВСКОГО ЗЕНИТ-ТЕЛЕСКОПА

**Соболева Т.В.**

*В статье, написанной на основе архивных документов, освещены важные этапы истории зенит-телескопа, охватывается период времени с 1904 г., когда инструмент начал работать, до возобновления наблюдений в 1948 г. История инструмента показана на фоне жизнеописаний пулковских сотрудников. Более подробно рассказано о создателе телескопа Г.А. Фрейберге-Кондратьеве. Даны краткие биографии Ф.Ф. Витрама и В.Р. Берга, а также некоторые факты из жизни первых послевоенных астрономов-широтников. Приведен список довоенных пулковских наблюдателей.*

Исполнилось сто лет одному из старейших пулковских инструментов, который с середины 1950-х гг. стали называть ЗТФ-135 (зенит-телескоп Фрейберга с диаметром объектива 135 мм). 22 сентября 2004 г. в Пулковской обсерватории состоялся научный семинар, посвященный этому юбилею. В Архиве ГАО РАН (АГАО) хранятся документы, в которых отражены сведения о поворотных моментах истории уникального телескопа, о судьбах пулковцев, причастных к его созданию и использованию.

В 1890-х годах впервые обнаружено явление изменяемости астрономических широт. Для широтных наблюдений в 1899 г. была создана Международная служба широты (МСШ). В этом же году директор Пулковской обсерватории О.А. Баклунд (1846–1916) выдвинул проект присоединения ГАО к МСШ. Тогда же возникла идея установить в Пулкове зенит-телескоп. О.А. Баклунд дал распоряжение построить телескоп более мощный, чем подобные инструменты МСШ. Большой зенит-телескоп и его микрометр изготовлены в механической мастерской Пулковской обсерватории. Сделал его, за исключением оптических частей и уровней, ученый механик Г.А. Фрейберг-Кондратьев. Постройка телескопа началась в 1900 г. и окончена в начале 1904 г. Зенит-телескоп оказался первоклассным астрономическим инструментом, сохранившим свое значение и в современных условиях.

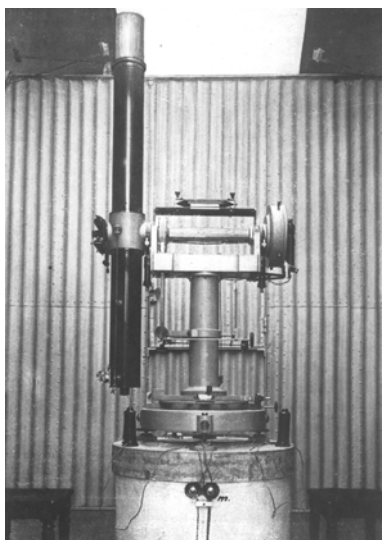


Южный фасад Главного здания. Слева внизу – павильон зенит-телескопа.

Для зенит-телескопа был возведен петербургской фирмой «Артур Коппель» специальный павильон, подобный тем, которые строились на некоторых международных станциях для определения колебаний высоты полюса. Этот павильон, сделанный из гофрированного железа, с двойными стенками и двойной двускатной раздвигающейся крышей, располагался между Главным зданием и башней 30-дюймового рефрактора. В 1929 г. в павильоне провели небольшие переделки: увеличен раздвиг крыши и вырезаны дополнительные форточки. Это дало возможность, открыв дверь и все форточки, иметь полный прорез по меридиану.

В начале 1904 г., когда зенит-телескоп установили в своем павильоне, точные исследования инструмента провели прикомандированные к Обсерватории офицеры Академии Генерального штаба: капитан А.И. Аузан, капитан М.П. Никитин и лейтенант Г.С. Максимов. Последний был потом сотрудником ГАО (в 1919–1925 гг.) и вел наблюдения на зенит-телескопе. Исследования инструмента показали его превосходные качества.

Установкой зенит-телескопа и его исследованиями руководил астроном, геодезист **Федор Федорович Витрам**. Его судьба неразрывно связана с Пулковской обсерваторией. Родился он в Риге 150 лет тому назад – 17 (29) сентября 1854 г. Там же прошел среднюю школу. В 1878 г. Ф.Ф. Витрам окончил Дерптский университет. С этого же года он начал службу в Пулковской обсерватории сверхштатным астрономом. Затем прошел все ступени службы в Обсерватории: вычислитель, адъюнк-астроном и, наконец, с 1907 г. – старший астроном. В 1885 г. Витраму присуждена ученая степень доктора астрономии за труд, посвященный вопросам небесной механики. Интересовали Ф.Ф. и затмения, солнечные и лунные, о которых он написал ряд статей. Велика заслуга Ф.Ф. Витрама перед русской геодезией. Научные труды, им оставленные, участие в экспедициях и геодезических предприятиях есть тому подтверждение.



Большой пулковский зенит-телескоп и его павильон  
(довоенные фотографии).

Помимо работы в Обсерватории Ф.Ф. Витрам преподавал в Академии Генерального штаба на Геодезическом отделении. С 1887 г. он определен туда профессором практической астрономии и геодезии. Среди его учеников были командированные в Пулковскую обсерваторию морские офицеры, военные геодезисты, а также астрономы. В 1912 г. Ф.Ф. Витрам утвержден в звании заслуженного профессора. В 1891 г. он был назначен совещательным астрономом Военно-топографического отдела Главного штаба, а позднее — таковым же Морского ведомства.



Федор Федорович был женат на Марте Ромберг, дочери пулковского астронома Г.Я. Ромберга, и имел двоих детей. Умер Ф.Ф. Витрам скоропостижно 23 декабря 1914 г. (по старому стилю). За несколько месяцев до своей кончины, в августе 1914 г., он участвовал в экспедиции по наблюдению полного солнечного затмения в Риге. Ф.Ф. Витрам похоронен на Пулковском Мемориальном кладбище астрономов.

Именно Ф.Ф. Витрам выработал в деталях первую программу наблюдений на зенит-телескопе. Он же руководил первоначальными наблюдениями. Знаменательной датой, с которой начинаются многолетние пулковские широтные ряды наблюдений, является **20 сентября 1904 г.** В тот день, точнее, вечер начал наблюдения И.В. Бонсдорф (1879–1950). А первые вычисления производились господами А.П. Бонсдорф и М.Г. Витрам.

Для создателя зенит-телескопа Генриха Андреевича Фрейберга-Кондратьева 2004 год тоже юбилейный (исполнилось 150 лет со дня его рождения). Этот талантливый механик-самоучка прожил долгую жизнь.

Родился **Генрих Андреевич Фрейберг** 18 (30) июля 1854 г. в г. Гапсале Эстляндской губернии (ныне Хаапсалу, Эстония). Будучи трёх лет от роду, он потерял мать, в 10 лет остался без отца. «Пришлось мне жить по милости моих родственников»<sup>1</sup>, — так писал Г.А. Фрейберг в своих воспоминаниях. С раннего возраста он имел склонность к самообразованию, проявлял большой интерес к механике, строя разные приборы и инструменты. После окончания уездного училища семнадцатилетнего Генриха отдали учиться в лучшие механические мастерские Петербурга (Витте, Вестберга, Брауэра). Механик Г.К. Брауэр рекомендовал его на работу в Главную физическую обсерваторию (в Павловске), где в 1881 г. Г.А. Фрейберг получил место главного механика. Здесь он создал ряд новых типов магнитного теодолита, анемометра, индукционного инклинометра; усовершенствовал анемометр Ришара, который стал потом известен как электрический анемограф Фрейберга-Ришара. Деятельность Г.А. была высоко оценена Академией наук: в 1899 г. он удостоен почетного звания корреспондента Главной физической обсерватории.

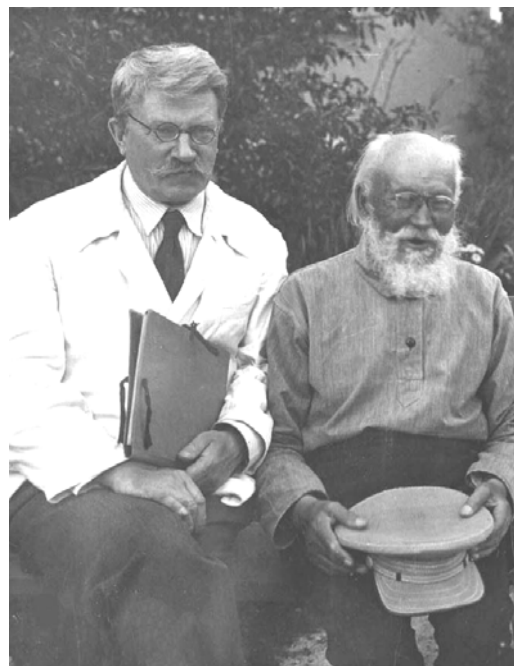
Генриха Андреевича давно интересовала постройка астрономических инструментов. Поэтому, когда он получил приглашение занять пост механика Пулковской обсерватории, он охотно согласился. 1 (13) сентября 1895 г. началась служба Г.А. Фрейберга в ГАО. Одной из первых его работ в Пулкове было изготовление 4-дюймового пассажного инструмента, Этот инструмент, названный «шедевром механического искусства»<sup>2</sup>, потом перевезли в Николаевское отделение ГАО.

А самое первое задание, порученное Г.А. Фрейбергу в Обсерватории, было следующее. В астрономические часы Тиде, помещенные в подвале центральной башни, каким-то образом просачивался воздух. Никто не мог устранить этот «недуг». Фрейберг внимательно осмотрел часы в присутствии директора О.А. Баклунда и астронома А.М. Ковальского (1858–1902) и понял, что воздух просачивается через медный кран. Но Ковальский не поверил этому. Тогда Г.А. принес менделеевскую замазку и спиртовку и ... воздух в часы Тиде больше не проходил.

<sup>1</sup> АГАО. Ф. 4. Оп. 1. Д. 77. Л. 3.

<sup>2</sup> Там же. Л. 17.

В 1900 г. дирекция Пулковской обсерватории предъявила ученому механику задачу построить большой зенит-телескоп с диаметром объектива 135 мм и фокусным расстоянием 1760 мм. Это задание мастер выполнил блестяще. За время своей работы в Пулкове Г.А. Фрейберг построил 2 переносных зенит-телескопа малых размеров, 8 небольших универсальных инструментов, а также создал новый тип переносных зенит-телескопов с ломаной трубой и электрическим освещением (их он построил 16). Все инструменты Обсерватории, как отмечалось в Отчетах, всегда содержались Фрейбергом в отличном состоянии. По поводу той или иной работы Генрих Андреевич нередко советовался с Ф.Ф. Витрамом, который был для него большим авторитетом. В свою очередь, профессор Витрам с глубоким уважением относился к ученому механику.



А.Я. Орлов и Г.А. Фрейберг-Кондратьев

У Генриха Андреевича и его жены Марии Васильевны (урожд. Акентьевой) было пятеро сыновей и дочь. Такое многочисленное семейство содержать на небольшое жалованье механика очень сложно. А воспитание детей в Пулкове за неимением школы — задача весьма затруднительная. Поэтому Фрейберг стал задумываться о приискании другого места в Петербурге, и случай пришел ему на помощь. В Пулково приехал начальник Главного гидрографического управления и, осмотрев переносной зенит-телескоп с ломаной трубой, предложил Фрейбергу заведовать мастерской мореходных инструментов при своем Управлении. Г.А. Фрейберг долго сомневался, но в 1908 г. он дал согласие и перешел на новую более доходную службу. С сожалением покидал он Обсерваторию. Думается, что и в Пулкове о его уходе сожалели. Но Фрейберг подготовил себе замену. Ученым механиком в Обсерватории стал его ученик и родственник Виктор Александрович Мессер (1880–1942).

Г.А. Фрейберг вернулся в ГАО в июне 1917 г. 63-летний мастер по причине ослабшего здоровья искал «тихую пристань» и нашел ее в южных отделениях Пулковской обсерватории. Сначала он работал в Николаеве. А в 1925 г. Фрейберга пригласили в Симеизское отделение для установки метрового рефлектора английской фирмы Греб (Grubb). В Симеизской обсерватории Генрих Андреевич работал и жил до 1930 г. Там в 1928 г. Генриха Андреевича Фрейберга чествовали в связи с 50-летием его научно-технической деятельности. Через год он подал в отставку, и в 1930 г. перебрался с семьей в Николаев, где жизнь была дешевле. Неутомимый труженик, Г.А. Фрейберг не мог не работать. В 1934 г. он переехал в Полтавскую гравиметрическую обсерваторию, где директор А.Я. Орлов принял его консультантом прецизионной механической мастерской. Здесь Фрейберг занимался усовершенствованием большого зенит-телескопа фирмы Цейсс, спроектировал несколько новых типов магнитных теодолитов и т. п.

Г.А. Фрейберг-Кондратьев прожил до конца своих дней в Полтаве, где и скончался 5 февраля 1944 г., немного не дожив до своего 90-летия.

Следует объяснить происхождение двойной фамилии Генриха Андреевича. Во время I-й мировой войны отчасти под давлением сыновей, которые воевали на фронте с немцами, отчасти по требованию начальства (в Гидрографическом управлении), он решил переменить немецкую фамилию. Генрих Андреевич вспоминал, что в 1915 или в

1916 году он приехал в Пулково к своему другу, ученому секретарю А.А. Кондратьеву (1867–1936), чтобы посоветоваться с ним о выборе фамилии. Тот предложил фамилию Кондратьев, говоря: «Будешь нашим старшим братом»<sup>3</sup>. А в 1923 г., когда проходила первая советская паспортизация, Генрих Андреевич попросил к фамилии Кондратьев прибавить старую, т.к. механика Кондратьева мало кто знает, зато механика Фрейберга — очень многие.

В 1939 г. Г.А. Фрейберг-Кондратьев написал мемуары, озаглавив их традиционно: «Моя жизнь». Вспоминал он, конечно, и о том, как создавался Большой пулковский зенит-телескоп. «В 1900 г. Пулковская обсерватория предъявила мне задачу построить зенит-телескоп с отверстием объектива в 135 мм и 1760 мм фокусного расстояния. Я выработал проект этого инструмента с большими изменениями по сравнению с иностранными инструментами и старался внести в проект наибольшую устойчивость инструмента, наибольшее удобство для наблюдения при работе с ним, и, обращая внимание на все детали постройки, добивался простоты конструкции для выработки и прочности инструмента»<sup>4</sup>.

Зенит-телескоп безостановочно и результативно работал до 1941 г. Ниже приводится список довоенных пулковских наблюдателей.

**Бонсдорф** Ильмари Владимирович (1879–1950)

▶ наблюдал в 1904–1906 гг.

**Орлов** Александр Яковлевич (1880–1954)

▶ наблюдал в 1907–1908 гг.

**Семенов** Леонид Иванович (1878–1965)

▶ наблюдал в 1908–1911 гг.

**Земцов** Борис Александрович (1888–1920)

▶ наблюдал в 1911–1913 гг.

**Нумеров** Борис Васильевич (1891–1941)

▶ наблюдал в 1913–1915 гг.

**Днепровский** Николай Иванович (1887–1944)

▶ наблюдал в 1915–1917 гг.

**Циммерман** Николай Владимирович (1890–1942)

▶ наблюдал в 1915–1917 гг.

**Дрозд** Антон Донатович (1892–?)

▶ наблюдал в 1917–1920 гг.

**Романская** София Васильевна (1886–1969)

▶ наблюдала в 1918–1941, 1947–1956 гг.

**Максимов** Георгий Сергеевич (1876–?)

▶ наблюдал в 1920–1926 гг.

**Берг** Виктор Рудольфович (1891–1942)

▶ наблюдал в 1925–1941 гг.

Вторая программа наблюдений на зенит-телескопе была составлена в 1908 г. Л.И. Семеновым, причем необходимость ревизии первой программы предложил Ф.Ф. Витрам. В 1915 г. составлена третья, расширенная, программа, предусматривающая наблюдения «от зари до зари». Ее авторами были Н.В. Циммерман и Б.В. Нумеров.

---

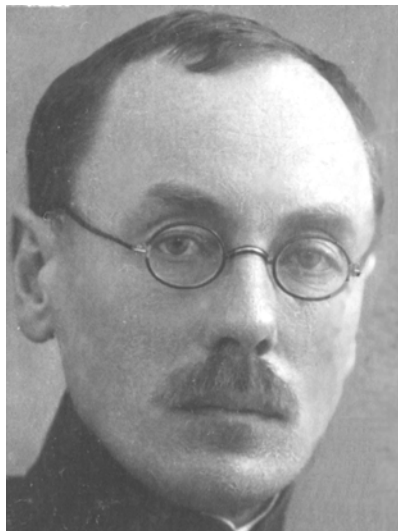
<sup>3</sup>Там же. Л. 48.

<sup>4</sup> Там же. Л. 18.



Четвертую программу предложил В.Р. Берг. Она составлена по образцу программ МСШ, но с учетом условий погоды в Пулкове. Наблюдения начались в 1929 г. и предусматривались в течение полного нутационного периода, но в 1941 г. прекратились. Трагическая пауза в работе зенит-телескопа связана с именем В.Р. Берга. О судьбе этого ученого хочется рассказать отдельно.

**Виктор Рудольфович Берг** родился в Самаре 13 (25) апреля 1891 г. Окончив Самарскую гимназию, он поступил в Юрьевский университет на математическое отделение. Его учителями в университете были проф. К.Д. Покровский и А.Я. Орлов. Для подготовки дипломной работы студент Берг был командирован в Пулковскую обсерваторию. Там он занимался под руководством А.А. Белопольского, С.К. Костинского, Г.А. Тихова и других астрономов. После окончания учебы В.Р. Берг остался работать в Астрономической обсерватории Юрьевского университета. В 1918 г. в связи с военными действиями Юрьевский университет эвакуировался в Воронеж и слился с Воронежским университетом. Виктор Рудольфович до 1925 г. преподавал астрономию в этом учебном заведении.



В 1925 г. В.Р. Берг переехал в Пулково. С 1 мая этого года началась его научная деятельность в Пулковской обсерватории. Инициативный ученый, искусный наблюдатель, Берг образцово поставил в Пулкове широтные наблюдения, стал заведовать зенит-телескопом. Его научный труд «Результаты наблюдений на Большом пулковском зенит-телескопе за годы 1925.5 – 1929.0»<sup>5</sup> являлся по оценке Н.В. Циммермана «своеобразной энциклопедией» и рекомендовался «всем наблюдателям на зенит-телескопе как образец»<sup>6</sup>.

В 1937 г. Бергу присуждена ученая степень кандидата астрономии без защиты диссертации. В том же году он назначен заведующим Вычислительной, и около полугода исполнял обязанности ученого секретаря ГАО. До конца жизни В.Р. Берг заведовал отделом Службы широты ГАО, состоял зам. председателя Широтной комиссии при АН СССР и членом Международной Широтной комиссии. Он активно участвовал в налаживании работы Службы широты на Международной широтной станции в Китабе. Берг не оставил и преподавательскую деятельность. С 1932 г. до последних своих дней он читал лекции, вел практические занятия по мореходной астрономии в Военноморском училище им. М.В. Фрунзе.

Летом 1941 г., когда началась Великая Отечественная война, Пулковская обсерватория стала готовиться к эвакуации. Инструменты, архив, часть библиотеки перевозили в Ленинград. К концу августа покинули Пулково оставшиеся сотрудники. Те, кто не имел жилья в городе, поселились в академическом общежитии на Петроградской стороне (ул. Петрозаводская, д. 7-б). Туда переехал и В.Р. Берг с женой Ольгой Васильевной Ковальницкой (1910–1983). В этом доме Виктор Рудольфович умер от голода 3 января 1942 г.

В Архиве ГАО среди документов В.Р. Берга<sup>7</sup> хранится его «Записная книжка преподавателя». Особенно впечатляют четыре странички карандашных записей, драмати-

<sup>5</sup> Труды ГАО. 1938. Сер. 2. Т. 52. С. 45–172.

<sup>6</sup> АГАО. Ф. 1. Оп. 2. Д. 40. Л. 7.

<sup>7</sup> Там же. Фонд О. В. Ковальницкой.

чески озаглавленные автором «Последние дни Пулковка». Этот своеобразный дневник Берг начал 9 июля: «Директор распорядился прекратить наблюдения на зенит-телескопе, сообщив, что 14 эвакуация "на восток"». И далее: «10.VII. Сняты зенит-телескоп, вертикальный круг <...>, начата упаковка». В.Р. Берг, как заведующий зенит-телескопом, руководил упаковкой и эвакуацией инструмента. Сохранилась и Опись 8-ми ящиков с демонтированным зенит-телескопом. Написанная аккуратным берговским почерком, она содержит подробное перечисление всех деталей инструмента. Ящики с разобранным зенит-телескопом были перевезены Ленинград и хранились в подвале здания ЛАХУ<sup>8</sup> на Университетской набережной. Там инструмент пролежал 6 лет.

Сразу после войны начались работы по восстановлению Пулковской обсерватории. Пулковцы возвращались в Ленинград ... В центре города для ГАО были выделены временные помещения по нескольким адресам. Только в 1952 г. Обсерватория вернулась в Пулково и разместилась в Восточном корпусе Главного здания. Но уже к лету 1947 г. был построен новый деревянный павильон для зенит-телескопа. Располагался он немного южнее прежнего, довоенного. В механических мастерских ГАО привели в порядок и подготовили к наблюдениям сам инструмент. 1 октября 1947 г. началась наблюдательная работа в Пулково. Зенит-телескоп стал первым инструментом, который вступил в строй после войны. По этому случаю 4 октября 1947 г. в недостроенной еще Обсерватории состоялось заседание выездной сессии Ученого совета ГАО, посвященное началу наблюдательной работы Пулковской Службы широты. Своих коллег поздравили с началом наблюдений сотрудники Полтавской обсерватории и пожелали «...скорейшего восстановления и великих достижений».<sup>9</sup>

Из довоенных пулковских широтников уцелела только София Васильевна Романская. Вместе с ней на зенит-телескопе стали работать вернувшиеся с фронта Владимир Иванович **Сахаров** (1911–1991) и Иван Федотович **Корбут** (1912–1995). Последний заведовал этим инструментом. Значительное количество ночей астрономы посвятили установке и регулировке зенит-телескопа, тщательному исследованию его уровней и окулярного микрометра. Новую программу наблюдений в 1947 г. весьма детально подготовил Яков Ефимович **Гордон** (1912–1978). С.В. Романская сделала разработку принципов этой программы, а общее научное руководство осуществлял Н.И. Идельсон (1885–1951).

Можно представить, какими трудными были условия работы первых послевоенных наблюдателей: необеспеченность транспортом, тяжелые жилищно-бытовые условия и т. д. Об этом можно узнать из писем заместителя директора по административно-хозяйственной части В.К. Морфорд (1898–1952?), рассылаемых в разные инстанции. Заботливая Валентина Клавдиевна хлопотала о предоставлении жилья, о благоустройстве наблюдателей: «Научные сотрудники Сахаров и Корбут, проживая в комнате бывшей астрофизической лаборатории, до сих пор имеют неисправную печь. Возвращаясь после ночных наблюдений и бессонной ночи, им необходимо тепло». В другом письме: «Астрономы-наблюдатели на зенит-телескопе Романская, Корбут и Сахаров находятся в чрезвычайно тяжелом положении, благодаря неустроенности общежития.<...> В связи с ремонтом во всем помещении грязь, холод и шум»<sup>10</sup>. Такие условия работы требовали от наблюдателей много энергии и самопожертвования.

В 1948 г. наблюдательная работа на зенит-телескопе дважды прерывалась из-за того, что при дренаже вблизи павильона были обнаружены неразорвавшиеся немецкие

<sup>8</sup> Ленинградское административно-хозяйственное управление АН СССР (ЛАХУ, ныне Санкт-Петербургский научный центр РАН) занимает здание Академии наук на Университетской наб., д. 5. Во время блокады Пулковской обсерватории были предоставлены помещения в этом доме.

<sup>9</sup> АГАО. Ф. 1. Оп. 1. Д. 79. Л. 64.

<sup>10</sup> Там же. Л. 70, 71.

крупнокалиберные снаряды. Их надлежало обезвредить, а телескоп пришлось демонтировать. Поэтому датой, определяющей начало нового широтного ряда, является **1 сентября 1948 г.**, когда возобновились постоянные наблюдения.

Когда-то Г.А. Фрейберг-Кондратьев писал в своих воспоминаниях: «Этот инструмент не дал мне за все истекшие 35 лет наблюдательской работы с ним ни одной жалобы, а только сплошную похвалу со стороны астрономов»<sup>11</sup>. С тех пор прошло много лет. Сменились поколения наблюдателей. А зенит-телескоп Фрейберга все также вызывает восхищение и удивление.

Автор выражает благодарность Н.О. Миллер и Е.Я. Прудниковой за помощь в подготовке статьи.

#### Источники

1. **Ахматов В.В.** Профессор Федор Федорович Витрам // Отд. оттиск из Записок по гидрографии. 1915. Т. 39. Вып.3. С.1–7.
1. **Берг В.Р.** Большой зенит-телескоп пулковской обсерватории за годы 1904–1938 // Сто лет Пулковской обсерватории: Сб. статей / Отв. ред. С. И. Белявский. М.; Л., 1945. С.87–98.
2. **Гордон Я.Е.** Новая программа пулковского зенит-телескопа // Изв. ГАО. 1948. № 141. С.130–139.
3. **В.Л. Горшков, И.А. Зыков, Л.Д. Костина, Н.О. Миллер, Н.Р. Персиянинова, Е.Я. Прудникова, В.В. Хохлов.** 90 лет зенит-телескопу Фрейберга-Кондратьева. Основные научные результаты // Изв. ГАО. 1996. №210. С.121–130.
4. **Дроздов С.В.** Г.А. Фрейберг-Кондратьев (1854–1944) // Природа. 1948. № 3. С.88.
5. **Жуков В.Ю., Соболева Т.В.** «Последние дни Пулкова» в записной книжке астронома В.Р. Берга (1891–1942) // Петербург в историческом сознании: Матер. Всероссийск. науч. конф., 24–25 апр. 2003 г. Санкт-Петербург / Под ред. С.Н. Полторака. СПб., 2003. С.107–111.
6. **Жуков В.Ю., Соболева Т.В.** «Тонкий мастер астрометрии» (Пулковский астроном В.Р. Берг. 1891–1942) // Астрономический календарь на 2002 год: Ежегодник. Переменная часть / Под ред. В.К. Абалакина. СПб.: ГАО РАН, 2002. Вып. 104. С.188–190.
7. **Костина Л.Д., Сахаров В.И.** Изучение движения географического полюса Земли в Пулковской обсерватории // 150 лет Пулковской обсерватории / Отв. ред. В.К. Абалакин. Л.: Наука, 1989. С.137–152.
8. **Отчет** за время с 1 августа 1902 по 1 марта 1904 года, представленный Комитету Николаевской Главной астрономической обсерватории ее директором. СПб., 1904. С.6, 17.
9. **Отчет за 1904–1905 год**, представленный Комитету Николаевской Главной астрономической обсерватории ее директором (заключен 1 марта 1905 г.) СПб., 1905. С.17–18.
10. **Романская С.В., Сахаров В.И., Корбут И.Ф.** 50 лет наблюдений на пулковском зенит-телескопе (1904–1954) //Труды 11-й астрометрической конференции СССР (Пулково, 24–26 мая 1954 г.) / Отв. ред. М.С. Зверев. Л.: ГАО АН СССР, 1955. С.185–192.
11. **Личное дело Ф.Ф. Витрама.** Санкт-Петербургский филиал архива РАН. Ф. 703. Оп. 3. Д. 21.
12. **Личное дело Г.А. Фрейберга-Кондратьева.** Там же. Д. 142.
13. **Фрейберг-Кондратьев Г.А.** Моя жизнь. АГАО. Ф. 4. Оп. 1. Д. 77.

<sup>11</sup> Там же. Ф. 4. Оп. 1. Д. 77. Л. 18.

14. *АГАО*. Ф. 4. Оп. 1. Д. 78, 79.
15. Там же. Ф. 1. Оп. 1. Д. 79. Л. 52, 57, 64, 70, 71.
16. Там же. Ф. 1. Оп. 1. Д. 112. Л. 3, 4.
17. Там же. Ф. 1. Оп. 1. Д. 114. Л. 6.

## THE CENTENARY OF THE BIG PULKOVO ZENIT-TELESKOPE

Soboleva T.V.

### *Summary*

*September 2004 marks 100 years of latitude observations with the Pulkovo Zenith-telescope. This article is written on the foundation of archival documents. Important stages of the history of Zenith-telescope are elucidated from creation to renewal of observations after the Great Patriotic War in it. Pulkovo scientists connected with Zenith-telescope are told about. More detailed information is furnished concerned the creator of the telescope G.A. Freiberg-Kondratieff. Short biographies of F. Vitram and V. Berg and some facts concerned the first post-war observers are presented too. The list of Pulkovo pre-war observers is included.*

## СПИСОК АВТОРОВ

- Абдусаматов Х.И.* 433  
*Абрамов-Максимов В.Е.* 9  
*Алексеева Г.Н.* 472  
*Алешкина Е.Ю.* 157, 194, 223, 236  
*Архаров А.А.* 30, 38  
*Ассиновская Б.А.* 353  
*Байкова А.Т.* 48, 441, 459  
*Батурина Г.Д.* 194, 223, 236  
*Бехтева А.С.* 194, 223, 236, 505  
*Бронникова Н.М.* 162  
*Бубнов Ю.А.* 536  
*Бубнова Н.Н.* 536  
*Буткевич А.Г.* 248  
*Васильева Т.А.* 162, 165  
*Вершков А.Н.* 248  
*Виноградов В.С.* 536  
*Воротков М.В.* 365, 384  
*Гаген-Торн Е.И.* 30, 38  
*Галкин В.Д.* 472  
*Гольдварг Т.Б.* 59  
*Гончаров Г.А.* 167  
*Горшанов Д.Л.* 182, 194, 215, 223, 229,  
236, 248, 485  
*Горшков В.Л.* 365, 370, 384  
*Григорьев К.В.* 248  
*Гроздилов В.М.* 493, 499  
*Даракчиев Ц.* 393  
*Девяткин А.В.* 194, 215, 223, 229, 236,  
248, 505  
*Ефремов В.И.* 531  
*Измайлов И.С.* 269, 292, 343, 536  
*Ильин Г.Н.* 472  
*Ихсанов Р.Н.* 69  
*Калиниченко О.А.* 269, 279, 297  
*Канаев И.И.* 248, 505  
*Киселев А.А.* 182, 269, 275, 279  
*Киселева Т.П.* 269, 286, 292, 297  
*Кияева О.В.* 275, 306  
*Копылова Ю.Г.* 85, 95  
*Корнилов Э.В.* 194, 236  
*Костина Л.Д.* 402, 565  
*Кулиш А.П.* 505  
*Куприянов В.В.* 194, 223, 229, 236, 314,  
505  
*Куприянова Е.Г.* 85  
*Литвиненко Е.А.* 406  
*Львов В.Н.* 236, 318  
*Ляйтерер У.* 472  
*Макаров В.И.* 107, 149  
*Марушин Ю.В.* 69  
*Мельников А.В.* 95, 229  
*Миллер Н.О.* 365, 402, 409, 415  
*Можсаев М.А.* 269, 297  
*Наговицын Ю.А.* 59  
*Наумов В.А.* 402, 420, 543  
*Ниберт Т.* 472  
*Никанорова И.Н.* 472  
*Новиков В.В.* 472  
*Окунев О.В.* 133  
*Парфиненко Л.Д.* 499, 531  
*Пахомов В.П.* 472  
*Персиянинова Н.Р.* 402  
*Поляков В.В.* 546  
*Поляков Е.В.* 182, 546  
*Полякова Г.Д.* 120  
*Правдюк Л.М.* 133  
*Прудникова Е.Я.* 402, 409, 415, 426  
*Пузакова Т.Ю.* 30  
*Рафальский В.Б.* 505  
*Романенко Л.Г.* 279  
*Рубан Е.В.* 30, 38  
*Румянцев К.В.* 536  
*Сальников И.Б.* 472  
*Сидоров М.Ю.* 194, 223, 236  
*Смехачева Р.И.* 318  
*Смирнов С.С.* 318, 325  
*Соболева Т.В.* 572  
*Соколов В.Г.* 330  
*Соловьев А.А.* 59  
*Сочилина А.С.* 248  
*Степанов А.В.* 85  
*Стоянова М.Н.* 140  
*Тавастииерна К.С.* 145  
*Тлатов А.Г.* 107, 145, 149  
*Федотова Л.А.* 546  
*Ханков С.И.* 433  
*Ховричев М.Ю.* 292, 337, 343  
*Ховричева М.Л.* 269  
*Хруцкая Е.В.* 292, 337, 343  
*Цап Ю.Т.* 85  
*Цекмейстер С.Д.* 318  
*Чапанов Я.* 393  
*Шахт Н.А.* 182  
*Шевченко И.И.* 229, 314  
*Шрамко А.Д.* 555  
*Шумахер А.В.* 505, 536



## ПАМЯТИ Н.М. БРОННИКОВОЙ

*Известно всем: Никто не вечен,  
Ведь наша жизнь всего одна.  
Ее сосуд пополнить нечем,  
Когда он вычерпан до дна...*

2 марта 2005 года ушла из жизни старейшая сотрудница Пулковской обсерватории, ведущий научный сотрудник Лаборатории астрометрии и звездной астрономии, кандидат физико-математических наук Нина Михайловна Бронникова.



Нина Михайловна Бронникова родилась 23 января 1931 года в селе Лобань Богородского района Кировской области. В 1948 году после окончания средней школы Нина Михайловна поступила в Уральский Государственный университет им. А.М. Горького, который закончила в 1953 г. Вся дальнейшая жизнь Н.М. Бронниковой была связана с Пулковской обсерваторией. 1953-1956 гг. – аспирантура у А.Н. Дейча, с 1956 года – младший научный сотрудник отдела фотографической астрометрии и звездной астрономии, 1963 г.- защита кандидатской диссертации, с октября 1982 г. – сначала и.о., затем бессменный заведующий лабораторией фотографической астрометрии.

За 52 года Н.М. Бронникова прошла путь от аспиранта до ведущего научного сотрудника и заведующего одним из основных подразделений ГАО.

Под ее руководством в лаборатории проводились непрерывные и систематические наблюдения на инструментах лаборатории (нормальном астрографе, 26-дюймовом рефракторе, АКД). До последних дней жизни она была воплощением “пулковского стиля” работы, в котором наблюдениям отводилась первостепенная роль. Этому же она учила молодых сотрудников. За большой вклад в наблюдательную астрометрию имя Н.М. Бронниковой было присвоено малой планете N 3385 (Bronina). Наблюдения этой планеты регулярно ведутся на нормальном астрографе обсерватории. По итогам конкурсов, проводившихся в обсерватории, Нина Михайловна неоднократно получала звание “Лучший наблюдатель ГАО”.

Н.М. Бронникова была высококвалифицированным специалистом в области фотографической астрометрии и звездной астрономии. Значительная часть ее научной деятельности была связана с реализацией плана А.Н. Дейча по определению абсолютных собственных движений звезд с привязкой к галактикам. Она автор наиболее значительных работ Пулковской обсерватории в этой области (каталоги Pul2 и Pul-3).

Однако научные интересы Н.М. Бронниковой не ограничивались только этой темой. Она много занималась определением положений тел Солнечной системы – больших и малых планет, комет, астероидов, сближающихся с Землей, исследованием сверхновых звезд, фотометрией лунных затмений. На основе многолетних рядов наблюдений Плутона на нормальном астрографе (1954-1990 гг.) ей было выполнено исследование изменения блеска Плутона.

Совместно с И.И. Брейдо и О.М. Михайловой Н.М. Бронникова занималась проблемой повышения чувствительности фотоматериалов методом гиперсенсibilизации фотопластинок водородом.

Работы Н.М. Бронниковой представлялись на всероссийских и международных симпозиумах и конференциях. Она автор 148 научных публикаций, член Международного астрономического союза.

Н.М. Бронникова была очень активным, жизнелюбивым и неравнодушным человеком. Она искренне любила Пулковскую обсерваторию, принимала близко к сердцу все проблемы, связанные с деятельностью обсерватории. Это был очень верный и надежный товарищ, тактичный и заботливый руководитель. Ее деятельность в должности заведующей лабораторией во многом способствовала привлечению в лабораторию молодых сотрудников.

Светлая память о Нине Михайловне Бронниковой навсегда останется в сердцах ее родных, друзей и коллег по работе.