

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ**

№ 223

**Труды
Всероссийской астрометрической конференции
«ПУЛКОВО – 2015»**

Санкт-Петербург
2016

Редакционная коллегия:

Член-корреспондент РАН **А.В. Степанов** (ответственный редактор)

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

Зав. редакцией **Е.Л. Терёхина**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ
№ 223
Труды Всероссийской астрометрической конференции
«Пулково – 2015»**

Утверждено к печати
Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН

Компьютерная верстка оригинал-макета Е.Л. Терёхиной

ISBN 978-5-9651-0959-3

© Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1

Наземная и космическая астрометрия

Авраменко А.Е., Лосовский Б.Я.

Наблюдательная ротационная устойчивость пульсаров 11

Амосов Ф.А., Витязев В.В., Цветков А.С.

Определение параметров межзвездного поглощения света по данным каталога Hipparcos 17

Витязев В.В., Цветков А.С.

Сравнение галактических систем координат XPM и UCAC4 23

Измайлов И.С., Рощина Е.А., Горшанов Д.Л., Назаров С.В.

Фотометрические наблюдения взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера в 2015 г. 29

Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Чазов В.В.

Результаты наблюдений неизвестных объектов космического мусора в геостационарной области 33

Липовка А.А., Липовка Н.М.

Радиоизлучение звезд $1^m - 12^m$ 39

Малкин З.М.

Влияние галактической абберации на результаты определения связи оптической и радио систем отсчета 45

Малкин З.М.

Новая версия каталога оптических характеристик астрометрических радиоисточников OCARS 49

Малкин З.М.

Связь радио и оптической небесных систем отсчета 53

Нарижная Н.В.

Наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Пулковском нормальном астрографе 59

Питьева Е.В.

Астрометрические наблюдения для построения планетных эфемерид 65

Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П.

ПЗС-наблюдения спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове 71

Чубей М.С., Курпьянов В.В., Бахолдин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Маркелов С.В., Левко Г.В.

Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория — фундаментальные и прикладные задачи научной программы, сравнительные оценки проекта 77

Чуркин К.О., Нефедьев Ю.А. Создание базы наблюдений фотоэлектрических покрытий звезд Луной	83
--	----

Секция 2

Вращение Земли и геодинамика

Горшков В.Л., Мохнаткин А.В., Петров С.Д., Щербакова Н.В. Геодинамика Балтийского щита и Русской плиты по ГНСС-данным	91
Горшков В.Л., Щербакова Н.В. О согласованности скоростей станций с несколькими ГНСС-приёмниками	97
Зотов Л.В., Бизуар К., Шум С.К. О возможной взаимосвязи вращения Земли и изменений климата в последние 150 лет	103
Малкин З.М. О точности прогноза координат небесного полюса	109
Миллер Н.О. Долгопериодические закономерности движения полюса, полученные из ряда изменения широты Пулкова за 1840–2014	113
Миллер Н.О. Прогнозирование движения полюса с помощью ССА	119
Миллер Н.О., Воротков М.В. Моделирование чандлеровского движения полюса	125
Пасынок С.Л. Упрощённая форма уравнений гидродинамики для уточнения временной зависимости момента сил электромагнитного сцепления мантии и ядра Земли	131
Пасынок С.Л., Безменов И.В., Цыба Е.Н. Оперативное определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ	137
Спирidonov Е.А., Виноградова О.Ю. Океанический нагрузочный эффект	143
Цуркис И.Я., Кучай М.С., Рыбин А.А. Применение спектра Винера-Лиувилля к анализу движения полюса и возмущающих функций атмосферы и океана	149
Цыба Е.Н., Пасынок С.Л. Определение параметров вращения Земли по результатам лазерной локации ИСЗ в ГМЦ ГСВЧ	155

Секция 3

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

Васильев М.В., Шуйгина Н.В., Язудина Э.И. Использование радиотехнических наблюдений посадочных аппаратов для уточнения эфемериды Луны	163
Виноградова Т.А. Оценка количества троянцев Юпитера	169
Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Башакова Е.А., Куприянов В.В., Русов С.А., Ляшенко А.Ю., Петрова С.Н., Мартюшева А.А., Наумов К.Н., Иванов А.В., Слесаренко В.Ю., Сокова И.А., Соков Е.Н., Зиновьев С.В., Мельников А.В., Ершов В.Н., Карашевич С.В. Результаты исследования ОСЗ	175
Довгалев И.С., Питьев Н.П. Оценка массы спутников по гравитационным возмущениям в кольцах Сатурна	183
Иванова Т.В. О построении аналитической теории вращения Луны в тригонометрической форме	189
Киселева Т.П., Васильева Т.А., Рощина Е.А., Измайлов И.С. Определение точных положений Сатурна и его спутников по оцифрованным астронегативам фотографических наблюдений 1972–1974 гг.	195
Кондратьев Б.П. О приливной силе внутри кольца Гаусса	201
Кузнецов В.Б. Определение орбиты по двум векторам положения методом продолжения по параметру с наилучшей параметризацией	207
Кузнецов В.Б., Майгурова Н.В., Медведев Ю.Д., Чернетенко Ю.А. Согласование опорной системы HCRF с динамической системой координат DE405 по наблюдениям астероидов	213
Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е., Гламазда Д.В. Динамическая эволюция высокоорбитальных космических объектов в окрестности резонансов	219
Мельников А.В. Вековая динамика планеты в системе 16 Cyg	225
Павлов Д.А. Уточнение параметров орбиты и либрации Луны на основе модели DE430	229
Пашкевич В.В. Геодезическое вращение тел Солнечной системы, динамически согласованное с эфемеридой DE422/LE422	235
Перминов А.С., Кузнецов Э.Д. Построение осредненных уравнений движения планетной задачи методом Хори-Депри	241

Петров Н.А., Соколов Л.Л., Васильев А.А. О положениях областей, ведущих к соударениям астероида Апофис с Землей	247
Смирнов С.С. Карликовые планеты и резонансная структура Солнечной системы	253
Шор В.А., Вавилов Д.Е., Железнов Н.Б., Зайцев А.В., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А. Вычислительно-аналитический комплекс для прогнозирования столкновений астероидов и комет с Землей и построения сценариев вызванных ими катастроф	259

Секция 4

Звездная астрономия, кинематика и динамика Галактики

Ананьевская Ю.К., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В. Исследование скопления NGC 6800 по наблюдениям на нормальном астрографе и телескопе МТМ-500М Пулковской обсерватории	267
Андреасян А.Р., Андреасян Р.Р., Паронян Г.М. О распределении пульсаров в Галактике	271
Жуйко С.В., Орлов В.В., Широкова К.С. Моделирование движения звезды в гравитационном поле двойной черной дыры	277
Кияева О.В., Орлов В.В., Жучков Р.Я. Исследование кратных звезд пулковской программы наблюдений на 26-дюймовом рефракторе	283
Романенко Л.Г. Является ли четверная иерархическая система 17 Лебеда гравитационно связанной?	289
Романенко Л.Г., Калиниченко О.А. Получение относительных положений широкой пары АF и собственных движений компонент четверной звезды 17 Суг	295

Секция 5

Новые методы и техника астрометрии и геодинамики

Биколова Д.А., Ершова А.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Рощина Е.А., Оськина К.И., Баляев И.А., Шумилов А.А., Петюр В.В., Максимова Л.А., Апетян А.А., Куликова А.М. Астрометрические наблюдения на телескопе «Сатурн». Первые результаты	301
Измайлов И.С., Рощина Е.А. Оцифровка, измерения и калибровка астронегативов при помощи цифровой фотокамеры	307
Мохнаткин А.В., Петров С.Д., Горшков В.Л. Разложение скоростей пунктов по сферическим функциям	313

Секция 6

Обработка, хранение и распространение астрономических данных

Васильева Т.А., Рощина Е.А. Фотографический архив Пулковской обсерватории	321
Mickaelian A.M., Nikoghosyan E.H., Gigoyan K.S., Paronyan G.M., Abrahamyan H.V., Andreasyan H.R., Azatyan N.M., Kostandyan G.R., Khachatryan K.G., Vardanyan A.V., Gyulzadyan M.V., Mikayelyan G.A., Farmanyan S.V., Knyazyan A.V. BAO plate archive digitization	327
Муминов М.М., Казанцева Л.В., Эгамбердиев Ш.А., Каххаров Б.Б., Андрук В.Н. Переобработка наблюдений лунных покрытий, выполненных в Узбекистане за период 1882–1996 гг.	333
Муминов М.М., Эгамбердиев Ш.А., Латыпов А.А., Каххаров Б.Б., Йулдошев К.Х., Андрук В.Н., Головня В.В. Каталог экваториальных координат и В-величин звезд экваториальной зоны программы ФОН на основе обработки оцифрованных астронегативов Китабской обсерватории	339

Секция 7

История астрономии

Кияева О.В. Памяти А.А. Киселева и Е.В. Хруцкой	347
Левитская Т.И. История выбора единой системы геодезических координат в России	353
Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Наблюдения широты Пулкова и исторические события	361
Пинигин Г.И., Пожалова Ж.А. Николаевское отделение ГАО во второй половине XX века	367
Птицына Н.Г., Альтаморе А. История нацистского подарка итальянской астрономии: «телескопы Муссолини»	373
Смирнов С.С. Астрономо-геодезические работы экспедиции Рамзая на Кольском полуострове	377
Макарова В.В. Горная астрономическая станция ГАО РАН. Эпоха становления	381
Список авторов	393

Секция 1

**НАЗЕМНАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ
АСТРОМЕТРИЯ**

НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ РОТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПУЛЬСАРОВ

Авраменко А.Е., Лосовский Б.Я.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Проведено сравнение параметров вращения секундных и миллисекундных пульсаров, образующих две неперекрывающиеся популяции с длинными и короткими периодами. По наблюдениям секундных пульсаров показано, что для каждого из них существует согласованное сочетание периода вращения и его производных, которое определяется когерентным излучением пульсаров, что соответствует числовому инварианту показателя торможения $n = -(0,9 \pm 0,2)$ и монотонному замедлению нейтронной звезды. Рассчитан верхний предел второй производной миллисекундных пульсаров, величина которого на несколько порядков меньше порога обнаружения по наблюдениям. У пульсара B0531+21 с аномально большим замедлением наблюдается спонтанное движение под действием неуравновешенных сил в радиальных направлениях, не нарушающее его ротационную устойчивость и когерентность импульсного излучения.

1. Введение

Наиболее значимые результаты в изучении физических свойств пульсаров, начиная с их открытия в 1967 году, связаны с периодичностью радиоизлучения твердотельно вращающейся намагниченной нейтронной звезды. Излучение звезды сопровождается потерей энергии, что приводит к постепенному замедлению вращения. Период вращения, будучи наблюдаемым параметром, представляет собой измеряемую величину, которая непосредственно определяет моменты прихода импульсов излучения и, соответственно, их временные соотношения в наблюдаемой последовательности интервалов излучения.

Моменты наблюдаемых на радиотелескопе событий импульсного излучения пульсара представляются в виде временных рядов, численные значения которых находятся из уравнений Общей теории относительности (ОТО) по эфемеридам Земли и планет Солнечной системы. В уравнениях учитывается движение Земли в пространстве, собственное движение и параллакс пульсара, релятивистское запаздывание радиосигналов в гравитационном поле, межзвездной среде, ионосфере и тропосфере Земли [1]. Поскольку входящие в уравнения переменные не могут быть точно известны априори, временные ряды обнаруживают случайные, немоделируемые шумы, которые накладываются на измеряемые моменты наблюдаемых импульсов и обычно интерпретируются как внутренние нерегулярности вращения пульсара, определяющие физический предел стабильности его периодического излучения [2]. Постнаблюдательная подгонка параметров – положение, собственное движение, период вращения пульсара и его производные и т.д., точными знаниями численных величин которых мы не располагаем, – не снимает это принципиальное ограничение [3]. Остаточные случайные вариации измеренного времени прихода импульсов находятся в диапазоне нескольких микросекунд для миллисекундных пульсаров и нескольких миллисекунд для секундных пульсаров.

Повышение на несколько порядков точности хронометрирования пульсаров было достигнуто преобразованием к аналитическому виду временных рядов, соответствующих наблюдаемому времени прихода импульсов периодического излучения пульсара. Аналитическое выражение пульсарного времени, во-первых, оперирует только априори известными параметрами вращения пульсара; во-вторых, численные значения этих параметров подтверждаются текущими наблюдениями пульсаров; и, в-третьих, этих параметров достаточно для того, чтобы по ним и только ими выразить время прихода наблюдаемых импульсов излучения пульсара. При этом достигается субнаносекундная

точность измерения наблюдаемых интервалов, исключая зависимость результатов измерения от немоделируемых шумов хронометрирования.

2. Аналитическая модель наблюдаемых интервалов пульсарного времени

Если параметры вращения пульсара – период P_0 на некоторую начальную эпоху и его производные \dot{P} и \ddot{P} априори известны, то интервалы PT пульсарного времени могут быть выражены в виде полиномиального степенного ряда Маклорена для N наблюдаемых событий периодического излучения:

$$PT(P_0, \dot{P}, \ddot{P}) = P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3, \text{ где } N = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

На рис. 1 показаны графики компонентов степенного ряда для типичного секундного пульсара ($P_0 \approx 1\text{с}$, $\dot{P} \approx 10^{-15} - 10^{-16} \text{ с}\cdot\text{с}^{-1}$, $\ddot{P} \approx 10^{-28} - 10^{-29} \text{ с}^{-1}$) в пределах двухлетнего временного промежутка.

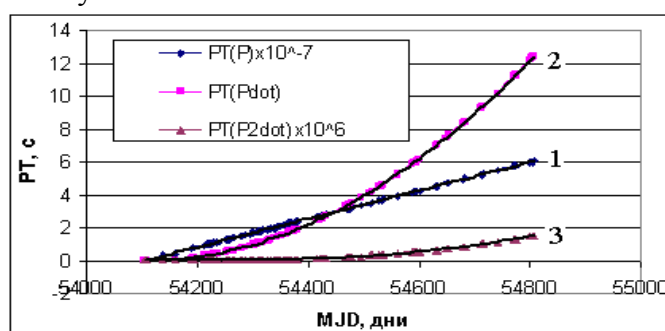


Рис. 1. Параметрические компоненты интервалов PT :

$$\{1\}: PT(P_0) = P_0 N; \{2\}: PT(\dot{P}) = \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2; \{3\}: PT(\ddot{P}) = \frac{1}{6} (P_0^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3.$$

Числовые значения компонентов на графиках 1–3 приведены к одному порядку величин.

Как следует из рис. 1, числовые величины компонентов уменьшаются на 5–6 порядков с увеличением порядка производных. Дальнейшее продолжение ряда показывает, что оцениваемый вклад третьей производной составляет порядка 1 нс или меньше и, следовательно, не может быть обнаружен современными наблюдательными средствами. Отсюда следует, что для сходимости полиномиального ряда (1) достаточно только трёх компонентов, так что производные выше 2-го порядка можно не рассматривать.

Отметим, что в выражении (1) интервалы PT рассчитаны по параметрам вращения, априори известными лишь предположительно. Однако, связав их с наблюдаемыми интервалами PT_i , мы получаем уравнение, решениями которого являются наблюдаемые параметры P_0^* , \dot{P} , \ddot{P} , соответствующие условию сходимости ряда (1) [4]:

$$PT_i = (1 + \alpha_i) (P_0^* N + \frac{1}{2} P_0^* \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^{*2} \ddot{P} - 2P_0^* \dot{P}^2) N^3)_i. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) получается линейной аппроксимацией наблюдаемых интервалов PT_i по критерию МНК. Кроме наблюдаемых параметров P_0^* , \dot{P} , \ddot{P} , решение содержит числовую безразмерную величину α_i , которая служит мерой сходимости ряда.

Сочетание параметров P_0^* , \dot{P} , \ddot{P} является единственным, при котором достигается сходимость полиномиального ряда (1) в любой координатной системе отсчета. Трёхкомпонентный ряд во вторых скобках уравнения (2) представляет собой аналитическое

выражение наблюдаемых интервалов PT_i , которое с субнаносекундной точностью соответствует числовому отношению $PT_i/(1 + \alpha_i)$, полученному из наблюдений.

3. Особенности наблюдаемых параметров вращения пульсаров

Входящая в уравнение (2) числовая величина наблюдаемого периода вращения зависит от выбора начальной эпохи наблюдений, и при ее изменении на величину t принимает новое значение, согласованное во времени с производными \dot{P}, \ddot{P} :

$$P(t) = P_0^* + \dot{P}_0 \cdot t + \frac{1}{2} \ddot{P}_0 \cdot t^2; \quad t = P_0^* N, \quad 1 < N < \infty, \quad (3)$$

где $P(t) = P_0^* + \dot{P} \cdot t$; $\dot{P} = \dot{P}_0 + \ddot{P} \cdot t$.

Соотношение (3) соответствует монотонному замедлению вращения пульсара ($\dot{P}, \ddot{P} > 0$), что является наблюдательным признаком сходимости полиномиального степенного ряда (1) при условии когерентности периодического излучения пульсара.

По наблюдениям секундных пульсаров В0809+74, В1919+21, В0834+06, J1509+5531, В2217+47, В0329+54, В0531+21, которые проводились в 2007-2015 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц, аппроксимацией интервалов в соответствии с уравнением (2) были получены согласованные параметры вращения P, \dot{P}, \ddot{P} , которые приведены в таблице 1. Отметим, что для выполнения условия согласованности наблюдаемый период P определен с большей на несколько порядков точностью по сравнению с данными каталога пульсаров [6], благодаря чему достигнута субнаносекундная точность интервалов PT при относительной нестабильности не более $10^{-18} - 10^{-19}$ в пределах 40-летнего промежутка наблюдений пульсаров.

Таблица 1. Секундных пульсары.

PSR	P (MJD), с	\dot{P} с·с ⁻¹	\ddot{P} , с ⁻¹	n
В0809+74	1,29224151775083 (54080.0098)	$1,676 \cdot 10^{-16}$	$< 10^{-30}$	не определён
В1919+21	1,33730279821909 (54477.39095)	$1,34809 \cdot 10^{-15}$	$3,99573 \cdot 10^{-30}$	- 0,94
В0834+06	1,27377145381349 (54103.96609)	$6,79918 \cdot 10^{-15}$	$1,07448 \cdot 10^{-28}$	- 0,96
J1509+5531	0,739683736756101 (54104.2354)	$4,99821 \cdot 10^{-15}$	$9,82117 \cdot 10^{-29}$	- 0,91
В2217+47	0,538470617227171 (54117.498697)	$2,76421 \cdot 10^{-15}$	$4,30247 \cdot 10^{-29}$	- 1,03
В0329+54	0,714521031744271 (54104.750676)	$2,04959 \cdot 10^{-15}$	$1,67089 \cdot 10^{-29}$	- 0,84
В0531+21	0,033638877858401 (55218.787512)	$4,2096 \cdot 10^{-13}$	$1,57877 \cdot 10^{-23}$	- 0,94

В таблице 1 приведены также значения показателя торможения n , который характеризует постепенное замедление вращения пульсаров, обусловленное потерями энергии на излучение, и определяется из соотношения

$$n = 2 - P\ddot{P} / \dot{P}^2. \quad (4)$$

Рассчитанная по наблюдаемым параметрам P, \dot{P}, \ddot{P} величина n является числовым инвариантом $n = -(0,9 \pm 0,2)$ со средним значением $n_{\text{средн}} = -0,94$. Поскольку компонент второй производной в интервалах PT (рис.1) не превышает нескольких микросекунд, то даже у пульсаров с относительно большими значениями $\ddot{P} = 10^{-28} - 10^{-29}$ с⁻¹ он проявляется не ранее чем после двух лет наблюдений. Для пульсара В1919+21 (\ddot{P} порядка 10^{-30} с⁻¹) требуется не менее 7 лет наблюдений, а у пульсара В0809+74 за все время наблюдений около 10 лет признаков второй производной в интервалах PT выявить пока не удалось, то есть $\ddot{P} < 10^{-30}$ с⁻¹, что не превышает указанного порога обнаружения.

Как показано Маловым [5], миллисекундные ($P < 0,1$ с) и секундные пульсары образуют две неперекрывающиеся популяции с короткими и длинными периодами, соответственно. Учитывая свойство когерентности излучения тех и других при согласованных параметрах вращения (3) и (4) и существенное различие производной \dot{P} , которое у них составляет 4-5 порядков, то вторая производная \ddot{P} у миллисекундных пульсаров по крайней мере на 7–8 порядков меньше, и, следовательно, она вообще не может быть обнаружена непосредственно по наблюдениям. Однако, учитывая числовую инвариантность показателя торможения, нетрудно по $n_{средн} = -0,94$ и известным, взятым из каталога [6], параметрам P, \dot{P} вычислить для миллисекундных пульсаров значение \ddot{P} как ее верхний предел (таблица 2). Расчет по соотношению (4) показал, что вторая производная миллисекундных пульсаров B1937+21, B1855+09, J1640+2224, J2145-0750, J0613-0200, J1713+0747, J1643-1224 находится в диапазоне 10^{-35} – 10^{-38} с⁻¹.

Таблица 2. Миллисекундные пульсары.

PSR	$P, \text{с}$	$\dot{P} \text{ с}\cdot\text{с}^{-1}$	$\ddot{P}, \text{с}^{-1}$
B1937+21	0,001557806468819794	$1,051193\cdot 10^{-19}$	$2,08469\cdot 10^{-35}$
B1855+09	0,00536210045404154	$1,78363\cdot 10^{-20}$	$1,74506\cdot 10^{-37}$
J1640+2224	0,00316331581791380	$2,8276\cdot 10^{-21}$	$7,42848\cdot 10^{-39}$
J2145-0750	0,01605242391433660	$2,97848\cdot 10^{-20}$	$1,6248\cdot 10^{-37}$
J0613-0200	0,00306184408653189	$9,5913\cdot 10^{-21}$	$8,8357\cdot 10^{-38}$
J1713+0747	0,004570136525082782	$8,5289\cdot 10^{-21}$	$4,6796\cdot 10^{-38}$
J1643-1224	0,00462164151699818	$1,84628\cdot 10^{-20}$	$2,1685\cdot 10^{-37}$

Когерентность импульсного излучения и монотонность замедления пульсаров на любом промежутке наблюдений, при том, что производные периода по кластерам сильно, на несколько порядков различаются, позволяет предположить, что разделение пульсаров на два кластера произошло еще на стадии звездообразования. Основанием для этого может служить высокая добротность Q колебательной системы излучения пульсаров, определяемая как отношение вращательной энергии E_{rot} , запасенной в колебательной системе, к энергии, теряемой системой за один период колебания:

$$Q = \frac{E_{rot}}{\dot{E}_{rot} \cdot P} = \frac{1}{2\dot{P}} \quad (5)$$

Учитывая значения производной \dot{P} , приведенные в таблицах 1 и 2, добротность достигает порядка 10^{15} – 10^{21} , здесь нижний предел относится к секундным, верхний – к миллисекундным пульсарам. Это на много порядков превосходит добротность любых известных колебательных систем. Несмотря на большую, в несколько порядков, разницу потерь энергии вращения секундных и миллисекундных пульсаров, запасенной энергии $E_{rot} = I\Omega^2 / 2 \sim 10^{45} \div 10^{52}$ эрг (момент инерции $I = 10^{45}$ г·см²) вполне достаточно, чтобы при $\dot{E}_{rot} = I\Omega\dot{\Omega} \sim 10^{31} \div 10^{34}$ эрг/с постепенное замедление пульсаров оставалось монотонным, а наблюдаемое периодическое излучение когерентным в течение всего характерного для пульсаров промежутка $T \sim 10^6$ – 10^7 лет.

Таким образом, установленные с помощью аналитической модели интервалов (2) согласованные значения наблюдаемых параметров вращения P, \dot{P}, \ddot{P} приводят показатель торможения к единой оценке для двух неперекрывающихся популяций секундных и миллисекундных пульсаров, определяемой когерентным излучением нейтронных звезд и монотонным их замедлением вследствие потерь энергии вращения.

4. Наблюдаемое спонтанное движение пульсара в Крабовидной туманности

Энергия, питающая Крабовидную туманность, исходит от центральной звезды – пульсара В0531+21 в виде 33-Гц волн и потока высокоэнергетических частиц, вызывая наблюдаемое в плазменных процессах продолжающееся свечение и ускоренное расширение туманности [7]. Подобные процессы зафиксированы в видимом свете на снимках космического телескопа Хаббла.

Наши наблюдения пульсара В0531+21 в радиодиапазоне 111 МГц обнаружили аномальные отклонения наблюдаемого периода P и интервалов PT (рис. 2), которые не укладываются в сходящийся степенной ряд (1) параметризованных компонентов наблюдаемых интервалов PT (рис. 1). При этом сами наблюдаемые параметры вращения, полученные из уравнения (2), согласованы по критерию когерентности и соответствуют типичному для монотонного замедления значению показателя торможения $n = -0,94$. В то же время величина непараметризуемых отклонений периода на двухлетнем промежутке наблюдений достигает в относительных единицах порядка 10^{-9} (рис. 2,а), что на 5–7 порядков больше, чем у других пульсаров группы в таблице 1. Более того, 21.02.2012 г. (MJD 55978) произошло изменение знака производной периода, и дальнейшее наблюдение показало резкое ее возрастание до величины порядка 10^{-6} .

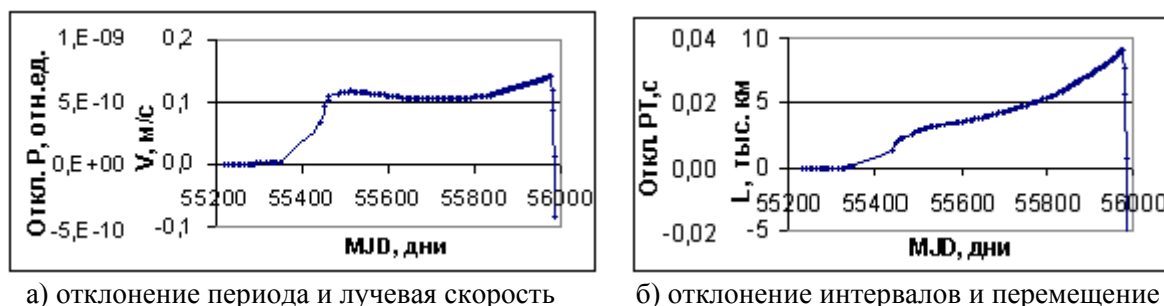


Рис. 2. Наблюдаемое движение пульсара В0531+21.

Эти спонтанные отклонения наблюдаемого периода излучения, не связанное с изменением параметров вращения пульсара, можно интерпретировать как доплеровское смещение при движении пульсара под воздействием неуравновешенных в радиальных направлениях сил. Лучевая скорость в этом случае определяется безразмерной величиной α_i относительного отклонения периода P , полученной из уравнения (2), и скоростью света c : $V_i = \alpha_i \cdot c$ (рис.2,а). На рис. 2,б показано отклонение интервалов PT и соответствующее ему перемещение пульсара в лучевом направлении.

Можно предположить, что ускоряющие силы являются следствием протекающих плазменных процессов в околозвездном пространстве пульсара. За пределами светового цилиндра, где электронно-позитронная плазма переходит из состояния твердотельного вращения с пульсаром в свободное, несвязанное со звездой состояние, изменение индукции вращающегося магнитного поля порождает вихревые электрические поля, и в пространстве, заполненном электронно-позитронной плазмой, возникают замкнутые индукционные вихревые токи. Создаваемые ими встречные магнитные поля возбуждают низкочастотную электромагнитную волну, которая уносит основную часть энергии, теряемой в процессе торможения. Аномально большие потери энергии вращения пульсара В0531+21 (\dot{P} на 2-3 порядка больше, чем у других) приводит к турбулентности возбужденной плазмы и возникновению неуравновешенных сил, вызывающих наблюдаемое движение пульсара.

За промежуток почти 6-летних наблюдений пульсара В0531+21 в 2010–2015 гг. была зафиксирована его скорость в пределах от 0,1 м/с и менее до 500 м/с и более; перемещение вдоль луча зрения от нескольких сотен метров до 100 млн.км и более. Рас-

считанное по изменениям скорости в промежутках 1–7 дней между наблюдениями ускорение находится в диапазоне от 10^{-8} м·с⁻² и менее до 10^{-4} м·с⁻² и более.

5. Заключение

По наблюдениям секундных пульсаров В0809+74, В1919+21, В0834+06, J1509+5531, В2217+47, В0329+54, В0531+21 в течение 2007-2015 гг. на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц показано, что для каждого из них существует единственное сочетание параметров вращения P_0^* , \dot{P} , \ddot{P} , при котором наблюдаемые интервалы излучения выражаются в виде сходящегося по этим параметрам степенного ряда, независимо от выбора эпохи, продолжительности и места наблюдений. Это свидетельствует о когерентности периодического излучения, монотонности замедления пульсаров и соответствует числовому инварианту показателя торможения $n = -(0,9 \pm 0,2)$ для всех наблюдаемых пульсаров.

Для миллисекундных пульсаров, образующих с секундными две неперекрывающиеся популяции с короткими и длинными периодами, рассчитан верхний предел второй производной, величина которой на 5–7 порядков меньше, чем у секундных, и не обнаруживается непосредственно в наблюдениях. Высокая, порядка $10^{15} - 10^{21}$, добротность колебательной системы секундных и миллисекундных пульсаров вполне достаточна, чтобы постепенное замедление пульсаров оставалось монотонным, а наблюдаемое периодическое излучение когерентным в течение всего характерного для пульсаров промежутка $T \sim 10^6 - 10^7$ лет.

Наблюдаемое ускоренное движение пульсара В0531+21 в Крабовидной туманности показывает, что часть вращательной энергии, теряемой при торможении пульсара, переходит в энергию наблюдаемого ускоренного движения, не нарушая ротационную устойчивость пульсара и когерентность периодического излучения.

Литература

1. Дорошенко О.В., Конейкин С.М. Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров // Астрон. журнал, т.67, № 5, 986-996.
2. Hobbs G., Lyne A.G., Kramer M. An analysis of the timing irregularities for 366 pulsars // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc., 2010, V. 402, 1027-1048.
3. Petit G., Tavella P. Pulsars and Time Scales // Astron. Astrophys., 1996, V.308, 290-298.
4. Avramenko A.E. Parametric invariance of the relativistic coordinate pulsar time scales. Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2014, St. Petersburg, 2015, 81-82.
5. Малов И.Ф. Радиопульсары. – М.: Наука, 2004, 191 с.
6. Taylor J.H., Manchester R.N., Lyne A.G. Catalog of 558 Pulsars // The Astrophys. J. Suppl.Ser., 1993, V. 88, 529-568.
7. Смит Ф.Г. Пульсары. Пер. с англ. под ред. проф. А.Д. Кузьмина. – М.: Мир, 1979. – 267 с.

A CONTINUOUS OBSERVING ROTATIONAL STABILITY OF PULSARS

Avramenko A.E., Losovsky B.Ya.

P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

A comparison of the parameters of second and millisecond pulsars, which form two non-overlapping populations with long and short rotation periods, is carried out. By observations of second pulsars it was shown, that for each of them there exists coordinated combination of the rotation period and its derivatives, which is determined by coherent radiation of pulsars. This corresponds to the numerical invariant of the braking index $n = -(0,9 \pm 0,2)$ and means a monotonic slow down the neutron star. It is calculated the upper limit of the second derivative of millisecond pulsars, whose value is several orders below the threshold of detection by observations. At the pulsar В0531+21, which has an abnormally large slowdown, it is observed a spontaneous motion under the action of unbalanced forces in radial directions, however do not lead to violations of its rotational stability and coherence of pulsed radiation.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА HIPPARCOS

Амосов Ф.А., Витязев В.В., Цветков А.С.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

На основе данных космической миссии Hipparcos для 98827 близких звезд (до 500 пк) получена карта значений градиента покраснения в направлениях, определяемых центрами 3888 равновеликих площадок, построенных методом HealPix. Отсутствующие в каталоге Hipparcos данные о классе светимости 49542 звезд северного экваториального полушария были восстановлены с помощью линейного бинарного классификатора, построенного на обучающем множестве 39807 звезд спектральных классов III и V. Для III класса светимости точность классификатора равна 95%, полнота – 89%. Для V класса светимости соответствующие характеристики равны 91% и 96%.

Введение

Как известно [4], пылевые облака в Галактике приводят к общему ослаблению света звезд (экстинции) и к покраснению звезд, то есть к увеличению их показателей цветов. Распределения покраснения звезд по небесной сфере может служить свидетельством о существовании межзвездной пыли в данном направлении.

Успех выявления пылевых облаков в двумерном и трехмерном варианте определяется имеющимися в нашем распоряжении массовыми каталогами звезд, содержащими информацию о координатах и параллаксах звезд, а также спектральные и фотометрические данные – спектральный класс, класс светимости и звездные величины в различных фотометрических полосах. Одним из таких каталогов является Hipparcos [9]. К сожалению, в каталоге Hipparcos спектральные классы звезд известны в основном только для отрицательных склонений. В настоящей работе поставлена задача устранить этот недостаток путем определения классов светимости звезд северного полушария с помощью метода машинного обучения [6, 10]. Теория обучения машин (machine learning, машинное обучение) – это самостоятельная математическая дисциплина, находящаяся на стыке прикладной статистики, численных методов оптимизации и дискретного анализа. В настоящее время технология машинного обучения нашла широкое применение в различных задачах обработки данных, в том числе и в астрономии [11]. Наша работа основана на построении бинарного классификатора, результатом работы которого является назначение звезде с известной абсолютной звездной величине класса светимости.

Исходные данные

В 2007 году вышла новая редакция астрометрических данных каталога Hipparcos – каталог HIPNEWCAT (HIPparcos NEW astrometric CATalog) [7]. Утверждается, что точность положений, параллаксов и собственных движений всех звезд, ярче $HP = 8$, улучшена в 4 раза, а для всех остальных звезд более чем в 2 раза. Уменьшена взаимная корреляция параметров иногда в 10 раз. Именно эта версия использовалась в работе в качестве источника астрометрических данных.

Каталог Hipparcos для большинства звезд содержит информацию о спектральном типе, полученную из наземных наблюдений. Основной источник – Мичиганский каталог [8] и несколько других каталогов. Однако информация о спектральных классах приведена только для звезд южного экваториального полушария.

В нашей работе использовалась следующая информация:

- положения звезд (каталог Hipnewcat);

- параллаксы звезд (каталог Hipnewcat);
- фотометрия (V_{mag} – каталог Hipparcos);
- класс светимости (каталог Hipparcos).

Дополнительные сведения об используемых данных можно найти в работах [2–3].

Способ получения классов светимости

Как уже было сказано, в каталоге Hipparcos, практически у всех звезд северного экваториального полушария отсутствует класс светимости. Для нашей задачи его наличие чрезвычайно важно, ввиду того, что мы на основе класса светимости и спектрального класса рассчитываем истинное значение $B-V$, то есть $(B-V)_{\text{int}}$. Тем самым, отсутствие класса светимости у половины звезд делает невозможным проведение наших расчетов для всего северного экваториального полушария.

Для исправления этого недостатка используем метод машинного обучения. Натренируем классификатор, который будет определять класс светимости для звезды по двум факторам – ее показателю цвета $B-V$ и ее абсолютной звездной величине M_V . Этих факторов должно быть достаточно, т.к. классы светимости теоретически разделимы на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

В каталоге Hipparcos доля звезд, которые не относятся ни к III, ни к V классам светимости мала (16.3%, 8058 из 49285). Поэтому мы упростим задачу – обучим линейный бинарный классификатор, который будет предсказывать III или V класс. Сделаем это с помощью метода опорных векторов [6]. В качестве обучающего множества возьмем все звезды, у которых присутствует класс светимости III и V. Таких звезд 39807. Распределение этих звезд по классам светимости показано в табл. 1,

Таблица 1. Структура обучающего множества

Класс светимости	$B-V < 0.6$	$B-V > 0.6$	всего
III	1947	16681	18628
V	15549	5630	21179
III & V	17496	22311	39807

Диаграмма Герцшпрунга-Рессела, соответствующая нашему обучающему множеству, показана на рис. 1.

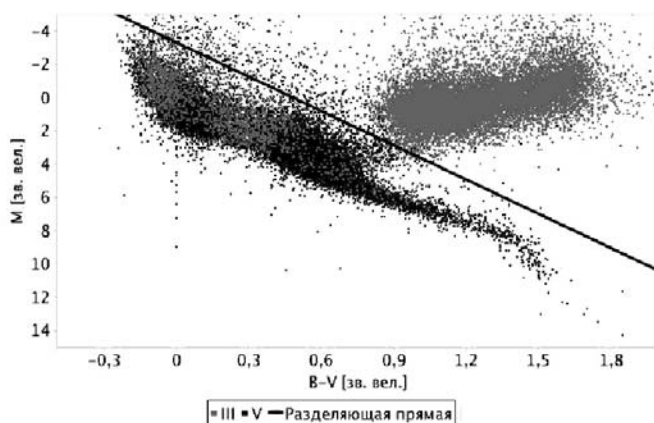


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела обучающего множества звезд (табл. 1). Серым цветом отмечены звезды III класса, темным – V. На рисунке также изображена разделяющая прямая.

Результатом обучения классификатора является разделяющая классы прямая, уравнение которой имеет следующий вид:

$$F(B-V, M) = 3.0752 \cdot (B-V) + 0.4485 \cdot M + 1.4793 = 0, \quad (1)$$

где $B-V$ – показатель цвета, M – абсолютная звездная величина.

Мы видим, что при показателе цвета $B-V > 0.6$ классификатор работает практически идеально, но при $B-V < 0.6$ и $F(B-V, M) > 0$ он всем звездам предсказывает V класс при большой доле звезд III класса в обучающем множестве (10.3%, 1758 из 17029). При $B-V < 0.6$ звезды III и V класса неразделимы, поэтому для этой половины можно принять другое решение – результат работы классификатора будет взвешенным средним III и V классов, то есть некоторым средним классом, $(B-V)_{int}$, у которого будет равен

$$(B-V)_{int} = w_1 \cdot (B-V)_{int}(III) + w_2 \cdot (B-V)_{int}(V). \quad (2)$$

В этой формуле веса w_1 и w_2 , ($w_1 + w_2 = 1$) логично взять в соответствии с априорной вероятностью классов в этой области (0.1 и 0.9). В таблице двумерной спектральной классификации [1] у спектрального типа G2 показатель цвета при III классе 0.733, при V – 0.630. Это максимальная разница между III и V классом в интересующем нас диапазоне. Класс, соответствующий средневзвешенному решению, будет иметь показатель цвета

$$(B-V)_{int} = 0.1 \cdot 0.733 + 0.9 \cdot 0.630 = 0.64, \quad (3)$$

то есть, даже в наихудшем случае отличие от V класса минимальное – 0.01^m , гораздо ниже уровня ошибок показателя цвета в каталоге Hipparcos. Поэтому в дальнейшем мы всегда будем использовать решение классификатора в этой области по V классу.

С учетом этого соглашения проведем оценку качества работы классификатора с помощью процедуры 10-fold кросс-валидации. Полученные оценки параметров классификатора (точность, полнота и F1-мера) приведены в следующей таблице:

Решение классификатора →	III	V	Класс	Точность	Полнота	F1-мера
III	16636	1992	III	95%	89%	92%
V	783	20396	V	91%	96%	93%

Как видим, классификатор имеет приемлемое качество, и с его помощью мы определили классы светимости 49542 звезд северного экваториального полушария. Этот результат позволил составить звездный каталог со следующей информацией:

- номер звезды в каталоге Hipparcos;
- галактические долготы и широты звезд, град;
- звездная величина в полосе V;
- спектральный класс;
- класс светимости.

Карты градиентов покраснения звезд

Межзвездное поглощение может быть описано избытком цвета, которое мы будем называть «покраснением»:

$$E = E_{B-V} = (B-V)_{obs} - (B-V)_{int} \quad (4)$$

где $(B-V)_{obs}$ – ее видимый показатель цвета звезды (с учетом межзвездного поглощения), а $(B-V)_{int}$ – теоретический показатель цвета звезды (без учета межзвездного поглощения). Значение $(B-V)_{obs}$ мы можем получить на основе данных фотометрии звезды из каталога. Значение $(B-V)_{int}$ берется из приведенной в [4] двумерной таблицы «спектральный класс, класс светимости – показатель цвета». То есть, для получения $(B-V)_{int}$ звезды нам нужно знать ее спектральный класс и класс светимости.

В дальнейшем мы будем обозначать конусы, высекаемые соответствующими пикселями разбиения Healpix [5], через C_i , где $i = 0, \dots, N_{pix}-1$. У нас $N_{pix} = 3888$.

Такое разбиение позволит нам:

- 1) рассмотреть ход покраснения в каждом конусе как одномерную функцию $E(r)$. Это корректно, ввиду того, что конусы достаточно узкие;
- 2) сделать наши результаты «независимыми», т.к. конусы не пересекаются;
- 3) поместить в каждый конус примерно одинаковое число звезд, чтобы избежать недостатка звезд в некоторых конусах.

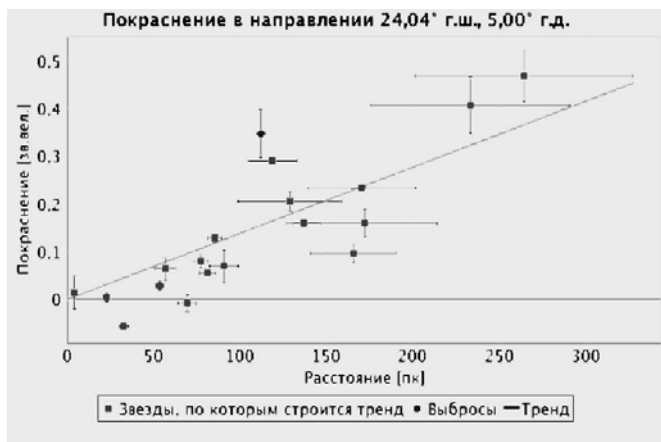


Рис. 2. Ход покраснения звезд по расстояниям в направлении $l = 5.00$, $b = 24.04$. По горизонтали расстояния в пк, по вертикали покраснение (зв. вел.). При вычислении градиента k отброшена одна точка. Данные из каталога Hipparcos.

Будем моделировать покраснение звезд вдоль луча зрения линейной функцией $E(r) = k \cdot r$. Свободный член можно считать нулевым, т.к. у ближайших звезд покраснения не должно быть ввиду очень малого объема пыли на луче зрения до них. Параметр k модели, соответствующей каждому конусу C_i , находится с помощью метода наименьших квадратов. При этом мы проводили отбор данных, так как метод наименьших квадратов очень чувствителен к выбросам, т.е. большие ошибки значений покраснения и/или параллакса могут очень сильно испортить результат. Для устранения этого недостатка после построения тренда по всем звездам в конусе, мы выбрасывали те звезды, которые давали самые большие отклонение от найденного тренда. Затем, новое значение тренда определялось уже только по оставшимся звездам. После выброса 10% самых плохих звезд процесс выбросов заканчивался (см. рис. 2).

Очевидно, что сильные выбросы дают далекие звезды, для которых параллакс определен с большой ошибкой. В нашей работе для построения градиентов покраснения использовались звезды на гелиоцентрических расстояниях до 500 пк. Кроме того, выбросы могут давать и звезды с большими ошибками в покраснении. Специальное исследование показало, что уровень ошибок покраснения, полученного по данным каталога Hipparcos, составляет 0.03^m , что является приемлемым значением. Тем не менее, некоторые звезды имеют большие ошибки в покраснении и могут быть выброшены в нашем методе вычисления тренда.

Распределение коэффициента k по небесной сфере

Тем самым, ход покраснения в конусе C_i мы описываем одним числом k_i — скоростью роста покраснения в этом конусе. Она, как мы ранее выясняли, должна коррелировать с наличием пыли. Поэтому, составив карту распределения коэффициента k , мы составим двумерную панораму распределения пыли в окрестности Солнца с радиусом до 500 пк.

На рис. 3 показана карта распределения градиентов покраснения для звезд обучающего множества. Черным цветом закрашены те площадки, для которых звезды обучающего множества не позволяют вычислить покраснение, так как для них не известны классы светимости. Число таких площадок равно 1678.

Как было сказано выше, определение спектрального класса для остальных звезд, не входящих в обучающее множество, нами производилось с помощью двумерного линейного классификатора. Карта градиентов покраснения, построенная с помощью классификатора, показана на рис. 3 справа. Сравнение левой и правой карт на рис. 3 показывает, что примененный нами метод машинного обучения для сортировки звезд по III и V классам светимости позволил получить информацию о межзвездном покраснении практически для всей небесной сферы.

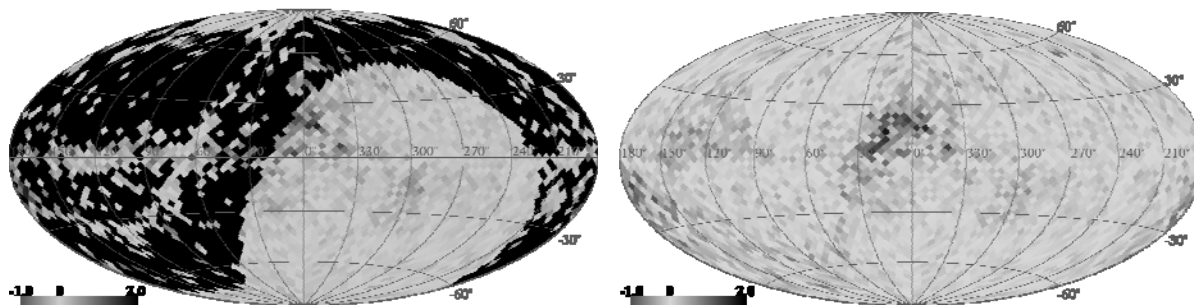


Рис. 3. Слева: распределение градиента покраснения, построенного по звездам, для которых можно определить покраснение только по данным каталога Hipparcos. Черным цветом отмечены 1678 пикселей, в которых нет даже 5-ти звезд. Справа: распределение градиента покраснения, построенного по звездам, для которых можно определить значение покраснения (94199 звезд). Границы цветовой шкалы указаны в зв. вел. на кпк.

Заключение

Перечислим основные результаты, полученные в работе.

- Создан бинарный классификатор, позволяющий звезде с известной абсолютной звездной величиной назначить класс светимости III или V. Для III класса светимости точность классификатора равна 95%, полнота – 89%. Для V класса светимости соответствующие характеристики равны 91% и 96%.
- Для 49542 звезд каталога HIPPARCOS с помощью бинарного классификатора определены классы светимости. Электронная версия этого каталога доступна по адресу <http://github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/predict-lumin.txt>
- Для 94199 звезд каталога HIPPARCOS определены покраснения звезд по показателю цвета B-V.
- Для звезд с расстояниями до 500 пк получена карта значений градиента покраснения в направлениях, определяемых центрами 3888 равновеликих площадок, построенных методом HealPix. Электронная версия этого каталога доступна по адресу <http://github.com/amosov-f/dust-detector/tree/R-1.0/dust/src/test/resources/table-k.txt>
- Определена статистическая надежность результатов для каждой площадки.
- Произведено сравнение карт покраснения, полученных нами в оптическом диапазоне, с аналогичными результатами, полученными в ближней инфракрасной области по данным каталога 2MASS. Практическое совпадение этих карт свидетельствует о надежной работе использованного нами бинарного классификатора.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 6.37.343.2015.

Литература

1. В. Страйжис. Многоцветная фотометрия звезд. – Вильнюс, 1977.
2. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos. – СПб: СПбГУ, (2005).
3. Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом ТУСНО-2. – СПб: СПбГУ, (2006).

4. *J. Binney and M. Merrifield. Galactic Astronomy. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1998.*
5. *Gorski et al. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // Astrophys. J. 622, 759 (2005).*
6. *Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. The Elements of Statistical Learning. – Springer New York Inc., New York, NY, USA (2001).*
7. *Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data van Leeuwen F. // Astron. Astrophys. 474, 653 (2007).*
8. *Houk N. et al. Michigan Catalog of Two-dimensional Spectral Types for HD Stars. Vol. 1–5. Ann. Arbor: Univ. Michigan Dept. Astron. 1978, 1982, 1975, 1988, 1999.*
9. *Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., Hog E., Bastian U., Bernacca P.L., Creze M., Donati F., Grenon M., Grewing M., van Leeuwen F., van der Marel H., Mignard F., Murray C.A., Le Poole R.S., Schrijver H., Turon C., Arenou F., Froeschle M., Petersen C.S. The Hipparcos Catalogue // A&A. 1997. 323L. 49 P.*
10. *V.N. Vapnik. The Nature of Statistical Learning Theory. – Berlin: Springer Verlag, 1995.*
11. *Zeljko Ivezić, Andrew J. Connolly, Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy. – Princeton University Press. 533 p., 2014.*

INTERSTELLAR EXTINCTION PARAMETERS DERIVED FROM THE HIPPARCOS CATALOGUE

Amosov F., Vityazev V., Tsvetkov A.
Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

A map of extinction gradients based on data from the Hipparcos catalogue in the directions, defined by the centers of 3888 equal size HealPix areas is presented. Missing data on luminosity classes of 49542 stars in northern equatorial hemisphere have been restored by linear binary classifier built on the training set of 39807 stars of the III and V spectral classes. The classifier precisions and recalls are 95% and 89% for the luminosity class III and 91% and 96% for the V class luminosity, respectively.

СРАВНЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ XPM и UCAC4

Витязев В.В., Цветков А.С.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Произведено сравнение стандартной Галактической системы координат с возможными версиями этой системы, построенными на новом наблюдательном материале по данным каталогов 2MASS, SPECIND, AKARI, WISE. Показано, что ошибки ориентации осей стандартной Галактической системы координат измеряются несколькими минутами дуги. На основе разбиения более 40 миллионов общих звезд каталогов XPM и UCAC4 на группы, принадлежащие 12 интервалам звездных величин в полосе J шириной 0.5^m для средних значений от 10.25^m до 15.75^m , получены систематические разности галактических координат обоих каталогов в виде разложения по векторным сферическим функциям с учетом уравнения яркости. Для выделения сигнала из шума использован статистический критерий, позволяющий тестировать все гармоники, которые можно вычислить при задании систематических разностей на сетке HealPix. Было найдено, что углы взаимной ориентации стандартных Галактических систем координат, реализованных с помощью каталогов XPM и UCAC4, различаются на миллисекундном уровне.

1. Введение

Сравнение каталогов традиционно делается в экваториальной системе координат, и, насколько нам известно, в литературе нет примеров вычисления систематических разностей положений и собственных движений в Галактической системе. Тем не менее, Галактическая система координат, которая реализуется с помощью преобразования экваториального триэдра, широко используется в различных задачах астрономии, таких как изучение структуры Галактики, звездная кинематики и динамика. Применяющаяся в настоящее время Галактическая система координат была введена Международным астрономическим союзом в 1958 году на основе изучения распределения нейтрального водорода в Галактике. В последнее время появились работы [6, 7], в которых ставится вопрос об улучшении Галактической системы координат путем идентификации плоскости Галактики с учетом нового наблюдательного материала о координатах различных объектов в инфракрасном диапазоне (каталог 2 MASS, [10]) и в радиодиапазоне (каталог SPECIND v.2.0, [12]). Все это делает актуальной задачу о сравнении различных реализаций Галактических систем координат.

Настоящая статья посвящена решению такой задачи. В ней произведено сравнение Галактических координат, полученных в стандартной системе МАС 1958, и в новых системах, основанных на каталогах 2MASS и SPECIND v.2.0. Помимо этого приводятся систематические разности галактических координат каталогов XPM [4] и UCAC4 [13], представленные в виде разложений по векторным сферическим функциям с учетом уравнения яркости. Полученные коэффициенты разложений используются для изучения взаимной ориентации и вращения изучаемых систем отсчета.

2. Сравнение стандартной Галактической системы отсчета с ее новыми вариантами

Как известно, Галактическая система координат реализуется долготами и широтами звезд, которые получаются из их экваториальных координат с помощью матричного преобразования

$$\begin{bmatrix} \cos l \cos b \\ \cos l \sin b \\ \sin b \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \cos \alpha \sin \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$N = R_z(90^\circ - \theta) R_x(90^\circ - \delta^p) R_z(90^\circ + \alpha^p), \quad (2)$$

где R_x, R_z – стандартные матрицы, описывающие повороты систем координат вокруг осей x, z соответственно, α^p, δ^p – экваториальные координаты северного полюса Галактики, а θ – позиционный угол центра Галактики, отсчитываемый от большого круга, проходящего через полюс мира и северный полюс Галактики (рис. 1).

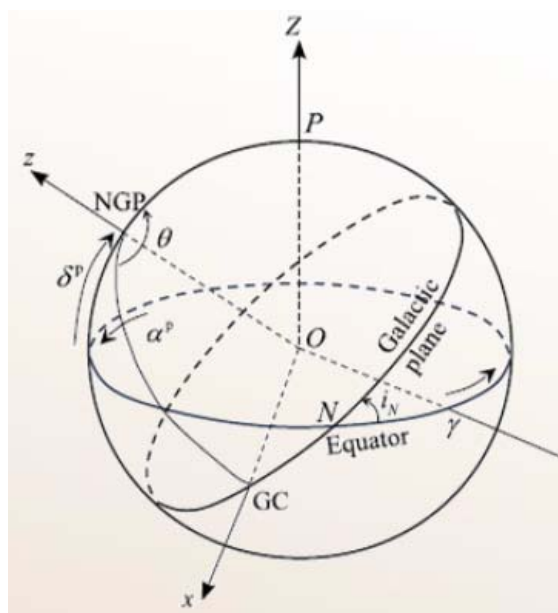


Рис. 1. Параметры ориентации Галактической системы координат относительно экваториальной системы координат.

Для вычисления собственных движений звезд в Галактической системе координат можно воспользоваться нижеследующими формулами:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mu_b \\ \mu_l \cos b \end{bmatrix} = A^{-1}(l, b) N A(\alpha, \delta) \begin{bmatrix} 1 \\ \mu_\delta \\ \mu_\alpha \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A(\alpha, \delta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta & -\cos \alpha \sin \delta & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \cos \delta & -\sin \alpha \sin \delta & \cos \alpha \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

По решению Международного астрономического союза [2] в 1958 году численные значения параметров ориентации Галактической системы координат, отнесенные к эпохе B1950.0, были введены во всеобщее употребление. Их новые значения, редуцированные на систему FK5, J2000.0, имеют следующий вид:

$$\alpha^p = 12^h 51^m 26^s .2755; \quad \delta^p = 27^\circ 07' 41'' .705; \quad \theta^p = 122^\circ .93191857. \quad (5)$$

В настоящее время Галактическая система координат, задаваемая выражениями (5), является стандартной. Она была получена на основе изучения распределения нейтрального водорода во внутренних частях диска Галактики. В работах [6, 7] предложены другие значения параметров (5), основанные на современных наблюдательных данных в инфракрасной области – каталог 2MASS [10], и в радиодиапазоне – каталог SPECFIND 2.0 [12]:

$$\alpha_{2MASS}^p = 12^h 50^m 46^s .5444; \quad \delta_{2MASS}^p = 26^\circ 48' 56'' .706; \quad \theta_{2MASS}^p = 122^\circ .912729244; \quad (6)$$

$$\alpha_{SPEC}^p = 12^h 49^m 58^s .7360; \quad \delta_{SPEC}^p = 26^\circ 32' 24'' .989; \quad \theta_{SPEC}^p = 122^\circ .823292026. \quad (7)$$

К этому следует добавить, что работе [3] приведены параметры еще одной Галактической системы координат, построенной по данным многоволновых каталогов AKARI [8] и WISE [9]:

$$\alpha_{AK-WI}^p = 192^\circ .777; \quad \delta_{AK-WI}^p = 26^\circ .9298; \quad \theta_{AK-WI}^p = 122^\circ .95017. \quad (8)$$

Для того чтобы выяснить отличия стандартной Галактической системы координат от ее новых вариантов, мы проделали следующие вычисления:

1. В центрах HealPix-площадок [5] был образован искусственный каталог экваториальных координат

$$\alpha_j, \delta_j, j = 0, \dots, N - 1; \quad (N = 1200).$$

2. С помощью преобразования (1) с наборами параметров (5–8) были получены четыре каталога с Галактическими координатами, которые мы в дальнейшем будем обозначать как и Gal(FK5), Gal(2MASS), Gal(SPEC), Gal(AK-WI);

3. Для сравнения новых Галактических систем со стандартной системой были вычислены разности галактических координат $\Delta l \cos b, \Delta b$ вида Gal(2MASS) – Gal(FK5) и Gal(SPEC) – Gal(FK5); Gal(AK-WI) – Gal(FK5);

4. Поля систематических разностей

$$\Delta \mathbf{G}(l, b) = \Delta l \cos b \mathbf{e}_l + \Delta b \mathbf{e}_b, \quad (\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_b - \text{орты в направлениях долгот и широт}) \quad (8)$$

были представлены в виде разложения по векторным сферическим функциям (ВСФ):

$$\Delta \mathbf{G}(l, b) = \sum_{nkp} t_{nkp} \mathbf{T}_{nkp} + \sum_{nkp} s_{nkp} \mathbf{S}_{nkp}. \quad (9)$$

В этой формуле $\mathbf{T}_{nkp}, \mathbf{S}_{nkp}$ – тороидальные и сфероидальные сферические функции, явные выражения для которых даны работе [1]. Коэффициенты аппроксимации для каждой пары галактических каталогов вычислялись по формулам

$$t_{nkp} = \frac{4\pi}{N} \sum_j \Delta \mathbf{G}(l_j, b_j) \mathbf{T}_{nkp}(l_j, b_j), \quad (10)$$

$$s_{nkp} = \frac{4\pi}{N} \sum_j \Delta \mathbf{G}(l_j, b_j) \mathbf{S}_{nkp}(l_j, b_j). \quad (11)$$

5. С помощью формул,

$$\varepsilon_x = -t_{111} / 2.89; \quad \varepsilon_y = -t_{110} / 2.89; \quad \varepsilon_z = -t_{101} / 2.89; \quad (12)$$

взятых из работы [11], были вычислены углы поворота осей прямоугольной Галактической системы Gal(FK5) для их совмещения с осями новых версий Галактической системы координат. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Компоненты вектора поворота осей ГСК Gal(FK5) для их совмещения с осями систем Gal(2MASS), Gal(SPEC), Gal(AK-WI). Единицы измерения – минуты дуги.

	ε_x	ε_y	ε_z
Gal(2MASS)	20.58	2.75	-3.36
Gal(SPEC)	40.29	2.74	-3.37
Gal(AK-WI)	12.41	2.78	-3.35

Мы видим, что ориентация осей новых Галактических систем относительно стандартной измеряются минутами дуги, при этом наблюдается хорошее согласие углов поворота вокруг осей y и z для систем Gal(2MASS), Gal(NSPEC) и Gal(AK-WI) в противовес сильному различию значений угла поворота вокруг оси x . Все это говорит о том, что для построения новой стандартной Галактической системы координат требуется дальнейшая работа, однако уже сейчас можно сказать, что ориентация осей стандартной системы, основанной на параметрах (5), установлена не на секундном, а минутном уровне точности.

3. Систематические разности положений в галактической системе координат

Систематические разности галактических долгот и широт вида XPM-UCAC4 были получены в виде разложений по векторным сферическим функциям с учетом уравнения блеска. Описание алгоритма дано в статье [1]. Эти разности можно использовать для анализа взаимной ориентации Галактических систем отсчета, реализуемых каталогами XPM и UCAC4. Как было сказано выше, углы поворота осей систем координат, реализуемых нашими каталогами, определяются через тороидальные коэффициенты первого порядка разложения по ВСФ разностей координат звезд. Зависимость этих компонент от блеска звезд показана на рис. 2. Здесь мы видим, что для совмещения с системой XPM углы поворота системы UCAC4 вокруг оси OY зависят от яркости звезд и заключены в пределах

$$(6.39 \pm 0.26) \text{ мсд} \leq \varepsilon_y \leq (3.51 \pm 0.55) \text{ мсд}.$$

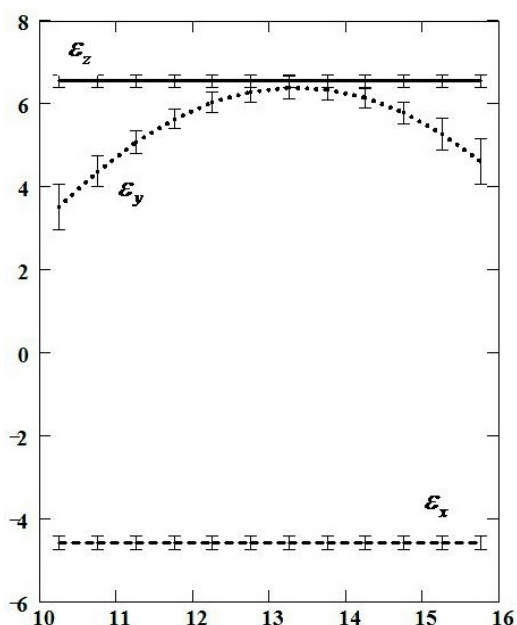


Рис. 2. Углы взаимной ориентации галактических систем отсчета каталогов XPM и UCAC4 в мсд. По горизонтальным осям отложены звездные величины выборок в полосе J.

Зависимость от блеска этого угла приводит к изменению координат полюса взаимного вращения, как это показано на рис. 3. Углы поворота вокруг осей OX и OY не зависят от яркости звезд и равны:

$$\varepsilon_x = -4.58 \pm 0.16 \text{ мсд}, \quad \varepsilon_z = 6.55 \pm 0.16 \text{ мсд}.$$

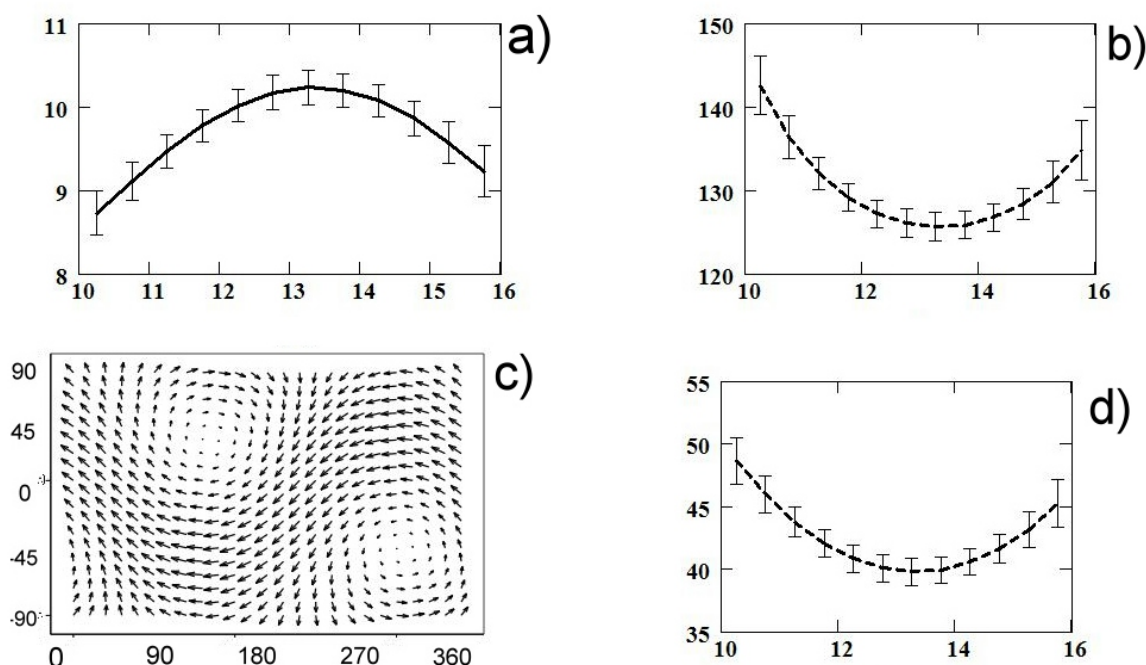


Рис. 3. а) Значения углов (мсд) поворота галактической системы отсчета каталога UCAC4 относительно XPM вокруг полюса, долготы и широты которого для звезд различной яркости показаны в боксах b) и d). Векторная карта в координатах (l,b), соответствующая повороту вокруг полюса для $J = 15 \text{ m}$, показана в боксе c). В боксах a, b, d по горизонтальным осям отложены звездные величины выборок в полосе J.

Заключение

Учитывая то, что фиксация направления осей стандартной Галактической системы координат произведена с точностью до нескольких минут дуги, можно сказать, что ориентация осей стандартной Галактической системы координат, реализуемых каталогами XPM и UCAC4, практически совпадает, так как найденные различия (хотя и имеют высокую статистическую надежность) оказались существенно меньше точности ориентации самой стандартной системы отсчета.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 6.37.343.2015.

Литература

1. Витязев В.В., Цветков А.С. Систематические разности положений и собственных движений звезд каталогов PPMXL и UCAC4 // Письма в АЖ, 2015, т. 41, № 7, 350–366; [V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov, *Astron. Lett.* 41, 317 (2015)].
2. Blaauw, A., Gum, C.S., Pawsey, J.L., Westerhout, G. The new I.A.U. system of galactic coordinates (1958 revision, *MNRAS*, 121, (1960).
3. P.-J.Ding, J.-C. Liu, and Zi Zhu. Galactic coordinate system based on multi-wavelength catalogues. Proceedings of the Journées 2014 "Systemes de reference spatio-temporels", Z. Malkin and N. Capitaine (eds), Pulkovo observatory, 32, (2015).
4. P.N. Fedorov et al. The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 393, 133 (2009).

5. *K.M. Gorski, E. Hivon, A.J. Banday et al.* HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astrophys. J.* v. 622, p.759, (2005).
6. *J.-C. Liu, Z. Zhu, and H. Zhang.* Reconsidering the Galactic coordinate system // *Astronomy and Astrophysics.* 526, A16, (2011a).
7. *J.-C. Liu, Z. Zhu, and B. Hu.* Constructing a Galactic coordinate system based on near-infrared and radio catalogs // *Astronomy and Astrophysics.* 536, A102, (2011b).
8. *Murakami, H., Baba, H., Barthel, P., et al.* The Infrared Astronomical Mission AKARI // *PASJ*, 59, 369, (2007).
9. *Wright, Edward L. Peter R. M. Eisenhardt, Amy K. Mainzer, et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *The Astronomical Journal*, 140, 1868–1881, (2010).
10. *Skrutskie, M.F., and 30 colleagues.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *The Astronomical Journal* 131, 1163–1183, (2006).
11. *V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov.* Intercomparison of kinematics derived from catalogues UCAC4, PPMXL and XPM with vector spherical harmonics // *MNRAS* 442, pp. 1249–1264, (2014).
12. *Vollmer, B., Gassmann, B., Derriere, S., et al.* Reconsidering the Galactic coordinate system (SPECFIND v.2.0 // *Astronomy and Astrophysics.* 511, A53, (2010).
13. *N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, and M.I. Zacharias.* The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.* 145, 44 (2013).

A COMPARISON OF GALACTIC COORDINATE SYSTEMS XPM AND UCAC4

Vityazev V.V., Tsvetkov A.S.

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Three versions of possible new Galactic coordinate systems based on modern catalogues *2MASS*, *SPECFIND*, *AKARI*, *WISE* have been compared with the standard one. It was shown that the standard system is oriented in space with accuracy not better than several arcminutes. The comparison of the XPM and UCAC4 catalogues based on more than 40 million common stars in the Galactic coordinate system is presented. The systematic differences between positions and proper motions in 12 J-magnitude bins in the range 10.25–15.75 mag. were expressed by decompositions on the vector spherical harmonics. An analytical method to describe the magnitude equation was used. A new statistical criterion adapted to the HealPix data pixelization to determine the significance of all the accessible harmonics is proposed to extract signal from noise. It was found that the mutual orientation of the XPM and UCAC4 Galactic frames is in the range of several mas.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЗАИМНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА В 2015 Г.

Измайлов И.С.¹, Рощина Е.А.¹, Горшанов Д.Л.¹, Назаров С.В.²

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

²Крымская астрофизическая обсерватория, Крым, Россия

Представлены предварительные результаты фотометрических наблюдений взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера, выполненных в 2015 г. Наблюдения выполнялись на 26-дюймовом рефракторе, Нормальном астрографе и телескопе ЗА-320 Пулковской обсерватории, телескопе МТМ-500 Горной станции ГАО РАН в Кисловодске и в Крымской астрофизической обсерватории. Всего было получено 73 наблюдения 37 явлений. Приводятся первые кривые блеска и оценка разностей О-С. Работа поддержана грантом РФФИ 15-02-03025.

Введение

Построение и уточнение теорий движения спутников планет требуют как можно более длительных рядов позиционных наблюдений от момента открытия и до настоящего времени. Особую роль играют фотометрические наблюдения взаимных явлений – затмений или покрытий спутников. Результаты анализа кривых блеска спутников, полученные во время взаимных явлений, позволяют получить особо точные астрометрические данные. В предыдущие международные кампании 1995, 1997, 2003 и 2009 гг. по наблюдениям взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера и Сатурна коллектив наблюдателей Пулковской обсерватории принимал активное участие [4]. В 2003 г. наблюдения Пулковской обсерватории обеспечили 10% от всех мировых данных [3].

Взаимные явления в системе галилеевых спутников Юпитера повторяются с периодом в 6 лет и 9 месяцев. В 2014–2015 гг. года явления доступны для наблюдений в Пулкове и Горной станции ГАО с октября 2014 г. по август 2015 г. Высота Юпитера над горизонтом достигала 45 градусов в меридиане.

Эфемериды взаимных явлений были обеспечены отделом небесной механики ГАИШ и представлены на сервере эфемерид MULTI-SAT [2] по адресу <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/nsszph515he.htm>

Результаты фотометрических наблюдений взаимных явлений будут представлены в виде кривых блеска, на основе которых будут определены параметры покрытий и затмений: разности угловых топоцентрических (при взаимных покрытиях) или гелиоцентрических (при взаимных затмениях) координат двух спутников, участвующих в явлении, на некоторый один момент времени (достаточно произвольный) в период явления.

Наблюдения и методика

В программе наблюдений участвовали три пулковских инструмента: 26-дюймовый рефрактор, Нормальный астрограф, телескоп ЗА-320 и телескоп МТМ-500М Горной астрономической станции ГАО РАН близ г. Кисловодска, где число ясных ночей значительно больше, чем в Пулкове (250 ночей против 120–140 в Пулкове). Одно явление было снято в Крымской астрофизической обсерватории.

В табл. 1 и 2 представлена информация о телескопах, участвовавших в наблюдениях и количестве наблюдаемых явлений.

Наблюдения производились согласно рекомендациям, приведенным в работе [1]. Наблюдения начинались заранее, до начала явления на величину длительности покры-

тия или затмения и продолжались после, на такой же интервал времени. Время экспозиций варьировалось от $0^s.1$ до 1^s в зависимости от погодных условий и звездных величин спутников. Фильтры не использовались. Полученные ПЗС-кадры анализировались,

Таблица 1. Телескопы, приемники излучения и наблюдатели

Обсерватория	Телескоп	Камера	Наблюдатели	Код
Пулково	26"-рефрактор D = 650 мм, F = 10413 мм	FLIProline 09000 3056×3056, 1 px = 0.012 мм, FOV 12'×12', M = 0.24 "/px	Измайлов И.С.	084
Пулково	Нормальный астрограф D = 330 мм F = 3467 мм	SBIG ST-L-11K, FOV = 35'×23', M = 0.533 "/pix.	Ховричев М.Ю. Куликова А.М.	084
Пулково	ЗА-320 D = 320 мм F = 3200 мм	SBIG STL-16803 FOV = 39'×39' M = 0.6 "/pix	Горшанов Д.Л. Петрова С.Н. Слесаренко В.Ю. Наумов К.Н. Иванов А.В. Соков Е. Н. Куприянов В.В.	084
Горная станция ГАС ГАО	МТМ-500М D = 500 мм F = 6520 мм	STL-1001E FOV = 21'×21' M = 1.2 "/pix	Ляшенко А.Ю. Русов С.А.	С20
КрАО	Sky Watcher D = 90 мм F = 910 мм	ZWO ASI 120MM	Назаров С.В.	095

Таблица 2. Наблюденные явления

Телескоп	Расположение	Количество явлений	Количество кривых блеска
26"-рефрактор	Пулково	29	26
Норм. астрограф	Пулково	14	в процессе
ЗА-320	Пулково	16	в процессе (1 получена)
МТМ-500	ГАС ГАО	13	в процессе
Sky Watcher 90/910	КрАО	1	в процессе

по изображениям спутников вычислялись интегральные интенсивности на средний момент каждого кадра. Учет темного тока и плоских полей производился стандартным образом. Результатами анализа являются отношения светового потока спутника и объекта сравнения или разность звездных величин спутника и объекта сравнения. В качестве объектов сравнения выбирался либо спутник, не участвующий во взаимном покрытии, либо затмевающий объект, либо звезда фона. Для учета градиента фона от планеты уровень фона рассчитывался по значениям интенсивности на пикселях из кольцеобразной области вокруг изображения спутника при помощи линейного полинома

$$I(x, y) = Ax + By + C.$$

Методом наименьших квадратов определялись параметры А, В и С, которые использовались для расчета фона в области изображения спутника. Для минимизации

ошибки определения фона Юпитер выводился из поля зрения камеры, когда это было возможно. Радиус апертуры выбирался минимальным.

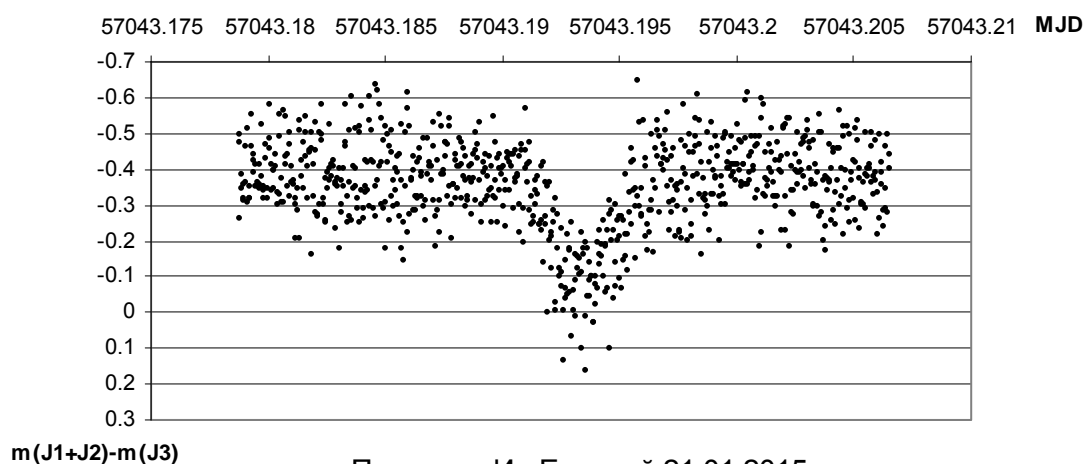
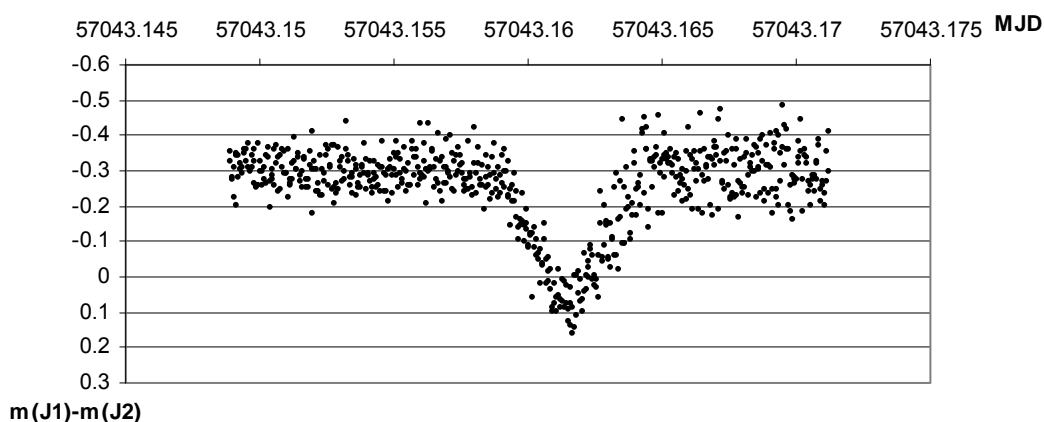


Рис. 1–2. Примеры полученных кривых блеска.

Предварительные результаты

Всего выполнено 73 наблюдения 37-ми явлений. Основными проблемами при наблюдении явлений в Пулкове оказались растительность вокруг павильонов и погода. По наблюдениям 26-дюймового рефрактора для 29-ти явлений удалось получить 27 кривых блеска (см. рис. 1–2). Моменты времени даны в единицах модифицированной юлианской даты (MJD), по оси ординат отложены разности блеска спутников (рис. 1), разности блеска спутника сравнения с суммой яркостей спутников участвовавших в явлении (рис. 2). Для предварительной оценки качества наблюдений, полученные значения звездных величин аппроксимировались квадратичным многочленом.

Среднеквадратичные ошибки одного определения блеска составили от 0.02^m до 0.19^m , в среднем – 0.06^m . Также определялся момент максимального падения блеска. Ошибки определения момента максимума зависели от глубины явления и количества полученных кадров, составили от 0.2 сек. до 11.9 сек., в среднем – 4 сек. По результатам обработки ПЗС-кадров и построению кривых блеска предполагается определить

взаимные расстояния между спутниками и оценить рассогласования с теорией. Полученные кривые блеска доступны в пулковской астрометрической базе данных по адресу <http://puldb.ru/photometry/phemu2014-2015/>. Данные будут пополняться по мере выполнения обработки наблюдений.

Литература

1. *Емельянов Н.* Специальная программа наблюдений путников Юпитера и Сатурна в 2009 году // *Астрон. Вестн.* 2008. Т. 42. С. 447–480.
2. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *Astronomy and Astrophysics.* 2008. V. 487. P. 759–765.
3. *Arlot, J.-E.; Thuillot, W.; Ruatti, C. et al.* The PHEMU03 catalogue of observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites of Jupiter // *As&A.* 2009. V. 493, I. 3, Pp. 1171–1182.
4. *Emelyanov, N.V.; Andreev, M.V.; Berezhnoi, A.A. et al.* Astrometric results of observations at Russian observatories of mutual occultations and eclipses of Jupiter's Galilean satellites in 2009 // *Sol. Sys. Research.* 2011. V. 45, I. 3. Pp. 264–277.

PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF MUTUAL PHENOMENA IN THE SYSTEM OF GALILEAN SATELLITES OF JUPITER DURING 2014-2015

Izmailov I.S.¹, Roshchina E.A.¹, Gorshanov D.L.¹, Nazarov S.V.²

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Crimea, Russia*

We present the preliminary results of photometric observations of mutual phenomena in the system of Galilean satellites of Jupiter obtained during 2014–2015. The observations were carried out using the 26-inch refractor, Normal astrograph, ZA-320 of Pulkovo Observatory, MTM-500 telescope at Pulkovo's mountainous station in Kislovodsk and at the Crimean Astrophysical Observatory. A total we had obtained the 73 observation of 37 phenomena. We present the first light curves and the differences with theory "O-C". The rms of determining the brightness are within a range from 0.02^m to 0.19^m, the average rms is 0.06^m. Also we defined the moments of minimum of brightness. Errors of moments are depended on the depth of the phenomenon and the number of ccd frames and they are within a range from 0.2 sec. to 11.9 sec., the average error is 4 seconds. We are going to determine the distances between the satellites and estimate a disagreement with theory using obtained light curves. This work was supported by grant RFFI 15-02-03025.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НЕИЗВЕСТНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ

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

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия*

Малоразмерные фрагменты космического мусора сложной формы с большим отношением площади миделева сечения к массе и с амплитудой изменения блеска 3^m и более являются сложными объектами как для наблюдения с помощью эфемеридной информации, так и для точного прогнозирования их орбиты. Существование таких околоземных космических объектов обуславливает сложность контроля состояния околоземного космического пространства в целом и геостационарной области в частности.

1. Введение

Целями и задачами оптических наблюдений фрагментов космического мусора являются:

- обновление и поддержание динамического каталога объектов космического мусора;
- исследование населённости околоземного космического пространства;
- определение элементов орбит и физических характеристик фрагментов космического мусора;
- поиск и обнаружение фрагментов;
- каталогизация фрагментов космического мусора (в том числе утерянных объектов на высоких орбитах).

Все данные наблюдений, использованные в настоящей статье, получены на обсерваториях ИНАСАН – пунктах Звенигород и Терскол, на инструментах Сантел-500 ($D = 0.5$ м, $F = 1.25$ м) и Zeiss-2000 ($D = 2$ м, $F = 16$ м) соответственно. Внутренняя точность измерения топоцентрических координат на данном оборудовании составляет около $0.1''$.

Аппаратурные возможности инструментов обсерваторий ИНАСАН позволяют получать измерения для всей геостационарной области и для объектов на высокоэллиптических орбитах, характеризующихся большим значением апогейного расстояния и высотой перигея, расположенного зачастую внутри атмосферных слоёв Земли.

В 2014–2015 гг. были проведены оптические наблюдения объектов геостационарной области со следующими параметрами:

- наклоном от 0° до 16° ,
- эксцентриситетом от 0.0001 до 0.75,
- амплитудой изменения блеска от 0.5^m до 8^m за один сеанс для одного объекта.

Проведенные исследования наблюдений в Терсколе и Звенигороде показали возможность научного использования результатов наблюдений даже с одного пункта и выявления особенностей орбитальной эволюции объектов с последующим их исследованием [3].

В настоящей работе приведены статистические данные пополнения каталога объектов системы контроля космического пространства (СККП) РФ для фрагментов космического мусора в геостационарной области (ГСО), наблюдения которых были проведены в 2014–2015 гг. с помощью аппаратуры комплекса Zeiss-2000 [4].

По данным наблюдений рассмотрена трёхлетняя эволюция движения одного из высокоэллиптических объектов космического мусора, открытого на Звенигородской

обсерватории ИНАСАН. Рассчитана эволюция элементов орбиты объекта на несколько лет вперёд, предсказано достижение критического значения эксцентриситета в 2018 году.

2. Пополнение каталога объектов СККП с помощью аппаратуры Zeiss-2000 в 2014–2015 гг.

В 2014 году нами было обнаружено и подтверждено 12 новых и утерянных объектов, орбиты которых не уточнялись с помощью новых наблюдений в течение 101–167 суток. Для 85 давно не наблюдававшихся (от 11 до 85 суток) объектов были уточнены элементы орбит.

За три сеанса 2015 года было обнаружено и подтверждено 5 новых и утерянных объектов, причём орбиты утерянных фрагментов были уточнены спустя 215–553 суток без наблюдений. Орбитальные данные были уточнены для 65 давно не наблюдававшихся (от 10 до 96 суток) фрагментов.

В табл. 1 приведены элементы орбиты новых фрагментов, открытых в ноябре 2014 г. в Терскольской обсерватории. Все фрагменты находятся на высоких орбитах с большими эксцентриситетами (больше 0.02). Объекты 66400 и 66500 имеют временные номера. Объекты 90*** имеют номера, присвоенные новым фрагментам в динамическом каталоге космического мусора ИПМ им. М.В. Келдыша. Серым цветом выделен один и тот же объект, которому после подтверждения орбиты был присвоен постоянный номер 90605 в каталоге.

Таблица 1. Элементы орбит объектов, обнаруженных по наблюдениям в ноябре 2014 г.

Объект	среднее движение (об/сутки)	эксцентриситет	наклонение (°)	большая полуось (км)
66400	1.0072	0.0563	14.44	42039.4
66500	0.9932	0.0540	14.40	42431.2
90600	1.0093	0.0255	13.63	41980.2
90602	1.0202	0.0451	12.57	41679.1
90603	1.0032	0.1349	12.91	42149.1
90605	1.0050	0.0554	14.44	42098.3

Все объекты из табл. 1 обладают слабыми значениями блеска, порядка 18^m . На рис. 1 и рис. 2 показаны кривые блеска и периодограммы изменения звёздной величины для объектов 90603 и 90605. По оси абсцисс на графиках кривых блеска отложено время в минутах, по оси ординат – звёздная величина. По оси абсцисс на периодограммах отложен период изменения блеска в минутах, по оси ординат – значение периодической функции изменения блеска.

Амплитуда изменения блеска для обоих объектов составляет примерно две звёздные величины. Периоды изменения блеска для объектов 90603 и 90605 составили 1.7 и 2.0 минуты соответственно.

На рис. 3 приведены значения амплитуд интегральных звёздных величин для объектов, измеренных на комплексе Zeiss-2000. Номера фрагментов на графике соответствуют номерам в динамической базе данных ИПМ им. М.В. Келдыша. Данные блеска приведены для 29 объектов, среди которых есть (отмечены стрелками вверх) как относительно стабильные, например, 43082 и 43125, блеск которых близок к 16^m , так и

фрагменты с большой амплитудой изменения блеска. Некоторые такие нестабильные объекты обладают быстрым, «вспышечным» характером изменения блеска в течение нескольких минут, для других же (например, объект 90073) характерно постепенное изменение средней звёздной величины со временем, обусловленное особенностями эволюции элементов орбиты.

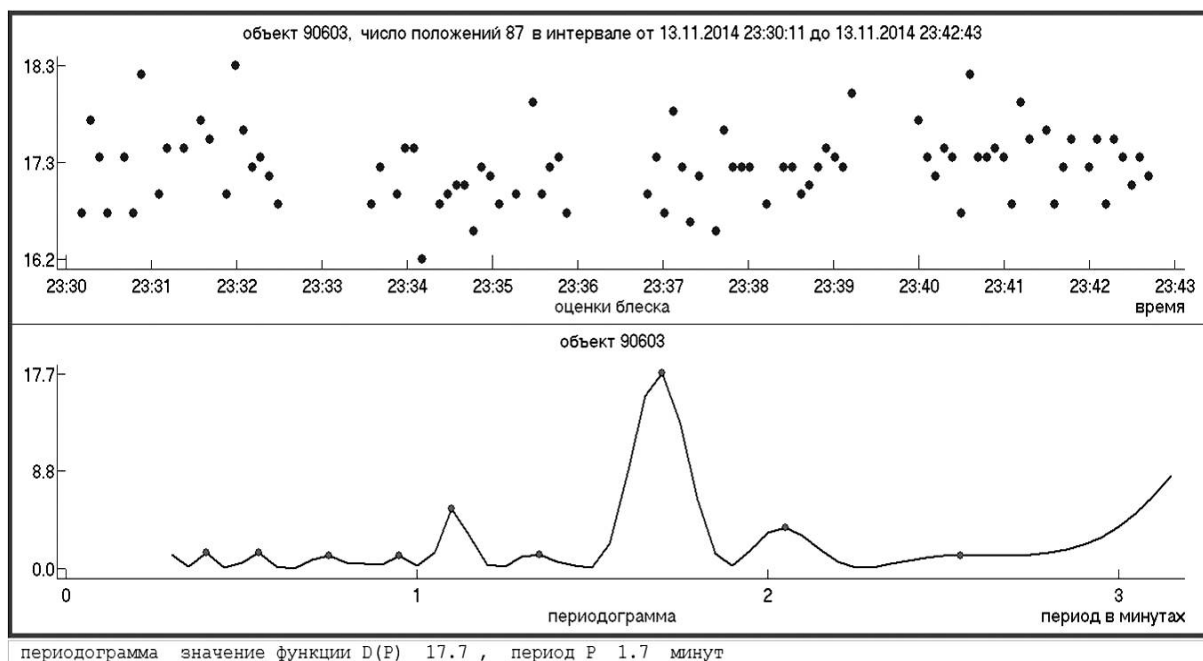


Рис. 1. Кривая блеска (вверху) и периодограмма изменения блеска (внизу) для объекта 90603.

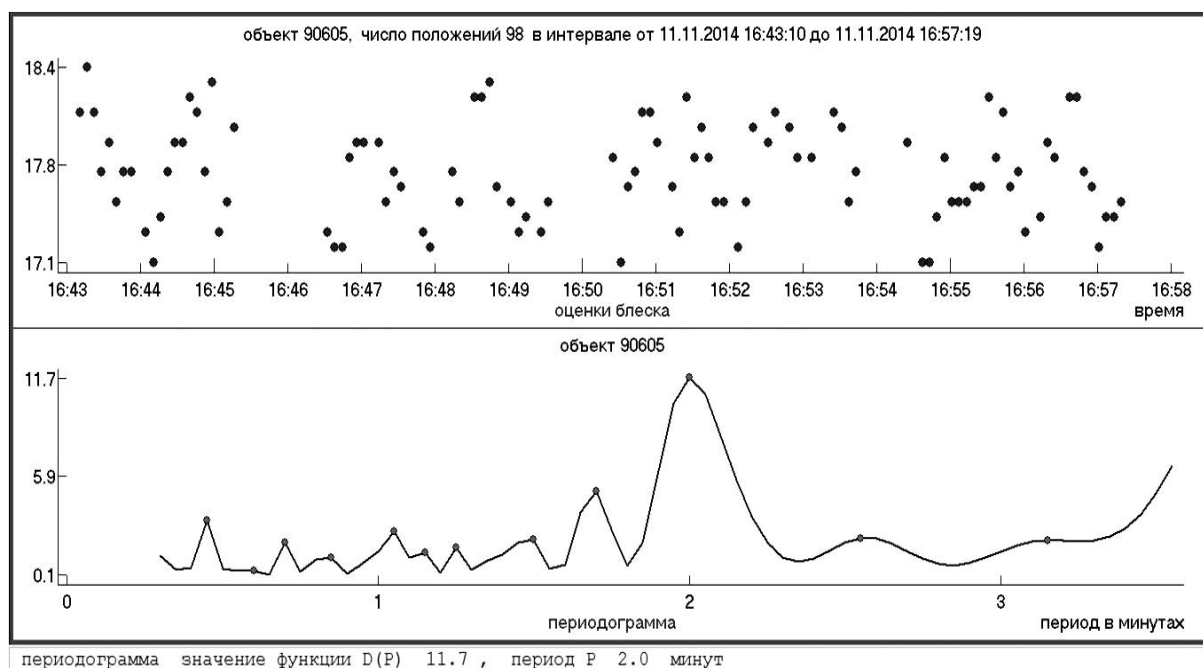


Рис. 2. Кривая блеска (вверху) и периодограмма изменения блеска (внизу) для объекта 90605.

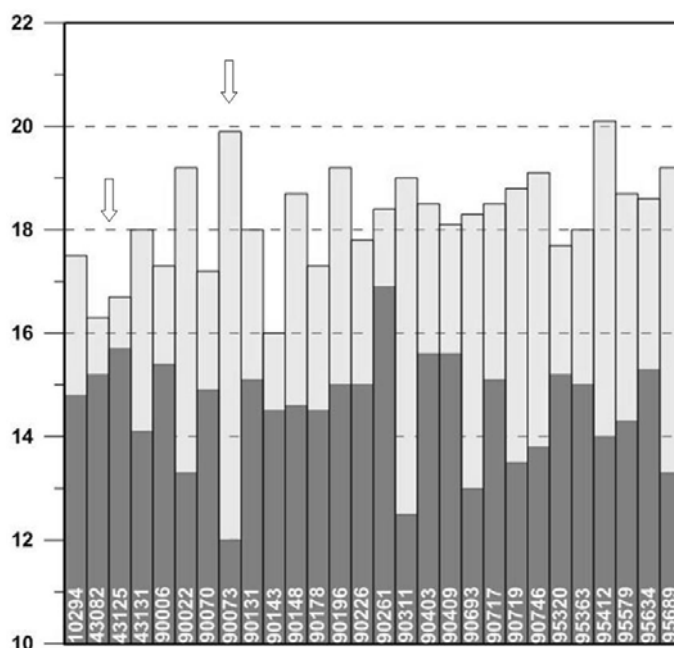


Рис. 3. Амплитуда изменения блеска 29 объектов, измеренных на Zeiss-2000 в июле 2015 г.

3. Исследование высокоэллиптических космических объектов

В 2012 году на Звенигородской обсерватории ИНАСАН был открыт объект космического мусора на высокоэллиптической орбите, включённый в каталог ИПМ им. М.В. Келдыша под номером 95633 [1].

Фрагмент 95633 обладает блеском с амплитудой 13.5–17.5^m с быстрым изменением интегральной звёздной величины – фотометрические измерения были проведены на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН, проникающая способность которого на ГСО составляет ~22^m [1]. На рис. 4 приведена кривая блеска объекта 95633, измеренного в декабре 2013 г. в Терсколе.

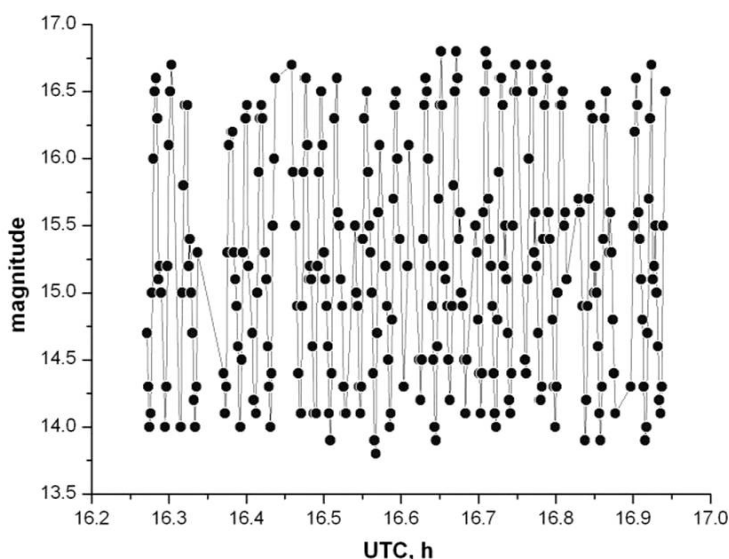


Рис. 4. Изменение блеска объекта 95633 по данным наблюдений на Zeiss-2000 12.12.2013.

Для объекта 95633 были найдены два основных периода изменения блеска – 4.5 минуты и 1.3 минуты. Высокоточное измерение блеска малоразмерных фрагментов космического мусора при разных углах вращения (на всём диапазоне изменения блес-

ка) значительно облегчает в дальнейшем сопровождение и последующий процесс наблюдений и, как следствие, уменьшает вероятность их потери.

В табл. 2 приведены данные о перигейном (h_{\min}) и апогейном (h_{\max}) расстояниях и эволюции эксцентриситета e фрагмента 95633 по данным трёхлетних наблюдений.

Таблица 2. Орбитальные параметры фрагмента 95633 по данным трёхлетних наблюдений.

дата	h_{\min} (км)	h_{\max} (км)	e
01.03.2012	1270	38580	0.70928
01.08.2012	1090	38758	0.71606
01.01.2013	900	38950	0.72338
01.09.2013	800	39050	0.72700
01.12.2013	700	39140	0.73066
01.06.2014	750	39100	0.72896
01.12.2014	800	39050	0.72719

По массиву полученных координатных измерений за несколько лет была рассчитана эволюция элементов орбиты фрагмента 95633 до 2018 года (рис. 5). Здесь период изменения большой полуоси – около 350 суток – обусловлен вхождением объекта в тень Земли и большим отношением площади миделева сечения к массе (около $0.12 \text{ м}^2/\text{кг}$).

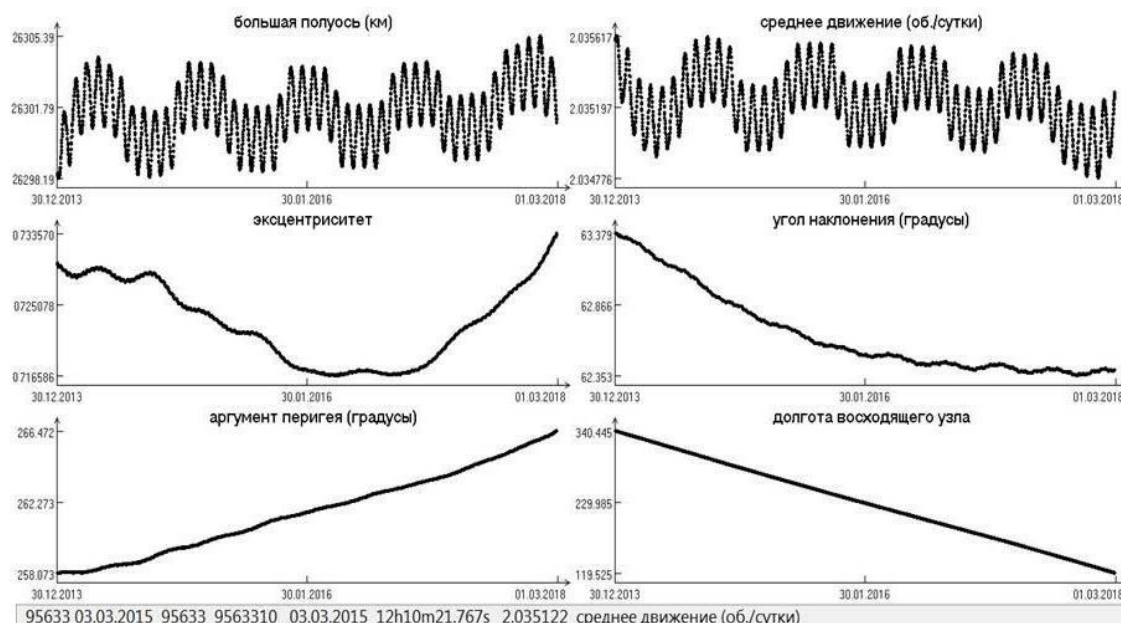


Рис. 5. Эволюция элементов орбиты объекта 95633 до 2018 года.

Показано, что достижение критического эксцентриситета 0.75 прогнозируется к 2018 году. При этом значении параметра e фрагмент космического мусора на высокоэллиптической орбите при каждом последующем витке стремительно уменьшает апогейное расстояние, погружаясь всё ниже в атмосферу Земли в перигейной точке. При этом падение такого аппарата – сложный скачкообразный процесс, при котором высота перигея может увеличиваться или уменьшаться на последовательных витках [2].

Объекты на высокоэллиптических орбитах, подобные 95633, нуждаются в регулярно обновляемых наблюдательных данных с тем, чтобы можно было точнее спрогнозировать время входа в плотные слои атмосферы таких объектов и даже их падения на Землю, если речь идёт о крупном космическом объекте.

5. Заключение

В настоящей работе представлены результаты анализа наблюдений объектов космического мусора на обсерваториях ИНАСАН, приведены данные пополнения каталога системы контроля космического пространства средствами комплекса телескопа Zeiss-2000 Терскольской обсерватории в 2014-2015 гг. Фрагменты, рассмотренные в настоящей статье, находятся на высоких орбитах с большими эксцентриситетами (больше 0.02) и обладают блеском слабее 17^m.

Рассмотрена трёхлетняя эволюция движения объекта космического мусора на высокоэллиптической орбите, открытого в Звенигороде, полный ряд позиционных и фотометрических наблюдений для которого был получен на Zeiss-2000 в Терсколе. Регулярное сопровождение объекта в течение нескольких лет позволило сделать долгосрочный прогноз эволюции элементов орбиты с выявлением момента достижения критического эксцентриситета.

Авторы благодарят сотрудников Терскольской обсерватории за помощь в организации и проведении наблюдений.

Литература

1. *Бахтигараев Н.С., Костюк Н.Д., Чазов В.В.* Наблюдения высокоэллиптических космических объектов в Звенигородской обсерватории ИНАСАН // Экологический вестник научных центров ЧЭС, 2013, т. 3, № 4, 38–42.
2. *Чазов В.В., Бахтигараев Н.С., Костюк Н.Д.* Наблюдения спутника Молния 3-39 в Звенигородской обсерватории ИНАСАН и определение времени падения // Вестник СибГАУ, 2011, Выпуск 6 (39), Красноярск, 183–185.
3. *Levkina P., Bakhtigaraev N., Sergeev A., Chazov V.* Determination of physical characteristics of small-size space debris in GEO // Proc. of the 6th European Conference on Space Debris, 22–25 April 2013, Darmstadt, Germany. ESA SP-723, August 2013.
4. *Tarady V., Yatskiv Ya.* The new 2m RCC telescope in the Northern Caucasus for modern astronomical research // Astron. Astrophys. Trans, 1997, № 13, 19–21.

RESULTS OF UNKNOWN SPACE DEBRIS FRAGMENTS OBSERVATIONS AT GEOSTATIONARY REGION

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

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Astronomical Institute named P.K. Sternberg MSU, Moscow, Russia*

Small-sized space debris fragments with a complicated shape and an amplitude of brightness variations about 3^m or more are complex objects and for observation using ephemeris information, and to accurately predict of their orbits. Available in the catalogue of the near-Earth space objects such fragments causes the complexity of near-Earth space monitoring as a whole and the geostationary region in particular.

Fragments discussed in this article are in high near-Earth orbits with large eccentricities (greater than 0.02), and with magnitude ~18^m.

We consider the three-year orbital evolution of the space debris object on highly elliptical orbit. Regular maintenance of the object for several years allowed us to forecast the long-term evolution of the orbital elements with identification of the moment of reaching the critical eccentricity.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД $1^m - 12^m$

Липовка А.А.¹, Липовка Н.М.

¹Центр физических исследований, Университет Соноры, Эрмосийо, Мексика

На основе разработанного и запатентованного метода привязки координат небесных радиообъектов к координатам оптических объектов (ЛКЛ), обнаружено смещение положения объектов в радиодиапазоне относительно положения координат оптических объектов из-за неверной привязки координат небесных объектов в радиодиапазоне. В результате правильной привязки координат объектов радио-оптика оказалось, что большая часть звезд радиоизлучает и что яркие звезды отождествляются с сильными радиоисточниками. Обнаружена радиорефракция в межзвездной среде.

1. Введение

Первые оптические отождествления были выполнены нами в 1985–1995 годах в Тонантсинтла (Мексика) в Национальном институте астрономии, оптики и электроники (INAOE) по стеклянным копиям Паломарского атласа с точность $1.5'' \times 1.5''$ при помощи высокоточного прибора блинк-компаратора фирмы Цейс.

Было обнаружено, что объекты радио-оптика не совпадают. Несовпадение объектов радио-оптика объяснялось тем, что радиоизлучают далекие галактики и квазары. В дальнейшем, при помощи блинк-компаратора и используя метод Шлезингера для привязки к опорным звездам, мы определили, с высокой точностью, координаты 800 объектов с диффузным изображением и в 1987–1989 годах выполнили радионаблюдения нескольких объектов на Бонском 100 м зеркале Института Макса Планка и на РАТАН-600. Эти наблюдения подтвердили факт того, что в положении оптических объектов нет радиоисточников, а рядом находятся радиообъекты, попадающие в пустое поле в оптическом изображении. Цель наших исследований заключалась в том, чтобы привести координаты радиообъектов в соответствие с координатами оптических объектов.

В настоящее время, при использовании нашей методики привязки координат объектов радио-оптика [1], на 10 уже опубликованных площадках, размером один квадратный градус каждая, у нас отождествилось 96 звезд ярче 12^m и 18 объектов с диффузным изображением. Ссылки на опубликованные работы приведены в работах [2, 3]. На исследуемых площадках обнаружена значительная радиорефракция в межзвездной среде. На обсуждение выносятся результаты исследований, которые актуальны для астрометрии, астрофизики, изучения межзвездной среды и механизмов излучения звезд.

2. Ошибки привязки

В NRAO обсерватории с 1993 по 1998 г. был выполнен обзор северного полушария неба на симметричном радиоинтерферометре на волне 21 см с высоким разрешением ($\theta = 45''$) и хорошей чувствительностью (2 мЯн) [4]. Обзор насчитывает 2×10^6 радиоисточников, и основная часть этих радиообъектов (99%) не совпадает с координатами объектов видимых в оптическом диапазоне длин волн.

Тем временем идет бурное развитие компьютерной техники, появляется интернет, в интернет заносятся данные обзоров неба в оптическом диапазоне длин волн [5] и данные NVSS радиообзора, выполненного на волне 21 см в NRAO обсерватории (США) [4]. Данными этого обзора мы и воспользовались для выполнения дальнейших отождествлений небесных объектов радио-оптика. В 2007 г. мы снова приступаем к выполнению оптических отождествлений и обнаруживаем, что, при предложенной в NVSS обзоре [4] привязке координат радиообъектов к оптическим объектам [5], коор-

динаты небесных объектов радио-оптика не совпадают. Ошибки по привязке координат радио-оптика были допущены в самом начале наблюдений на радиотелескопах. В качестве опорных для привязки координат радиообъектов к оптическим объектам в 1962 г. были рекомендованы радиообъекты 3С каталога, которые дают неверную привязку радиообъектов к оптическим объектам. Каталог 3С был получен на радиотелескопе с диаграммой $13.6' \times 4.6''$, на частоте 178 МГц [6]. Кроме того учитывались координаты радиоисточников полученные осреднением всех имеющихся тогда радиокаталогов на частотах от 38 МГц до 1390 МГц. Основная часть радиообъектов 3С каталога **не была** привязана к оптическим небесным объектам. Мы просмотрели все публикации в радиодиапазоне, начиная с 1955 г. по 2007 г., и обнаружили ошибки привязки координат радиообъектов к оптическим объектам. Результаты этих исследований опубликованы в работах [7, 8].

3. Отождествления объектов радио-оптика на трех небесных площадках

Площадка 1. Радиоизлучение звезд в окрестности zet Cyg

При предложенной в NVSS обзоре [4] привязке координат радио-оптика, на исследуемой площадке, представленной на рис. 1, ни один радиоисточник не отождествился с оптическим объектом [5]. Используя разработанный нами метод привязки ЛКЛ [1], у нас отождествилось с радиообъектами 8 звезд из 9 звезд. Переменная звезда zet Cyg (№ 6) отождествилась с сильным переменным радиоисточником [9], который числится в ICRF2 каталоге [10] как квазар ICRFJ211529.4+293338. Вероятность случайного совпадения яркой звезды **zet Cyg** (1^m) с сильным радиоисточником и еще 7-ми ярких звезд с радиоисточниками очень мала и составляет менее $10^{-6}\%$.

В таблице 1 представлены координаты 8 радиообъектов (столб. 2, 3) [9], которые отождествились с 8 звездами. В столб. 4 представлена плотность потока радиообъектов. Привязка координат объектов радио-оптика выполнялась по методике привязки ЛКЛ [1]. Координаты радиообъектов, исправленные за привязку к звездам, представлены в табл. 1 (столб. 5, 6), в столб. 7, 8 указано имя звезды, с которой выполнено отождествление и звездная величина по данным [11]. Обнаруженная радиорефракция (τ) в межзвездной среде на исследуемом участке неба между близкими и далекими звездами составила по прямому восхождению $\tau(RA) = 8$ с и по склонению $\tau(DEC) = 24''$.

Таблица 1.

№	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	P (Ян)	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	Имя звезды	Mag m
1	2	3	4	5	6	7	8
1	21 13 26.46	+29 56 15.9	0.0048	21 10 54.0	+30 34 55.5	HD201779	8.662
2	21 14 26.62	+29 05 38.7	0.0129	21 11 46.2	+29 43 54.4	BD+29 4342B	9.559
3	21 14 29.12	+29 04 24.5	0.0249	21 11 48.7	+29 42 40.2	HD201912	6.844
4	21 14 39.21	+29 07 22.8	0.1666	21 11 58.8	+29 45 38.5	-	14.2
5	21 15 11.97	+29 56 20.7	0.0104	21 12 39.6	+30 35 00.3	BD+20 4347	7.814
6	21 15 29.40	+29 33 38.5	0.7	21 12 57.0	+30 13 18.0	zet Cyg	1.0-4.0
7	21 15 46.83	+29 23 01.1	0.0080	21 13 06.4	+30 01 16.8	BD+29 4349	8.296
8	21 16 41.91	+29 15 44.2	0.1123	21 14 09.5	+29 54 23.8	HR8126	6.089
9	нет	в радио		21 14 24.2	+30 06 59.9	BD+29 4356	8.018

Площадка 2. Радиоизлучение звезд в окрестности звезд HR2956 и HR2988

При предложенной в NVSS обзор [4] привязке координат радио-оптика ни один радиоисточник не отождествился с оптическим объектом на исследуемой площадке неба, представленной на рис. 2 [5].

Нами выполнены оптические отождествления радиоисточников со звездами, расположенными на площадке размером в один квадратный градус между звездами HR2956 и HR2988. Десять радиоисточников сильнее 0,0068 Ян [9] отождествились с десятью звездами ярче 9^m [11].

В таблице 2 представлены координаты 10 радиообъектов (столб. 2, 3) [9], которые отождествились с 10 звездами. В столб. 4 представлена плотность потока радиообъектов. Привязка координат объектов радио-оптика выполнялась по методике привязки ЛКЛ [1]. Исправленные координаты радиообъектов после привязки к звездам представлены в табл. 2 (столб. 5, 6), в столб. 7, 8 указано имя звезды и звездная величина, с которой выполнено отождествление по данным [11].

Исследуемая площадка расположена вблизи плоскости Галактики в области с обилием газа и пыли, что обеспечивает радиорефракцию (τ) в межзвездной среде, которая на исследуемом участке составила по прямому восхождению $\tau(\text{RA}) \sim 9$ s и по склонению $\tau(\text{DEC}) \sim 23''$ для звезд ярче 9^m.

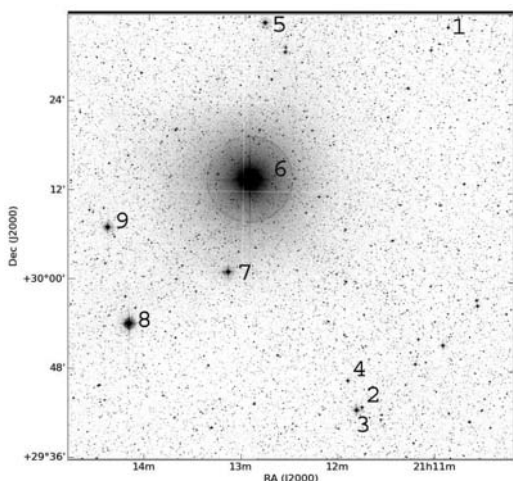


Рис 1.

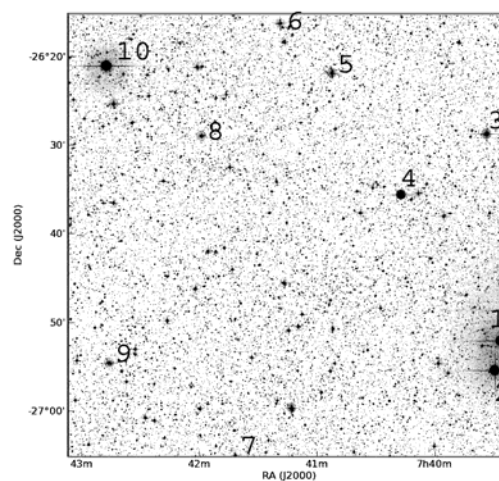


Рис 2.

Таблица 2.

№	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	P (Ян)	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	Имя звезды	Mag m
1	2	3	4	5	6	7	8
1	07 42 42.330	-26 28 41.30	0.0321	07 39 26.33	-26 51 25.1	HR2956	6.492
2	07 42 45.170	-26 33 13.60	0.032	07 39 29.2	-26 55 57.4	HD61687	6.769
3	07 43 08.190	-26 07 52.70	0.0312	07 39 38.31	-26 30 13.5	HD61686	8.130
4	07 43 46.740	-26 12 32.90	0.0211	07 40 16.87	-26 34 53.7	HD61874	7.588
5	07 44 23.720	-26 00 00.20	0.0106	07 40 53.85	-26 22 21.2	HD61986	8.302
6	07 44 43.960	-25 53 19.00	0.0068	07 41 14.09	-26 15 39.8	HD62106	8.655
7	07 45 15.050	-26 50 35.80	0.0192	07 41 46.18	-27 12 56.6	HD62191	8.073
8	07 45 29.470	-26 06 14.30	0.0094	07 41 59.6	-26 28 35.1	HD62224	8.746
9	07 45 58.740	-26 31 34.80	0.1108	07 42 42.74	-26 54 18.6	HD62395	8.858
10	07 46 09.050	-25 58 09.00	0.2079	07 42 53.,1	-26 20 52.9	HR2988	5.749

Площадка 3. Радиоизлучение звезд в окрестности звезды HD114149

На исследуемой площадке, согласно привязке используемой в NVSS обзоре [4], ни один радиисточник не отождествился с оптическим объектом в том числе и яркая галактика NGC4993 (№5, 9^m) [5], которая, по общепринятой в настоящее время идеологии, должна была бы радиоизлучать [10]. Нами выполнены оптические отождествления радиисточников с группой звезд в окрестности звезды HD114149 (№ 2, рис. 3). В таблице 3 представлены координаты 9 радиообъектов (столб. 2, 3) [9], которые отождествились с 8 звездами и одним объектом с диффузным изображением (NGC4993, № 5, 9^m) [11]. В столб. 4 представлена плотность потока радиообъектов [9]. В столбце № 5 (таблица 3) указан спектральный индекс для радиисточников, имеющих измеряемые плотности потоков на других частотах [9]. В столбцах №6 и 7 приведены координаты радиисточников, исправленные за поправки по привязке координат радиообъектов к оптическим объектам на данном участке неба. Имя объекта, с которым выполнено отождествление [11] и звездная величина его в оптическом диапазоне волн, представлены в табл. 3 (столб. 8, 9).

По изображению звезд и по радиоизотопам обзора [4] видно, что в окрестности исследуемой области много газа и пыли, что обеспечивает радиорефракцию (τ) в межзвездной среде, которая на исследуемом участке составила по прямому восхождению $\tau(\text{RA}) \sim 10 \text{ s} - 26 \text{ s}$ и по склонению $\tau(\text{DEC}) \sim 3' 26''$ для звезд ярче 9^m.

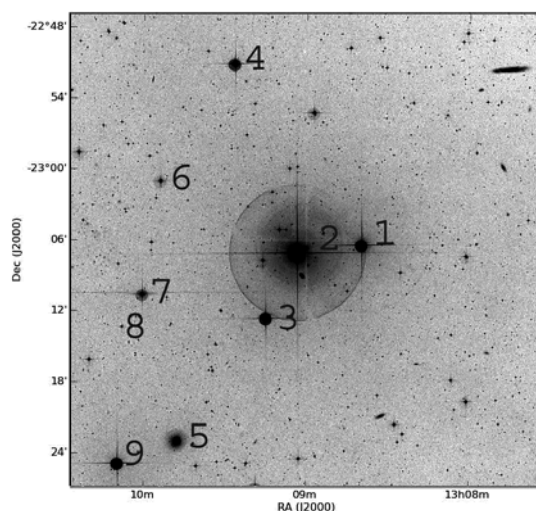


Рис 3.

Таблица 3.

№	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	P (Ян)	α	RA(J) h m s	DEC(J) ° ' "	Имя звезды	Mag m
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	13 10 54.09	-22 32 32.	0.0905	0.7	13 08 41.9	-23 06 40.0	HD114098	6.800
2	13 11 12.39	-22 33 08.0	0.0236	0.98	13 09 00.1	-23 07 16.0	HD114149	4.66
3	13 12 14.9	-22 45 34.9	0.0089	0.92	13 09 18.5	-23 12 49.8	HD114180	5.477
4	13 11 39.29	-22 16 41.5	5.2	0.81	13 09 27.0	-22 50 49.5	HD114205	7.810
5	13 12 10.74	-22 52 27.2	0.0153	-	13 09 48.1	-23 23 12.4	NGC4993	9.2
6	13 12 13.4	-22 29 19.6	0.1291	0.96	13 09 40.8	-23 00 04.8	TYC6699-112-1	9.961
7	13 12 53.5	-22 42 50.4	0.0051	-	13 09 57.1	-23 10 05.3	HD114303	9.005
8	13 13 04.59	-22 46 24.5	0.0106	-	13 10 08.2	-23 13 39.4	---	12.84
9	13 12 34.89	-22 54 34.9	0.0029	-	13 10 12.2	-23 24 20.1	HD114312	7.948

4. Заключение

Отождествление объектов радио-оптика по координатному совпадению оказалось невозможным из-за неправильной привязки большей части площадок наблюдаемых в радиодиапазоне к оптическому небу. Разработанный нами метод привязки радиообъектов к оптическим небесным объектам позволил определить поправки привязки к координатам объектов в радиодиапазоне, которые оказались значительными. Обнаружено, что 85% радиообъектов отождествляются со звездами. Обнаружено, что система координат радиообъектов, отождествленных со звездами, отличается от системы координат радиоисточников, которые отождествляются с диффузными объектами и более далекими звездами.

При используемой в NVSS обзор привязке радиообъектов к оптическим объектам, на уже опубликованных 11 площадках ни один радиоисточник не отождествился с оптическими объектами, в том числе и яркая галактика NGC4993.

На трех площадках, рассмотренных в настоящей работе, с оптическими небесными объектами отождествилось 26 ярких звезд и один объект с диффузным изображением (NGC4993).

Мы считаем необходимым обратить внимание ученых, прежде всего, астрометристов, астрофизиков, оптиков и радиоастрономов на методику правильной привязки объектов радио-оптика и подключиться к методу правильных отождествлений небесных радиообъектов к объектам, видимым в оптическом диапазоне длин волн. Это позволит изучить характеристики небесных объектов в широком диапазоне длин волн, исследовать эволюцию звезд, узнать все о межзвездной и межгалактической средах, где эти объекты расположены, и ответить еще на ряд очень важных вопросов.

Литература

1. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Патент на изобретение №2010107938/28(011185) «Способ привязки координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат. ЛКЛ (англ LKL)», ФИПС, 2011.
2. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Радиоизлучение скопления галактик A1716 и группы звезд // *Астрофизика*, т. 56, в. 2, с. 241, 2013.
3. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Оптические отождествления радиоисточников в окрестности объекта ICRF J002914.2+345632.0 // *Геодезия и картография*, № 2, с. 11, 2012.
4. *Condon J.J., Cotton W. D., et al.* The NRAO VLA sky survey // *The Astronomical Journal*, 115, p. 1693–1716, 1998.
5. .DSS, <http://cadwww.dao.nrc.ca/cadcbin/getdss/>
6. *Bennett A.S.* The revised 3C catalogue of radio sources // *Mem. Roy. Astron. Soc.* 68, p. 163, 1962.
7. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Метод привязки координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат // *Геодезия и картография*, № 12, с. 6, 2010.
8. *Липовка А.А., Липовка Н.М.* Проблемы привязки радионеба к оптическому небу. История и перспективы // *Геодезия и картография*, № 10, с. 2, 2013.
9. *Верходанов О.В. и др.* (<http://www.sao.ru/cats/>)
10. ICRF2, <http://rorf.usno.navy.mil/>
11. UCAC, vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VisieR-2

RADIO-EMISSION OF STARS 1^m – 12^m

Lipovka A.A.¹, Lipovka N.M.

¹Center for physical research, Sonora State University, Hermosillo, Mexico.

On the basis of developed and patented method of coordinates binding of the celestial radio objects to the coordinates of the optical objects (LKL), the shift of the radio coordinates of objects in respect to the position of the optical objects is found. This shift could be explained by incorrect binding coordinates of celestial objects at radio frequencies. Correct binding of the object's coordinates in radio and optics leads to the fact that most of the stars are radio-emitting and the bright stars are identified with the strong radio sources. Radio refraction in the interstellar medium is detected.

ВЛИЯНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЯЗИ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИО СИСТЕМ ОТСЧЕТА

Малкин З.М.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Через несколько лет ожидается появление высокоточной оптической системы отсчета GCRF (Gaia Celestial Reference Frame). К этому же времени ожидается выход новой версии радио системы ICRF (International Celestial Reference Frame). Привязка GCRF к ICRS будет производиться путем определения их взаимной ориентации по внегалактическим радиоисточникам, наблюдаемым как в радио (РСДБ), так и в оптике (Gaia). Такая привязка должна производиться на микросекундном уровне точности с применением наиболее точных алгоритмов астрометрических редукиций. Одной из таких редукиций, пока не вошедших в практику регулярной обработки наблюдений, является галактическая абберрация в собственных движениях. В работе исследуется ее влияние на определение взаимной ориентации ICRF и GCRF. Предварительная оценка этого влияния показала, что оно находится на уровне 1 мксд.

Введение

К концу текущего – началу следующего десятилетия ожидается появление высокоточной оптической системы отсчета нового поколения GCRF (Gaia Celestial Reference Frame). К этому же времени ожидается выход новой версии радио системы ICRF-3 (International Celestial Reference Frame) [1]. Точность положения объектов в обеих системах отсчета должна быть на уровне первых десятков микросекунд дуги. При этом ICRF является официально признанной МАС реализацией системы небесных координат ICRS (International Celestial Reference System). Поэтому привязка GCRF к ICRS будет производиться путем ее привязки (фактически определения взаимной ориентации) к ICRF по внегалактическим радиоисточникам, наблюдаемым как в радио (РСДБ), так и в оптике (Gaia). Такая привязка должна производиться на микросекундном уровне точности, что, в частности, предполагает применение наиболее точных алгоритмов астрометрических редукиций. Одной из таких редукиций, пока не вошедших в практику регулярной обработки наблюдений, является галактическая абберрация в собственных движениях (ГА). В работе исследуется ее влияние на определение взаимной ориентации ICRF и GCRF.

Влияния ГА на углы ориентации между ICRF и GCRF

Для оценки влияния ГА на результаты определения взаимной ориентации ICRF и GCRF был проделан следующий численный эксперимент. Сначала из каталога ICRF2 были выбраны радиоисточники типа АЯГ с оптической яркостью не слабее 18^m . В качестве источника фотометрических данных использовался каталог OCARS [2]. Всего было выбрано 688 источников. Распределение источников по небу показано на Рис. 1.

Далее, можно предположить, что для связи ICRF с GCRF будет целесообразно выбрать эпоху $t_0 = 2017.0$, как ожидаемую среднюю эпоху каталога GCRF, предполагая 5-летний срок наблюдений по основной научной программе с началом в июле 2014 г. Каталог GCRF будет приведен к эпохе t_0 путем обычной астрометрической редукиции с учетом собственных движений, определенных из наблюдений миссии Gaia. Приведение описанной выше выборки из каталога ICRF2 к эпохе 2017.0 производилось по формулам:

$$\begin{aligned}\alpha(t_0) &= \alpha(t_i) - \mu_\alpha(t_i - t_0), \\ \delta(t_0) &= \delta(t_i) - \mu_\delta(t_i - t_0),\end{aligned}$$

где t_i – средняя эпоха наблюдений i -го источника, $\alpha(t_i)$ и $\delta(t_i)$ – координаты источника в ICRF2, μ_α и μ_δ – компоненты собственного движения i -го источника, обусловленные влиянием ГА, вычисленные по алгоритму, описанному в [3].

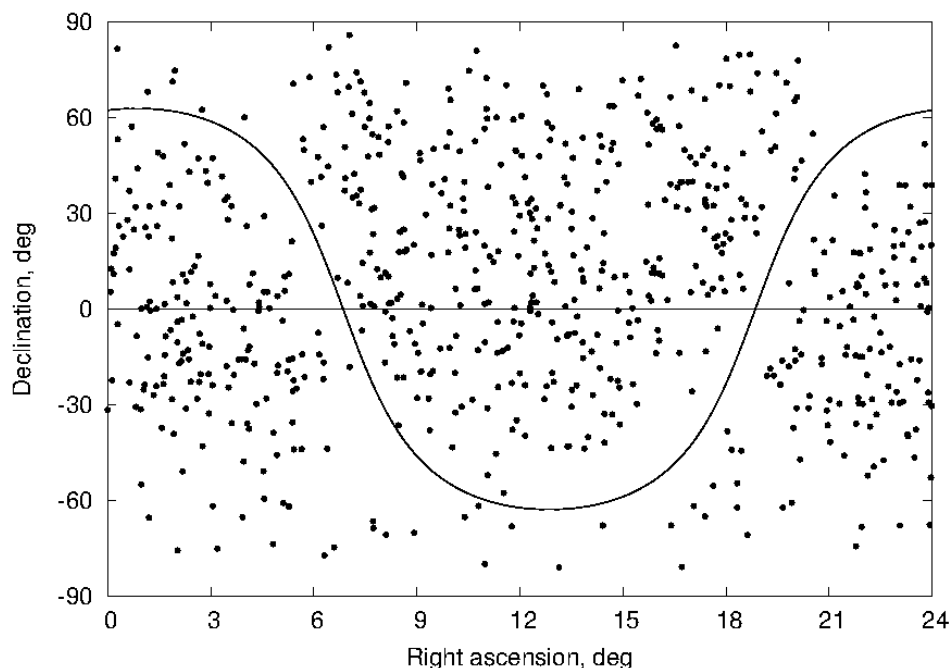


Рис. 1. Распределение ярких источников ICRF по небесной сфере.

Таким образом, были получены два каталога (две системы отсчета). Первый представляет собой выборку из ICRF2, в котором координаты источников считаются независимыми от времени. Именно такой каталог пока предполагается использовать для связи с GCRF. Второй каталог вычислен с учетом изменения видимых координат источников из-за влияния ГА. Взаимная ориентация между двумя этими системами отсчета определяется тремя углами поворота A_1 , A_2 , и A_3 в соответствии с классическими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= A_1 \cos \alpha \tan \delta + A_2 \sin \alpha \tan \delta - A_3, \\ \Delta\delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha. \end{aligned}$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1. Величина этих углов представляет собой разницу в углах ориентации ICRF–GCRF в зависимости от учета или неучета ГА.

Таблица 1. Углы ориентации между исходным каталогом и каталогом, приведенным к эпохе 2017.0 за влияние ГА, мксд.

A_1	A_2	A_3
1.32 ± 0.50	-0.06 ± 0.49	0.28 ± 0.42

Заключение

В результате проделанного эксперимента было получено практически пренебрежимое влияние ГА на углы ориентации между радио и оптической системами координат. Однако надо иметь в виду, что проведенный численный эксперимент может быть достаточно далек от реальности, поскольку заранее трудно предугадать, по какому именно набору объектов будет определяться связь ICRF–GCRF и насколько равномерно они будут распределены по небу. Представляется полезным повторить такую оценку позднее с (более) реальным набором источников. Разумеется, оптимальным решением будет введение в практику редукции РСДБ-наблюдений учета ГА, например, по методике, предложенной в [3]. Проблема, однако, заключается в том, что для сохранения однородности и совместимости результатов, получаемых в разных центрах необходимо начать учет ГА одновременно во всех центрах.

Литература

1. *Jacobs, C.S., Arias, F., Boboltz, D., Boehm, J., Bolotin, S., Bourda, G., Charlot, P., de Witt, A., Fey, A., Gaume, R., Gordon, D., Heinkelmann, R., Lambert, S., Ma, C., Malkin, Z., Nothnagel, A., Seitz, M., Skurikhina, E., Souchay, J., Titov, O.* ICRF-3: Roadmap to the Next Generation ICRF. In: Proc. Journées 2013 Systèmes de Référence Spatio-temporels, Paris, France, 16–18 Sep 2013, Ed. N. Capitaine, Paris, 2014, 51–56.
2. *Малкин З.М.* Новая версия каталога оптических характеристик астрометрических радиосточников OCARS. В этом выпуске.
3. *Malkin Z.* On the implications of the Galactic aberration in proper motions for the Celestial Reference Frame // MNRAS, 2014, 445(1), 845–849.

IMPACT OF GALACTIC ABERRATION ON THE LINK BETWEEN OPTICAL AND RADIO FRAMES

Malkin Z.M.^{1,2}

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

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

A new highly-accurate optical reference frame GCRF (Gaia Celestial Reference Frame) is expected to be available in several years. About by the same time, a new version of radio reference frame ICRF (International Celestial Reference Frame) should be also published. The link GCRF to ICRS will be defined by means of computation of the orientation angles between the two frames using the common extragalactic objects observed in both radio (VLBI) and optics (Gaia). Taking into account the expected accuracy of ICRF and GCRF at a level of the first tens microarcseconds, the link between them should be defined at a microarcsecond level, which requires using the most accurate algorithms and models. One of such models is the Galactic aberration in proper motions, which is not included in the data processing yet. In this paper its impact on the ICRF-Gaia link is estimated. Preliminary results showed that this impact is at a level of about 1 microarcsecond.

НОВАЯ ВЕРСИЯ КАТАЛОГА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ OCARS

Малкин З.М.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлена новая версия каталога оптических характеристик астрометрических радиоисточников OCARS. Каталог включает радиоисточники, наблюдавшиеся в астрометрических и геодезических РСДБ-программах 1979–2015 гг., их красные смещения, а также оптические и инфракрасные величины. Каталог непрерывно развивается в отношении включения новых источников (число источников почти удвоилось) и добавления новых оптических данных. Основными источниками информации служат базы данных NED и SIMBAD. Кроме того регулярно отслеживаются публикации в основных астрономических журналах и arXiv. На август 2015 г. каталог содержит 9392 источника, из которых для 5166 известно красное смещение и для 7135 оптическая или инфракрасная величина. Если в старых версиях каталога OCARS приводилась только одна оптическая величина в оптическом или инфракрасном диапазоне, в новой версии приводятся величины в тринадцати диапазонах от и до K, принятых в SIMBAD.

Каталог OCARS

Каталог OCARS (Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources) был первоначально создан для дополнения основного каталога ICRF2 [1]. Каталог включает радиоисточники, наблюдавшиеся в астрометрических и геодезических РСДБ-программах в 1979–2015 гг., для которых приводятся, когда доступны, тип объекта, красное смещение (z) и звездные величины в визуальной и ближней инфракрасной области спектра. С момента выхода первой версии OCARS в декабре 2007 г. [2] каталог непрерывно развивается за счет увеличения числа источников, а также добавления новых и уточнения имеющихся наблюдательных данных. Последние описания каталога относятся к 2009 и 2012 гг. [3,4]. В настоящей работе описано текущее состояние каталога OCARS.

Сначала оптические характеристики брались преимущественно из базы NED, которая содержит большое число данных с детальным описанием и комментариями. В настоящее время для обновления OCARS дополнительно активно используется база SIMBAD. Последняя содержит меньше внегалактических объектов, но данные по ним появляются более оперативно. Кроме того, с 2011 г. регулярно отслеживаются публикации в основных астрономических журналах и arXiv, и все новейшие данные сразу вводятся в OCARS. Но данные NED по-прежнему рассматриваются как основные и используются, когда становятся доступными.

Красные смещения для части источников получены из специальных программ оптических спектральных наблюдений. Первые наблюдения на БТА были организованы в Пулковской обсерватории [5]. По разным причинам эта программа оказалась неэффективной. За три года удалось отнаблюдать только около 10 источников. Намного более плодотворными оказались наблюдения на зарубежных телескопах, организованные О.А. Титовым [6, 7]. Из этих наблюдений были определены красные смещения для более чем 200 радиоисточников. Особенно ценно, что большая их часть расположена в южном полушарии, где процент радиоисточников с известными оптическими характеристиками намного меньше, чем в северном полушарии (см. табл. 1).

Таблица 1. Статистика каталога OCARS. В последней колонке дано отношение текущей статистики к версиям 2009 и 2012 гг. [3, 4].

Текущее состояние (сентябрь 2015 г.)		2015/2009	2015/2012
Все источники			
Общее число источников	9392	2.2	1.3
N	5458 (58.1%)		
S	3934 (41.9%)		
Число источников с известным типом	5523 (58.8%)	2.2	1.2
АЯГ	4154 (75.2%)		
radio galaxies	1369 (24.8%)		
Число источников с известным z	5166 (55.0%)	2.8	1.3
N	3367 (65.2%)		
S	1799 (34.8%)		
Число источников с известной величиной	7135 (76.0%)	2.9	1.5
N	4330 (60.7%)		
S	2805 (39.3%)		
Источники ICRF2			
Общее число источников	3414		
N	2031 (59.5%)		
S	1383 (40.5%)		
Число источников с известным типом	2488 (72.9%)		
АЯГ	2249 (90.4%)		
radio galaxies	239 (9.6%)		
Число источников с известным z	2383 (69.8%)		
N	1481 (62.1%)		
S	902 (37.9%)		
Число источников с известной величиной	3048 (89.3%)		
N	1814 (59.5%)		
S	1234 (40.5%)		
Определяющие источники ICRF2			
Общее число источников	295		
N	162 (54.9%)		
S	133 (45.1%)		
Число источников с известным типом	278 (94.2%)		
АЯГ	273 (98.2%)		
radio galaxies	5 (1.8%)		
Число источников с известным z	262 (88.8%)		
N	149 (56.9%)		
S	113 (43.1%)		
Число источников с известной величиной	287 (97.3%)		
N	157 (54.7%)		
S	130 (45.3%)		

Кроме спектральных наблюдений для определения красных смещений, в 2015 г. совместно ГАО РАН и Парижской обсерваторией начата специальная фотометрическая программа (руководитель – F. Tatis, Парижская обсерватория).

При создании OCARS основной задачей было определение и коррекция ошибочных красных смещений астрометрических радиоисточников, включенных в состав дополнительных данных каталога ICRF. Звездные величины первоначально рассматривались как второстепенные для полноты информации и планирования спектральных наблюдений. В дальнейшем полноте данных о визуальных или инфракрасных величинах в каталоге OCARS стало уделяться больше внимания. Если в старых версиях каталога OCARS приводилась только одна оптическая величина в оптическом или инфракрасном диапазоне, в новой версии приводятся величины в тринадцати диапазонах от *u* до *K*, принятых в SIMBAD. Эти детальнее фотометрические данные приводятся в отдельном файле. Эта информация, в частности, нужна для связи радио-системы ICRF с оптической системой Gaia (GCRF).

Еще одной задачей, для решения которой может быть полезен каталог OCARS, является установление взаимного соответствия объектов в разных каталогах астрометрических и астрофизических каталогах. В рамках развития этой функции в августе 2015 г. в состав OCARS был включен третий файл с таблицей взаимного соответствия имен объектов в разных каталогах. В начальной версии этого файла приводится соответствие имен источников в каталогах OCARS, ICRF2 и LQAC2. Последний каталог [9] содержит разнообразную информацию о 1876504 квазарах и является одним из наиболее часто используемых каталогов для планирования и анализа РСДБ-наблюдений.

Список объектов, включенных в OCARS, формируется, в основном, из следующих астрометрических и геодезических РСДБ-программ и каталогов:

- источники, вошедшие во вторую реализацию международной небесной системы координат ICRF2, <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/icrf2/icrf2.html>;
- другие источники, наблюдавшиеся в рамках IVS, <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>;
- источники из каталога РСДБ-группы Центра космических полетов им. Годдарда (НАСА), <http://gemini.gsfc.nasa.gov/solutions/astro/>;
- источники из каталога RFC Л. Петрова, <http://astrogeo.org/>.

Общая статистика текущей версии каталога приведена в табл. 1. Около 30% источников в OCARS не имеют информации о физических характеристиках. Тем не менее, их присутствие важно, поскольку они используются для оптического отождествления, а также для поиска их характеристик в базах данных и литературе или планирования оптических спектроскопических наблюдений.

Заключение

Знание физических характеристик как можно большего числа радиоисточников играет важную роль при решении ряда астрономических задач. Кроме того, сочетание высокой точности позиционных наблюдений радиоисточников методом РСДБ с известными красными смещениями позволяет построить трехмерную картину вселенной. Одними из основных принципами работы над каталогом является непрерывное обновление с учетом новых наблюдательных данных и оперативная публикация через Интернет. В среднем, обновление происходит раз в несколько недель. Самые массовые обновления связаны с появлением радиоисточников в результате новых программ РСДБ-наблюдений и обновлением баз данных NED и SIMBAD, которые являются основным источником данных для OCARS. Последняя версия каталога всегда доступна по адресу http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/ocars.txt. Для заинтересованных пользователей организовано извещение об обновлениях по e-mail.

Литература

1. *Fey A.L., D. Gordon, C.S. Jacobs, et al.* The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.*, 2015, V. 150(2), 58.
2. *Malkin Z., Titov O.* Optical characteristics of astrometric radio sources. In: Proc. Fifth IVS General Meeting, A. Finkelstein, D. Behrend (eds.), St. Petersburg, 2008, 183–187.
3. *Titov O., Malkin Z.* Effect of asymmetry of the radio source distribution on the apparent proper motion kinematic analysis // *Astron. Astrophys.*, 2009, v. 506(3), 1477–1485.
4. *Малкин З.М.* Каталог оптических характеристик астрометрических радиосточников OCARS. Тр. Всероссийской астрометрической конф. "Пулково-2012", Изв. ГАО, 2013, № 220, 507–510.
5. *Масленников К.Л., Болдычева А.В., Малкин З.М., Титов О.А.* Определение красных смещений избранных объектов программы IVS. I. // *Астрофизика*, 2010, т. 53(2), 173–180.
6. *Titov O., Jauncey D., Johnston H., et al.* Optical spectra of candidate southern hemisphere International Celestial Reference Frame (ICRF) radio sources // *AJ*, 2011, V. 142(5), 165.
7. *Titov O., Stanford L., Johnston H., et al.* Optical spectra of candidate International Celestial Reference Frame (ICRF) flat-spectrum radio sources // *AJ*, 2013, V. 146(1), 10.
8. *Jacobs, C.S., Arias, F., Boboltz, D., et al.* ICRF-3: Roadmap to the Next Generation ICRF. In: Proc. Journées 2013, N. Capitaine (ed.), Paris, 2014, 51–56.
9. *Souchay J., Andrei A.H., Barache C., et al.* The second release of the Large Quasar Astrometric Catalogue (LQAC-2) // *A&A*, 2012, V. 537, A99.

OPTICAL CHARACTERISTICS OF ASTROMETRIC RADIO SOURCES OCARS

Malkin Z.M.^{1,2}

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

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

In this paper, the current status of the catalog of Optical Characteristics of Astrometric Radio Sources OCARS is presented. The catalog includes radio sources observed in various astrometric and geodetic VLBI programs in 1979–2015. For these sources the physical object type, redshift and visual or infrared magnitude are given when available. Detailed comments are provided when necessary. Since the first version created in December 2007, the catalog is continuously developed and expanded in respect to inclusion of new radio sources and addition of new or correction of old astrophysical data. Various sources of information are used for OCARS. The main of them are the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) and SIMBAD astronomical databases. Besides several astronomical journals and arXiv depository are regularly monitored, so that new data is included in OCARS just after publication. As of September 2015, OCARS catalog includes 9392 radio sources. 5166 sources have known redshift, and 7135 sources have known magnitude.

СВЯЗЬ РАДИО И ОПТИЧЕСКОЙ НЕБЕСНЫХ СИСТЕМ ОТСЧЕТА

Малкин З.М.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается современное состояние проблемы связи радио и оптической систем отсчета. Основной целью ведущихся в этом направлении исследований на ближайшие годы является подготовка к детальному сравнению и определению взаимной ориентации оптической небесной системы отсчета GCRF (Gaia Celestial Reference Frame) по наблюдениям космического аппарата Gaia и системы отсчета ICRF3, получаемой из РСДБ-наблюдений. Обе системы отсчета должны в идеале служить реализациями единой небесной системы координат ICRS (International Celestial Reference System) на микросекундном уровне точности. Поэтому стоит вопрос о согласовании систем ICRF и GCRF на том же уровне точности, что является нетривиальной задачей по причине относительно больших случайных и систематических расхождений координат небесных объектов в различных диапазонах длин волн. Эти расхождения обусловлены как ошибками, присущими разным методам наблюдений и их обработки, так и физическими особенностями строения и механизмов излучения наблюдаемых небесных объектов. В работе дается обзор последних работ по связи ICRF и GCRF.

Введение

К концу текущего – началу следующего десятилетия ожидается появление оптической небесной системы отсчета нового поколения по наблюдениям космического аппарата Gaia в 2014–2019 гг. В результате этой миссии будет создан каталог GCRF (Gaia Celestial Reference Frame) положений звезд и внегалактических объектов, внутренне согласованный на микросекундном уровне точности. К этому же времени запланирован выход новой версии небесной системы отсчета ICRF (International Celestial Reference Frame) близкой точности, создаваемой на основе обработки РСДБ-наблюдений с 1979 г. Обе системы отсчета в радио (ICRF) и оптическом (GCRF) диапазонах волн должны в идеале служить реализациями единой небесной системы координат ICRS (International Celestial Reference System) на микросекундном уровне точности. Поэтому стоит вопрос о согласовании систем ICRF и GCRF по общим объектам, в первую очередь по радио- и оптически-ярким активным ядрам галактик (АЯГ). Однако согласование этих двух систем с такой точностью является нетривиальной задачей по причине сравнительно больших случайных и систематических расхождений координат небесных объектов в различных диапазонах длин волн. Расхождения в координатах в радио и оптических обусловлены как ошибками, присущими разным методам наблюдений и их обработки, так и физическими особенностями строения и механизмов излучения АЯГ. В последующих разделах кратко рассматриваются различные направления работ по связи радио и оптической систем отсчета.

Радио система небесных координат ICRF-3

Система небесных координат ICRF-3 является следующим поколением небесной системы координат, построенной по радиоинтерферометрическим (РСДБ) наблюдениям внегалактических радиоисточников. Она развивает текущую официальную небесную систему координат ICRF2 [1]. Детальное описание работы по созданию ICRF-3, которая координируется специальной рабочей группой МАС "Third Realization of the International Celestial Reference Frame", приводится в [2–4]. Основные ожидаемые характеристики ICRF-3 следующие:

— Около 4000 радиоисточников с ошибкой координат менее 1 мсд (от 20 мксд).

— Каталоги в разных диапазонах: X/S (2.2/8.2 ГГц, 4000+ р/и), K (24 ГГц, 500+ р/и), X/Ka (8/32 ГГц, 600+ р/и), (?) Q (43 ГГц, 300+).

— Стабильность ориентации: 10 мксд.

При этом при построении ICRF мы встречаемся с серьезными проблемами, которые ограничивают точность каталога, например:

— Структура радиоисточников, часто переменная и зависящая от длины волны, включая несовпадение центроидов радиояркости на разных длинах волн (core-shift effect, составляющий до 100 мксд).

— Атмосферные ошибки (тропосфера, ионосфера).

— Нелинейное движение наблюдательных станций.

— Систематические разности между каталогами в разных радиодиапазонах.

— Зависимость положений радиоисточников со временем, которой в настоящее время пренебрегают ввиду низкой точности определения индивидуальных движений радиоисточников; однако эти движения содержат заметную систематическую часть, обусловленную галактической абберацией, которую можно учесть [5].

Оптическая система небесных координат GCRF

Система координат GCRF будет построена по наблюдениям космического аппарата Gaia. Основные параметры этой программы следующие [6–8]:

— Запущен 19.12.2013

— Старт научной программы 18.07.2014.

— Программа рассчитана на 5 лет, возможно продление.

— Планируется $225 \cdot 10^9$ астрометрических наблюдений объектов со звездной величиной $2^m < G < 20.7^m$

— Определение координат для $\sim 10^9$ объектов, в т.ч. ~ 500 тысяч квазаров (АЯГ).

— Ожидаемая точность координат точечных объектов: 8 мксд для $m = 13$, 100 мксд для $m = 18$, и 470 мксд для $m = 20$.

К сожалению, в результатах Gaia также ожидаются проблемы, ограничивающие точность их связи с ICRF, например:

— структура оптических изображений квазаров (host galaxy) и радиогалактик;

— точность определения координат ярких галактик ($m < \sim 16$), составляющих значительную долю объектов ICRF намного хуже, чем для точечных объектов.

Связь радио (ICRF) и оптической (GCRF) систем координат

Каталог GCRF, обладающий высокой внутренней точностью, должен быть привязан к ICRS через ICRF. При этом необходимо решить две основные задачи:

1. Определение ориентации ICRF-GCRF на начальную эпоху, например J2000.0 или среднюю эпоху наблюдений Gaia.

2. Определение взаимного вращения ICRF-GCRF.

Для каталога HCRF (HIPPARCOS), создатели которого решали такую же задачу, авторы оценили точность определения ориентации как 0.6 мсд на эпоху 1991.25 и ошибку взаимного вращения как 0.25 мсд/год [9].

Стоит задача улучшить эти точности в несколько раз (цель – на порядок) для связи ICRF-GCRF. При этом надо иметь в виду следующие обстоятельства. Связь радио и оптической систем координат производится по общим объектам. Чем больше число этих объектов, тем, вообще говоря, выше точность привязки GCRF к ICRF. При этом ожидается, что каталог Gaia будет содержать высокоточные положения 400–500 тысяч внегалактических объектов, в то время как число радиоисточников в ICRF на два порядка меньше, они неравномерно распределены по небу, и точность положений в каталоге ICRF весьма неоднородна. Поэтому радиоинтерферометрическим сообществом

проводится работа по отождествлению новых перспективных объектов для связи GCRF-ICRF. Такие объекты должны иметь достаточную яркость в радио и оптике, а также иметь компактную и симметричную структуру.

Таким образом, основные направления этой работы следующие:

1. Позиционные оптические наблюдения радиисточников ICRF (в частности, служат важным материалом для изучения систематических ошибок в разностях координат одних и тех же объектов в радио и оптике).
2. Фотометрические оптические наблюдения радиисточников ICRF (в частности, служат для отбора общих источников ICRF-GCRF).
3. Усиленные РСДБ-наблюдения избранных радиисточников.
4. Создание банков данных оптических и радио изображений.

Ожидаемое число оптически ярких астрометрических радиисточников может быть оценено по данным каталога ICRF2 [1] (рис. 1). На рисунке выделена звездная величина 18, которая принята граничной в текущей программе отбора [10].

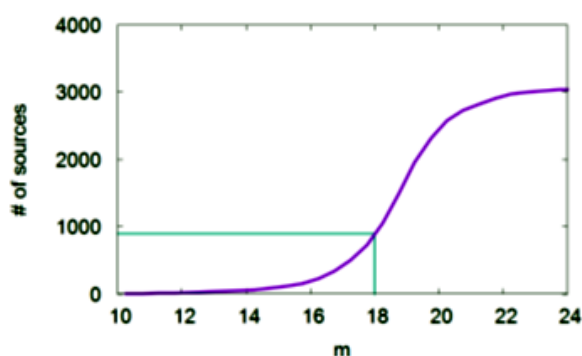


Рис. 1. Распределение источников ICRF2 по оптической звездной величине.

Общее число астрометрических радиисточников в несколько раз больше, чем содержится в ICRF (Л. Петров, каталог RFC, <http://astrogeo.org/rfc/>), и также в несколько раз больше число оптически ярких радиисточников [11]. Но применение дополнительных критериев, таких как компактность структуры, снижает выбор также в несколько раз [10]. В целом, можно ожидать в ближайшие годы несколько сотен новых перспективных радиисточников для связи радио и оптической систем координат.

Оптические наблюдения объектов ICRF

Основные работы по определению точных оптических координат объектов ICRF ведутся в USNO в рамках создания больших каталогов. Так в результате нескольких наблюдательных программ 1997–2004 гг. определены оптические положения 413 объектов (АЯГ) по всему небу; исследованы ошибки и их влияние на параметры ориентации радио-оптика; сделан пессимистический вывод, что параметры связи не могут быть определены лучше 0.5 мсд без существенного увеличения числа общих объектов [12]. Новый каталог URAT1 содержит 228 млн. объектов с $R = 3-18.5$. Типичная ошибка координат в этом каталоге 10–30 мсд, ошибка собственных движений 5–7 мсд/год для 188+ млн. объектов [13]. К сожалению, этот каталог включает только объекты с $\delta > -15^\circ$.

Наиболее активные оптические фотометрические наблюдения астрометрических внегалактических объектов ведутся в рамках программы, координируемой Парижской обсерваторией [14, 15].

Вся доступная информация по оптическим характеристикам астрометрических радиисточников (красные смещения, фотометрия, взаимные отождествления между различными каталогами содержится в каталоге OCRAS [11].

Выбор и наблюдения новых радиоисточников для связи ICRF-GCRF

Эти работы в рамках IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) ведутся по программе координируемой обсерваторией Бордо [10, 16]. Цель работы: получить несколько сотен источников, равномерно распределенных по небу и пригодных для высокоточных позиционных наблюдений в радио и оптике. Основные этапы работы следующие:

1. Выбор оптически ярких радиоисточников (в т.ч. дополнительно к ICRF).
2. Тестовые РСДБ-наблюдения для определения пригодности для астрометрии; изучение структуры источников, включая специальные наблюдения и отсев объектов со сложной структурой.
3. Астрометрические РСДБ-наблюдения отобранных источников для уточнения их координат.

На сегодня отобрано ~400 источников для связи ICRF-GCRF. В работе [17] показано, что используя информацию, содержащуюся в каталоге OCARS [11] можно существенно увеличить число перспективных радиоисточников.

Проблемы связи радио-оптика

Перечислим основные проблемы связи радио и оптической систем координат.

- Не всегда однозначная идентификация объектов в ICRF и GCRF.
- Кратные радиоисточники, ВВН (binary black hole).
- Гравитационные линзы.
- Несовпадение центров излучения в радио и оптике.
- Систематика радиокаталогов; зональные ошибки.
- Вращение ICRF.

В качестве примеров систематических ошибок ICRF на рис. 2 показано изменение со временем углов ориентации между каталогами GSFC и ICRF2, а на рис. 3 приведены зональные ошибки ICRF2 также по сравнению каталогов GSFC и ICRF2.

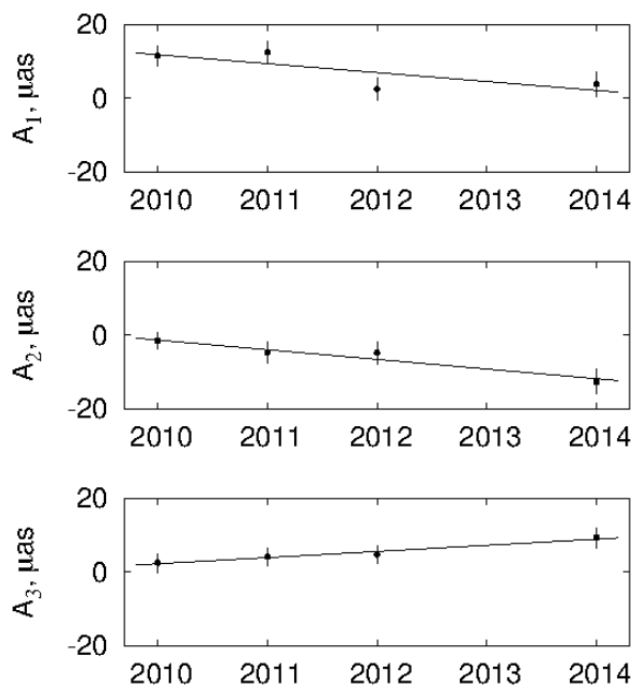


Рис. 2. Вращение каталогов GSFC относительно ICRF2. По оси абсцисс отложен год публикации каталога [5].

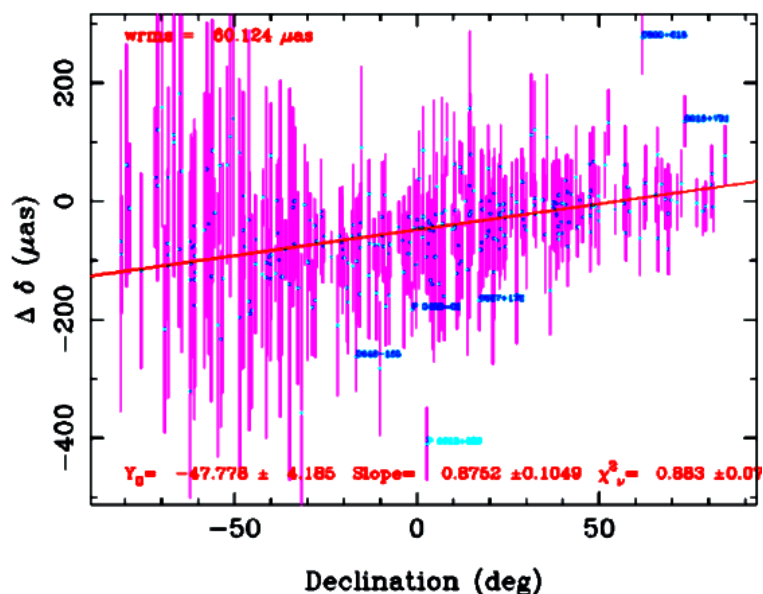


Рис. 3. Зональные ошибки ICRF2 по сравнению с последними каталогами GSFC [3].

Заключение

Сочетание различных методов связи ICRF и GCRF должно обеспечить наиболее точно их взаимную ориентацию и вращение. Принимая во внимание намного более высокую точность ожидаемых радио и оптической систем, можно надеяться достигнуть точности параметров связи ICRF-GCRF в 5–10 раз лучше, чем в случае ICRF-HIPPARCOS. Но для реализации этого потенциала необходимы большие дополнительные теоретические и наблюдательные усилия.

С точки зрения фундаментальной астрометрии нужна единая многодиапазонная ICRF, реализующая ICRS на (суб-)мсд уровне точности в оптике, радио (разные диапазоны), ИК, и т.д.

Детали различных вопросов, затронутых в этом обзоре можно найти в цитированной литературе.

Литература

1. Fey A.L., D. Gordon, C.S. Jacobs, et al. The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.*, 2015, V. 150(2), 58.
2. Jacobs, C.S., Arias, F., Boboltz, D., et al. ICRF-3: Roadmap to the Next Generation ICRF. In: *Proc. Journées 2013*, N. Capitaine (ed.), Paris, 2014, 51–56.
3. Jacobs C.S., Arias F., Bertarini A., et al. The ICRF-3: Status, Plans, and Multi-wavelength Progress on the next generation Celestial Reference Frame. Presented at the XXIX IAU General Assembly, Hawaii, USA, Aug 2015.
4. Gaume R., Arias F., Boboltz, D., et al. The IAU Division A Working Group on the Third Realization of the ICRF: Background, Goals, Plans. Presented at the XXIX IAU General Assembly, Hawaii, USA, Aug 2015.
5. Malkin Z. On the implications of the Galactic aberration in proper motions for the Celestial Reference Frame // *MNRAS*, 2014, 445(1), 845-849.
6. Prusti T. Gaia status. Presented at the GAGNES-2015 Conference, Paris, July 8–10, 2015, http://www.iap.fr/gagnes/talks/Prusti_GAGNES.pdf
7. Mignard F., Galluccio L. Observing QSOs and ICRF sources with Gaia. Presented at the GAGNES-2015 Conference, Paris, July 8-10, 2015, http://www.iap.fr/gagnes/talks/Mignard_GAGNES.pdf
8. de Bruijne, J.H.J.; Rygl, K.L.J.; Antoja, T. Gaia Astrometric Science Performance – Post-Launch Predictions // *EAS Publications Series*, Volume 67–68, 2014, pp.23–29.

9. Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M.A.C. The Hipparcos Catalogue as a realisation of the extragalactic reference system // *Astron. Astrophys.*, 1997, Vol. 323, 620–633.
10. Bourda G., Charlot P., Le Campion J.-F. Astrometric suitability of optically-bright ICRF sources for the alignment with the future Gaia celestial reference frame // *Astron. Astrophys.*, 2008, Vol. 490(1), 403–408.
11. Малкин З.М. Новая версия каталога оптических характеристик астрометрических радиосточников OCARS // Настоящий сборник.
12. Zacharias N., Zacharias M.I. Radio–optical reference frame link using the U.S. Naval Observatory astrograph and deep CCD imaging // *Astron. J.*, 2014, Vol. 147, 95.
13. Zacharias N. Astrometric Catalogs: radio-optical link. Presented at the GAGNES-2015 Conference, Paris, July 8–10, 2015, http://www.iap.fr/gagnes/talks/Zacharias_Gagnes.pdf
14. Taris F., Andrei A., Klotz A., et al. Optical monitoring of extragalactic sources for linking the ICRF and the future Gaia celestial reference frame. I. Variability of ICRF sources // *Astron. Astrophys.*, Vol. 552, A98.
15. Taris F., Damjanovic G., Andrei A., et al. Optical monitoring of QSO in the framework of the Gaia space mission. Proc. Journées 2014 "Systèmes de référence spatio-temporels", Pulkovo, 22–24 September 2014, Z. Malkin & N. Capitaine (eds.), 42–43.
16. Bourda G. Aligning VLBI and Gaia Extragalactic Celestial Reference Frames, Presented at the GAGNES-2015 Conference, Paris, July 8–10, 2015, http://www.iap.fr/gagnes/talks/Bourda_GAGNES_2015_web.pdf
17. Malkin Z. Presented at the GAGNES-2015 Conference, Paris, July 8–10, 2015, http://www.iap.fr/gagnes/talks/malkin_gagnes-2015.pdf

LINK BETWEEN RADIO AND OPTICAL CELESTIAL REFERENCE FRAMES

Malkin Z.M.^{1,2}

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

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

The current state of the link problem between radio and optical celestial reference frames is considered. The main goal of the investigations in this direction for the nearest years is a preparation to a detailed comparison and mutual orientation between optical frame GCRF (Gaia Celestial Reference Frame) expected as a result of Gaia mission and radio frame ICRF3 (International Celestial Reference Frame, 3rd generation) obtained from VLBI observations. Both systems, ideally, should be a realization of the ICRS (International Celestial Reference System) at a microarcsecond level of accuracy. Therefore, the link accuracy between ICRF and GCRF should be obtained with a similar accuracy, which is not a trivial task because of relatively large systematic errors and random errors in source positions at different frequency bands. The coordinates differences between radio and optical catalogs can be explained by both observation errors and physical properties of the structure and radiation mechanisms in different frequency bands. In this paper, a brief review of the recent works on the ICRF–GCRF link is presented.

НАБЛЮДЕНИЯ ГАЛИЛЕЕВЫХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА НА ПУЛКОВСКОМ НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ

Нарижная Н.В.

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

Приводятся результаты наблюдений Юпитера и его галилеевых спутников, выполненные на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории за период 2009–2011 гг. Полученные экваториальные координаты спутников сравниваются с 9 наиболее современными теориями движения планет и спутников. В среднем разности (О-С) по обеим координатам относительно всех выбранных теорий движения не превышают 0.08". Величины и поведение разностей (О-С) для положений спутников Ганимеда и Каллисто свидетельствуют о том, что теории их движения изучены хуже, чем у Ио и Европы. Распределение разностей (О-С) для Каллисто оказалось отличным от нормального закона.

Введение

Важнейшим направлением изучения Солнечной системы является построение теорий движения больших планет и их естественных спутников, которые используются для исследования физических параметров этих систем, а также для поддержки космических проектов. Для выполнения этих задач необходимы длительные высокоточные ряды астрометрических наблюдений. Вместе с другими российскими и зарубежными обсерваториями Пулковская обсерватория участвует в этой программе наблюдений на протяжении нескольких десятилетий.

Наблюдения и обработка полученных данных

В этой работе представлены результаты астрометрических ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера в период с 2009 по 2011 год, выполненных на Нормальном астрографе ($D/F = 330/3467$ мм). ПЗС-камера S2C (рабочее поле: $18' \times 16'$, масштаб: 0.952 "/пиксел) использовалась в качестве приемника. Для уменьшения влияния ореола от яркой планеты перед объективом инструмента устанавливалась диафрагма $D = 15$ см. Использовался фильтр (СЗС-21) с полосой пропускания от 400 до 500 нм. Длительность и качество наблюдений ограничивались низким положением планеты над горизонтом и погодными условиями. Наиболее длительный ряд наблюдений получен за 2009 год, поскольку проводилась специальная программа по наблюдениям взаимных покрытий и затмений галилеевых спутников Юпитера. Прямые определения экваториальных координат спутников при этом не были выполнены.

В зависимости от используемых экспозиций кадра, равных соответственно 60, 30, 10 и 5 секунд, объекты снимались сериями по 5, 10, 50, 100 кадров. При сложных наблюдательных обстоятельствах, связанных с затмениями и взаимными покрытиями галилеевых спутников Юпитера, приходилось уменьшать экспозиции кадров и накапливать результат с помощью суммирования кадров. Малое количество опорных звезд в наблюдаемых областях заставило варьировать длительность и количество используемых экспозиций в каждом конкретном случае. Уменьшение апертуры (15–5 пк) при измерениях также способствовало решению данной задачи, но ограничением служило ухудшение случайных ошибок измерений.

За наблюдательный период было получено и обработано около 8000 ПЗС-кадров с изображениями Юпитера и галилеевых спутников: Ио (J1), Европа (J2), Ганимед (J3), Каллисто (J4). Длительность наблюдений объектов от ночи к ночи менялось, а в 2009 году достигала почти 3 часов. Поэтому полученные ряды серий ПЗС-кадров разбива-

лись на интервалы, не превышающие по длительности 9–12 минут, в пределах которых видимое движение спутников можно считать прямолинейным и усреднение положений будет являться корректным. Полученные же индивидуальные положения и их моменты использовались для оценки внешней точности наблюдений.

Для обработки полученных ПЗС-изображений использовался программный комплекс IZMCCD, разработанный Измайловым И.С. [1]. Программное обеспечение позволяет выполнить сложение кадров с параллельным сдвигом и учет ореола от яркой планеты. Поскольку галилеевы спутники очень близки к Юпитеру, главной проблемой, при измерении их цифровых изображений, является учет ореола планеты. Центры изображений спутников и опорных звезд на кадре определяются при помощи профиля, задаваемого функцией Лоренца [2].

$$I(x_j, y_j) = \frac{C}{(1 + Ar_j)^\alpha} + D, \quad r_j^2 = (x_j - x_0)^2 + (1 + B)(y_j - y_0)^2 + E(x_j - x_0)(y_j - y_0),$$

где $I(x_j, y_j)$ – отсчет яркости на элементе с координатами x_j, y_j ; x_0, y_0 – координаты центра изображения; α, A, B, C, D, E – параметры модели.

Обработка измерений заключается в определении этих параметров с помощью решения системы условных уравнений нелинейным методом наименьших квадратов. Так были получены измеренные координаты центров изображений объектов в системе ПЗС-кадра. Затем, применяя стандартную астрометрическую редукцию по методу Тернера, определяем экваториальные координаты, используя в качестве опорного каталога UCAC4. Была проведена оценка качества измерений отдельной звезды или спутника посредством контроля невязок, получаемых при аппроксимации изображения звезды выбранной функцией профиля. Наш выбор профиля, который показал случайное распределение невязок, оказался более приемлемым, чем использование профиля Моффата. После отсева одиночных и суммированных ПЗС-кадров, на которых оказалось 1–3

Таблица 1. Количество наблюдательных ночей и полученных положений галилеевых спутников с ошибками редукции их экваториальных координат за весь период наблюдений

Год	Число ночей	Число положений спутников					Sx угл.с	Sy угл.с	Число опорных звезд	Интервал зенитных расстояний
		все	J1	J2	J3	J4				
2009	16	87	26	24	23	14	0.070–0.352	0.005–0.362	5–12	74°–78°
2010	4	15	2	5	4	4	0.089–0.294	0.077–0.331	6–7	60°–62°
2011	9	38	9	9	10	10	0.028–0.336	0.101–0.311	5–8	46°–51°

опорных звезды, были также исключены результаты с ошибками редукции, превосходящими 0.4". Количественные оценки итогов наших наблюдений приведены в табл. 1. В этой таблице также приводятся средние по годам ошибки редукции для обеих координат (Sx, Sy) и число опорных звезд каталога UCAC4, по которым проводилась редукция, чаще всего равное 6–7 звездам.

Сравнение наблюдений с теорией и анализ внешней точности результатов

Был проведен анализ результатов наших наблюдений за весь наблюдательный период при использовании комбинаций четырех современных теорий движения спутников Юпитера: V. Lainey-V.2.0|V1.1, V. Lainey-V.1.1, J.-E. Arlot-G5, J.H. Lieske-E5, опирающихся на пять версий планетной теории: INPOP13C, INPOP10, EMP2011m, DE431, INPOP08. Эфемериды были обеспечены сервисом “MULTI-SAT” [3]. Вычислялись разности по прямому восхождению $(O-C)_\alpha$ и склонению $(O-C)_\delta$ между наблюдаемыми и теоретическими координатами для всех четырех спутников Ио, Европы, Ганимеда и

Каллисто. В табл. 2 приведены значения разностей (O–C) по обеим координатам, усредненные за весь период наблюдений, для выбранных нами 20 комбинаций теорий движения.

Таблица 2. Средние значения разностей (O–C) по обеим координатам для галилеевых спутников при использовании 4 современных теорий движения спутников, опирающихся на пять версий планетной теории, все значения даны в секундах дуги

Теория движения спутника	Ио (J1)		Европа (J2)		Ганимед (J3)		Каллисто (J4)	
	(O–C) α	(O–C) δ	(O–C) α	(O–C) δ	(O–C) α	(O–C) δ	(O–C) α	(O–C) δ
Планетная теория INPOP13C								
V.Lainey V2.0	0.0089	-0.0654	0.0158	-0.0197	0.0762	-0.0365	-0.0073	-0.0460
V.Lainey V1.1	0.0112	-0.0729	0.0080	-0.0208	0.0750	-0.0417	0.0026	-0.0440
J.-E.Arlot G5	0.0013	-0.0774	0.0488	-0.0052	0.0226	-0.0539	-0.0120	-0.0467
D.Lieske E5	0.0069	-0.0673	0.0550	-0.0057	0.0302	-0.0529	0.0070	-0.0402
Планетная теория INPOP10								
V.Lainey V2.0	0.0152	-0.0717	0.0222	-0.0263	0.0826	-0.0434	-0.0005	-0.0539
V.Lainey V1.1	0.0175	-0.0791	0.0144	-0.0275	0.0814	-0.0486	0.0094	-0.0520
J.-E.Arlot G5	0.0075	-0.0836	0.0552	-0.0118	0.0290	-0.0608	-0.0052	-0.0547
D. Lieske E5	0.0132	-0.0736	0.0614	-0.0124	0.0366	-0.0597	0.0138	-0.0482
Планетная теория EPM2011m								
V.Lainey V2.0	0.0008	-0.0653	0.0076	-0.0192	0.0679	-0.0358	-0.0160	-0.0445
V.Lainey V1.1	0.0031	-0.0728	-0.0003	-0.0204	0.0667	-0.0410	-0.0061	-0.0425
J.-E.Arlot G5	-0.0068	-0.0772	0.0406	-0.0047	0.0143	-0.0532	-0.0207	-0.0453
D. Lieske E5	-0.0012	-0.0672	0.0468	-0.0053	0.0219	-0.0522	-0.0017	-0.0387
Планетная теория DE431								
V.Lainey V2.0	0.0054	-0.0634	0.0121	-0.0173	0.0724	-0.0340	-0.0114	-0.0426
V.Lainey V1.1	0.0077	-0.0709	0.0043	-0.0185	0.0712	-0.0391	-0.0015	-0.0407
J.-E. Arlot E5	-0.0022	-0.0754	0.0451	-0.0028	0.0188	-0.0514	-0.0161	-0.0434
D. Lieske G5	0.0034	-0.0653	0.0513	-0.0034	0.0265	-0.0503	0.0029	-0.0369
Планетная теория INPOP08								
V.Lainey V2.0	-0.0566	-0.0515	-0.0507	-0.0046	0.0094	-0.0207	-0.0768	-0.0275
V.Lainey V1.1	-0.0543	-0.0589	-0.0586	-0.0057	0.0082	-0.0259	-0.0669	-0.0256
J.-E. Arlot G5	-0.0642	-0.0634	-0.0178	0.0100	-0.0442	-0.0381	-0.0815	-0.0283
D. Lieske E5	-0.0586	-0.0534	-0.0116	0.0094	-0.0365	-0.0371	-0.0625	-0.0218

Оценки точности средних значений (O–C) вычислялись по стандартным формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - x_{mean})^2}{N-1}}; \quad \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}},$$

где x – случайная величина, распределенная по нормальному закону, принимающая значения x_j ($j = 1, \dots, N$); x_{mean} – среднее арифметическое величины x ; σ_x – среднеквадратическое отклонение; ε_x – ошибка среднего.

Поскольку величины и интервалы среднеквадратических отклонений и ошибок среднего оказались не зависящими от выбранных теорий движения, а только от конкретных спутников, приводим их максимальные (σ_{max} , ε_{max}) и минимальные (σ_{min} , ε_{min}) значения, выраженные в секундах дуги, в отдельной табл. 3. В этой таблице также приводится число положений, полученных для каждого спутника. Самый большой интервал среднеквадратических отклонений (σ_{min} , σ_{max}) для средних арифметических величин (O–C) был получен для спутника Ганимед по прямому вос-

хождению, а самыми большими получились среднеквадратические ошибки у Ганимеда по склонению и у Каллисто по прямому восхождению.

Таблица 3. Среднеквадратические отклонения ($\sigma_{\min, \max}$) и ошибки среднего ($\varepsilon_{\min, \max}$) для средних арифметических величин (O-C) по обеим координатам, полученных при сравнении наблюдений с 20 комбинациями теорий движения, величины приводятся в секундах дуги.

Спутник	N	(O-C) α				(O-C) δ			
		σ_{\min}	ε_{\min}	σ_{\max}	ε_{\max}	σ_{\min}	ε_{\min}	σ_{\max}	ε_{\max}
Ио	37	0.1507	0.0248	0.1552	0.0255	0.1662	0.0273	0.1730	0.0284
Европа	38	0.1891	0.0307	0.1976	0.0321	0.1794	0.0291	0.1874	0.0304
Ганимед	37	0.1624	0.0267	0.1835	0.0302	0.1926	0.0316	0.2011	0.0331
Каллисто	28	0.2132	0.0403	0.2243	0.0424	0.1466	0.0277	0.1536	0.0290

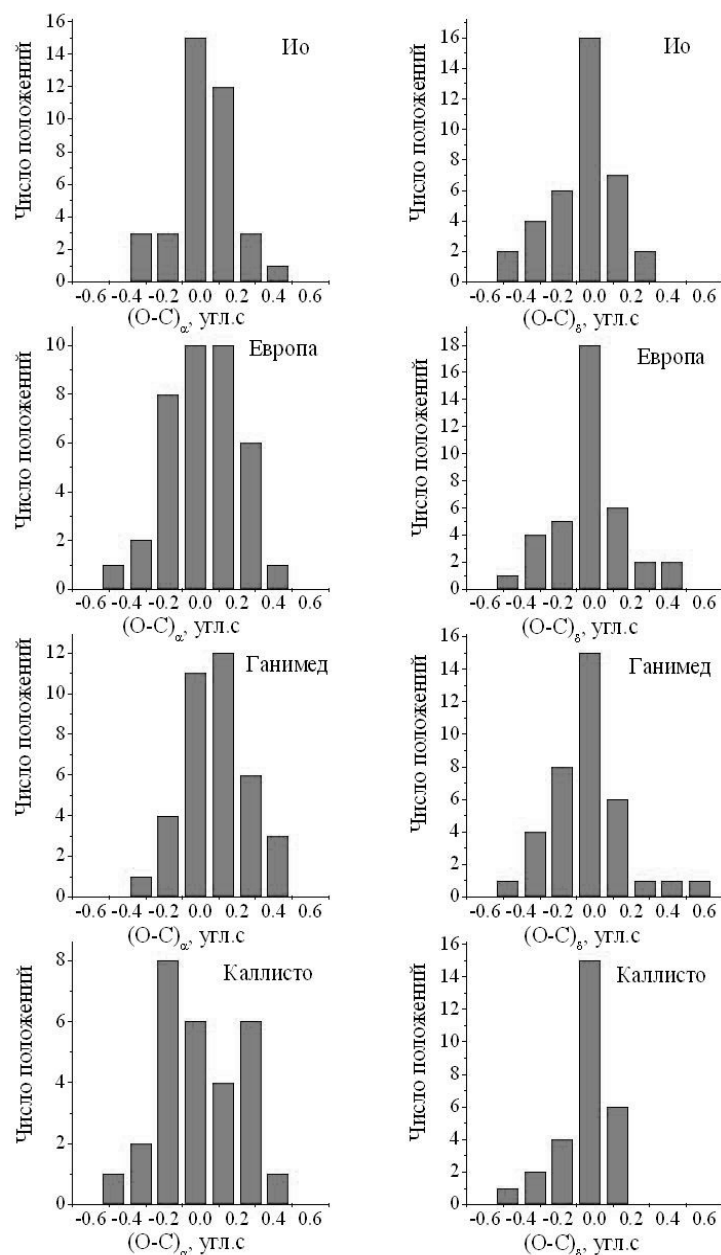


Рис. 1. Гистограммы распределений разностей O-C по прямому восхождению ($\Delta\alpha \cos\delta$) и по склонению ($\Delta\delta$) для положений галилеевых спутников.

Анализ разностей (O-C) для экваториальных координат (табл. 2), полученных по пяти теориям движения Юпитера, показал, что для имеющегося ряда положений спутников Юпитера, теория INPOP08 хуже всего согласуется с наблюдениями. Исключение составляют положения Ганимеда по всем четырем теориям движения спутников. Наоборот, при использовании теорий движения INPOP13C, INPOP10, EPM2011m и DE431 у Ганимеда получаются самые большие разности (O-C), для всех спутниковых теорий. Возможная причина таких результатов состоит в несовершенстве теорий движения Ганимеда и Каллисто. Однако добавление в наше исследование самой новой теории движения планеты INPOP13C не изменило результаты. Но величина и поведение ошибок полученных положений этих спутников может предполагать другие причины. Например, это могут быть невыгодные условия наблюдений, взаимодействие изображений.

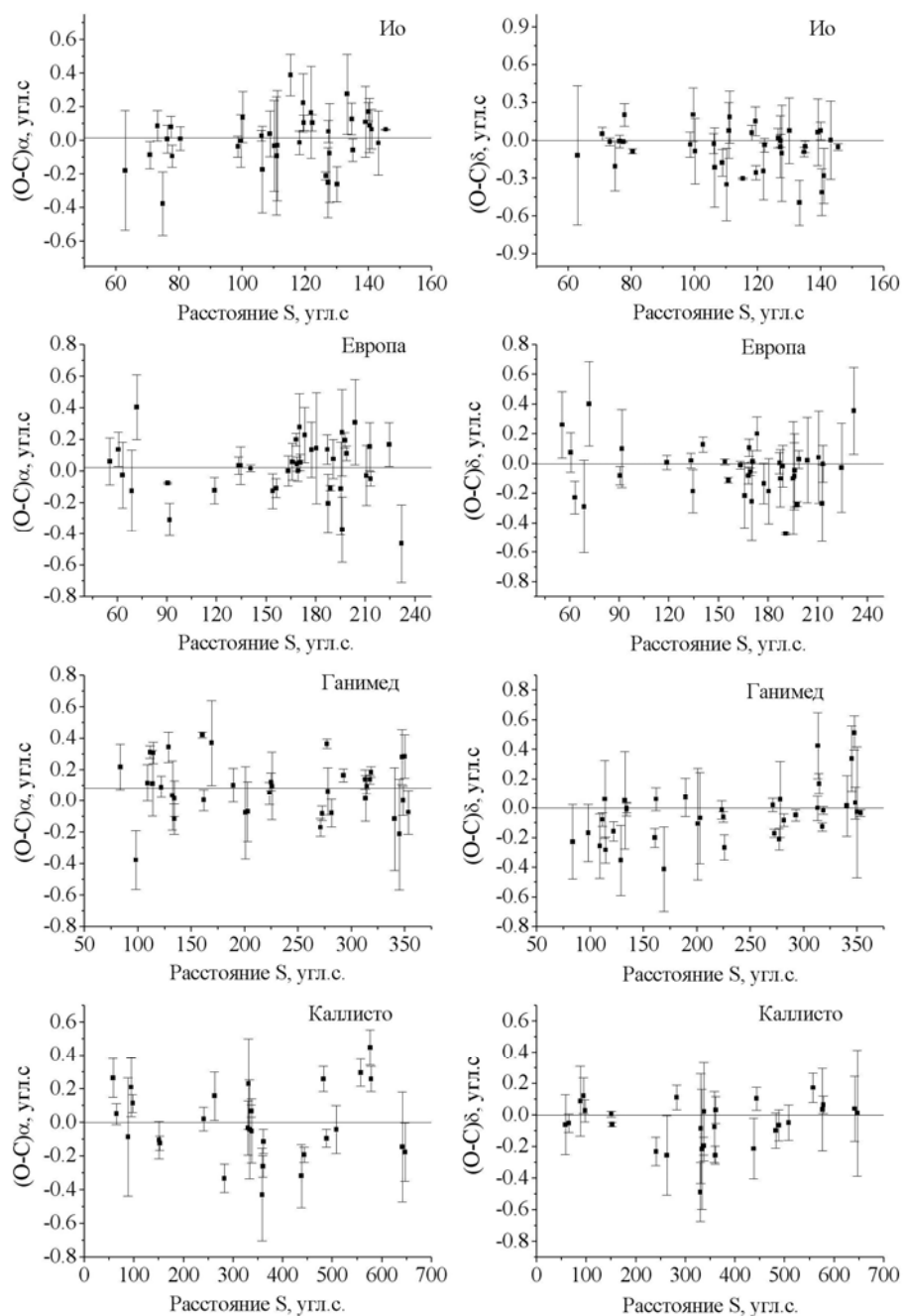


Рис. 2. Поведение разностей (O-C) по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния между галилеевыми спутниками и Юпитером (S).

Из исследуемых нами теорий, DE431 показывает чуть лучшее согласование с наблюдениями. Так же можно оценить теорию движения спутников V. Lainey-V.2.0|V1.1. Гистограммы, характеризующие распределение разностей О-С по прямому восхождению и склонению для всех четырех спутников, приводятся на рис. 1. Использовалась версия теорий INPOP10 и V. Lainey-V.2.0|V1.1. Величина и распределение разностей (О-С) хорошо согласуются с предыдущими выводами, а отличие распределения разностей (О-С) от нормального закона для спутника Каллисто, делает их более вескими.

Естественно предположить, что наличие ореола от яркой планеты на ПЗС-кадре, обеспечивает некоторый градиент фона. Для того чтобы оценить эффективность его учета, были построены графики поведения разностей (О-С) по прямому восхождению и склонению в зависимости от видимого углового расстояния между галилеевыми спутниками и Юпитером (S), рассчитанного по эфемеридам согласно теориям INPOP10 и V. Lainey-V.2.0|V1.1.

Полученные результаты с их ошибками приведены на рис. 2. Небольшой тренд заметен у спутника Ио по обеим координатам и по склонению у Ганимеда, но его величина в пределах ошибок измерений. Полученные экваториальные координаты галилеевых спутников размещены в Пулковской астрометрической базе наблюдательных данных.

Заключение

В итоге за наблюдательный период 2009–2011 гг. было получено 140 положений галилеевых спутников в системе каталога UCAC4 (ICRS, J2000.0). Наблюдения сравнивались с 9 наиболее современными теориями движения планет и спутников. В среднем (О-С) по обеим координатам относительно всех теорий движения не превышает 0.08". Поведение и величины разностей (О-С) для положений спутников Ганимеда и Каллисто свидетельствуют о том, что теории их движения менее удовлетворяют наблюдениям, чем теории Европы и Ио. Отмечено также, что распределение разностей (О-С) для Каллисто отличается от нормального закона.

Работа выполнена при поддержке Программы № 22 Президиума РАН, а также гранта РФФИ 12-02-00675-а.

Литература

1. *Измайлов И.С.* Izmccd-программный пакет для астрометрической обработки числовых изображений небесных объектов // <http://izmccd.puldb.ru/izmccdru>, 2005.
2. *Franz O.G.* Observational procedures for visual double-star work // *J.Roy.Astr.Soc.Can.*1973.V.67.
3. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 487. P. 759–765.

THE OBSERVATIONS OF JUPITER GALILEAN SATELLITES WITH PULKOVO NORMAL ASTROGRAPH

Narizhnaia N.V.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The results of CCD-observations with Pulkovo Normal Astrograph for Jupiter and its galilean satellites are presented. For the observation period 140 galilean satellites positions was obtained in system catalogue UCAC4. Comparison of obtained equatorial coordinates of satellites was made with the 9 most modern theory of planet motion. The average residuals between the observed and calculated co-ordinates (O-C) using the selected theories of motion do not exceed 0.08". The behavior and magnitudes of the (O-C) residuals in the positions of Ganymede and Callisto satellites show that the theory of their motion was elaborated worse than in the case of Io and Europa satellites.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНЕТНЫХ ЭФЕМЕРИД

Питьева Е.В.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Астрометрические наблюдения являются основой для построения планетных эфемерид и одним из основных факторов повышения их точности. Астрометрические наблюдения планет с 1961 г. после успешной радиолокации Венеры, делятся на две большие группы: оптические и радиотехнические наблюдения, которые являются значительно более точными. Именно поэтому эфемериды внутренних планет, хорошо обеспеченных радиотехническими наблюдениями, целиком основаны на этих данных. Однако, оптические наблюдения по-прежнему необходимы для уточнения эфемерид внешних планет. Для эфемерид EPM2014 мы использовали около 800000 наблюдений 1913–2014 гг. Показано увеличение точности эфемерид в зависимости от наблюдений и адекватности динамических моделей реальному движению планет.

1. Астрометрические наблюдения и их точность

Астрометрические наблюдения необходимы для определения и уточнения движений тел в Солнечной системе, а также для получения различных физических параметров (массы, параметры вращения и топографии, релятивистские параметры и т. д.).

Наблюдения, используемые для построения и уточнения эфемерид EPM2014, включают позиционные измерения разного типа 1913–2014 гг. от классических меридианных до современных радиотехнических наблюдений планет и космических аппаратов (КА), всего около 800000 наблюдений. Были использованы оптические наблюдения с 1913 г., когда в Морской обсерватории США (Naval Observatory) был установлен улучшенный микрометр, и наблюдения стали более точными ($\approx 0.5''$). Примерно в то же время появились первые фотографические наблюдения планет, но эти наблюдения имели слишком большие случайные и систематические ошибки и не согласовывались с меридианными наблюдениями. По этой причине фотографические наблюдения до 60-х годов прошлого века, когда точность фотографических наблюдений значительно улучшилась, не использовались для уточнения движения планет. Исключение составляют фотографические наблюдения Плутона, полученные или найденные на фотографических пластинках того времени, которые вынужденно включают в набор наблюдений для улучшения орбиты Плутона, поскольку никаких других наблюдений этого объекта не было. Новые современные измерения старых фотографических пластинок, их редукция и отнесение объекта к современным каталогам (UCAC4) позволяют значительно улучшить их точность, до $0.2''$ и меньше (см. работы Buie & Folkner [4] и Khrutskaya et al. [6]). Кроме наблюдений внешних планет, мы используем также позиционные наблюдения естественных спутников этих планет. Эти наблюдения более точные, т.к. практически не имеют ошибок, возникающих из-за эффектов фазы. С 1995 г. начался переход на CCD матрицы, точность таких наблюдений первоначально составляла $0.2''$, а в настоящее время достигают сотых долей угловой секунды.

Настоящая революция в динамической астрономии началась в 1961 г., когда была впервые осуществлена успешная радиолокация Венеры одновременно в США в Массачусетском и Калифорнийском технологическом институтах, в СССР в Институте радиотехники и электроники и в Великобритании на радиобсерватории Джодрелл-Бэнк. Значение радиолокационных наблюдений в астрономии обусловлено двумя факторами. Во-первых, добавилось два новых вида измерений: измерение времени запаздывания, которое через скорость света связано с расстоянием, и измерение доплеровского сме-

щения частоты, дающего относительную радиальную скорость отражающей поверхности. Во-вторых, радиолокационные измерения имеют высокую точность. В настоящее время относительная точность $10^{-11} \div 10^{-12}$ в траекторных измерениях КА стала обычной, что на пять порядков превосходит точность классических оптических измерений. Однако, радиотехническими наблюдения обеспечены, в основном, планеты земной группы и Сатурн (КА Cassini); для Юпитера таких наблюдений значительно меньше, а для Урана и Нептуна имеется только по одной трехмерной нормальной точке (α , δ , R), полученной по данным КА Voyager-2, поэтому по-прежнему большие значения для внешних планет имеют оптические наблюдения. Необходимо отметить, что в настоящее время локационные наблюдения поверхностей планет не выполняются, на смену им пришли траекторные данные различных КА, находящихся около планет. Для уточнения положений планет, в основном, используются наблюдения времен запаздывания, которые при умножении на скорость света дают расстояния. Современная точность таких наблюдений достигает 1–2 м.

Несколько слов следует сказать о специальных РСДБ наблюдениях КА около планет (Венера, Марс, Юпитер, Сатурн) на фоне квазаров, координаты которых даны в международной системе ICRF2. Именно эти данные позволяют ориентировать планетные эфемериды в систему ICRF2. Ошибки таких измерений в настоящее время составляют доли mas, и сказываются на ошибках угловых положениях соответствующих планет. Все используемые наблюдения вместе с их априорными точностями показаны на рис. 1.

Оптические наблюдения внешних планет и их спутников 1913–2013 гг., 72049 наблюдений			
USNO Pulkovo Nikolaev Tokyo Bordeaux La Palma Lowell Flagstaff TMO Pico dos Dias	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
	прохождения	1913–1994	1" → 0"5
	ф-э прохождения	1963–1998	0"8 → 0"25
	фотографические	1913–1998	1" → 0"2
	ПЗС	1995–2013	0"2 → 0"05
Радарные наблюдения Меркурия, Венеры, Марс 1961–1997 гг., 58112 наблюдений:			
Millstone Haystack Arecibo Goldstone Crimea	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
	ranging	1961–1997	100 км → 150 м
Траекторные данные КА 1971–2014 гг., 52556 нормальных точек:			
Mariner – 9 Венера Mariner – 10 Меркурий Pioneer – 10, 11 Юпитер Voyager – 1, 2 Юпитер Voyager – 1, 2 Сатурн Voyager – 2 Уран Voyager – 2 Нептун Phobos Марс Ulysses Юпитер Magellan Венера Galileo Юпитер Viking – 1, 2 Марс Pathfinder Марс MGS Марс Odyssey Марс MRO Марс Cassini Сатурн VEX Венера Messenger Меркурий MEX Марс	Тип набл.	Интервал	Априорная точность
	ranging	1971–2014	6 км → 1 м
	dif.range	1976–1997	1.3 → 0.1 мм/с
	rad.velos.	1992–1994	0.1 → 0.002 мм/с
	flybys 3-D	1973–2009	400 mas → 0.4 mas
	Δ VLBI	1990–2014	12 mas → 0.13 mas

Рис. 1. Астрометрические наблюдения, использованные для построения EPM2014.

В общем, используется 72049 оптических наблюдений и 52556 нормальных точек, составленных из более чем 700000 радиотехнических данных разных типов. Большин-

ство наблюдений были взяты из базы данных JPL (<http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/planeph-data/index.html>).

Большое значение для создания эфемерид, и определения различных параметров динамических моделей имеет точность наблюдений. Ошибки оптических наблюдений складываются из ошибок измерений положений объектов, ошибок координат звезд сравнения, ошибок среднего движения каталогов, а также ошибок перехода между каталогами (приходится переходить от FK3 для старых наблюдений к современным каталогам).

Для радиолокации поверхностей планет основная ошибка возникала из-за необходимости учета топографий лоцируемых поверхностей, который в лучшем случае выполнялся с ошибкой около 100 м. Для траекторных наблюдений КА точность доходит до нескольких метров. Основной вклад в эти ошибки вносят трудно оцениваемые из самих наблюдений ошибки времен запаздываний, возникающие в аппаратуре и в солнечной короне.

Кроме того, во всех типах наблюдений могут быть и другие систематические и случайные ошибки. Эти ошибки могут быть оценены из сравнения остаточных невязок RMS наблюдений, вычисленных по разным независимым эфемеридам (DE, EPM, INPOP), или по аналитическим теориям и численным эфемеридам, в также из сравнения RMS рядов наблюдений одних и тех же объектов, полученных примерно на том же интервале времени, на разных обсерваториях.

Например, сравнение наблюдений Урана, полученных в обсерваториях Пулково [1] и Flagstaff в 2006–2011 гг. показывает, что в Пулковских наблюдениях по прямому восхождению есть некоторая систематика на уровне $0.2''$, которая, возможно, исчезнет после новой редукции наблюдений, выполняемой сейчас в Пулково.

На рис. 2 показано сравнение О-С наблюдений Titania, 3 спутника Урана, выполненных на трех обсерваториях: в Пулково (46 точек) 2007–2011 гг. [2], Table Mountain — ТМО (87) 2001–2009 гг. и Flagstaff (485) 1998–2013 гг.

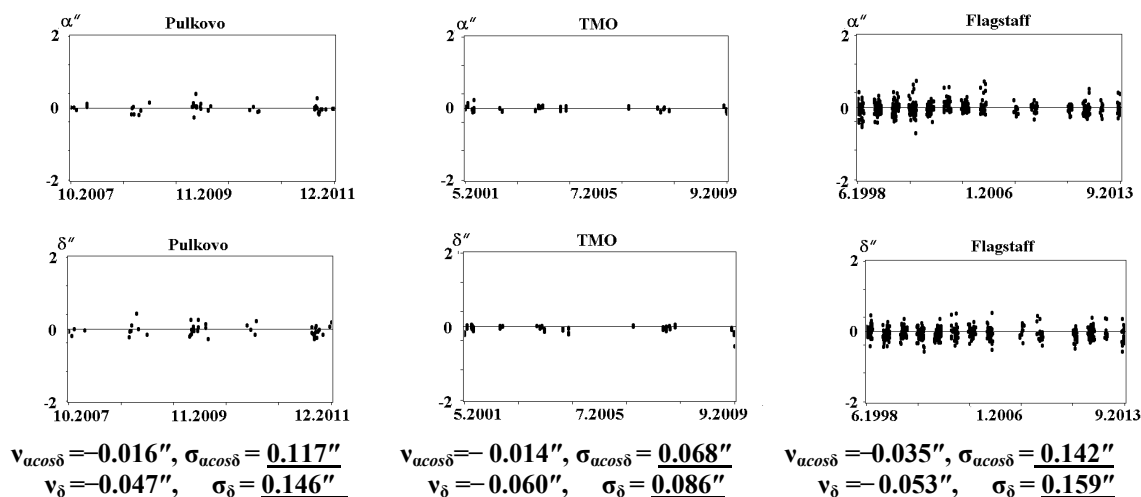


Рис. 2. Сравнение О-С наблюдений Titania, выполненные на обсерваториях в Пулково, Table Mountain и Flagstaff.

Из рис. 2 видно, что наблюдения, выполненные во всех трех обсерваториях, хорошие, и не имеют систематических ошибок. Отметим, что средние значения и средне-квадратичные ошибки наблюдений в Пулково, ставшие доступными недавно, меньше, чем для наблюдений, полученных в обсерватории Flagstaff, несмотря на то, что условия наблюдений в последней обсерватории значительно лучше. То же самое наблюдается из сравнения наблюдений для 4-го спутника Урана — Oberon. Исследование наблюде-

ний четырех спутников Урана показывает, что наблюдения во всех обсерваториях несколько лучшие для 3-го и 4-го спутника, чем для 1-го и 2-го.

2. Факторы, влияющие на точность эфемерид

В первую очередь, на точность построенных эфемерид влияет количество, качество и интервал наблюдений. В табл. 1 показаны формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов внешних планет для разных наборов наблюдений. В первой колонке “О” означает использование для улучшения планетных орбит только оптических наблюдений, “+ сп.” — использование в дополнение к наблюдениям самих планет, позиционных наблюдений их спутников (см. рис. 1), а “+ радио” — использование также всех доступных радиотехнических наблюдений рассматриваемых планет. Из таблицы видно, что использование наблюдений спутников Юпитера и Сатурна уменьшает формальные ошибки всех орбитальных элементов в несколько раз, так как для улучшения этих планет не могли быть использованы фотографические и ПЗС наблюдения самих планет из-за их огромной яркости по сравнению со звездами сравнения, а наблюдения спутников успешно используются. Кроме того, видно улучшение точности при использовании радиотехнических данных КА, находящихся или проходивших около планет. Точность орбитальных элементов Сатурна увеличилась на один–три порядка благодаря 10-летнему ряду времен запаздывания КА Cassini [5].

Таблица 1. Формальные стандартные ошибки (σ) орбитальных элементов внешних планет для разных наборов наблюдений.

Планета	a [км]	$\sin i \cdot \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \cdot \sin \Omega$ [mas]	$e \cdot \cos \pi$ [mas]	$e \cdot \sin \pi$ [mas]	λ [mas]
Юпитер-О	1.693	10.912	10.854	6.188	5.497	11.431
+ сп. 1 - 4	0.588	2.268	2.314	1.258	1.197	2.361
+ радио КА	0.347	2.005	1.808	0.128	0.109	0.882
Сатурн-О	10.823	14.795	14.584	8.136	7.440	18.452
+ сп. 1– 9	3.437	1.731	2.333	1.428	1.310	3.376
+ радио КА	0.0048	0.0807	0.057	0.001	0.0004	0.012
Уран-О	33.779	4.321	4.256	3.795	3.666	5.993
+ сп. 1– 4	32.554	3.960	3.138	3.198	3.630	5.643
+ радио КА	30.033	3.453	3.007	2.849	2.003	3.592
Нептун-О	314.462	4.253	5.718	7.025	14.747	13.650
+ сп. 1– 4	288.699	4.082	4.918	5.983	13.800	12.061
+ радио КА	270.470	2.669	5.195	5.546	13.540	12.345
Плутон-О	1200.101	1.881	7.070	25.289	19.029	13.716
+ L, B	724.911	0.843	3.914	16.539	11.180	6.257

У Плутона (табл. 1) наблюдения его спутников не использовались, и доступных позиционных радиотехнических данных пока нет, поэтому, условно оптические наблюдения разбиты на две части: все имеющиеся данные до 2014 г. — “О”, и данные, ставшие доступными в 2014–2015 гг. — “L, B”, необходимые для полета КА New Horizons к Плутону. Это найденные и полностью переобработанные цифровые данные, полученные из фотографических пластинок, сделанных в Lowell обсерватории с 1930 г. по 1951 г. [4], и новый ряд высокоточных наблюдений, полученных с 1995 г. по 2013 г. в бразильской обсерватории Pico dos Dias [3]. Из табл. 1 видно, что точность определения орбитальных элементов Плутона улучшилась примерно вдвое благодаря этим новым наблюдениям.

Folkner [4] для того, чтобы вычислить максимальную неопределенность предвычисляемой орбиты Плутона, взял только несколько рядов хороших и длительных наблюдений: Пулковские наблюдения (1930–1992 гг.) [8], наблюдения, выполненные в обсерваториях Lowell (1931–1951 гг.) [4], Flagstaff (1995–2013 гг.) и ТМО (2000–

2013 гг.), а также Pico dos Dias (1995–2013 гг.) [3]. Он комбинировал эти ряды, беря старые и новые данные, строя соответствующие эфемериды и сравнивал геоцентрические расстояния и положения Плутона на интервале 1920–2020 гг. Оказалось, что эти разности не превосходят 3000 км, а на дату 15.06.2015 (время сближения New Horizons с Плутоном) составляют меньше 2000 км. Сравнение же независимых эфемерид DE432 и EPM2014a показало значительно меньшее различие [7], что говорило о достаточно хорошем определении орбиты Плутона, требуемого для работы аппаратуры этого КА. Этот пример убедительно показывает необходимость длительных и качественных наблюдений, выполняемых на разных обсерваториях.

Редукции наблюдений хорошо известны, однако, следует учесть, что по мере увеличения точности наблюдений, точность редукции тоже должна увеличиваться. Так, эффект Шапиро теперь вычисляется не только от Солнца, но и от Юпитера и Сатурна, а для перехода к собственному времени наблюдателя потребовалось вычисление дополнительных членов.

Современная точность наблюдений требует учета всех влияющих факторов. Все серии трех основных эфемерид DE, EPM, INPOP основаны на Общей Теории Относительности. Общее для трех основных планетных эфемерид — одновременное численное интегрирование уравнений движения больших планет (включая Плутон), Солнца, Луны и физической либрации Луны в барицентрической системе координат с учетом сжатия Солнца. Большое влияние на движения планет оказывают возмущения от астероидов и транс-нептуновых объектов (ТНО). В эфемеридах EPM динамические модели, учитывающие эти объекты, становились более точными: от учета возмущений всего 5-ти крупнейших астероидов до полного учета возмущений от всех астероидов главного пояса и возмущений от 30 крупнейших ТНО, и остальных ТНО, находящихся на среднем расстоянии 43 а.е. Описание динамических моделей и построенных на их основе эфемерид EPM дано в работе [7].

Динамические модели движения планет значительно усложнились и улучшились, количество наблюдений возросло на порядок, в основном, за счет высокоточных наблюдений, редукции наблюдений тоже были уточнены. Все эти факторы привели к увеличению точности планетных эфемерид. Прогресс точности эфемерид может быть показан на примере новых наблюдений КА MEX, которые не использовались для построения EPM эфемерид до EPM2014. Уменьшение их остаточных невязок, составляющие 63, 34, 29, 20 м для эфемерид EPM2004, EPM2008, EPM2011, EPM2013, соответственно, показаны на рис. 3, который демонстрирует улучшение точности эфемериды Марса.

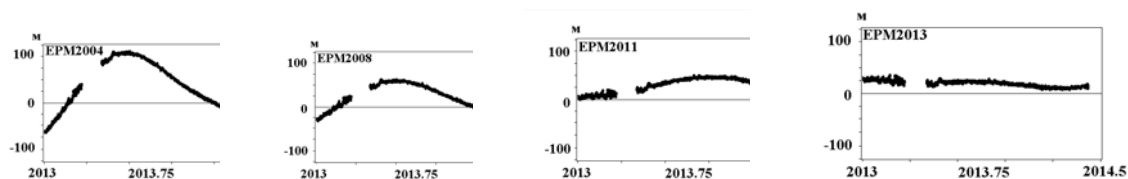


Рис. 3. О-С времен запаздывания, умноженные на скорость света, КА MEX (до улучшения), вычисленные для эфемерид EPM2004, EPM2008, EPM2011, EPM2013.

После улучшения при построении эфемерид EPM2014, WRMS всех остаточных невязок КА MEX составляет 1.5 м. Эти и остаточные невязки других КА показаны на рис. 4.

3. Заключение

Астрометрические наблюдения являются основой для построения планетных эфемерид и одним из основных факторов повышения их точности. Хотя эфемериды внутренних планет целиком основаны на радиотехнических наблюдениях, но оптические наблюдения по-прежнему необходимы для уточнения эфемерид внешних планет,

особенно эфемерид Плутона. Исключительно важно получение наблюдательных данных на разных обсерваториях (например, Flagstaff и Пулково), что позволяет судить о реальной точности наблюдений и учитывать этот фактор при улучшении эфемерид.

Прогресс в точности планет эфемерид объясняется ростом количества наблюдательных данных, улучшением качества этих наблюдений и их редукций, а также уточнением динамических моделей движения небесных тел.

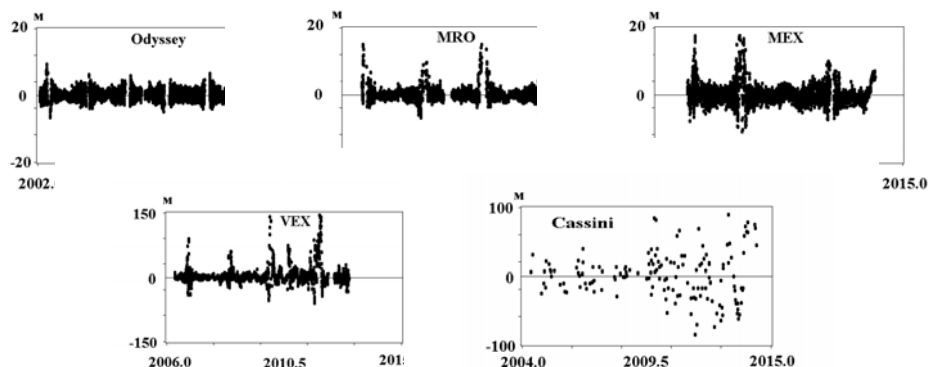


Рис. 4. Остаточные невязки времен запаздывания КА, умноженные на скорость света: WRMS O-C Odyssey и MRO – 1.2 м, MEX – 1.5 м, VEX – 3.1 м, Cassini – 22.0 м.

Литература

1. Деметьева А.А. Астрометрические наблюдения Урана на Пулковском нормальном астрографе // *Астрон. вестник*, 2014, т. 48, № 3, 211–218.
2. Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. Астрометрические наблюдения на 26-дюймовом рефракторе в 2007–2011 гг. // *Астрон. вестник*, 2015, т. 49, № 3, 190–194.
3. Benedetti-Rossi G., Vieira-Martins R., Camargo J.I.B., Assafin M., Braga-Ribas F. Pluto: improved astrometry from 19 years of observations // *A&A*, 2014. V. 570, Id. A86, 12 p.
4. Buie M.W., Folkner W.M. Astrometry of Pluto from 1930–1951. Observations: the Lampland Plate Collection // *A.J.*, 2015. V. 107, Issue 1, article id. 22, 13 p.
5. Hees A., Folkner W.M., Jacobson R.A., Park R.S. Constraints on modified Newtonian dynamics theories from radio tracking data of the Cassini spacecraft // *Physical Review D*, 2014, V. 89, Issue 10, id.102002.
6. Khrutskaya E.V., De Cuyper J.-P., Kalinin S.I., Berezhnoy A.A., de Decker G. Positions of Pluto extracted from digitized Pulkovo photographic plates taken in 1930–1960. eprint arXiv:1310.7502, 2013, 8 p.
7. Pitjeva E.V., Pitjev N.P. Development of planetary ephemerides EPM and their applications // *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2014, V. 119, 237–256.
8. Rylkov V.P., Vityazev V.V., Dement'eva A.A. Pluto: an analysis of photographic positions obtained with the Pulkovo normal astrograph in 1939–1992 // *Astron. & Astroph. Transactions*, 1995, V. 6, No. 4, 265–281.

ASTROMETRIC OBSERVATIONS FOR CONSTRUCTING PLANETARY EPHEMERIDES

Pitjeva E.V.

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

Astrometric observations are the basis of constructing planetary ephemerides and one of the main factors of improving their accuracy. Astrometric observations since 1961, after successful radiolocation of Venus, divide on two major parts: optical and radio, the latter being considerably more precise. It is due to this fact that ephemerides of the inner planets, well provided by radio measurements, are based on radio data fully. However, optical observations are needed, as before, for improving ephemerides of the outer planets. About 800000 observations 1913–2014 of different types have been used for creation EPM2014 (Ephemerides of Planets and the Moon) of IAA RAS. Increasing ephemeris accuracy due to observations and adequacy of dynamical models to real planetary motions is shown.

ПЗС-НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ

Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П.

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

В работе представлены результаты наблюдений спутников Сатурна, Урана и Юпитера, выполненных в Пулковской обсерватории. В работе использовались теоретические положения спутников, предоставленных сервером эфемеридной поддержки MULTI-SAT IMCCE, разработанным Н.В. Емельяновым. По дисперсии разностей эфемерид и наблюдаемых положений была оценена внутренняя точность полученных экваториальных координат спутников планет, она составляет в среднем от 20 до 80 mas, в зависимости от объекта и условий наблюдения. Полученные положения спутников размещены в пулковской астрометрической базе данных www.puldb.ru.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-02-03025 и Программы №9 Президиума РАН.

Введение

Наблюдения планет и их естественных спутников дают материал, необходимый для построения и уточнения теорий движения небесных тел, для чего важно как можно дольше накапливать точные положения тел солнечной системы. Для построения теории движения планет и спутников используется весь накопленный ряд наблюдений от открытия небесного тела до наших дней. В свою очередь, совершенствование теорий важно не только для согласования звездной и динамической систем координат, но и для обеспечения космических миссий более точными эфемеридами. В начале 2020-х гг. планируются как минимум три полета космических аппаратов к системам планет-гигантов: Titan Saturn System Mission (NASA & ESA) [10], Jupiter Icy Moon Explorer (ESA & ROSCOSMOS) [11] и Uranus orbiter and probe (проект NASA в рамках Planetary Science Decadal Survey) [12], и поэтому получение высокоточных положений планет и их спутников весьма актуально.

Наблюдения

ПЗС-наблюдения спутников планет производятся на 26"-рефракторе в Пулкове (59°46'18.22" с. ш. 30°19'33.79" в. д., код обсерватории 084) с августа 1995 г. с помощью ПЗС-камеры ST-6. Технические характеристики телескопа следующие:

диаметр объектива – 65 см;
фокусное расстояние – 10413 мм,
масштаб в фокальной плоскости – 19.80"/мм.

До 2007 г. из наблюдений определялись только взаимные расстояния между парами близких спутников Сатурна и Юпитера [1]. Основным недостатком камеры ST-6, было небольшое поле 170 на 130 угл. сек., что существенно затрудняло калибровку. Также, до введения в строй в 2003 году системы автоматического наведения [2], на одно ПЗС-наблюдение требовалось больше времени, чем на одно фотографическое. В 2007 г. на телескопе была установлена ПЗС-камера FLI ProLine 09000:

поле зрения – 12×12 угл. мин.,
размер сенсора – 3056×3056 пикселей,
масштаб – 0.238 угл. сек./пиксель.

Это позволило получать изображения опорных звезд и определять экваториальные координаты спутников с использованием опорных каталогов. В программу наблюдений

были добавлены спутники Урана, которые ранее на 26"-рефракторе не наблюдались. До 2007 г. наблюдения Урана выполнялись только на Нормальном астрографе. 26"-рефрактор был полностью автоматизирован и установлена система мониторинга погоды, что позволило увеличить количество наблюдений (см. рис. 1).

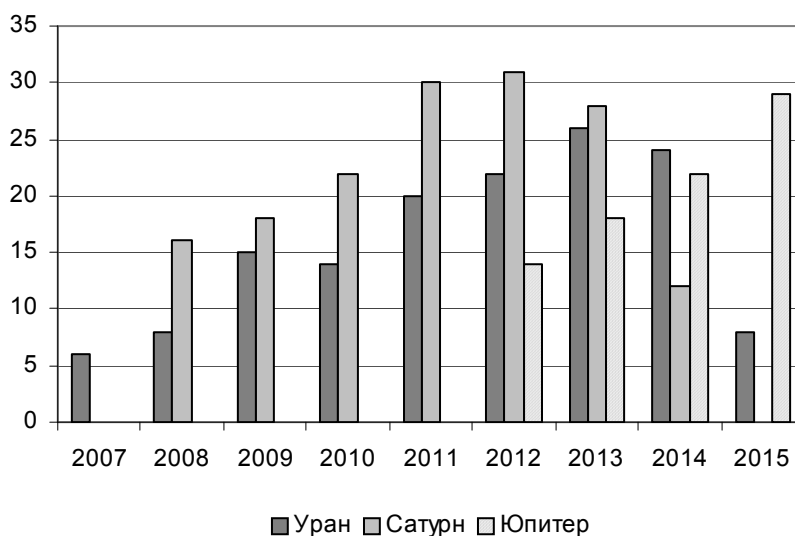


Рис. 1. Количество ночей наблюдений планет и их спутников.

Время накопления одного ПЗС-кадра и количество кадров в серии различаются для разных объектов. Для Урана за одну ночь снимается серия из 40 кадров с экспозициями 10 секунд, для Сатурна – серия в 270 кадров с экспозициями по 1.5 секунды, для астрометрических наблюдений галилеевых спутников Юпитера – по 100 кадров с экспозициями 0.4 секунды. ПЗС-кадры, полученные в одну ночь, делились на 4–5 последовательностей, по 8 для Урана, по 50 для Сатурна и по 20–25 кадров для Юпитера. Кадры каждой последовательности складывались (производилось сложение интенсивностей по пикселям кадра) и измерялись, для каждого результирующего изображения вычислялся соответствующий ему момент с учетом времени экспозиции и соответствующих поправок времени. Таким образом, для каждой наблюдательной ночи получалось по 4–5 положений для каждого спутника, доступного для измерений и соответствующих им моментов, из которых вычислялись нормальные места и средние моменты после исключения явно ошибочных положений с разницей «О-С» более 0".5 (кроме Гипериона). Поскольку длительность ПЗС-наблюдений в одну ночь не превышала 7–8 минут, можно считать видимое движение спутников прямолинейным во время съемки.

Измерения и редукция

Измерения ПЗС-изображений были выполнены при помощи программного пакета IZMCCD, разработанного И.С. Измайловым [3, 4]. Программное обеспечение позволяет учесть засветку кадра от яркой планеты и измерить положения спутников, близких к изображению планеты. Ореол аппроксимируется квадратичным многочленом, и далее из всех элементов изображения спутника производится вычитание значения многочлена на этом элементе. На рис. 1 показано изображение Урана и спутников до и после вычитания ореола.

Центры изображений спутников и опорных звезд определяются при помощи профиля, задаваемого функцией Лоренца [5]

$$I(x, y) = \frac{C}{(1 + Ar)^a} + D,$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (1 + B)(y - y_0)^2 + E(x - x_0)(y - y_0),$$

где $I(x,y)$ – отсчет яркости на элементе с координатами x,y ; x_0, y_0 – координаты центра изображения; a, A, B, C, D, E – параметры модели.

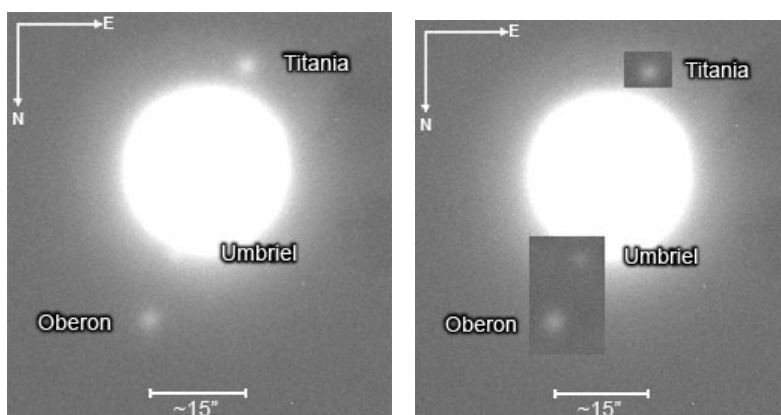


Рис. 2. Фрагмент ПЗС-кадра до и после вычитания ореола.

Координаты центров изображений вычисляются решением избыточной системы уравнений нелинейным методом наименьших квадратов. Так определяются измеренные координаты спутников и опорных звезд в системе ПЗС-кадра. В качестве опорного каталога использовались UCAC2 [6] и, позднее, UCAC4 [7], обладающие достаточной звездной плотностью. На снимках отождествлялось от 5 до 40 звезд (рис. 2). Стандарт-

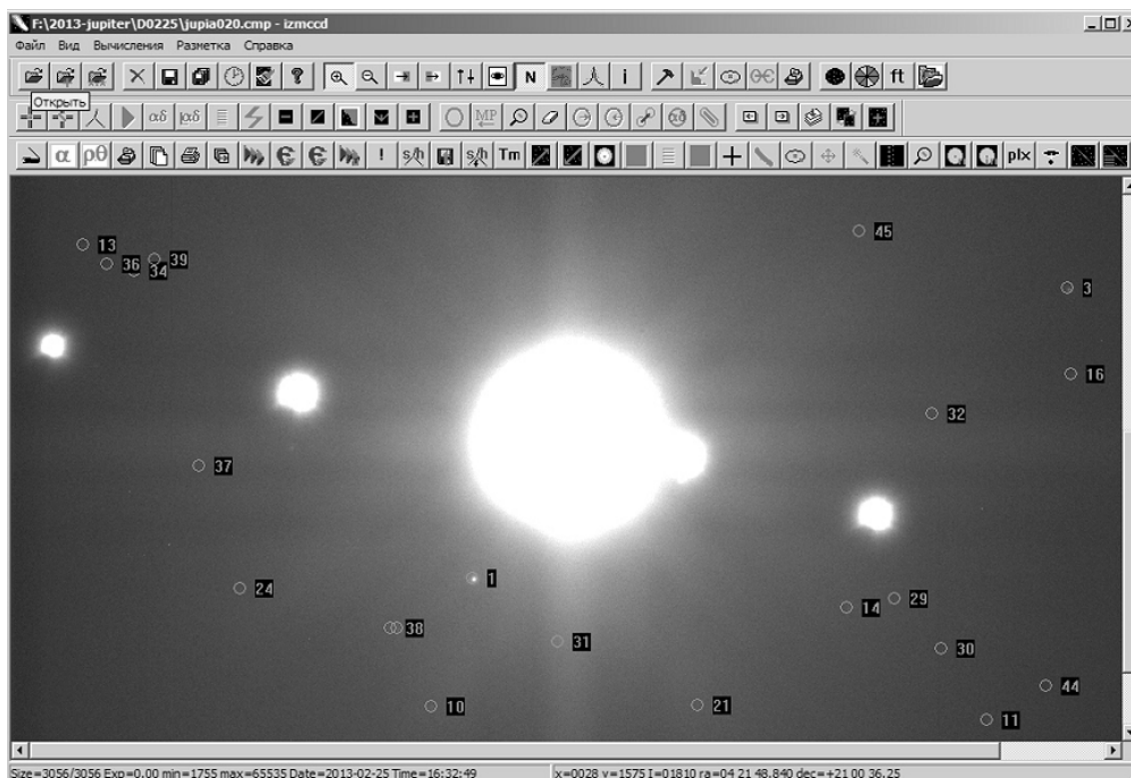


Рис. 2. Интерфейс программы IZMCCD с кадром с изображениями Юпитера и спутников и отождествленных звезд из каталога UCAC4.

ная астрометрическая редукция выполнялась по методу Тернера (метод шести постоянных). В редукции использовались только звезды с невязками условных уравнений не

превосходящими 0".238 (1 рх). Среднеквадратические ошибки определения координат спутников составили в среднем 0".066 и 0".055 по тангенциальным координатам X и Y соответственно.

В наблюдаемые положения не вводились поправки за абберацию, суточный параллакс и время прохождения света между спутниками, учитывался только линейный эффект рефракции, что является достаточным для малых полей, снятых на длиннофокусных телескопах.

В результате определялись экваториальные топоцентрические координаты спутников планет, дифференциальные координаты спутников относительно друг друга. Изображения планет не измерялись, поскольку были засвечены. Положения планет вычисляются из наблюдаемых положений спутников и их теоретических планетоцентрических координат согласно теориям движения по эфемеридам сервиса MULTI-SAT [8].

Оценка точности и сравнение с теорией

Полученные положения спутников сравниваются с их теоретическими значениями. Эфемериды спутников были обеспечены веб-сервером “Natural Satellites Ephemeride Server MULTI-SAT” [8]. Внешняя точность астрометрических положений формально оценивалась по дисперсии разностей «O-C». Внешняя точность зависит от искажений, вносимых атмосферой, и от характеристик телескопа и приемника излучения. Средние значения разностей «O-C», ошибки среднего (ε_α , ε_δ) и среднеквадратические ошибки (σ_α , σ_δ) приведены в табл. 1 для спутников Сатурна со 2-го по 8-й, в секундах дуги, и в табл. 2 для четырех спутников Урана и в табл. 3 для галилеевых спутников Юпитера.

Таблица 1. Средние разности «O-C» для спутников Сатурна, средние ошибки нормальных мест (ε_α , ε_δ) и средние ошибки одного положения (σ_α , σ_δ), arcsec.

Объект	$(O-C)_\alpha \cdot \cos\delta$	$(O-C)_\delta$	ε_α	ε_δ	σ_α	σ_δ
Энцелад (S2)	-0.003	0.013	0.028	0.038	0.055	0.081
Тетис (S3)	-0.007	0.011	0.020	0.025	0.043	0.057
Диона (S4)	-0.006	0.022	0.020	0.024	0.043	0.056
Рея (S5)	-0.007	0.024	0.018	0.022	0.039	0.047
Титан (S6)	-0.010	-0.036	0.025	0.023	0.053	0.049
Гиперион (S7)	-0.057	-0.112	0.027	0.038	0.056	0.073
Япет (S8)	0.071	-0.007	0.020	0.022	0.040	0.045

Таблица 2. Средние разности «O-C» для спутников Урана, средние ошибки нормальных мест (ε_α , ε_δ) и средние ошибки одного положения (σ_α , σ_δ), arcsec.

Объект	$(O-C)_\alpha \cdot \cos\delta$	$(O-C)_\delta$	ε_α	ε_δ	σ_α	σ_δ
Ариэль (U1)	-0.228	0.107	0.022	0.052	0.049	0.117
Умбриэль (U2)	-0.181	-0.266	0.026	0.035	0.050	0.064
Титания (U3)	-0.133	-0.120	0.011	0.019	0.024	0.043
Оберон (U4)	-0.202	-0.073	0.010	0.012	0.023	0.027

Таблица 3. Средние разности «O-C» для галилеевых спутников Юпитера, средние ошибки нормальных мест (ε_α , ε_δ) и средние ошибки одного положения (σ_α , σ_δ), arcsec.

Объект	$(O-C)_\alpha \cdot \cos\delta$	$(O-C)_\delta$	ε_α	ε_δ	σ_α	σ_δ
Ио (J1)	0.006	-0.045	0.032	0.030	0.068	0.066
Европа (J2)	0.055	-0.026	0.036	0.034	0.079	0.069
Ганимед (J3)	0.032	-0.045	0.036	0.036	0.076	0.075
Каллисто (J4)	0.016	-0.049	0.042	0.046	0.086	0.097

Результаты наблюдений, топоцентрические экваториальные координаты спутников Сатурна, Урана и Юпитера в системе J2000.0, разности «О-С», относительные положения спутников и координаты планет доступны в электронном виде в пулковской астрометрической базе данных www.pulldb.ru [9]. На данный момент в базе данных представлены результаты наблюдений:

- 1995–2007 гг., ПЗС камера ST-6, относительных положений спутников Юпитера – 32, Сатурна – 349
- 2007–2014 гг., ПЗС камера FLI Proline, экваториальных координат спутников Юпитера – 165, Сатурна – 1968, Урана – 285, также представлены относительные положения спутников друг относительно друга и координаты планет, определенные из наблюдаемых координат спутников и их теоретических планетоцентрических положений.

Заключение

На 26"-рефракторе в Пулкове проводятся регулярные позиционные наблюдения спутников Юпитера, Урана и Сатурна. Проводится сравнение полученных положений с теориями движения. Для Гипериона и Япета разности наблюдаемых и теоретических положений превышают ошибки определения координат, что говорит о необходимости уточнения теорий их движения. Положения 1–4 спутников Урана показывают значительное расхождение с теорией, на порядок превышающее ошибки вычисленных координат. Для создания более точных теорий движения спутников необходимо продолжение позиционных наблюдений.

Работа выполняется при поддержке грантов РФФИ 12-02-00675 и 15-02-03025, а также Программ №22 и №9 Президиума РАН.

Литература

1. Киселева Т.П., Измайлов И.С. // Изв. ГАО № 214, 2000, с. 333–343.
2. Измайлов И.С., В.С. Виноградов, К.В. Румянцев и др. // Изв. ГАО № 217, 2004, 536.
3. Измайлов И.С. Izmccd <http://izmccd.pulldb.ru/izmccdrus>, (2005)
4. Измайлов И.С., М.Л. Ховричева, М.Ю. Ховричев и др. // ПАЖ, 2010, 36, 365.
5. Franz O.G. // J. R. Astr. Soc. Can., 1973, 67, 81.
6. Zacharias, N.; Urban, S.E.; Zacharias, M.I. et al // A.J., 2004, V. 127, pp. 3043–3059.
7. Zacharias, N.; Finch, C.T.; Girard et al. // Astron. J., 2013, V. 145, I. 2, p.14.
8. Emel'yanov N. V., Arlot J.-E. // A&A. 2008. V. 487. P. 759–765.
9. Kiseleva T.P., Khrutskaya E.V. // Sol. Sys. Res. 2007. V. 41. № 1. P. 72–80.
10. <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/20090218.html>
11. <http://sci.esa.int/cosmic-vision/50321-juice-is-europe-s-next-large-science-mission/>
12. <http://solarsystem.nasa.gov/docs/131171.pdf>

**CCD OBSERVATIONS OF THE MAJOR PLANET SATELLITES WITH 26-INCH
REFRACTOR AT PULKOVO**

Roschina E.A., Izmailov I.S., Kiseleva T.P.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The results of CCD observations of satellites of Saturn, Jupiter and Uranus with 26-inch refractor at Pulkovo are presented. Astrometric reduction algorithm is based on Turner's method with using UCAC2 and UCAC4 catalogues as a reference. Accuracy estimation gives the errors of mean positions within a range of 20–80 mas for both coordinates. Observed positions were compared with motion theories. Ephemerides are provided by “The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT” developed by N.V. Emel'yanov. Results of observations are available at the pulkovo's astrometric data base www.pulbd.ru.

ОРБИТАЛЬНАЯ ЗВЕЗДНАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ — ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ, СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПРОЕКТА

**Чубей М.С.¹, Куприянов В.В.¹, Бахолдин А.В.², Львов В.Н.¹,
Цекмейстер С.Д.¹, Маркелов С.В.³, Левко Г.В.⁴**

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

²Санкт-Петербургский нац. иссл. ун-т информ. технологий, механики и оптики, С.-Петербург

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Зеленчукский р-н Карачаево-Черкесской АО

⁴Научно-исследовательский институт телевидения, Санкт-Петербург, Россия

Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория (ОЗСО) — звездный вариант Межпланетной Стереоскопической Обсерватории [1], — оснащается астрографами, рассчитанными на получение прямых снимков в оптическом диапазоне, с фокусным расстоянием в 30 м, в поле с угловыми размерами 40'×40', рассчитанном на ПЗС-мозаику диаметром 350 мм, с масштабом 6.7"/мм. Пиксель квадратный со стороной 10 мкм, соответствует квадрату на небе со стороной 0.069". Положение фотоцентра изображения точечного источника в поле пикселей определяется в единичном измерении с точностью $\sigma_1 = \pm 0.0007"$. Многополосная фотометрия планируется с точностью $|\sigma_\phi| < 0.05^m$. Предложена система подвеса и наведения телескопов, позволяющая навести телескоп на любую точку небесной сферы. Обеспечены возможности выполнить все виды наблюдений, выполнявшиеся с классическим астрографом. С учетом этих возможностей проектируется программа фундаментальных и прикладных исследований по классическим разделам астрономии и по проблемам астероидно-кометной опасности. Приведены сопоставления с проектами EUCLID и Gaia.

Проектируемые конфигурация, оснащение, возможности и состояние проекта

Развитие проекта [1] в «звездном» варианте [2, 3] доведено до завершения стадии «научное определение проекта», именуемой «фазой А» в отечественной и зарубежной периодике, [4]. В продолжение работ [2, 3] в проекте предложен вариант компоновки системы подвески и наведения основного астрографа [5]. Напомним, что планируемая конфигурация Орбитальной Звездной Стереоскопической Обсерватории (ОЗСО) рассчитана на занятие круговых Лагранжевых центров либрационных движений L_4 и L_5 в системе «Солнце — Земля + Луна», рис. 1. Принципиальным в проекте является занятие окрестностей именно круговых Лагранжевых центров L_4, L_5 . Дополнение конфигурации третьим КА в окрестности Эйлеровых центров (или непосредственно в околоземном пространстве, например, на геостационарной орбите) может значительно повысить эффективность и возможности планируемой обсерватории, значительно улучшая перспективу ее применения для решения задач астероидно-кометной опасности (АКО). В этом случае стереометрические свойства ОЗСО усиливаются возможностью синхронного наблюдения с трех точек в пространстве, разделенных тремя базами, две из которых близки по длине к астрономической единице (а. е.), но главной является база

$$\vec{B}, \text{ при этом } |\vec{B}| = \sqrt{3} \text{ а.е.} \approx 259.1 \text{ млн км.}$$

Эксцентриситетные и либрационные вариации (Δ) основной базы \vec{B} составляют:

$$\Delta = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{\sqrt{3}} + \text{tg } 100'' \right) \text{ а.е.} = 85\,172 \text{ км} = 0.033\% \text{ от базы } |\vec{B}|.$$

Присутствие КА в околоземном пространстве создает возможность для испытаний, а возможно, и для внедрения системы дальней космической связи с применением

лазерного луча, идущего вдоль направлений L_4 –Земля, L_5 –Земля. А синхронные наблюдения объектов в околоземном пространстве, в принципе, на расстоянии до 8–10 а. е., дают уникальный материал для томографического их анализа.

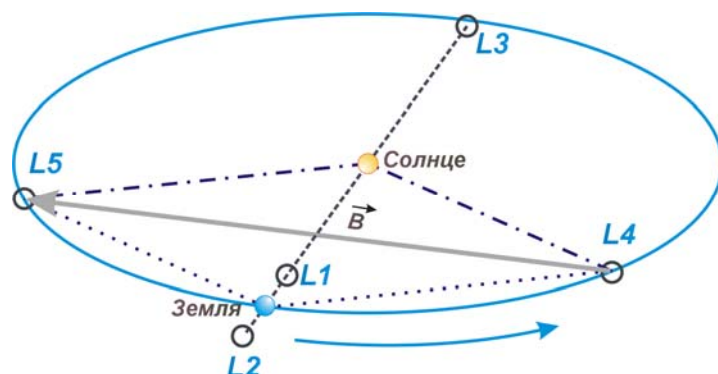


Рис. 1. Конфигурация ОЗСО с космическими аппаратами в окрестностях центров L_4 , L_5 ; также может включать аппарат в окрестностях Земли (на геостационарной орбите или в окрестностях Эйлеровых центров L_1 , L_2).

Учитывая отсутствие результатов космических экспериментов в области фундаментальных исследований в России в последние два десятилетия [6], особенно в астрометрии и звездной астрономии, сопоставимых с зарубежными, группа, разрабатывающая ОЗСО, считает, что надо выполнить работу инструментами и методами, хорошо освоенными в оптическом диапазоне в наземных условиях, и получить результат, актуальный для науки, по оригинальному проекту, не «плестись в хвосте» и не повторяя уже сделанного. Усложнять аппаратуру не следует, на борту нет криогеники.

Астрограф ОЗСО рассчитан по трехзеркальной оптической схеме [3, 7]. Прибор должен реализовывать уровень разрешения, астрометрического и фотометрического, сопоставимого с таковым в проектах Gaia, EUCLID, Hubble и т.п. Ошибка единичного определения положения фотоцентра изображения точечного источника $\sigma_1 = \pm 0.0007''$ [3], достигаемая в штатном режиме работы систем наведения, удержания и регистрации, позволяет решать фундаментальные и прикладные задачи астрометрии, астрофотометрии, небесной механики, звездной астрономии и астрофизики. При этом наблюдения в основном режиме синхронных экспозиций обладают свойством трехмерности и стереоскопии, что отличает их от наблюдений в традиционном режиме одиночного телескопа. Возможно получить наблюдения для исследования формы, минерального состава и параметров вращения астероидов, структуры и химического состава деталей комет. Длительность миссии, рассчитанной минимум на 6 лет (максимум 12 лет — полный гелиоцикл), позволяет исследовать также кинематику структур Галактики.

Предлагаемая система подвеса инструмента и его наведения [5] имеет ряд особенностей. На рис. 2 показано, что по логике функционирования элементов оснащения каждого из двух КА обсерватория, как единое целое, допускает возможность наведения на любую точку небесной сферы и может наблюдать объекты во всем пространстве, за исключением пространства, заключенного в сфере радиусом, равным полуоси орбиты Венеры. Угол избегания засветок избран в проекте равным 25° и определяет два конуса с осями $L_4L'_4$ и $L_5L'_5$, рис. 2.

ОЗСО, как и любая астрономическая обсерватория, имеет «меридиан», определяемый сечением небесной сферы плоскостью, перпендикулярной главной базе L_4 , L_5 , линия STX есть его проекция на эклиптику. Околомеридианное пространство определяется двумя плоскостями, параллельными меридианной плоскости и проходящими соответственно через точки либрации, — их проекции AA' и BB' . Именно в околомеридианном

пространстве, отображаемом на полной небесной сфере, что возможно, благодаря «вынесенному» относительно направления «Земля — Солнце» (линия TS) каждого из КА, наибольшую точность имеют синхронные наблюдения.

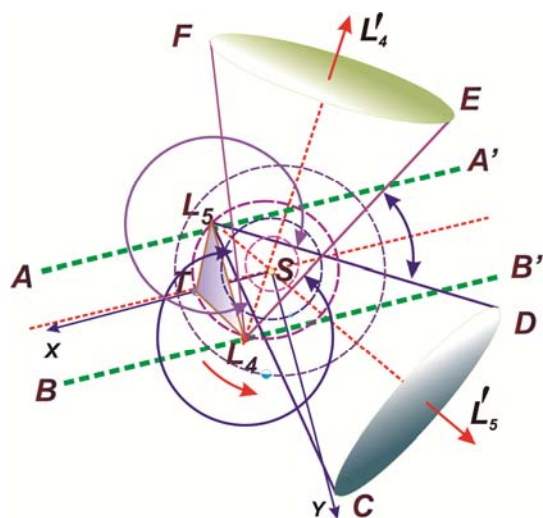


Рис. 2. Области наведения и их ограничение.

Возможны также наблюдения в режиме одиночного телескопа. В этом режиме конус засветки делает невидимыми области CD и EF для каждого телескопа соответственно. Но зона невидимости каждого телескопа доступна наблюдению другого телескопа. Вся небесная сфера, таким образом, доступна для наблюдения в режиме одиночного телескопа в любое время. В годичном же цикле сфера обмещается дважды, будучи доступной наблюдению в режиме синхронных наблюдений. Эти условия наблюдений, а также условия обращения ОЗСО в годичном цикле определяют логику системы подвеса инструментов и их наведения, рис. 3.

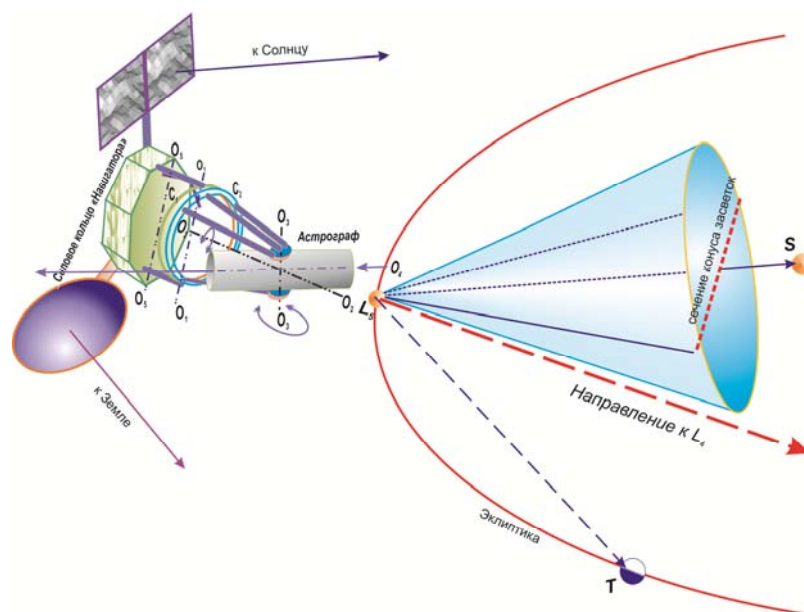


Рис. 3. Принципиальная схема трехосного подвеса с системой приводов.

В схеме ОЗСО есть два лежащих в эклиптике направления, рис. 3: 1) «КА – Солнце»; которому должны быть перпендикулярны плоскости солнечных батарей (СБ), и 2) «КА – Земля», которое должно совпадать с осью радиоантенны. Угол между этими направлениями в аппаратноцентрической системе координат равен 60° , а его биссектриса медленно смещается вдоль эклиптики с угловой скоростью $\sim 1^\circ/\text{сутки}$. Для выбора системы наведения астрографа естественно напрашивается техническое решение, при котором несущая аппарат жесткая платформа снабжается гиросистемами, удерживающими штанги с антенной и СБ, ориентированными как сказано выше. Штанги крепятся к силовому кольцу, например, к кольцу модуля «Навигатор» (разработка НПО им. С.А. Лавочкина), на котором укреплен подвес инструмента, обеспечивающий возможность наведения в любую точку на небе вне зоны избегания засветок без изменения по-

ложения СБ и антенны. Для «подвеса» инструмента предлагается использовать принцип Кардана в сочетании с азимутальной системой координат.

«Подвес» крепится на кольце C_1 (на рисунке показано зеленым цветом), связанном с платформой. Внутри кольца C_1 смонтирован привод, жестко связанный со вторым (внутренним) кольцом C_2 (показано синим цветом), на котором смонтирован гребенчатый или шарикоподшипниковый механизм, вращающий кольцо C_2 вокруг оси O_2 на полный диапазон в 360° . Вращение должно быть «мягким», чтобы не вызывать вибраций системы.

К кольцу C_2 жесткими длинными штангами крепится ось O_3 с механизмом подвеса телескопа. Механизм подвеса оснащен системой поворота инструмента вокруг оси O_3 в пределах $\sim -90^\circ - +185^\circ$ от направления на сопряженную точку Лагранжа (в данном случае, L_4 , схема рис 3 отображает установку КА в точке L_5).

Чтобы обеспечить возможность наведения на объекты, в текущий момент экранлируемые корпусом «Навигатора» (условно эту область можно назвать «надиром» аппаратноцентрической системы координат), необходим механизм «подсмотра» или наклона. Таким образом, система наведения представляет собою аналог наземной азимутальной системы, в которой наводятся практически все полевые универсальные инструменты и теодолиты, а также большинство крупных телескопов мира.

Для удержания направления антенны на Землю предложено использовать звездный датчик для автонавигации [8]. Удержание направления на Солнце целесообразно осуществить солнечным гелиографом с двумя искусственными «лунами» (внешней и внутренней), разрабатывавшимся еще на стадии проектирования МССО [1]. Это обеспечивает также наблюдения выброса масс в корону, значительно усиливая прикладную и фундаментальную части научной программы. Данные о выбросах и траекториях их ухода в космическое пространство являются важнейшими для предсказаний космической погоды. Прибор должен иметь угловое поле зрения не менее 10° , ПЗС-регистрацию изображений Солнца, возможно даже с резервным ее вариантом для замены после исчерпания ресурса первого экземпляра, что целесообразно, учитывая то, что прибор работает непрерывно в потоке излучения от Солнца.

Свойства ОЗСО и программа:

1. Спокойная физика пространства в точках L_4, L_5 : нет теней и нет полей;
 2. «Вынесенное» от направления «Земля – Солнце» положение инструментов обсерватории – обзор всего неба и наличие «меридиана»; синхронность и томография.
 3. База обсерватории достаточна для «мгновенного» определения параллаксов, что было невозможно с обсерваторий, работающих «с одним направлением»; возможны наблюдения точечного микролинзирования.
 4. После исчерпания ресурса КА не засоряют околоземного пространства.
- Программа ОЗСО включает три основные группы задач, где ее преимущества очевидны по сравнению с обсерваториями другой конфигурации. Это группы:
1. Наблюдения тел Солнечной системы, решение задач АКО;
 2. Астрометрия, звездная астрономия и астрофизика с получением распределения энергии в спектрах и прямым определением мгновенных параллаксов звезд, альтернативных классической их реализации – например, в проектах HIPPARCOS и Gaia.
 3. Наблюдение оптических транзиентов – все по целеуказанию.

К решению задач АКО

Проблема АКО, как известно, для решения требует знания [9, 10] популяции объектов, падение которых на Землю способно вызвать глобальную, региональную или ло-

кальную катастрофы. На базе этого знания и технического опыта возможна разработка соответствующих средств перехвата и защиты Земли.

Фундаментальной задачей проблемы АКО является построение максимально точных орбит всех объектов, имеющих потенциал столкновения. Их определение рационально вести в основном наземными средствами, которые к настоящему времени обогащены инструментами, часть которых имеют недостижимую в орбитальных условиях оперативность и эффективность (PanSTARRS), скорость обзора и проникание до 24–25^м. Количество наблюдателей, любителей и профессионалов, достаточно велико. Это позволяет утверждать, что все объекты, заведомо ярче 19–20^м будут обнаружены задолго до возможного столкновения. Далее следует стадия точного и быстрого определения орбит с помощью наблюдений ОЗСО по целеуказаниям. Наблюдения ОЗСО для решения задач АКО смоделированы [11].

Оперативное определение таксономического класса и параметров вращательной динамики объектов, сближающихся с Землей, построение их высокоточных орбит в минимальные сроки и их мониторинг в пространстве Солнечной системы между базой \bar{B} и околоземным пространством, а также мониторинг космической погоды – таковы возможные прикладные задачи ОЗСО.

Два сопоставления

I. EUCLID [12]: КА устанавливается в точке Эйлера L_2 или на геостационарной орбите. Освоение окрестностей точек L_4, L_5 в ОЗСО представляет элемент новизны.

В ОЗСО не будет ИК-приемника и криогеники на борту: космос дальний.

В ОЗСО более сложная задача сброса потока научных и телеметрических данных (телеметрия или специализированная система измеряет стороны L_4T, L_5T лучом).

Потоки научной информации:

EUCLID: 850 Гбит/сутки из точки L_2 , 35 Гбит/час, хранение 4 Тбит 3 суток.

ОЗСО: 0.82 Гпикс \times 16 = 13 Гбит кадр с полной мозаики.

35:13 = 2.5 кадра/час или 5 кадров/час с компрессией. Для обеспечения скорости загрузки кадров, совпадающей с темпом их получения (с учетом времени перенаведения), в ОЗСО требуется увеличения пропускной способности канала, по крайней мере, вдвое. Реализация канала этой мощности станет безусловным технологическим развитием и, соответственно, стимулом.

По значению и научному выходу данные ОЗСО и EUCLID сопоставимы. Перекрытие программ целевых наблюдений не только возможно, но и желательно.

II. Проект GAIA: заявленный предел проникания 20^м, классическая схема определения параллаксов, проблема АКО: побочный продукт, объекты, случайно попавшие в поле зрения.

ОЗСО: предел проникания 25^м, оригинальная схема определения параллаксов, целенаправленное решение фундаментальных и прикладных аспектов проблемы АКО, изучение таксономических характеристик и физических параметров объектов Солнечной системы. Авторы считают, что ожидаемые результаты проекта ОЗСО по ценности сопоставимы с таковыми в проекте Gaia, дополняют его и столь же важны для фундаментальных исследований.

Заключение

Безусловно, для фундаментальной науки важно знать свойства темной материи, устройство Вселенной в целом. Но не менее важно изучить близсолнечное окружение, состав и свойства самой Солнечной системы, угрозы космических стихий – с применением современных технологий. В этом смысле результаты сравниваемых проектов в равной степени ценны для человечества.

Литература

1. Григорьев В.М., П.Г. Папушев, С.А. Чупраков и др. Межпланетная Солнечная Стереоскопическая Обсерватория // Оптич. Журн., том 73, № 4, 2006. С. 43–48.
2. Чубей М.С. Межпланетная Стереоскопическая Обсерватория: астрономическая часть научной программы и компоновки // Изв. ГАО, № 219, выпуск 4, Труды ВАК «Пулковско-2009», СПб, с. 361–368.
3. Чубей М.С., Куприянов В.В., Львов В.Н. и др. Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория: научное и прикладное значение проекта // Изв. ГАО, № 220, 2013, с. 93–98.
4. Чубей М.С. Орбитальная Стереоскопическая Обсерватория // Космонавтика и ракетостроение. № 1(80) 2015, с. 138–147.
5. Чубей М.С., Бахолдин А.В., Куприянов В.В. и др. К вопросу о системе наведения в проекте «Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория». Сб. трудов третьей всеросс. н.-т. конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». 8–13 сент. 2014 года, г. Таруса, СКБ ИКИ РАН. М. 2015, 85–94.
6. Галимов Э.М. Замыслы и просчеты. Фундаментальные космические исследования в России последнего двадцатилетия. Двадцать лет бесплодных усилий. – М.: Едиториал УРСС, 2010. – 304 с.
7. Чубей М.С., Цуканова Г.И., Бахолдин А.В. Специфика расчета оптического астрографа для проекта «МССО» // Оптич. Журн., 2007, т. 74, № 7, с. 37–41.
8. Чубей М.С., Ковальчук Л.В., Еськов Д.Н. и др. Звездный датчик для автономной навигации в дальнем космосе // Оптич. Журн. 2007, том 74, № 2, с. 40–48.
9. Рыхлова Л.В. Устойчивое развитие и проблемы околоземной астрономии // Сб. тр. Конф. «Околоземная астрономия», 2003, том 1. СПб, 2003, с. 9–15.
10. Баканас Е.С., С.И. Барабанов, Г.Т. Болгова и др. Астрономический аспект проблемы космической защиты Земли // Сб. тр. Конф. «Околоземная астрономия», 2003, том 1. СПб, 2003, с. 16–37.
11. Chubey M.S., L.I. Yagudin, V.N. L'vov et al. Solving of the ACH problem in the project “Interplanetary Solar Stereoscopic Observatory” // Proc. Intern. Conf. «ACH-2009», ИПА, 21–25 сент. 2009, с. 203–206.
12. EUCLID Consortium. <http://www.euclid-ec.org/>, <http://sci.esa.int/euclid/>. Доступ 13.01.2016 г.

ORBITAL STELLAR STEREO SCOPIC OBSERVATORY — FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF SCIENTIFIC PROGRAM, COMPARED TO OTHER PROJECTS

**Chubey M.S.¹, Kouprianov V.V.¹, Bakholdin A.V.², L'vov V.N.¹,
Tsekmeister S.D.¹, Markelov S.V.³, Levko G.V.⁴**

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia

²ITMO University, St. Petersburg, Russia

³Special Astrophysical Observatory of RAS, Zelenchuk Region, Karachay-Cherkessia, Russia

⁴Television Research Institute, St. Petersburg, Russia

Orbital Stellar Stereoscopic Observatory (OStSO), currently under development as a stellar version of the Interplanetary Stereoscopic Observatory [1], is equipped with astrographs intended for direct imaging in optical, with a focal length of 30 m, pixel scale of 6.7"/mm, and angular field of view of 40'×40' realized by a CCD mosaic in a 350 mm circle. A 10 μm square pixel is assumed, which corresponds to a 0.069" sky area. The location of centroid of a point source is obtained with the accuracy of $\sigma_1 = \pm 0.0007''$ in a single observation. Multiband photometry is planned, accurate to $|\sigma_f| < 0.05^m$. A telescope suspension and pointing system is proposed that allows one to aim the telescope at an arbitrary point of the celestial sphere. The system is capable of making all kinds of observations that are possible with classical astrographs. Taking into account these capabilities, a program for fundamental and applied research is planned involving the classical fields of astronomy and the asteroid and comet hazard problem. OStSO is compared to the EUCLID and Gaia projects.

СОЗДАНИЕ БАЗЫ НАБЛЮДЕНИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЗВЕЗД ЛУНОЙ

Чуркин К.О., Нефедьев Ю.А.

*Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта
Казанского федерального университета, Россия*

В работе рассмотрены вопросы создания базы фотоэлектрических покрытий звезд Луной, методы анализ базы наблюдений покрытий и использования их для исследования современных каталогов звездных положений. Создана база фотоэлектрических покрытий с 1960 по 2003 гг. Разработанный в настоящей работе метод редукации покрытий позволяет определять динамические параметры современных звездных каталогов.

Введение

В последнее время достигнуты большие успехи в создании инерциальной системы координат. В свое время также были обозначены перспективы исследования нашего естественного спутника [3]. На основе наземных и космических наблюдений получены каталоги звездных положений и собственных движений, в том числе и каталог 118218 звезд Hipparcos [1]. Классический подход предполагает исследование ориентации космической системы координат каталога Hipparcos относительно динамической производилось по результатам наблюдений 48 малых планет с астрометрического спутника HIPPARCOS. Нами предлагается альтернативный метод анализа всего спектра звездных каталогов, основанный на редукации фотоэлектрических покрытий звезд Луной, выполненных с 1960 г. до настоящего времени. Также следует отметить, что применение в данном анализе более совершенных карт краевой зоны Луны при редукации наблюдений позволит получить более надежные результаты сравнительно с зарубежными аналогами при прочих равных условиях. Данная работа посвящена созданию мировой электронной базы фотоэлектрических покрытий звезд Луной.

Кратко историю создания мировой базы наблюдений покрытий можно представить следующим образом. Еще E.W.Brown (1927) и D.V.Brower подчеркивали важность наблюдений покрытий звезд Луною для определения изменений в скорости вращения Земли и для улучшения фундаментальных постоянных в лунной теории. Они содействовали началу кампании, которая привела к координации, систематической регистрации и обработке наблюдений покрытий звезд Луной, полученных большим числом наблюдателей. Nautical Almanac согласился взять ответственность за централизацию сбора и обработки наблюдений покрытий, начатых с 1943 года. Все наблюдения покрытий были опубликованы в различных астрономических журналах, но большинство их осталось не опубликованными, они посылались в соответствующий офис и больше никуда. Проведя очень большую работу, Л. Моррисон составил “Catalogue of observations of occultations of stars by the Moon for the years 1943 to 1971” [5]. Результаты наблюдений были перенесены с магнитных лент на микрофиши. Описание каталога дано в работе Моррисона [4]. Нами было принято решение расширить эту базу данных наблюдений покрытий на последующие годы по структуре представленной в них данных информационно минимально отличалась бы от базы наблюдений, редуцированной Моррисоном [4, 5].

База фотоэлектрических покрытий звезд Луной

Только порядка 6% всех наблюдений сделаны с использованием фотоэлектрического оборудования, с помощью которого время покрытия фиксируется с точностью

0.001s. Этим наблюдениям при редукциях покрытий придавался вес больший, чем в случае визуальных наблюдений покрытий, но только в небольшой степени, так как основной вклад в ошибки редукций покрытий вносят ошибочные положения в звездных каталогах и особенно поправки за неровности краевой зоны Луны. Тем не менее, фотоэлектрические наблюдения избавлены от ошибок, связанных с наблюдателем и неточности фиксации самого момента покрытия.



Рисунок 1. Распределение по годам фотоэлектрических покрытий с 1960 по 2001 гг.

На рис. 1 приводится график распределения количества фотоэлектрических наблюдений покрытий звезд Луной в зависимости от годов. Как видно, количество наблюдений, выполненных с использованием фотоэлектрической регистрации, непрерывно возрастало и только в 2001 году стало уменьшаться [8]. Но, тем не менее, имеющегося их количества и распределения покрытий по годам вполне достаточно для анализа динамических параметров звездных каталогов, особенно это важно для исследования точности собственных движений звезд. В итоге, в нашем банке данных оказалось 22626 таких наблюдений.

Метод анализа каталогов звездных положений

Был разработан метод редукции фотоэлектрических наблюдений покрытий звезд Луной с целью исследования современных звездных каталогов. На первом этапе проводится идентификация звезд исследуемого каталога, используемого для описания покрытия. Как известно, при описании наблюдений покрытий только в последние годы стали использоваться номера каталогов HIPPARCOS, USNO и др., до этого практически всегда покрываемая звезда характеризовалась номером звездного каталога SAOC [6]. Поэтому идентификация состояла из нескольких этапов. Вначале номер SAOC сопоставлялся с номером каталога PPM. Затем мы использовали построенный нами общий каталог на основе каталогов PPM и HIPPARCOS для нахождения номера покрываемой звезды в системе звездного каталога HIPPARCOS. Такие же действия возможны для исследования и других каталогов. Далее осуществляется определение видимых координат звезд. Экваториальные координаты покрываемых звезд и их собственные движения выбирались из электронной версии каталога HIPPARCOS по определенному номеру и приводились на видимые места на момент покрытия согласно известным формулам. Обозначим вычисленные видимые координаты как α_{*v}, δ_{*v} ; Далее следует

определение прямоугольных координат эфемеридного центра масс Луны. По эфемериде определялись прямоугольные координаты, определенные геоэкватором и равноденствием стандартной эпохи J 2000 и их изменения для этой эпохи, далее эти данные переводились на эпоху звездного каталога. Затем в прямоугольной эклиптической системе находились координаты наблюдателя и направления на покрываемые звезды на момент покрытия t и эклиптические прямоугольные координаты Луны на момент $t - \Delta t$, чтобы вычислить расстояние между центром Луны и точкой лимба, в которой произошло покрытие звезды с точки зрения земного наблюдателя. Следующим этапом является вычисление топоцентрических оптических либраций Луны с учетом влияния физической либрации Луны l'' , b'' , C'' . Далее по значениям гайновских координат P,D производится выборка с помощью компьютера высот Δh с карт краевой зоны Луны «Казань» [7]. Для более точного определения поправок за неровности лунного края необходимо производить моделирование явления покрытия с учетом особенностей физической поверхности в области покрытия. Вычисление величины (O - C) [наблюденное - вычисленное] с учетом поправок за неровности карт краевой зоны Луны проводилось по следующим формулам:

$$\begin{aligned} (\Delta\alpha_{O-C} \cos \delta)'_v &= (R_o - R_c) \sin \theta'_*, \\ (\Delta\delta_{O-C})'_v &= (R_o - R_c) \cos \theta'_*. \end{aligned} \quad (1)$$

Один из методов определения ориентации системы координат звездного каталога – модифицированный метод Моррисона [4]:

$$\Delta\sigma = \sum_{k=1}^N \frac{\partial\sigma}{\partial Q_k} \Delta Q_k, \quad (2)$$

где σ – угловое расстояние от звезды до эфемеридного центра масс Луны на момент покрытия, $\Delta\sigma$ – это $(O - C)_\sigma$ (наблюденный радиус-вектор точки покрытия минус вычисленный), $\frac{\partial\sigma}{\partial Q_k}$ – известные коэффициенты уравнения поправок, ΔQ_k – искомые

поправки к приближенным известным значениям определяемых параметров Q_k , N – число этих параметров. В настоящее время лунные и планетные эфемериды имеют высокую точность, и положения звезд определены с точностью миллисекунды в каталоге HIPPARCOS, по этой причине число параметров в уравнении (2) может быть минимизировано. В первом приближении положим в уравнениях (2) $N = 3$, чтобы найти только некоторые параметры теории движения Луны, положение нуля-пункта прямых восхождений каталога HIPPARCOS, наклон экватора к эклиптике, поправки к системе координат карт краевой зоны Луны и поправку к положению экватора системы каталога HIPPARCOS.

Для этих предположений уравнения поправок (2) будут иметь следующий вид:

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial\lambda} \Delta\lambda + \frac{\partial\sigma}{\partial\alpha_0} \Delta\alpha_0 + \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta\lambda &= \Delta w_1^0; \\
 \Delta\alpha_0 &= (\Delta A + \Delta\alpha_S \sin \alpha_{cat} + \Delta\alpha_C \cos \alpha_{cat}) \\
 &\quad - (\Delta R_0 + \Delta R_{1C} \cos \theta_*' + \Delta R_{2S} \sin 2\theta_*' + \Delta R_{2C} \cos 2\theta_*'); \\
 \Delta\varepsilon &= \Delta\varepsilon_0,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

w_1^0 – постоянный член средней долготы Луны, $(\Delta A + \Delta\alpha_S \sin \alpha_{cat} + \Delta\alpha_C \cos \alpha_{cat})$ – постоянная поправка к равноденствию каталога и переменные, зависящие от $\sin \alpha_{cat}$ и $\cos \alpha_{cat}$ поправки в прямом восхождении каталога; $(\Delta R_0 + \Delta R_{1C} \cos \theta_*' + \Delta R_{2S} \sin 2\theta_*' + \Delta R_{2C} \cos 2\theta_*')$ – постоянная и переменные поправки к системе координат карт краевой зоны Луны, ε_0 – постоянный член наклона экватора к эклиптике, $\Delta\alpha_S$ – систематическая поправка в прямом восхождении каталога HIPPARCOS, меняющаяся как $\cos \alpha$; ΔR_{1C} – широтный компонент сдвига начала системы координат поверхности отсчета неровностей лунного края карт краевой зоны Луны; ΔR_{2S} – долготный компонент поправки эллиптичности сдвига начала координат поверхности отсчета неровностей лунного края карт краевой зоны Луны; ΔR_{2C} – широтный компонент поправки эллиптичности поверхности отсчета начала координат поверхности отсчета неровностей лунного края карт краевой зоны Луны.

Решение системы уравнений (3) находится методом наименьших квадратов посредством итераций, то есть вначале определяются приближенные поправки, затем после их учета находятся другие требуемые величины и т.д. Однако в данном методе предусмотрена точная привязка к системе данных карт Уоттса, поэтому мы решили для нахождения ориентации звездных каталогов использовать другой метод.

Если X, Y, Z – оси динамической системы координат и $X_{cat}, Y_{cat}, Z_{cat}$ – оси системы координат исследуемого каталога, ED – экватор динамической системы координат, EC – экватор каталога и соответственно ECD – эклиптика динамической системы и ECC – эклиптика каталога, ΔA – поправка к нуль-пункту каталога по прямому восхождению, ΔL – поправка долготы Солнца, $\Delta\varepsilon$ – поправка наклона эклиптики к экватору, A – направление на нуль-пункт каталога.

Зададим ориентацию осей системы координат каталога $X_{cat}, Y_{cat}, Z_{cat}$ относительно динамической системы координат углами поворота $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ вокруг осей X, Y, Z динамической системы, согласно обозначениям, приведенным в работе [2].

Тогда для поправок $\Delta\alpha_{O-C} = \alpha_{cat} - \alpha_{dyn}$, $\Delta\delta_{O-C} = \delta_{cat} - \delta_{dyn}$ мы будем иметь уравнения справедливые для малых углов поворотов:

$$\begin{aligned}
 \Delta\alpha_{O-C} \cos \delta &= \sin \delta \cos \alpha \epsilon_x + \sin \delta \sin \alpha \epsilon_y - \cos \delta \epsilon_z, \\
 \Delta\delta_{O-C} &= -\sin \alpha \epsilon_x + \cos \alpha \epsilon_y.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Углы поворота $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ связаны с поправками в Эйлеровы углы поворота соотношениями [2]:

$$\epsilon_x = -\Delta\varepsilon, \epsilon_y = \Delta L \sin \varepsilon, \epsilon_z = \Delta A - \Delta L \cos \varepsilon,
 \tag{6}$$

При классической схеме определения ориентации каталога, связанной с углами Эйлера, и учитывая, что ΔD аддитивная поправка к нуль-пункту каталога по склонению, для $\Delta\alpha_{O-C}$ и $\Delta\delta_{O-C}$ можно записать, подставляя (6) в (5) [2]:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{O-C} &= -\Delta A + \Delta L \cos \varepsilon (1 + \tan \varepsilon \tan \delta \sin \alpha) - \Delta \varepsilon \tan \delta \cos \alpha, \\ \Delta\delta_{O-C} &= -\Delta D + \Delta L \sin \varepsilon \cos \alpha + \Delta \varepsilon \sin \alpha.\end{aligned}\quad (7)$$

Выражения (7) представляют собой уравнения поправок для определения $\Delta A, \Delta L, \Delta D, \Delta \varepsilon$ ориентации каталога.

Скорости изменения углов $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ определяются формулами:

$$w_x = -\Delta\dot{\varepsilon}, w_y = \Delta\dot{L} \sin \varepsilon, w_z = \Delta\dot{A} - \Delta\dot{L} \cos \varepsilon, \quad (8)$$

где точки обозначают производные соответствующих величин по времени.

Выражения для углов поворота $\epsilon_{xt}, \epsilon_{yt}, \epsilon_{zt}$ в зависимости от времени будут иметь вид:

$$\epsilon_{xt} = \epsilon_x + w_x(t - t_0), \epsilon_{yt} = \epsilon_y + w_y(t - t_0), \epsilon_{zt} = \epsilon_z + w_z(t - t_0). \quad (9)$$

В результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{O-C} &= -(\Delta A + \Delta\dot{A}(t - t_0)) \\ &+ (\Delta L + \Delta\dot{L}(t - t_0)) \cos \varepsilon (1 + \tan \varepsilon \tan \delta \sin \alpha) - (\Delta \varepsilon + \Delta\dot{\varepsilon}(t - t_0)) \tan \delta \cos \alpha, \\ \Delta\delta_{O-C} &= -\Delta D + (\Delta L + \Delta\dot{L}(t - t_0)) \sin \varepsilon \cos \alpha \\ &+ (\Delta \varepsilon + \Delta\dot{\varepsilon}(t - t_0)) \sin \alpha.\end{aligned}\quad (10)$$

Учитывая, что по сути $(\alpha_{cat} - \alpha_{dyn})$ и $(\delta_{cat} - \delta_{dyn})$ есть $(\Delta\alpha_{O-C} \cos \delta)'_m$ и $(\Delta\delta_{O-C})'_m$, в итоге получаем систему 2n уравнений поправок. Произведя оценку неизвестных методом наименьших квадратов, получаем искомые параметры ориентации системы координат каталога относительно динамической системы координат. Данный метод может быть использован для анализа любого современного каталога при условии, что покрываемые лунной звезды будут идентифицированы со звездами в этом исследуемом каталоге.

Заключение

Кратко результаты настоящей работы можно представить как выполнение следующих взаимосвязанных задач:

- построение и редуцирование электронной базы фотоэлектрических наблюдений покрытий звезд Луной;
- проведение идентификации покрываемых звезд;
- создание точного метода и применение его на практике для точного учета поправок из-за неровности лунного края;
- разработка нового метода определения на основе наблюдений покрытий динамических параметров ориентации системы координат современных звездных каталогов.

Литература

1. Bange, I.F., Bec-Borsenberger, A. Determination of the masses of minor planets // In: Hipparcos, Venice'97 (Presentation of the Hipparcos and Tycho Catalogues). 1997. P. 169–172.

2. *Batnikov, Yu.V., Chernetenko, Yu.A., Gorel, G.K., Gudkova, L.A.* Hipparcos catalogue orientation as obtained from observations of minor planets // AA. 1999, No. 352. P. 703–711.
3. *Galimov, E.M., Polishchuk, G.M., Sevastianov, N.N.* Objectives and Facilities of Lunar Exploration by Russia // 8th ILEWG Conference on Exploration and Utilization of the Moon, 23-27 July 2006, Beijing, China. 2006. P. 15–16.
4. *Morrison, L.V., Appleby, G.M.* Analysis of lunar occultations // Monthly Notices. 1981, No. 196. P. 1005–1012.
5. *Morrison L.V.* Catalogue of observations of occultations of stars by the Moon 1943–1971 // Roy. Greenwich Obs. Bull. 1978, No. 183, P. 1–14.
6. *Nefedyev, Yu.A., Nefedjeva, A.I., Rizvanov, N.G.* Method of determination of the orientation of a space system of coordinates on the basis lunar occultations // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2003. 22(4–5). P. 633–637.
7. *Nefedyev, Yu.A., Rizvanov N.G.* The results of an accurate analysis of EAO charts of the Moon marginal zone constructed on the basis of lunar occultations // Astronomische Nachrichten. 2002. AN 323. P. 135–138.
8. *Nefedyev, Yu., Varaksina, N., Kutlenkov, M. and Churkin, K.* The building of the occultation observations base // European Planetary Science Congress 2011, EPSC-DPS Joint Meeting, La Cite Internationale des Congres Nantes Metropole, 03–07 October 2011, Nantes, France. 2011. Vol. 6. P. EPSC-DPS2011-135.

CREATE DATABASE OBSERVING PHOTOELECTRIC OCCULTATION

Churkin K.O., Nefedyev Y.A.

Engelhardt astronomical observatory Kazan Federal University, Russia

The paper deals with the creation of photoelectric database occultation, methods of analysis of observations base occultation and their use for the study of modern star catalogs. A database of photoelectric occultation from 1960 to 2003 years was made. In this paper described method reduction of the photoelectric occultation allows to determine the dynamic parameters of the modern star catalogs.

Секция 2

**ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ
И ГЕОДИНАМИКА**

ГЕОДИНАМИКА БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И РУССКОЙ ПЛИТЫ ПО ГНСС-ДАНЫМ

Горшков В.Л.^{1,2}, Мохнаткин А.В.¹, Петров С.Д.², Щербакова Н.В.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Ежесуточные наблюдения за период с 1993 по 2015 год на сотне перманентных ГНСС-станций Балтийского щита (БЩ) и Русской плиты (РП) были обработаны с помощью пакета GIPSY 6.3 (JPL) в системе ITRF2008 с использованием стратегии PPP. Учтены все стандартные редукции, в том числе, все нагрузочные поправки [6]. По скоростям этих станций в предположении кинематической независимости геологических структур РП и БЩ оценены угловые скорости твердотельного вращения соответствующих литосферных блоков. Их координаты полюса Эйлера и угловая скорость вращения составили соответственно:

$\Phi_{\text{БЩ}} = 59.71 \pm 0.18$ с.ш., $\Lambda_{\text{БЩ}} = 108.51 \pm 2.37$ з.д., $\Omega_{\text{БЩ}} = 0.258 \pm 0.002$ град/млн. лет и $\Phi_{\text{РП}} = 49.48 \pm 0.13$ с.ш., $\Lambda_{\text{РП}} = 102.30 \pm 0.58$ з.д., $\Omega_{\text{РП}} = 0.233 \pm 0.001$ град/млн. лет.

Введение

Средства космической геодезии совместно с данными сейсмологии и геологии дают возможность с высокой точностью осуществлять прямые измерения современных движений литосферных плит и деформаций на их границах. Плотные ГНСС-сети позволяют строить адекватные геодинамические модели, в том числе выделять все более мелкие структуры в литосферных плитах.

Евразийская плита (ЕА) состоит из многочисленных платформ и щитов разного геологического возраста. Взаимодействию таких структур на северо-западе ЕА плиты, кристаллического Балтийского щита и осадочной Русской плиты Восточно-Европейской платформы, посвящено данное исследование. Граница этих геологических структур проходит по югу Финского залива, Ладожского и Онежского озёр и далее по Белому морю. Эта граница отмечена геофлексурой Полканова, одной из наиболее активных тектонических структур в современной Фенноскандии, являющейся главным элементом зоны сочленения Фенноскандинавского щита с Русской плитой [3]. Современное отражение флексуры в характере контакта между докембрийским кристаллическим фундаментом и платформенным чехлом определяется ступенеобразной формой рельефа, отражённой, в частности, в Балтийско-Ладожском уступе.

По мере расширения сетей сейсмических и ГНСС-станций, в том числе в рамках международных проектов BSL и BIFROST, геодинамика региона постоянно уточняется [4, 5]. В последние годы количество перманентных станций в регионе БЩ возросло почти в два раза, а на РП – многократно. Однако их продолжительность наблюдений пока недостаточна для геодинамических оценок. В данной работе, продолжающей наши предыдущие исследования [1], для этих целей были привлечены дополнительные станции с продолжительностью наблюдений более трёх лет.

Метод

На основе метода совместного оценивания компонент угловой скорости и деформаций литосферного блока в работе [1] исследована геодинамика взаимодействия Балтийского щита и Русской плиты.

Предполагая твердотельное вращение геотектонического блока, можно отделить решение для элементов тензора деформации (D) от общего для всех вычисляемых точек решения для компонент угловой скорости (Ω), т.е. представить матрицу градиента поля скоростей L в виде $L = \Omega + D$. Тогда для исследуемой области можно записать:

$$\Delta V = L\Delta X, \quad (1)$$

где $\Delta V_{3(n-1)}$ — матрица разностей проекций на оси геоцентрической системы координат измеренных горизонтальных скоростей i -ой станцией со всеми прочими $(n-1)$ станциями, а $\Delta X_{3(n-1)}$ — матрица разностей соответствующих координат.

В силу недостаточной плотности и неоднородности распределения станций в исследуемом регионе в настоящее время от определения деформаций пришлось отказаться ввиду неустойчивости решения для твердотельного вращения блоков. Таким образом, уравнение (1) переписывается в виде:

$$\Delta V = \Omega\Delta X. \quad (2)$$

Таким образом, для нахождения компонент угловых скоростей отдельно для каждой станции из сети n станций необходимо решать избыточную систему:

$$\Delta v' = A'\Omega' + \varepsilon', \quad (3)$$

где $\Delta v'_{1 \times 3(n-1)} = (\Delta v_{1x}, \Delta v_{1y}, \Delta v_{1z}, \dots)$, $\Omega'_{1 \times 3} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ — искомый вектор компонент угловых скоростей для i -ой станции, $\Delta \varepsilon'_{1 \times 3(n-1)}$ — вектор случайных невязок с нулевым матожиданием, обусловленный ошибками Δv , а $A'_{3(n-1) \times 3}$ — матрица, состоящая из разностей координат:

$$A'_{3(n-1) \times 3} = \begin{pmatrix} 0 & \Delta z_1 & -y_1 \\ -z_1 & 0 & \Delta x_1 \\ \Delta y_1 & -\Delta x_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}.$$

Составим нормальную систему из элементов уравнения (3) для всех исследуемых n станций

$$\Delta v = A\Omega + \varepsilon, \quad (4)$$

где $\Delta v'_{3(n-1)n \times 1} = (\Delta v'_{(1)}, \Delta v'_{(2)}, \dots, \Delta v'_{(n)})$, $\Omega'_{1 \times 3} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$, $\Delta \varepsilon'_{3(n-1)n \times 1} = (\varepsilon'_{(1)}, \dots, \varepsilon'_{(n)})$,

$$A_{3(n-1)n \times 3} = \begin{pmatrix} A'_{(1)1,1} & A'_{(1)1,2} & A'_{(1)1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A'_{(n)3n(n-1),1} & A'_{(n)3n(n-1),2} & A'_{(n)3n(n-1),3} \end{pmatrix}.$$

В качестве весовой матрицы используем обратную ковариационную матрицу $W = C^{-1}$, где $C_{3(n-1)n \times 3(n-1)n}$. Она имеет диагональный вид в предположении о независимости компонент скоростей различных станций, т. е. при условии отсутствия систематических ошибок наблюдений и полноте принятой модели данных:

$$C_{ii}^{-1} = \text{diag}(\sigma_{\Delta v_{1x}}^{-2}, \sigma_{\Delta v_{1y}}^{-2}, \sigma_{\Delta v_{1z}}^{-2}, \sigma_{\Delta v_{2x}}^{-2}, \dots)$$

Ошибками систематического характера могут быть, например, смещения, обусловленные послеледниковым поднятием региона Балтийского щита. Однако из работы [7] следует, что их влияние на определение угловой скорости ЕА плиты по горизонтальным компонентам скоростей станций несущественно.

Теперь в соответствии с МНК оценка вектора-столбца Ω , общего для всех точек региона в силу предположения о твердотельном вращении блока $\hat{\Omega} = (A^T W A)^{-1} A^T W v$. Со-ответствующая $\hat{\Omega}$ апостериорная ковариационная матрица имеет на диагонали дисперсии соответствующих компонент $D_{\Omega} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T W A)^{-1}$. Здесь несмещённая оценка еди-

ницы веса $\hat{\sigma}_0^2 = (3n(n-1)-3)^{-1}(v-A\Omega)^T W(v-A\Omega)$, а $3n(n-1)-3$ – количество степеней свободы.

Данные

В качестве исходного материала для исследования использованы все доступные наблюдения с продолжительностью не менее 3 лет на ГНСС-станциях из национальных служб России, Норвегии, Швеции, Финляндии, Эстонии, Латвии, Литвы, Польши и Украины. Для уплотнения сети использованы несколько российских станций с продолжительностью наблюдений около трёх лет, данные которых любезно предоставлены Комитетом по градостроительству и архитектуре СПб и компанией НАВГЕОКОМ. Всего на Балтийском щите (БЩ) использовано 34 станции и 67 – на Русской плите (РП). Не использовались станции, расположенные на Украинском кристаллическом щите, вклинивающемся на юго-западе в Русскую плиту. В 18 пунктах расположено более чем по одной станции, что дало возможность оценить верхний предел ошибок скоростей станций.

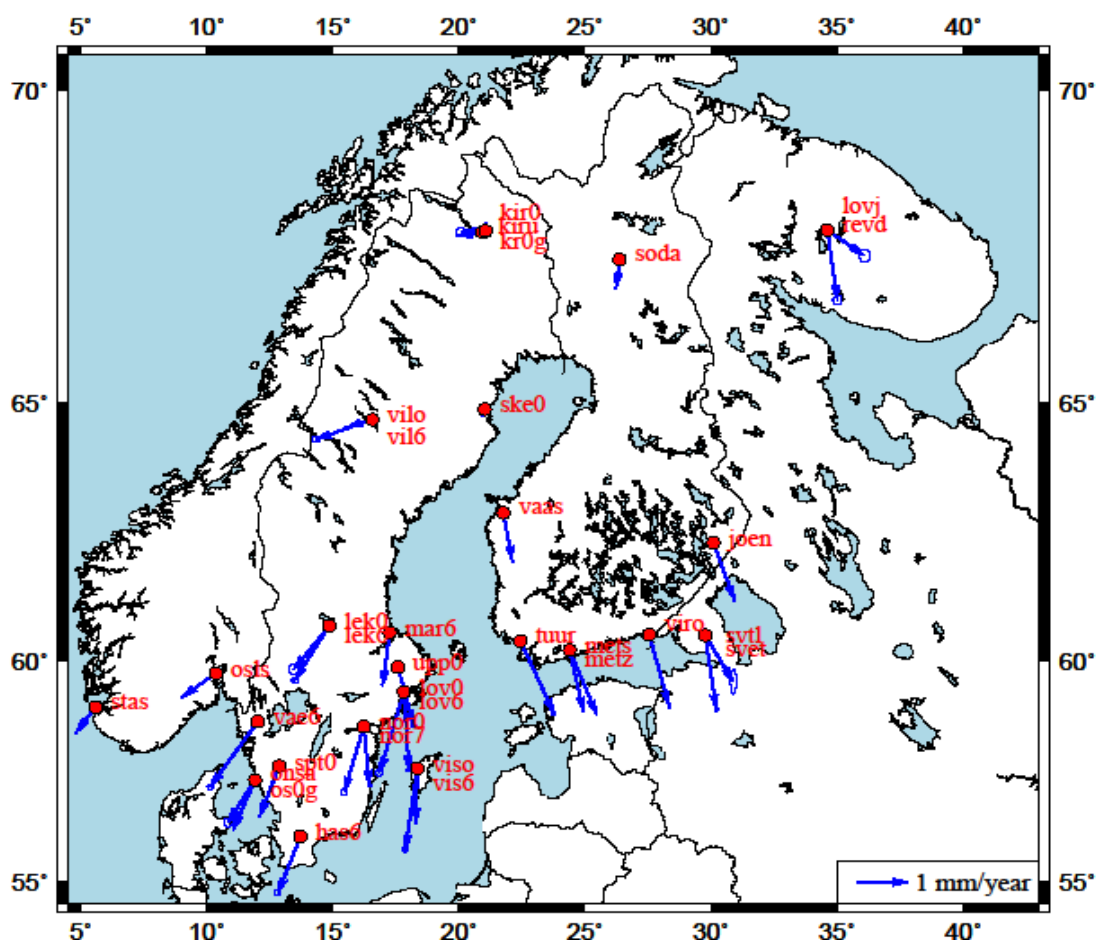


Рис. 1. Вектора остаточных скоростей ГНСС-станций на Балтийском щите.

Для обработки использовано ПО Gipsy 6.3 (JPL), стратегия обработки PPP (Precise Point Positioning). Использовались следующие редукции:

- абсолютная калибровка антенн,
- финальные поправки часов и орбиты (IGS08, <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/>),
- параметры вращения Земли (IERS_C04, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>),
- модель тропосферы (VMF1, <http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1/GRID/>),

- океанические приливные нагрузки (GOT48, <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>), твердотельные приливы, в том числе, полюсной прилив,
- атмосферные, гидрологические и неприливные нагрузки ([6], <http://massloading.net/>)

Были учтены все смещения в рядах положений из-за смены антенн и других причин. Смещение учитывалось в случае, если при его использовании дисперсия ряда значимо ($p = 0.99$) улучшалась по критерию Фишера. Также были удалены некачественные наблюдения и статистически значимые выбросы. По рядам положений оценены скорости станций и их ошибки с учётом типа шумовой составляющей (как правило, фликкершум). На рис. 1, 2 представлены вектора скоростей станций после редукции за вращение ЕА плиты [7].

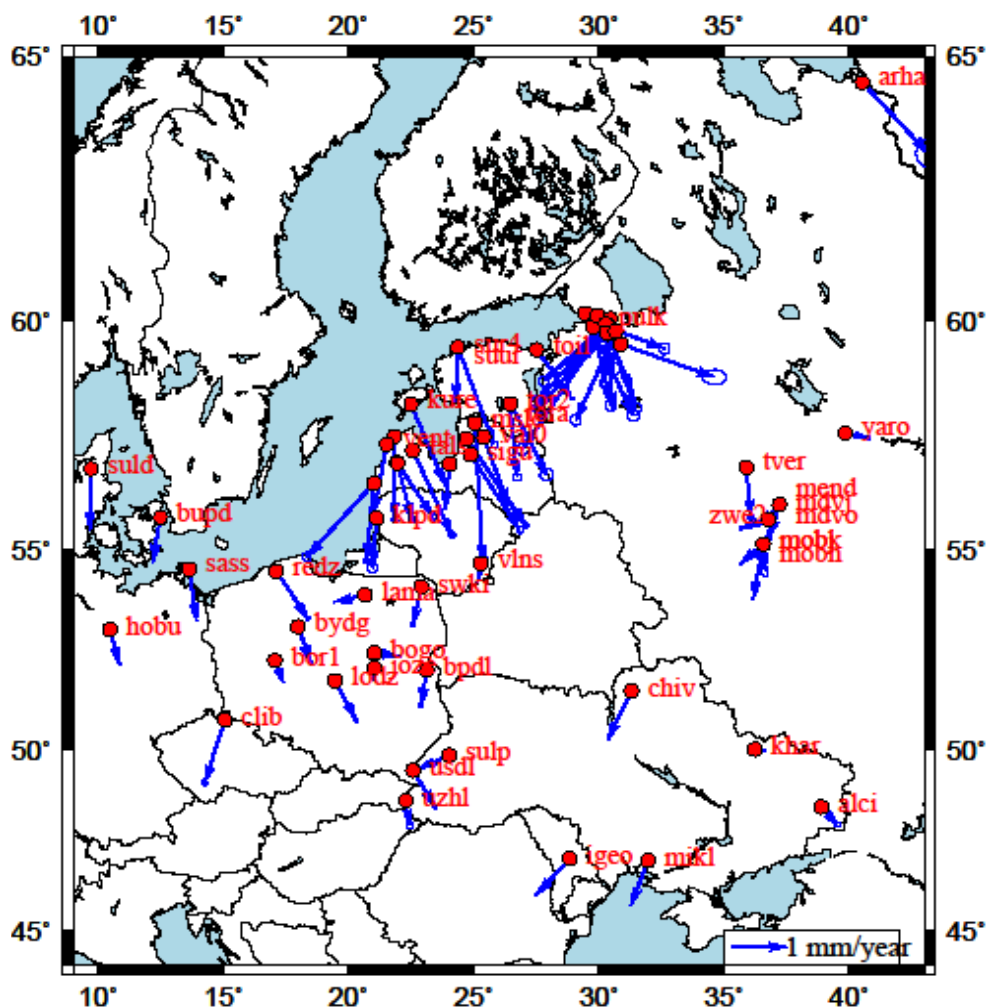


Рис. 2. Вектора остаточных скоростей ГНСС-станций на Русской плите.

Результаты

Из рисунков видно, что разброс направлений векторов скоростей станций с несколькими приборами существенно превышает эллипсы их формальных ошибок и близок к 1 мм/год. Величину этой неформальной ошибки подтверждает также наше расширенное исследование по всем станциям с множественными приёмниками [2]. Особенно это характерно для станций расположенных внутри и вблизи мегаполиса СПб. Эти же станции имеют и наиболее короткую историю наблюдений.

Ввиду этого в табл. 1 приведены оценки компонент угловой скорости для РП с учётом и без учёта этих станций. Приведены также данные по вращению ЕА плиты из работы [7], в которой ни одна из станций БЩ и других станций из данного исследова-

ния с северной широтой более 55 градусов не использовались. Также существенно, что угловая скорость ЕА плиты оценивалась на гораздо более широкой по долготе дуге наиболее устойчивых станций.

Таблица 1. Компоненты угловой скорости исследуемых литосферных блоков

БЛОК	ω -X мсек/год	ω -Y мсек/год	ω -Z мсек/год	Количество Станций
БЩ	-0.148 ± 0.009	-0.442 ± 0.007	0.798 ± 0.008	34
РП	-0.116 0.003	-0.532 0.004	0.637 0.003	67
РП	-0.124 0.004	-0.522 0.005	0.630 0.005	54
ЕА	-0.083 0.008	-0.534 0.007	0.750 0.008	69

В решении использовались ошибки скоростей с учётом фликкер-шумового типа распределения, в среднем составившие около 0.1 мм/год для горизонтальных скоростей станций. Как упоминалось, реальные ошибки скоростей могут быть на порядок больше и, следовательно, приведённые оценки угловой скорости рассматриваемых блоков также имеют более широкие доверительные интервалы. Тем не менее, можно говорить о различии кинематики вращения БЩ и РП. Кроме того заметна близость параметров вращения ЕА плиты и РП.

Общий вывод из проведённого исследования состоит в том, что с ростом числа наземных ГНСС-станций и с увеличением точности оценок их скоростей всё более уверенно определяется обособленность кинематики вращения БЩ относительно РП и, в целом, относительно ЕА плиты, дополняя их геологическую и сейсмическую обособленность. Кроме того, при достаточной плотности и равномерном распределении ГНСС-станций, включение внутренних деформаций литосферных плит в алгоритм их кинематических оценок естественно расширяет возможности построения геодинамической модели движения плит.

Литература

1. Горшков В.Л., Мохнаткин А.В., Смирнов С.С., Петров С.Д., Трофимов Д.А., Щербакова Н.В. 2015. Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС-наблюдений // Вестник Санкт-Петербургского университета, серия 1, Том 2(60), №3, с. 476–485.
2. Горшков В.Л., Н.В. Щербакова. О согласованности скоростей станций с несколькими ГНСС-приёмниками. Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». №3–2015, с. 95-103. <http://geo-science.ru/>
3. Свириденко Л.П. 2008. Геофлексура Полканова и ее роль в геодинамике восточно-европейской платформы. Материалы XIV международной конференции «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными», часть 2. Петрозаводск. С. 171–173.
4. Assinovskaya B., Shchukin J., Gorshkov V., Shcherbakova N. 2011. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region. *Baltica*, 24 (2), 61–70. Vilnius.
5. Lidberg M., J.M. Jonsson, H.-G. Scherneck, G.A. Milne. 2009. Recent results base on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST // *J. Geodyn* (2010), doi:10.1016/j.jog.2009.11.010.
6. Petrov L., Boy J.-P. 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations // *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2003JB002500, Vol. 109, No. B03405, [http://massloading.net./](http://massloading.net/)
7. Altamimi, Z., L. Metivier, X. Collilieux. 2012. ITRF2008 plate motion model // *J. Geophys. Res.*, 117, B07402, doi:10.1029/2011JB008930.

BALTIC SHIELD AND RUSSIAN PLATFORM GEODYNAMICS FROM GNSS-DATA

Gorshkov V.L.^{1,2}, Mokhnatkin A.V.¹, Petrov S.D.², Scherbakova N.V.^{1,2}

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

Daily GNSS-observations of one hundred permanent stations of Baltic Shield (BS) and Russian Platform (RP) for 1993–2015 were processed by PPP strategy of GIPSY 6.3 (JPL) software in ITRF2008. All conventional corrections were applied including loading one [6]. The velocities of these stations were used for estimation of solid-state rotation of these independent geological blocks. The geographical coordinates of Euler pole and angular velocities of these blocks are the next: $\Phi_{BS} = 59.71 \pm 0.18$ N, $\Lambda_{BS} = 108.51 \pm 2.37$ W, $\Omega_{BS} = 0.258 \pm 0.002$ degr/Myear and $\Phi_{RP} = 49.48 \pm 0.13$ N, $\Lambda_{RP} = 102.30 \pm 0.58$ W, $\Omega_{RP} = 0.233 \pm 0.001$ degr/Myear.

О СОГЛАСОВАННОСТИ СКОРОСТЕЙ СТАНЦИЙ С НЕСКОЛЬКИМИ ГНСС-ПРИЁМНИКАМИ

Горшков В.Л., Щербакова Н.В.

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

В региональных геодинимических исследованиях (определение разломных зон, выделение различных структурных элементов в континентальных плитах и их взаимная динамика), где количество станций с продолжительной историей наблюдений невелико, достоверность оценок скоростей отдельных ГНСС-станций становится существенным фактором при анализе результатов. Для определения неформальной ошибки скоростей ГНСС-станций из различных международных сетей были выбраны все станции, компактно расположенные на одной территории (с базами не более 1 км). По сходимости скоростей этих станций определён верхний предел ошибки скорости случайно выбранной ГНСС-станции. Около половины этих станций имеют значимые расхождения хотя бы в одной из компонент вектора скорости, достигающие 1 и более мм/год. Проведён анализ возможных причин таких расхождений.

Введение

Вектора скоростей ГНСС-станций являются исходными данными для геодинимических исследований. Точность и отсутствие систематических ошибок в оценке скоростей этих станций являются гарантией корректных геодинимических выводов. В случае исследований в региональном масштабе, где количество станций с продолжительной историей наблюдений, как правило, невелико, достоверность оценок скоростей ГНСС-станций становится существенным фактором.

Точность оцениваемых скоростей, а, следовательно, и ценность конкретной ГНСС-станции тем больше, чем более продолжительный на ней ряд наблюдений. Согласно [4] оценки скоростей станций (σ) для основных типов распределения ошибок ГНСС-наблюдений пропорциональны $\sigma \propto a / \Delta T$, где a – средняя величина амплитуды шума, ΔT – продолжительность ряда наблюдений в годах.

Помимо продолжительности существенным является однородность ряда наблюдений. Однако разные обстоятельства и, в особенности, технический прогресс в развитии ГНСС-приборов почти повсеместно приводят к эпизодической смене приемников, антенн или их перемонтировке. В большинстве случаев смена антенны приводит к различным, как правило, субсантиметровым смещениям в разных составляющих рядов положений. Существует много способов учесть эти сдвиги положений (особенно если точно известны моменты оперативного вмешательства, например, из log-файлов) и, таким образом, сохранить однородность ряда. Иногда к такому же эффекту приводит и смена приёмника при неизменной антенне, чего, вообще говоря, не должно происходить. И тем более неприемлемым с точки зрения геодинимических исследований является изменение скорости станции при смене приёмника или антенны, что, однако, тоже случается. При этом значимое изменение скорости станции обнаруживается спустя месяцы в процессе постобработки.

Не единичны случаи, когда рядом стоящие приёмники также отличаются динамикой своих положений. Именно выборка таких станций с несколькими одновременно функционирующими или сменяющимися друг друга приёмниками и/или антеннами позволяет произвести оценку верхнего предела ошибки скоростей ГНСС-станций. Наш опыт исследования подобных станций, когда происходили замены оборудования, близкие переносы антенн или одновременное функционирование многих приёмников на одной территории, свидетельствует о весьма существенных в некоторых случаях рас-

хождениях в оцениваемых скоростях [1, 2]. Исследование этой проблемы, т.е. насколько статистически значимо различие скоростей близко расположенных станций, и попытка понять причины этих расхождений, являются целью данной работы.

Данные и метод

Для исследования были использованы данные наблюдений ГНСС-станций, на которых либо одновременно, либо, сменяя друг друга, функционировали близко расположенные приёмники и/или антенны. Часть материала (пятнадцать парных рядов на девяти пунктах) была собрана в виде исходных RINEX-файлов и обработана с помощью пакета GIPSY 6.3 (стратегия PPP, стандартные поправки) и последующей оценки скоростей. Результаты этой части материала были скорректированы за атмосферные и гидрологические нагрузки, взятые из соответствующей международной службы (<http://massloading.net>, [3]) и исправлены за смещения в положениях, вызванные сменой аппаратуры или перемонтировкой антенн в отмеченные в log-файлах моменты (<ftp://garner.ucsd.edu/pub/docs/station-logs/>).

Другая часть взята из сайта JPL <http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>, где ряды положений также вычислялись с помощью пакета GIPSY. Скорости станций, согласно приведённой на сайте методике, основанной на χ^2 -статистике, вычислялись после учёта скачков в рядах положений. Метод не привязан к информации из log-файлов о смене параметров приёмника или антенны и поэтому иногда интерпретирует случайные изменения положений, часто являющиеся случайными выбросами, как скачки. Поэтому скорости этих станций отягощены такого рода методическими ошибками. Кроме того ввиду роботизированной системы обработки в некоторых рядах присутствуют грубые и поэтому легко обнаруживаемые ошибки скоростей. Ряды с такого рода ошибками были частично исключены (6 рядов), а частично скорректированы и по ним заново были вычислены скорости (5 рядов).

Из почти 2.5 тысяч рядов, представленных в этой базе, нами были выбраны все станции, где одновременно, частично пересекаясь, или сменяя друг друга, функционировало несколько близко расположенных (с базами до 1 км) приёмников. Помимо этого имеются станции, где сигнал с одной антенны обрабатывался разными приёмниками, соединёнными через разделитель. Использовались разные марки приёмников и антенн. На некоторых станциях количество изменений в составе приёмник/антенна доходило до 20, но были станции и с постоянным комплектом на протяжении 15 и более лет. Антенны установлены на крышах, мачтах и наземных геодезических столбах.

Использовались ряды продолжительностью не менее трёх лет. Были отбракованы ряды, в которых данные о положении не соответствовали описанию этих же станций из log-файлов. Всего перечисленным выше условиям удовлетворяло 102 парных ряда наблюдений, некоторые из которых пересекались с рядами из первой части материала, что позволило дополнительно оценить сходимость разных подходов в оценке скоростей.

Естественно предположить, что скорости станций, расположенных рядом друг с другом, должны совпадать в пределах ошибок. Поэтому по имеющейся оценке $\sigma_{\Delta V} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ проверялась нулевая гипотеза $\Delta V = |V_1 - V_2| = 0$ на 99% уровне значимости: если $\Delta V > u_{0.99} \sigma_{\Delta V}$, то нулевая гипотеза отвергалась ($u_{0.99} = 2.576$). Здесь $V_1, V_2, \sigma_1, \sigma_2$ – скорости и их ошибки для сравниваемых рядов. Ошибки вычислены с учётом фликкер-шумового типа распределения.

Сравнение скоростей

Сравнение по данным из базы JPL. Всего из 102 пар рядов 39 оказалось со скоростями, значимо различающимися хотя бы в одной компоненте (ΔV_N , ΔV_E , ΔV_H).

Данные разбиты на следующие группы:

- 1) пересекающиеся по времени наблюдения (не менее трёх лет) с несколькими приборами (24 пары из 56),
- 2) наблюдения на последовательно сменяющих друг друга приборах (11 из 20),
- 3) наблюдения на одну антенну разными приёмниками (4 из 26).

В табл. 1 представлены осреднённые по группам и по компонентам скоростей значимые и максимальные их величины.

Таблица 1.

группа	% значимых ΔV	ΔV_N (мм/год)	ΔV_N max	ΔV_E (мм/год)	ΔV_E max	ΔV_H (мм/год)	ΔV_H max
1	43	$0.76 \pm .24$	1.51	$0.98 \pm .29$	2.72	$3.05 \pm .75$	4.53
2	55	$2.13 \pm .49$	3.46	$1.48 \pm .39$	2.73	4.08 ± 1.14	4.08
3	15	$0.52 \pm .12$	0.59	$0.82 \pm .17$	1.51	$1.01 \pm .35$	1.01

Из табл. 1 видно, что процент значимых расхождений скоростей наименьший (15.4%) для одновременно работающих на одной антенне нескольких, иногда меняющих друг друга приёмников (группа 3). Это кажется естественным, что однородность ряда обеспечивается, главным образом, постоянством антенны и слабо зависит от смены приёмника. Однако это не всегда так, как будет показано на материале из другой части данных.

Затем идут пересекающихся по времени наблюдения (группа 1) на близко расположенных комплексах приёмник-антенна (42.9%) и сменяющие друг друга комплексы (группа 2) иногда на той же точке, но чаще на близких марках (55%). Причём в последнем случае разности скоростей значимо больше, чем при одновременных наблюдениях, что свидетельствует о большом вкладе низкочастотных вариаций в положения станций.

Практически это означает, что около половины расположенных в одном месте ГНСС-комплексов имеют значимые расхождения скоростей хотя бы в одной из компонент. Из этого следует, что и в местах одиночного расположения ГНСС-комплексов примерно такова же вероятность появления в горизонтальном векторе скорости ошибки от 1 до 4 мм/год. Использовались самые разные марки приёмников и антенн. На некоторых пунктах марки приёмников и антенн принадлежали различным фирмам-изготовителям. Какой-то уверенной зависимости от марки приёмника и антенны в разностях скоростей не обнаружено. Также нет никакой статистической разницы в установке антенны на крышах или мачтах по сравнению с установкой на наземных, как правило, бетонных или металлических столбах.

Заметим, что величины ошибок в скоростях станций порядка 1–2 мм/год не столь существенны при глобальном уравнивании и оконтуривании континентальных плит, но могут быть критическими при решении задач региональной геодинамики, где на счету каждая станция. Величины менее 1мм/год в разностях скоростей, несмотря на их статистическую значимость в некоторых исследованных рядах, следует признать находящимися за порогом реальных ошибок достигнутого уровня точности ГНСС-средств. Не менее важную роль в этом играет выбор места и качество монтажа антенн.

Сравнение по данным избранных станций. Ряды положений 21 станции, компактно расположенные в девяти местах, были обработаны нами из исходных RINEX-файлов и исправлены за все возможные нагрузочные эффекты. В отличие от предыдущего раздела для тех станций, где наблюдения пересекались по времени, здесь оценки

были сделаны по выборкам исключительно одновременных наблюдений, т.е. исследовались ряды разностей положений станций по каждой координате.

По аналогии с нашей работой [1] были исследованы распределения ошибок наблюдений на выбранных станциях для оценок реальных дисперсий разностей их скоростей. Практически во всех случаях распределение ошибок было близко к фликкер-шуму и, следовательно, оценки дисперсий разностей скоростей станций согласно [4] $\sigma_{\Delta} \cong 0.75A_{\Delta} / T_{\Delta}$. Здесь A_{Δ} – вариации Аллана, T_{Δ} – продолжительность совместных наблюдений на соответствующих ГНСС-станциях в годах. В табл. 2 приведены данные для всех ГНСС-станций этого раздела. Выделены значимые расхождения скоростей.

Таблица 2.

Ст. 1	Ст. 2	T_{Δ}	$\Delta V_N \pm \sigma_{\Delta}$ (мм)	$A_{\Delta N}$ (мм)	$\Delta V_E \pm \sigma_{\Delta}$ (мм)	$A_{\Delta E}$ (мм)	$\Delta V_H \pm \sigma_{\Delta}$ (мм)	$A_{\Delta H}$ (мм)	База (м)
IRKT	IRKM	9.0	0.00 ± .08	0.93	0.04 ± .06	0.70	0.06 ± .26	3.06	0.0
IRKT	IRKJ	9.7	.07 ± .10	1.30	.15 ± .09	1.10	.50 ± .29	3.70	1.2
IRKJ	IRKM	10.3	.11 ± .08	1.06	.11 ± .07	.96	.36 ± .17	2.05	1.2
REVD	LOVJ	3.7	1.87 ± .46	2.29	1.05 ± .26	1.29	2.27 ± 1.32	6.49	14.4
MOBJ	MOBK	4.5	.11 ± .16	.98	.08 ± .11	.65	.05 ± .53	3.18	0.0
MOBN	MOBJ	4.5	.35 ± .27	1.62	.36 ± .20	1.20	.39 ± 1.00	5.79	12.0
MOBK	MOBN	4.5	.17 ± .25	1.47	.51 ± .19	1.14	1.51 ± .92	5.37	12.0
MDVJ	MEND	5.5	.30 ± .17	1.21	.10 ± .15	1.09	3.10 ± .52	3.79	44.3
MDVJ	MDVO	0.0	.22 ± .24	1.59	.30 ± .20	1.30	1.53 ± .66	4.25	874.9
METS	METZ	9.9	.08 ± .07	1.21	.03 ± .06	.79	.17 ± .19	2.55	1.1
SVTL	SVET	5.5	.21 ± .12	85	.56 ± .08	.61	.25 ± .38	2.75	2.1
PULK	PULJ	4.6	.09 ± .28	1.69	.98 ± .20	1.21	.27 ± 1.03	6.29	407.9
PULK	SPTR	3.7	1.16 ± .28	1.36	.83 ± .23	1.15	1.26 ± 1.07	5.24	328.0
TORA	TOR2	0.0	.51 ± .31	1.07	1.11 ± .31	1.03	1.70 ± .89	3.02	0.63
SUUR	SUR4	0.0	.40 ± .23	1.39	.37 ± .21	1.32	.87 ± .57	3.28	250.7

Данные по станциям Иркутска, Обнинска, Менделеева (за исключением MEND) и Метсахови присутствуют и в базе JPL. Только станции MOBN и MOBK присутствуют в обеих оценках статистически значимых разностей, но в разных компонентах скоростей. Последнее может быть обусловлено различными интервалами времени этих оценок – в базе JPL это всё время наблюдения на станции MOBN, а в нашей обработке только последние годы одновременных наблюдений с MOBK.

Процент значимых расхождений скоростей (7 из 15) практически такой же как в предыдущем разделе. Визуализация рядов положений даёт возможность более детального анализа изменений в скоростях станций и их возможных причин при сопоставлении с данными из log-файлов. На рис. 1 и рис. 2 представлены лишь некоторые наиболее характерные варианты для станций, на которых происходили какие-либо изменения в конфигурации.

На рис. 1 приведены результаты по станциям в Менделеево. Видно, что на станции MDVJ смена приёмника привела к существенному изменению скорости станции в широтной компоненте. Но, с другой стороны, смена антенны и её перемещение на 46 метров на близкой станции MEND никак не отразились на результатах сравнения.

В то же время, на станции Тыравера (рис. 2) перемещение антенны на 250 м привело к изменениям скорости во всех компонентах и, плюс к тому, в долготной компоненте возникли серьёзные сезонные вариации. Сходная ситуация имеет место на станции SPTR, где антенна была перемещена на 7 м. Следовательно, простая замена приёмника или перемещения антенны могут привести к изменению скорости станции до

1.5 мм/год, что уверенно обнаруживается спустя год ввиду наличия сезонности в рядах положений.

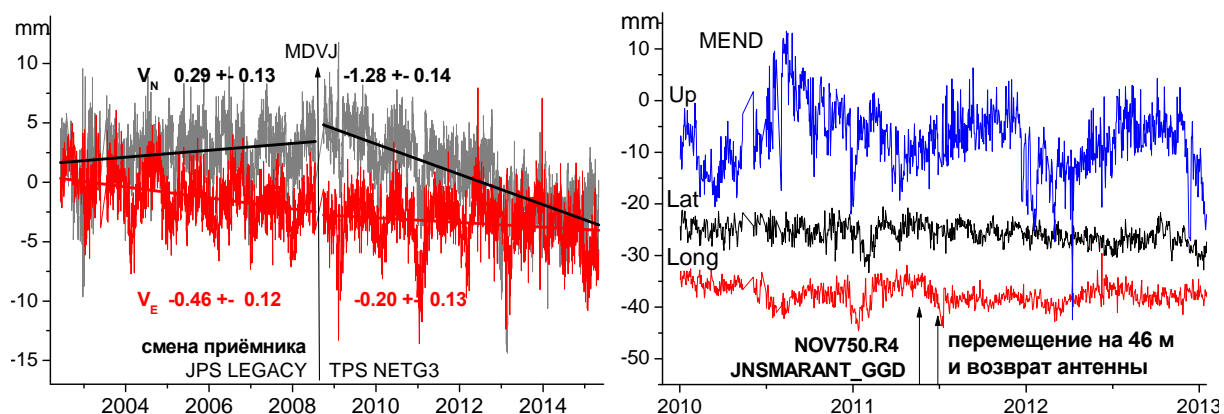


Рис. 1.

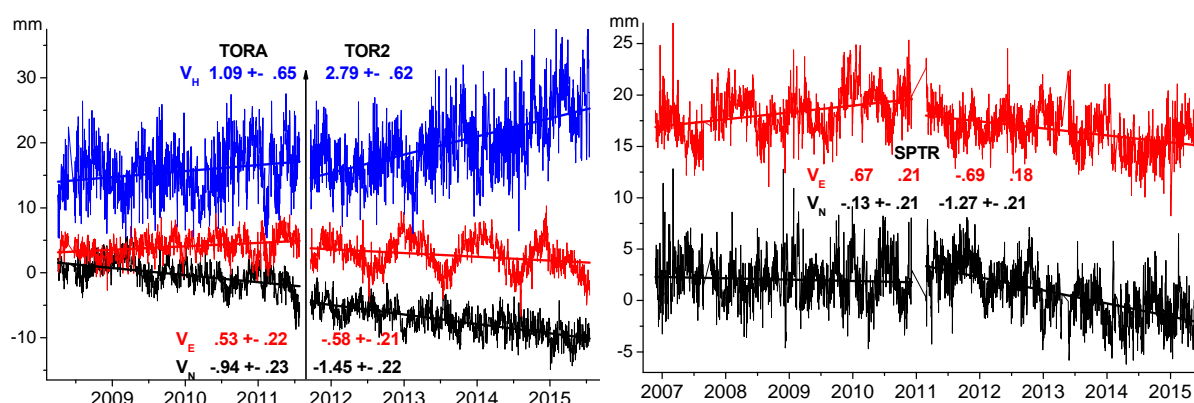


Рис. 2.

Другой пример из разряда потенциально опасных для рассматриваемых оценок – это нередкое наличие сезонных компонент между станциями, расположенными рядом друг с другом. Для примера на рис. 3 приведены разности положений станций METS (с антенной AOAD/M_B) и METZ (ASH701073.1), антенны которых расположены на одной мачте в 1 м друг от друга. Видно наличие сезонной компоненты в вертикальной составляющей с амплитудой около 3 мм. Сходные вариации в разности компонент скоростей присутствуют и на других исследованных станциях.

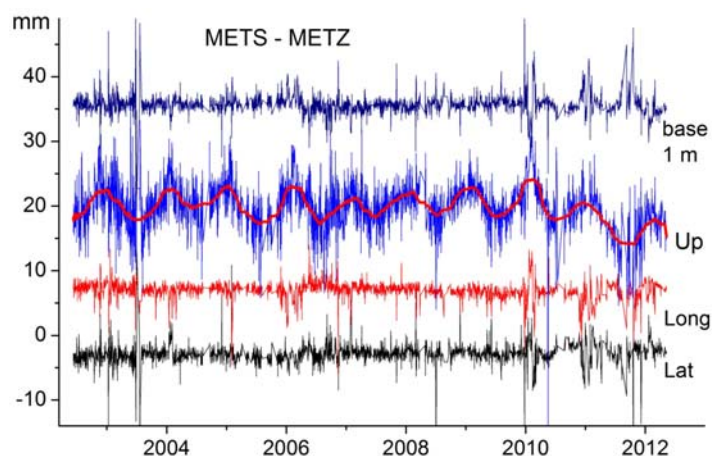


Рис. 3.

Заключение

Исследование ГНСС-наблюдений на пунктах с одновременно работающими или последовательно сменяющимися друг друга приёмниками на глобальной сети станций было предпринято с целью определения статистически значимых различий в скоростях таких станций и, таким образом, оценить верхний предел ошибки скорости на произвольно выбранной ГНСС-станции.

По результатам исследования более сотни пар таких рядов наблюдений вероятность появления в горизонтальном векторе скорости ошибки порядка 1 мм/год составляет около 50%. Иначе говоря, каждая вторая произвольно выбранная ГНСС-станция может иметь такую ошибку в одной из компонент скорости. Максимальные расхождения скоростей по данной выборке станций достигали более 3 мм/год для горизонтальных компонент скоростей и превышали 4 мм/год для вертикальной компоненты. Полученные предельные ошибки в скоростях ГНСС-станций существенны в геодинамических исследованиях особенно регионального характера.

Расположения антенн на крышах, мачтах или на геодезических наземных пунктах не оказывает влияния на результат по данной выборке станций. Также нет зависимости от типа приемников или антенн. Однако по результатам более детального исследования избранных станций в ряде случаев обнаруживается уверенная зависимость изменения скорости от перемещения антенны или даже от смены приёмника при неизменной антенне. Таким образом, в каждом конкретном случае при смене приёмника или антенны или смене места расположения антенны возможны не только смещения в положении станции, которые достаточно уверенно могут быть учтены, но и изменение в её скорости, что более важно в геодинамических исследованиях. При этом существенно, что такое изменение в скорости уверенно обнаруживается спустя год, а то и больше по причине его маскировки сезонными вариациями в положении станции.

Литература

1. Горшков В.Л., Н.В. Щербакова. Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». 2012. №4-2012, с 12–22. <http://geo-science.ru/>.
2. Горшков В.Л., А.В. Мохнаткин, С.Д. Петров, С.С. Смирнов, Д.А. Трофимов, Н.В. Щербакова. Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС-наблюдений // Вестник Санкт-Петербургского университета, 2015. Серия 1, Том 2 (60), Выпуск 3. С. 482–491.
3. Petrov L., 2015. The International Mass Loading Service, <http://arxiv.org/abs/1503.00191>.
4. Williams S.D.P., 2003. The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series // J. Geodesy (2003) 76, 483–494.

ABOUT CONSISTENCY OF STATION VELOCITIES WITH MULTIPLE GNSS-RECEIVERS

V. Gorshkov, N. Shcherbakova

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

In regional geodynamical researches (search of intraplate structure, fault zones) with insufficiency of permanent GNSS-stations, the accuracy of velocity estimation is the most significant parameter for correct geodynamical conclusions. All compactly located GNSS-stations within small area (1 km base) were selected in international GNSS nets for the estimation of informal velocity error. The upper limit of this error for the random selected GNSS-station was assessed by means of comparison of these station velocities. Almost half of these stations have significant discrepancies in some of velocity components achieved 1 and more mm/year. The possible reasons of such velocity outlier are analyzed.

О ВОЗМОЖНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ПОСЛЕДНИЕ 150 ЛЕТ

Зотов Л.В.^{1,2}, Бизуар К.³, Шам С.К.⁴

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

²Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, Москва, Россия

³Парижская обсерватория, SYRTE, Париж, Франция

⁴Школа наук о Земле, Университет штата Огайо, Колумбус, США

С использованием многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) выполнено разложение климатических временных рядов на главные компоненты (ГК) и их сравнение с параметрами ориентации Земли (ПОЗ). Тренды глобального потепления были предварительно исключены. Выявлены схожие 60- и 20-летние периодические составляющие в изменении глобальной температуры на Земле (HadCRUT4) и глобального уровня моря (GMSL). Изменения продолжительности суток (LOD) и амплитуды Чандлеровского движения полюса за последние 150 лет были сопоставлены с климатическими рядами. Скорость вращения Земли хорошо согласуется с 60-летними изменениями глобальной температуры, а огибающая Чандлеровского колебания – с уровнем моря. Представляя эти результаты, мы задаемся вопросом – могут ли эти процессы быть взаимосвязаны?

1. Введение

В последние десятилетия Межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК) опубликованы отчеты по климату [8]. В них содержится большой объем сведений об изменениях температуры на Земле и уровня моря, о таянии ледников, увеличении концентрации парниковых газов и др. Важнейшей задачей МГЭИК является прогнозирование изменений на будущее с использованием глобальных моделей динамики атмосферы и океана. Несмотря на учет большого числа факторов в таких моделях, они плохо воспроизводят так называемые “естественные вариации”, среди которых квази 60-летние и 20-летние колебания температуры (до 0.3°C) и уровня моря (до 30 мм), наблюдающиеся в последние 150 лет. Эти колебания хорошо выделяются [12–14] из рядов средней глобальной температуры (HadCRUT4), уровня моря (GMSL) [4, 9], приповерхностной температуры океана (HadSST) и показаны на рис. 1 после снятия трендов потепления. Причины этих вариаций малопонятны. Так, о 60-летних вариациях температуры говорят как об атлантическом мультидекадном колебании (АМК), затрагивающем Северную Атлантику и влияющем на Арктику и северные континенты. Квази 20-летние вариации характерны для некоторых районов Индийского и Тихого океанов [14]. Для объяснения этих колебаний привлекают естественные моды атмосферы и океана, такие как Эль-Ниньо южное колебание (ЭНЮК, квазипериодичность 2–8 лет), Северо-Атлантическое колебание (NAO), вулканическую деятельность и другие факторы. Вместе с тем, мы предлагаем обратить внимание на сходство этих колебаний с вариациями параметров вращения Земли [18].

2. Используемые данные и методы обработки

Для анализа временных рядов нами использован метод многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА), позволяющий выделять периодические компоненты с меняющимися амплитудами, тренд, шумы и т.п. Эта методика является обобщением метода эмпирических ортогональных функций (EOF) для многомерных временных рядов. Она подробно описана в работах [2, 10] и применялась нами в более ранних исследованиях [18], к которым мы и отсылаем читателей, интересующихся деталями. Метод основан на сингулярном разложении (SVD) блочной траекторной мат-

рицы, получаемой вложением временного ряда в линейное пространство размерности L . Величина лага L является основным параметром метода и подбирается на основе эвристических принципов, изложенных в [10]. Главные компоненты (ГК) многомерного временного ряда реконструируются из сингулярных чисел и соответствующих собственных векторов и представляют собой основные моды его изменчивости. МССА позволяет выделить коррелированное поведение в компонентах ряда.

В качестве исходных данных мы использовали ряд глобальной температуры с 1850 г. (суша + океан) HadCRUT4, полученный в центре Hadley в Великобритании (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Этот ряд во многом определяется температурой над океаном (HadSST). Для уровня моря (SL) мы воспользовались реконструкцией, сделанной в австралийском центре CSIRO (Church & White [4]) с 1880 по 2009 г., и условно названной нами GMSL A, и реконструкцией GMSL B (Jevrejeva et al. [9]) на интервале 1880–2002 с шагом год. Тренды каждого из рядов моделировались полиномом второго порядка, их параметры подбирались методом наименьших квадратов (МНК) и вычитались перед применением МССА. Нас интересовали лишь остаточные колебания. Модель тренда оказывает незначительное влияние на их вид.

Сначала методом МССА мы совместно проанализировали данные по температуре HadCRUT4 и уровню моря GMSL A, считая каждый ряд отдельной компонентой двумерного временного ряда. Затем совместный анализ был выполнен для HadCRUT4 и GMSL B. Параметр L был выбран равным 22 года. В обоих случаях отчетливо разделились квази-60-летняя и 20-летняя компоненты, показанные на рис. 1. Оба колебания присутствуют как в температуре, так и в уровне моря. В реконструкции GMSL B уровень моря демонстрирует большую амплитуду колебаний, чем в GMSL A. Было также выявлено 10-летнее колебание малой амплитуды ($T \sim 0.03^\circ\text{C}$, $SL \sim 3$ мм) [18]. Поскольку оно находится на уровне шумов, здесь мы его не приводим.

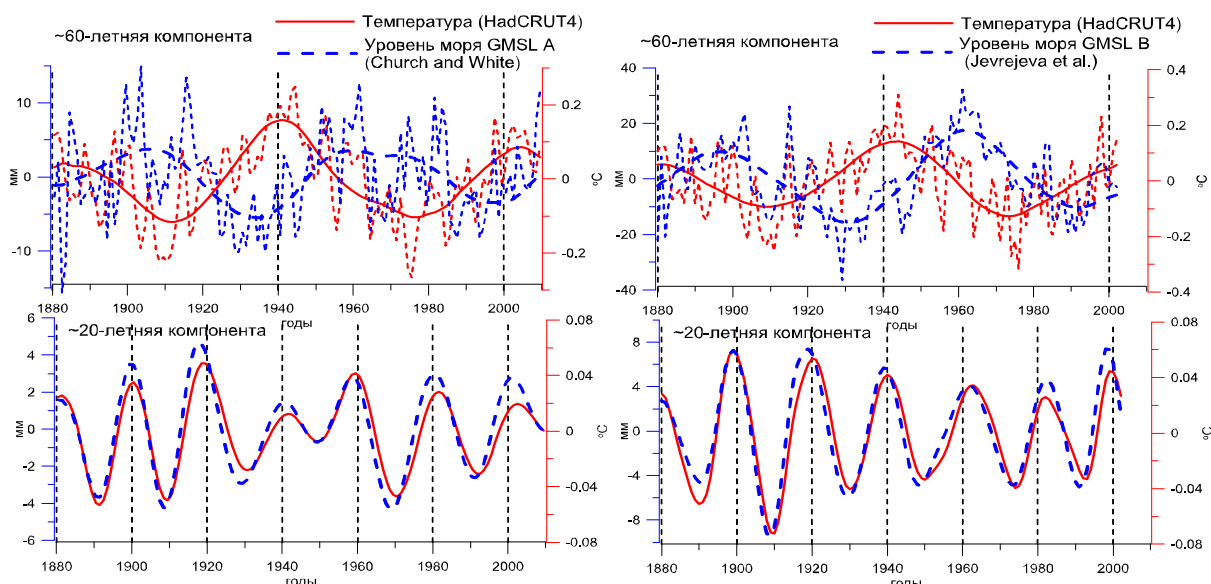


Рис. 1. 60-летние ГК 1 (вверху) и 20-летние ГК 2 (внизу) колебания глобальной температуры на Земле (красным непрерывным) и уровня моря (синим штрихованным), выделенные совместным МССА данных HadCRUT4 и GMSL A (слева) и HadCRUT4 и GMSL B (справа).

Результаты, полученные МССА, подтверждены нелинейным МНК. Период, амплитуда и фаза гармоник подбирались независимо для рядов HadCRUT4, GMSL A и GMSL B и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры квази 60- и 20-летних колебаний в глобальной температуре на Земле HadCRUT4 (слева) и уровне моря в реконструкциях GMSL A (в центре) и GMSL B (справа).

	HadCRUT4		GMSL A		GMSL B	
Период, лет	65	21.3	55.3	20.6	60.7	21.1
амплитуда	0.1°C	0.043°C	4.1 мм	2.1 мм	12.4 мм	5.3 мм
фаза на 1880 г	-16°	-55°	170°	-43°	117°	-67°

Мы воспользовались индексом Северо-Атлантического колебания NAO, который воспроизводит сглаженную разность давлений в Азорском максимуме и Исландском минимуме. Данные взяты с сайта, рекомендованного в работе [16] и проинтегрированы (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-rc-based>). На рис. 3 показана интегральная кривая, хорошо согласующаяся с АМК.

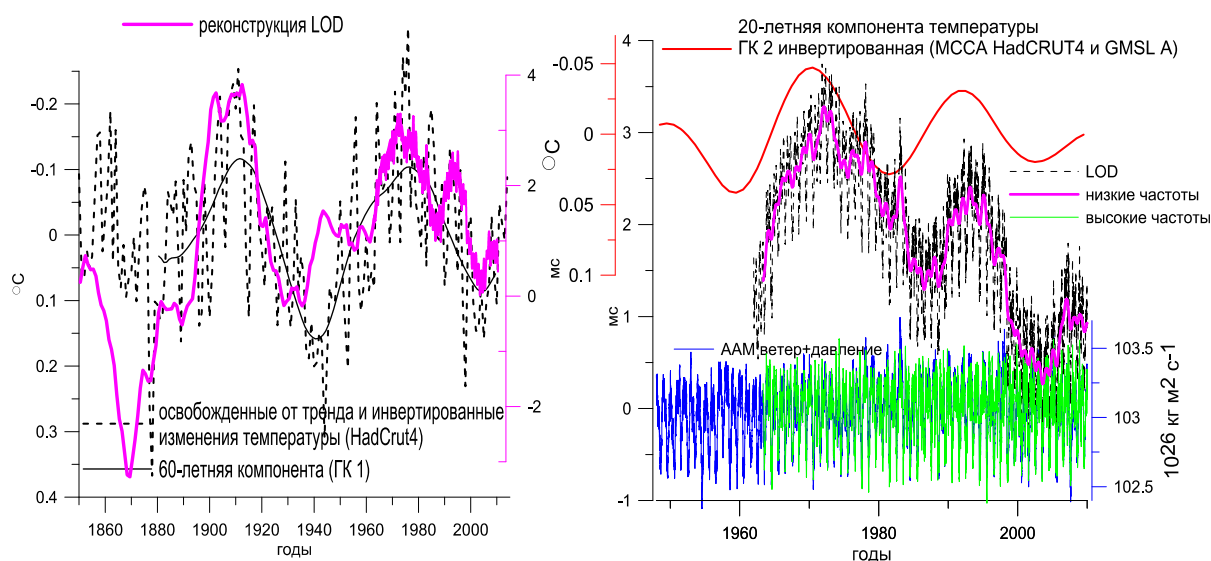


Рис. 2. Слева: Долговременные изменения LOD и вариации в глобальной температуре (без тренда, инвертированные). Справа: LOD с 1962 года сопоставленная с 20-летней компонентой изменения температуры ГК 2 (инвертированной). Высокочастотная изменчивость сопоставлена с угловым моментом атмосферы ААМ (масса + движение) (внизу).

Параметры ориентации Земли ПОЗ брались из бюллетеня службы вращения Земли IERS C01 (<http://http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>) с 1846 г. для движения полюса и с 1962 г. для продолжительности суток LOD. Долговременная реконструкция LOD с 1832 г., представленная на рис. 2, получена из наблюдений затмений и покрытий звезд Луной на основе комбинированных рядов наблюдений Луны LUNAR97 в NASA JPL [7].

3. Сравнение климатических характеристик и вращения Земли

Из рис. 1 хорошо видно, что выделенные МССА 60- и 20-летние колебания прослеживаются как в данных по температуре, так и по изменению уровня моря. Однако 60-летняя компонента уровня моря (ГК 1) задерживается относительно температуры примерно на 20–30 лет. В работе [13] предложена связь между уровнем моря (SL) и глобальной температурой (T) в виде $\frac{dSL}{dt} = a(T - T_0)$. Такое уравнение соответствует фильтру нижних частот. Океан, имеющий теплоемкость на три порядка большую, чем атмосфера, должен откликаться с задержкой на изменения температуры воздуха. Однако отклик на 20-летнюю компоненту температуры при этом должен быть сильно подавлен и сдвинут по фазе, чего не наблюдается. В работе [16] показано, что уровень

Атлантики поднимается во время спада положительной фазы АМК. В ответ на NAO океан меняет циркуляцию, интегрирует эффект NAO, что приводит к АМК. Это подтверждается из рис. 1, где АМК соответствует 60-летнее изменение температуры и рис. 3, где представлен проинтегрированный индекс NAO. По всей видимости, атмосфера контролирует быстрые климатические осцилляции, а океан – долгопериодические.

На рис. 2 слева представлены долговременные (с 1846 г.) изменения длительности суток LOD. Они сопоставлены с изменениями температуры на Земле после вычитания тренда и инвертирования. Сходство декадной изменчивости температуры и скорости вращения планеты отмечено еще К. Ламбеком в его монографии [15], но так и не получило объяснения.

На рис. 2 справа показаны данные по изменениям LOD с 1962 года, полученные на основе сравнения вращения Земли с атомной шкалой времени UTC. Эффекты зональных приливов исключены согласно [20]. Высокочастотная (до года) изменчивость практически полностью объясняется обменом моментом импульса с атмосферой (сравнение кривых ААМ внизу) [22]. Считается, что долгопериодические (декадные) изменения LOD связаны с обменом угловым моментом между ядром и мантией в недрах Земли. Найдены корреляции с геомагнитным полем [5]. Океанические процессы, как считается, вносят меньший вклад. Однако тренд LOD также связан с диссипацией приливов в океане.

Нами было замечено [19], что декадные вариации LOD с 1962 г. также антикоррелированы с 20-летней компонентой (ГК 2) изменений температуры на Земле. Если бы угловой момент океана (ОАМ) или атмосферы (ААМ) демонстрировал такую же изменчивость, это можно было бы объяснить влиянием изменений в их циркуляции. Однако данные по угловому моменту имеют слишком малые тренды [5]. Возможно, внешние факторы (прецессия лунной орбиты) или процессы внутри Земли (на границе ядро-мантия), связанные с магнитным полем, приводят к появлению сходных откликов в LOD и температуре на Земле [22].

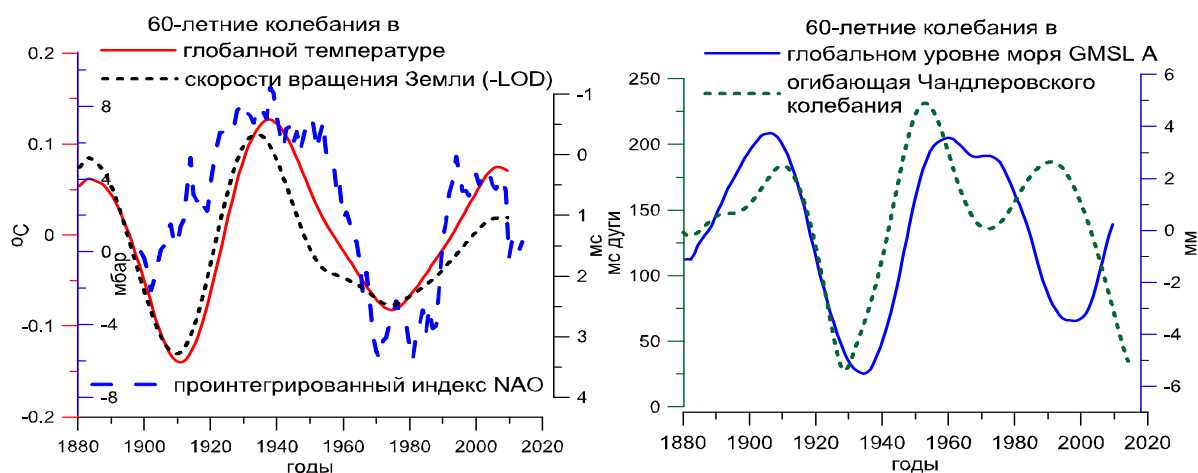


Рис. 3. Слева: Медленные вариации скорости вращения Земли (отфильтрованная и инвертированная LOD), проинтегрированный индекс NAO и 60-летняя компонента (ГК 1) изменения температуры на Земле. Справа: Огибающая Чандлеровского движения полюса (433-суточной несущей) и ГК 1 изменения уровня моря GMSL A (справа).

Мы также исследовали изменения амплитуды Чандлеровского колебания, которая была исключительно малой в 1930-е годы и стремительно уменьшилась в 2010-е. Сравнение его огибающей с климатическими характеристиками показывает, что корреляция с 60-летней компонентой уровня моря составляет $r = 0.72 \pm 0.08$ (рис. 3 справа). На рис. 3, слева показаны сглаженная скорость вращения Земли (отфильтрованная и инвертирован-

ная LOD) и 60-летняя компонента (ГК 1) изменения температуры на Земле. Корреляция между ними составляет $r = 0.92 \pm 0.03$. Там же представлен график проинтегрированного индекса NAO. Сходство приводит нас к заключению о том, что изменения во вращении Земли (LOD и Чандлеровское колебание) могут быть взаимосвязаны с естественными колебаниями климатических характеристик (температуры и уровня моря).

4. Заключение и дискуссия

В представленной работе методом МССА исследованы глобальные климатические индексы, такие как глобальная температура и уровень моря. Наше внимание сосредоточено на многолетних естественных колебаниях. Они могут быть причиной наблюдаемой в последнее десятилетие паузы в глобальном потеплении *Hiatus*. Выявлено одновременное присутствие в данных по температуре и уровню моря квази 60- и 20-летних компонент. Связанная с АМК 60-летняя компонента температуры сдвинута по фазе относительно изменений уровня моря на 20–30 лет. Мы склонны считать это скорее следствием отклика температуры (АМК) на проинтегрированное циркуляцией океана NAO [16], нежели задержкой отклика уровня моря на изменения температуры согласно дифференциальному уравнению, введенному в работе [13].

Сопоставление данных по вращению Земли с климатическими характеристиками позволило установить сходство изменений скорости вращения Земли с квази 60-летним колебанием температуры, а амплитуды Чандлеровского колебания (оггибающей) – с вариациями уровня моря (рис. 3). Мы полагаем, что эти сходства имеют под собой физическое основание.

В работах специалистов по циркуляции атмосферы и океана [11,16,17,21] уже не раз высказывались предположения о том, что Чандлеровское колебание, квазидвухлетнее атмосферное колебание, ЭНЮК, NAO и АМК взаимосвязаны. Эти глобальные климатические моды затрагивают глубинные слои океана, атмосферу и находят отражение в вариациях глобальной температуры на Земле. Однако современные климатические модели все еще с трудом воспроизводят их [6]. Следовательно, в угловых моментах океана (ОАМ), получаемых из этих моделей, могут быть погрешности на интервалах в десятилетия. Недостаточно точное представление об изменчивости течений в глубинах океана на периодах в 20–60 лет может приводить к недостаточно точной оценке влияния океана на климат и вращение Земли.

Возможно, существуют иные факторы, накладывающие сходные отпечатки на оба эти явления. Так, изменение коэффициента разложения гравитационного потенциала Земли J_2 под действием прилива в цикле 18.6-летней прецессии орбиты Луны может сказываться на периоде Чандлеровского колебания и вызывать модуляции его амплитуды. Однако предварительные оценки говорят о малости подобных эффектов [3].

Пока механизм влияния не установлен, можно говорить об информационной связи между климатическими процессами и вращением Земли, что уже сейчас может быть использовано для улучшения точности их прогнозирования.

Благодарности: работа поддержана грантами РФФИ 16-05-00753 и НИУ ВШЭ.

Литература

1. *Bizouard C., L. Zotov, and N. Sidorenkov.* Lunar influence on Equatorial Atmospheric Angular Momentum // *J. of Geophys. Res. Atmospheres*, DOI:10.1002/2014JD022240 (2014).
2. *Ghil M., R.M. Allen, M.D. Dettinger et al.* Advanced spectral methods for climatic time series // *Rev. of Geophys.* 40(1), 3.1-3.41 (2002).
3. *Cheng, M., B.D. Tapley, and J.C. Ries.* Deceleration in the Earth's oblateness // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 740–747, (2013), doi:10.1002/jgrb.50058
4. *Church, J.A., N.J. White et al.* Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008 // *Geophys. Res. Lett.*, 38, L18601,doi:10.1029/2011GL048794, (2011).

5. *Jean O. Dickey, Steven L. Marcus, and Olivier de Viron.* Air Temperature and Anthropogenic Forcing: Insights from the Solid Earth // *J. Climate*, 24, 569574 (2011).
6. *Jin Ba, Noel S. Keenlyside et al.* A multi-model comparison of Atlantic multidecadal variability // *Climate Dynamics*, Vol.43, Iss. 9, pp 2333–2348, (2014).
7. *Richard S. Gross.* A combined length-of-day series spanning 1832–1997: LUNAR97 // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 123, Iss. 1, pp. 65–76 (2001).
8. IPCC fifth assessment report: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, (2013).
9. *Jevrejeva, S., J.C. Moore, A. Grinsted, and P.L. Woodworth* // *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08715, doi:10.1029/2008GL033611 (2008).
10. *Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A.* Analysis of Time Series Structure SSA and Related Techniques, CHAPMAN & HALL/CRC (2001).
11. *Maximov I.V. and Smirnov N.P.* The changes in the speed of the Earth's rotation and the mean sea level of the Oceans // *Oceanologia*, N 4, pp. 9–18, (1964).
12. *Qian W.H., Lu Bo, Zhu C.W.* How would global-mean temperature change in the 21th century? // *Chinese Science Bulletin*, 55, 19. pp. 1963–1967 (2010).
13. *Rahmstorf S.* A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise // *Science*, Vol. 315 no. 5810 pp. 368–370, DOI: 10.1126/science.1135456 (2007).
14. *Schlesinger, M.E.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature* 367 (6465): 723726. Bibcode:1994Natur.367..723S. doi:10.1038/367723a0, (1994).
15. *Lambeck K.* The Earth's Variable Rotation; Geophysical Causes and Consequences, Cambridge University Press, (1980).
16. *G.D. McCarthy, I.D. Haigh, J.J.-M. Hirschi, J.P. Grist & D.A. Smeed.* Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations // *Nature* 521, pp. 508–510 (2015), doi:10.1038/nature14491
17. *Sidorenkov N.S.* The Interaction Between Earth's Rotation and Geophysical Processes, Wiley-VCH Verlag (2009).
18. *Zotov L.* On the similarities between Earth rotation and temperature changes // *Odessa Astronomical Publications*, N 2, p. 225 (2012).
19. *Zotov L., C. Bizouard.* Regional atmospheric influence on the Chandler wobble // *Advances in Space Research*, Vol. 55, Iss. 5, pp. 1300–1306, (2015), doi:10.1016/j.asr.2014.12.013
20. IERS conventions 2010, <http://62.161.69.131/iers/conv2010/conv2010.html>
21. *Бышев В.И., В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых.* Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 11. No 1. С. 62–71 (2014).
22. *Сидоренков Н., К. Бузар, Л. Зотов, Д. Салстейн.* Угловой момент атмосферы // *Природа*, № 4, с. 22–28, РАН (2014).

ABOUT POSSIBLE INTERRELATION BETWEEN EARTH ROTATION AND CLIMATE VARIABILITY OVER RECENT 150 YEARS

Zotov L.^{1,2}, Bizouard C.³, Shum C.K.⁴

¹*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

³*Paris Observatory, Service de la Rotation de la Terre (SYRTE), France*

⁴*Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, the Ohio State University, USA*

Using Multichannel Singular Spectrum Analysis (MSSA) we decomposed climatic time series into principal components, and compared them with Earth rotation parameters. The global warming trends were preliminarily subtracted. Similar quasi 60- and 20-years periodic patterns have been found in the Global Mean Earth Temperature (HadCRUT4) and Global Mean Sea Level (GMSL). Length of Day (LOD) variations and amplitude of the Chandler wobble over recent 150 years were compared to climate time series. The Earth rotation velocity corresponds well to the 60-year Earth temperature changes and Chandler wobble envelope – to those of Sea Level. We present these results, asking the question: can these processes be interrelated?

О ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА КООРДИНАТ НЕБЕСНОГО ПОЛЮСА

Малкин З.М.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Для многих практических приложений, таких как спутниковые навигационные системы, оперативное определение всемирного времени и космическая навигация необходимо знать координаты небесного полюса в реальном времени, а иногда и с некоторым упреждением. В настоящее время наиболее точные значения координат небесного полюса получаются из РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций. К сожалению, результаты этих наблюдений бывают обычно доступны только через две-четыре недели после наблюдений. Поэтому на практике используются их прогнозные значения. В настоящей работе исследуется точность прогнозов координат небесного полюса на материале реальных данных, полученных с 2013 г. в Морской обсерватории США (модель USNO) и Пулковской обсерватории (модели ZM2 и ZM4). Показано, что точность прогнозов, сделанных в Пулковской обсерватории по обеим моделям существенно выше, чем прогнозов Морской Обсерватории США. При этом модель ZM4 показала лучшую точность прогноза длительностью до 7–8 месяцев, а для более длительных прогнозов предпочтительной оказалась модель ZM2.

Введение

Прогнозы параметров вращения Земли (ПВЗ) разной длительности нужны для многих практических приложений, поэтому развитию методов прогноза и исследованию их точности посвящено множество работ. При этом практически все исследования в этой области посвящены прогнозу координат земного полюса и всемирного времени или длительности суток. Точность прогноза движения небесного полюса (НП) или углов прецессии-нутаии остается недостаточно исследованной. По-видимому, единственное детальное рассмотрение этого вопроса на основе реальных прогнозов, сделанных в разных центрах определения ПВЗ, было предпринято в [1]. В настоящей работе предыдущее исследование было повторено на основе новых данных и расширенного набора моделей.

Для движения НП была разработана высокоточная модель прецессии-нутаии, рекомендованная в качестве стандарта Международным астрономическим союзом (МАС) в 2006 г. и состоящая из теории нутаии IAU2000A и теории прецессии P03 с небольшими коррекциями [2]. Заявленная точность этой теории составляет 100 мксд. Однако эта величина не отражает реальной ошибки положения НП, поскольку модель МАС описывает только часть реального движения оси вращения Земли в пространстве, которое также включает ряд немоделируемых на современном уровне знаний, и, следовательно, непредсказуемых эффектов, суммарный вклад которых достигает в наше время около 400 мксд. Основными из этих эффектов являются свободная нутаии ядра (FCN, Free Core Nutation) и тренд.

Таким образом, для тех приложений, где достаточна точность учета прецессии-нутаии около 500 мксд, специальные процедуры прогноза не нужны. Для приложений более требовательных к точности моделирования движения НП в реальном времени и тем более с упреждением по времени, необходимо моделировать и прогнозировать отличие реального движения НП от теории МАС, называемое смещением НП, в международной терминологии Celestial Pole Offset (CPO). Именно значения CPO dX и dY , т.е. отличия наблюдаемых координат НП от модельных, публикуются центрами обработки РСДБ-наблюдений и службами определения ПВЗ. Они же используются для прогноза движения НП. В первую очередь представляют интерес для настоящей работы сводные ряды IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) и IVS (International VLBI Service for Astrometry and Geodesy).

Модели СРО

В настоящей работе проведено сравнение трех доступных в настоящее время моделей (рядов) СРО, регулярно обновляемых и обеспечивающих прогноз на длительный интервал времени. Эти модели следующие.

Модель USNO (<ftp://maia.usno.navy.mil/ser7/>). Этот ряд СРО вычисляется в Центре срочной службы и прогноза IERS IERS, функционирующем в Морской обсерватории США (USNO). Ряд USNO вычисляется путем комбинации четырех рядов СРО: трех индивидуальных рядов, вычисляемых в центрах анализа РСДБ-данных IAA, GSFC и USNO, а также комбинированного ряда IVS. Веса исходных рядов в комбинации USNO непостоянны и неизвестны, поэтому трудно точно оценить вклад ряда IVS в ряд USNO, что затрудняет оценку корреляции этого ряда с пулковскими моделями СРО, построенными на базе ряда IVS, как описано ниже. Прогноз СРО длиной 90 дней вычисляется по модели нутации KSV1996 с поправкой за систематический сдвиг, вычисляемый по последним 20 дням [3].

Модель ZM2 (<http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/fcn2.dat>). Этот ряд СРО вычисляется автором с 2007 г. просто как сглаженный ряд IVS. Вычисляется прогноз длиной 1 год методом авторегрессии.

Модель ZM4 (<http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/fcn4.dat>). Эта модель вычисляется путем аппроксимации ряда IVS по скользящим интервалам длиной 431 суток и со сдвигом в 1 сутки следующими выражениями:

$$\begin{aligned}dX &= A_c \cos \phi - A_s \sin \phi + X_0, \\dY &= A_c \sin \phi + A_s \cos \phi + Y_0,\end{aligned}$$

где dX и dY — наблюдаемые значения СРО, $\phi = 2\pi/P_{FCN}(t - t_0)$, P_{FCN} — период FCN, равный -430.21 средних суток. Метод вычисления модели СРО ZM4 близок к методу Ламбера (S. Lambert) построения модели FCN (<http://syrtel.obspm.fr/~lambert/fcn/>), которая является частью IERS Conventions (2010) [2]. Отличия заключаются в использовании другого исходного ряда, длиной скользящего интервала и величиной его сдвига (Ламбер использует ряд IERS C04 и двухлетний скользящий интервал со сдвигом в 1 год). Фактически ряд ZM4 также является сглаженным рядом IVS, при этом более сглаженным, чем ряд ZM2. Коэффициенты модели, вычисленные для последнего наблюдаемого интервала, используются для прогноза ряда СРО на один год.

Все три модели обновляются формально ежедневно, но фактически новые данные доступны только после поступления новых результатов РСДБ-наблюдений (в среднем около трех раз в неделю).

Ошибки прогноза СРО

Для оценки точности прогнозирования СРО были использованы прогнозы, сделанные в Морской обсерватории США (модель USNO) и Пулковской обсерватории (модели ZM2 и ZM4) в 2013–2015 гг. Началом исследуемого периода выбран март 2013 г., поскольку с этого времени начато регулярное вычисление прогнозов по модели ZM4. Всего было обработано 130 еженедельных прогнозов (хотя все прогнозы вычисляются ежедневно, использовались их выборки, сделанные с интервалом в неделю).

Любое изучение ошибок прогноза некоторого явления основано на апостериорном анализе разностей прогнозов с окончательными (наблюденными) значениями. В нашем случае не вполне ясно, что принимать за окончательные данные, которыми могут служить как сводный ряд IVS, так и сводные ряды IERS. Мы считаем подходящим для роли эталона для сравнения сводный ряд ПВЗ IVS, который сохраняет преимущество использования всех доступных РСДБ-данных и, в то же время, не подвержен возможным методическим ошибкам составления сводных рядов IERS.

Именно с окончательным рядом IVS производилось сравнение пулковских прогнозов ZM2 и ZM4. Прогнозы USNO сравнивались как со сводным рядом IVS, так и со

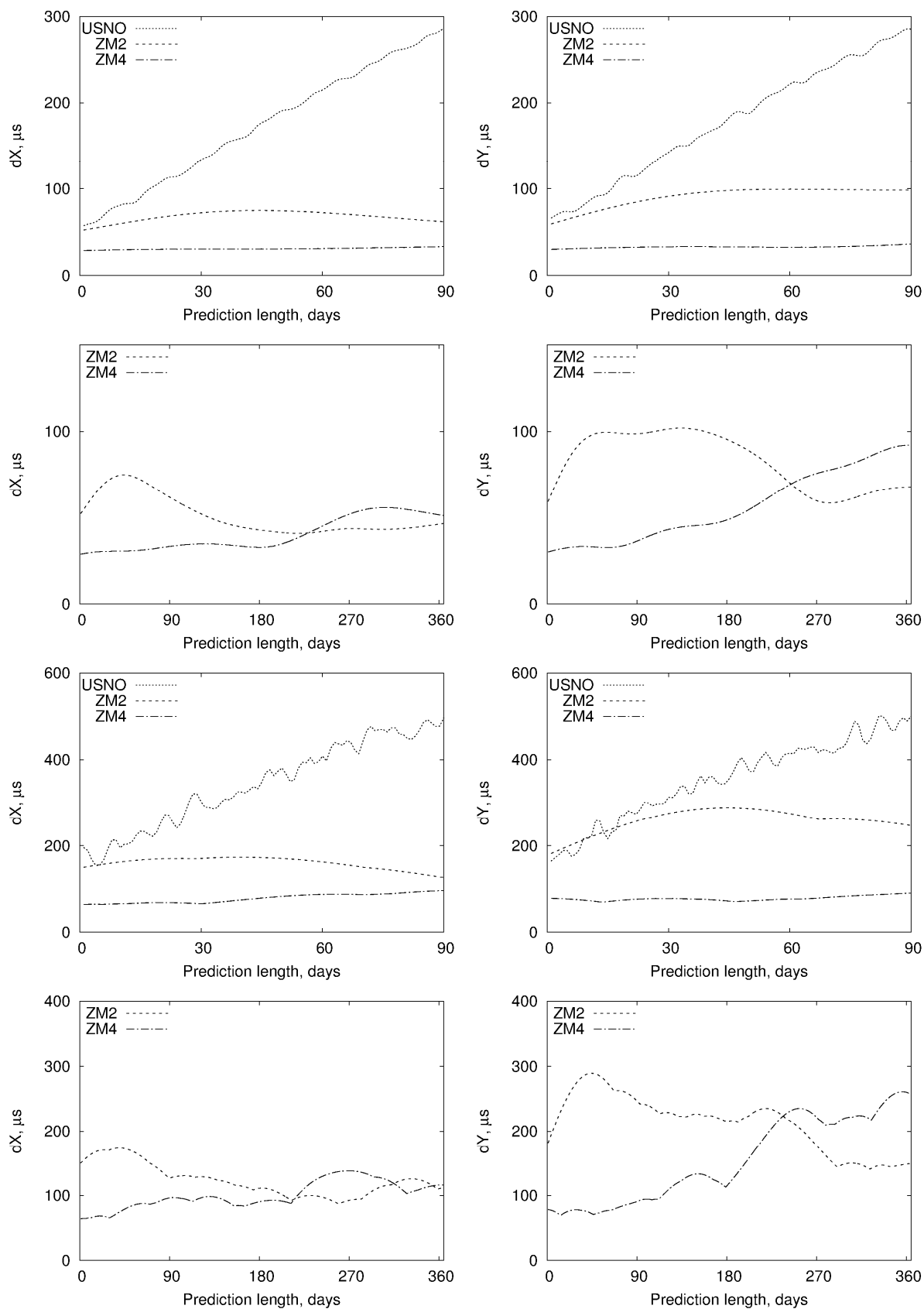


Рис. 1. Ошибки прогноза координат небесного полюса: слева dX , справа dY , в двух верхних строках среднеквадратические ошибки, в двух нижних – максимальные ошибки.

сводным рядом USNO. При этом точность прогнозов USNO, определенная по сравнению с окончательным рядом USNO, оказалась даже немного хуже, чем точность по сравнению с рядом IVS. Поэтому все результаты ниже приведены для сравнения прогнозов с рядом IVS.

Определенной трудностью при сравнении прогнозов с рядом СРО IVS является значительная зашумленность последнего. Кроме того, данные IVS приводятся на средние моменты суточных сессий наблюдений, а все прогнозы приводятся на начало гринвичских суток. Поэтому необходимо привести ряд IVS к стандартному равноотстоящему разумно гладкому виду с шагом в одни сутки, что может быть достигнуто интерполяцией с одновременным сглаживанием, например, с использованием гауссовского фильтра или сглаживающего сплайна. Мы использовали первый подход. При этом, как показано в [1] ошибки прогнозов, и особенно результаты сравнения точности прогнозов, сделанных по разным моделям, мало зависят от степени сглаживания.

Для суждения о точности прогнозов СРО вычислялись их среднеквадратичные и максимальные ошибки. Результаты вычислений приведены на рис. 1.

Заключение

В работе проведено сравнение еженедельных прогнозов координат НП, вычисленных в Морской обсерватории США (модель USNO) и Пулковской обсерватории (модели ZM2 и ZM4) с марта 2013 г. по август 2015 г., всего 130 прогнозов. Для оценки точности вычислены среднеквадратичные и максимальные ошибки прогноза длительностью 90 суток для всех трех моделей и один год для пулковских моделей. Сравнение показало, что, как и в 2009 г., точность прогноза координат НП IERS/USNO существенно уступает точности прогнозов Пулковской обсерватории. При этом модель ZM4 показала лучшую точность прогноза длительностью до 7–8 месяцев, а для более длительных прогнозов предпочтительной оказалась модель ZM2.

Литература

1. Малкин З.М. Анализ точности прогноза СРО движения небесного полюса // Астрон. журн., 2010, т. 87, № 11, 1141–1150.
2. IERS Conventions (2010), G. Petit, B. Luzum (eds.), IERS Technical Note 36, BKG, Frankfurt am Main, 2010.
3. IERS Annual Report 2013, BKG, Frankfurt am Main, 2014.

ON THE ACCURACY OF CELESTIAL POLE PREDICTION

Malkin Z.M.^{1,2}

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

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Many practical applications, such as satellite navigation systems, operational determination of Universal Time, and space navigation require knowledge of the celestial pole coordinates either in real time or even in advance. Currently, the most accurate celestial pole coordinates are obtained from VLBI observations on global station networks. Unfortunately, results of these observations are mostly available with delay 2–4 weeks. Therefore, predicted celestial pole coordinates are used for the real-time applications. In this paper, the accuracy of the actual celestial pole position predictions obtained from 2013 in U.S. Naval observatory (model USNO) and Pulkovo observatory (models ZM2 and ZM4). It was found that Pulkovo models provide substantially better prediction accuracy than USNO model. Model ZM4 performs better for the prediction length up to 7–8 months, model ZM2 is preferable for longer predictions.

ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ РЯДА ИЗМЕНЕНИЯ ШИРОТЫ ПУЛКОВА ЗА 1840–2014

Миллер Н.О.

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

В работе представлена структура движения полюса на примере вариаций широты Пулково (1840–2014). Движение полюса можно представить как сумму тренда, чандлеровского колебания, годового колебания и ряда остатков. Исследована тонкая структура каждой составляющей, в результате выявлены особенности и закономерности в их поведении. Некоторые из обнаруженных тенденций заметны только при исследовании длинных рядов наблюдений. Например, характер тренда за последние 20 лет существенно изменился. Это не связано с переходом на новые методы наблюдения, потому что широты были получены на одном инструменте. В работе были использованы различные методы анализа временных рядов: сингулярный спектральный анализ, преобразования Фурье и Гильберта. Для чандлеровского колебания подтверждается наличие повторяющейся структуры с интервалом 80 лет, максимальный коэффициент корреляции (0.93) приходится на интервалы 1850–1930, 1930–2010. В годовом колебании наблюдается небольшое увеличение амплитуды на $0.003''$ и фазы на 45° за 174 года.

1. Введение

Данная работа посвящена исследованию движения полюса, которое имеет сложный нерегулярный характер, зависящий от различных астрономических и геофизических причин и обусловленный влиянием взаимодействий между различными процессами. Движение полюса Земли можно представить как сумму тренда, чандлеровского колебания, годового колебания и ряда остатков.

Одной из задач исследования является выделение отдельных составляющих с последующим выявлением структурных особенностей и закономерностей в их поведении, оценка параметров колебаний: периода, добротности, изменения амплитуды и фазы со временем. Схема решения этой задачи приведена на рис. 1.

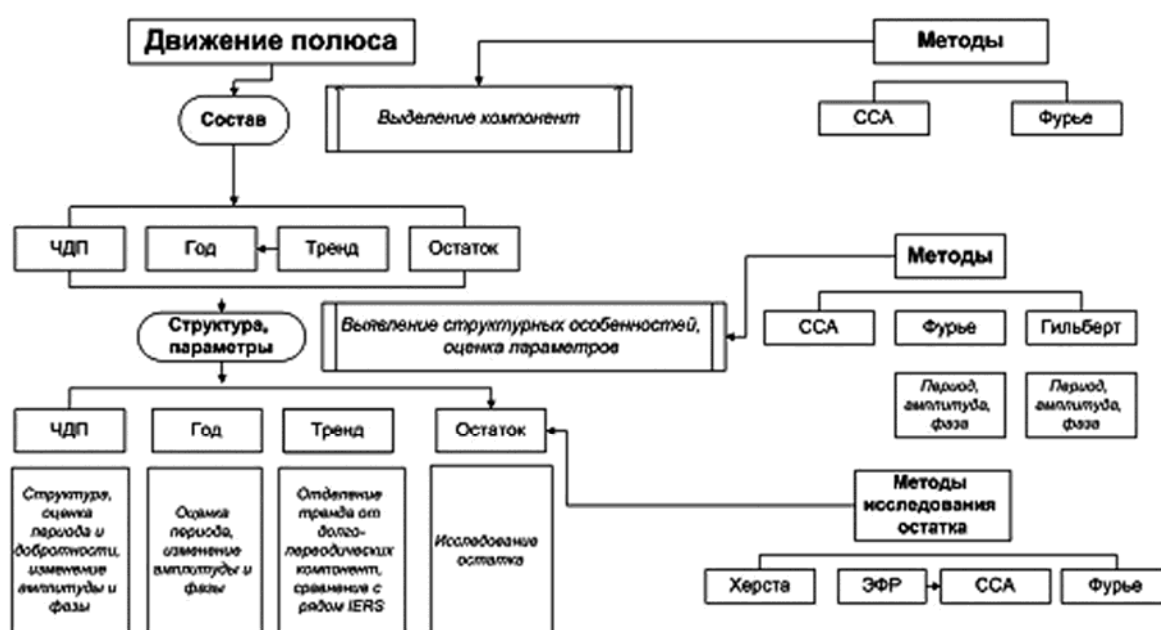


Рис. 1. Схема исследования движения полюса.

При решении данной задачи возникают различные проблемы, связанные с отдельностью компонент, соответствующих тому или иному физическому процессу. Варианты решения этой задачи зависят как от исследуемых рядов (длины ряда, однородности наблюдений и обработки), так и от используемых методов. В данной работе были использованы различные методы анализа временных рядов: сингулярный спектральный анализ (ССА) [1], преобразования Фурье и Гильберта.

Для формирования объединенного ряда изменений широты Пулкова были использованы ряды, полученные из наблюдений широты за разные годы на разных инструментах и вычисленные из координат полюса X_p, Y_p IERS C01, C04 по формуле:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = X_p \cos \lambda + Y_p \sin \lambda = 0.8631 X_p - 0.5049 Y_p, \quad (1)$$

где X_p, Y_p – координаты полюса, λ – долгота ЗТФ-135.

В итоге для исследования использовались два ряда: объединенный ряд изменений широты Пулкова (F_i) и ряд изменений широты, полученный по формуле (1) из рядов координат полюса ($F_{i \text{ EOP}}$) с шагом 0.1 г. Эти ряды кратко можно записать следующим образом:

$$F_{i \text{ EOP}} = F_{i \text{ C01 (1864-2006)}} + F_{i \text{ C04 (2006-2014)}} \quad (2)$$

$$F_i = F_{i \text{ БВК (1840-1842)}} + F_{i \text{ ПИПВ (1842-1846)}} + F_{i \text{ C01 (1846-1904)}} + F_{i \text{ ЗТФ135 (1904-1941)}} + F_{i \text{ C01 (1941-1948)}} + F_{i \text{ ЗТФ135 (1948-2006)}} + F_{i \text{ C04 (2006-2014)}} \quad (3)$$

2. Главные компоненты движения полюса

В основе метода ССА лежит преобразование временного ряда в матрицу и ее сингулярное разложение, приводящее к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты. При использовании этого метода производится вычисление выборочной корреляционной матрицы, собственные числа (λ_i) которой являются выборочными дисперсиями соответствующих главных компонент. Эти компоненты определяются таким образом, чтобы первая из них давала максимально возможный вклад в суммарную дисперсию. Выполняемое преобразование не меняет сумму дисперсий, а только перераспределяет ее так, чтобы наибольшая дисперсия приходилась на первые компоненты. Таким образом, появляется возможность исключить из анализа компоненты, имеющие малые дисперсии.

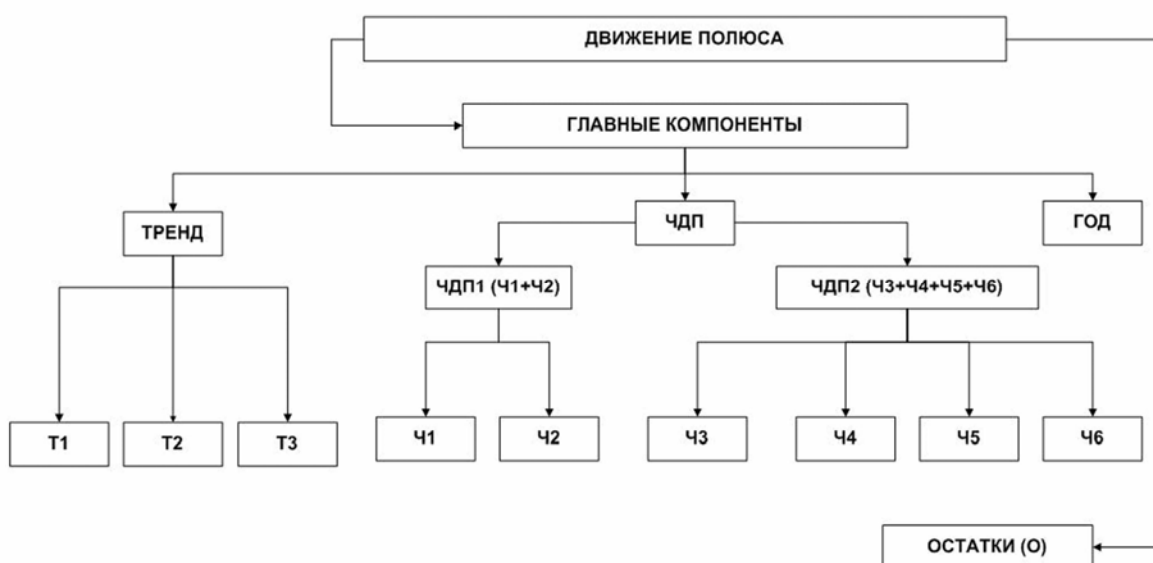


Рис. 2. Схема структуры разложения ССА движения полюса на компоненты.

Процент вклада вычисляется по формуле:

$$V_i = \frac{\lambda_i}{M} \times 100\%, \quad (4)$$

где M – длина окна, λ_i – i -е собственное число.

С помощью ССА были получены основные компоненты движения полюса: трендовая, чандлеровская и годовая (табл. 1). Длина окна M равнялась половине длины ряда. Графики полной структуры разложения ЧДП приводятся в [2].

На рис. 2 приведена полная схема разложения ССА для координат полюса X_p, Y_p и рядов изменения широты Fi_{EOP}, Fi . Этой схемой иллюстрируется процесс объединения рядов исходного разложения ССА для формирования основных компонент и их обозначения.

3. Тренд

Метод ССА позволяет отделять тренд от долгопериодических гармоник и выявлять особенности в его поведении. Суммарный тренд (T_{sum}) состоит из трех рядов исходного разложения ССА ($T_{sum} = T1 + T2 + T3$). Процент вклада (V), период (P) и амплитуда (A) этих рядов приведены в табл. 1. Суммарные тренды для рядов Fi_{EOP}, Fi приведены на рис. 3. Нужно отметить, что начиная с 1960 года, наблюдается некоторая особенность в поведении тренда.

Таблица 1.

№	V%	Fi		Fi_{EOP}		
		P, г.	A, arc	V%	P, г.	A, arc
$T1$	0.8			32.2	26	0.047
$T2$	0.9	26	0.057	0.2	21.5	0.003
$T3$	0.3	21.5	0.003	0.4	32	0.002
		34.5	0.002			
T_{sum}	2			32.8		

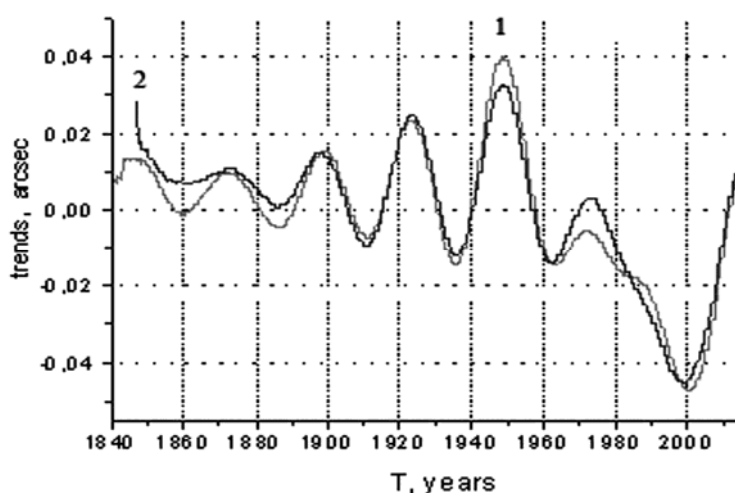


Рис. 3. 1 – суммарный тренд ряда Fi , 2 – Fi_{EOP} .

4. Годовое колебание

В результате разложения ССА получается одна компонента, соответствующая годовой составляющей ($V = 20\%$ для Fi и $V = 13\%$ для Fi_{EOP}). Методом Гильберта были вычислены изменения амплитуды и фазы этой компоненты. Оказалось, что амплитуда и фаза за 174 года выросли на $0.003''$ и 45° , соответственно.

На рис. 4 справа приведена кривая изменения амплитуды, а слева – кривая разницы средних температур за ноябрь–март северного и южного полушарий ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/20thC_ReanV2/Monthlies/gaussian/monolevel/. На той и другой кривой виден перегиб в районе 1960 года. Известно, что годовое колебание объясняется как вынужденное колебание, вызванное сезонными изменениями в атмосфере, океане и гидросфере [3]. Таким образом, можно предположить, что причиной этого факта, а также особенности в поведении суммарного тренда T_{sum} после 1960 года (рис. 3), служит воздействие изменения климата на вращение Земли.

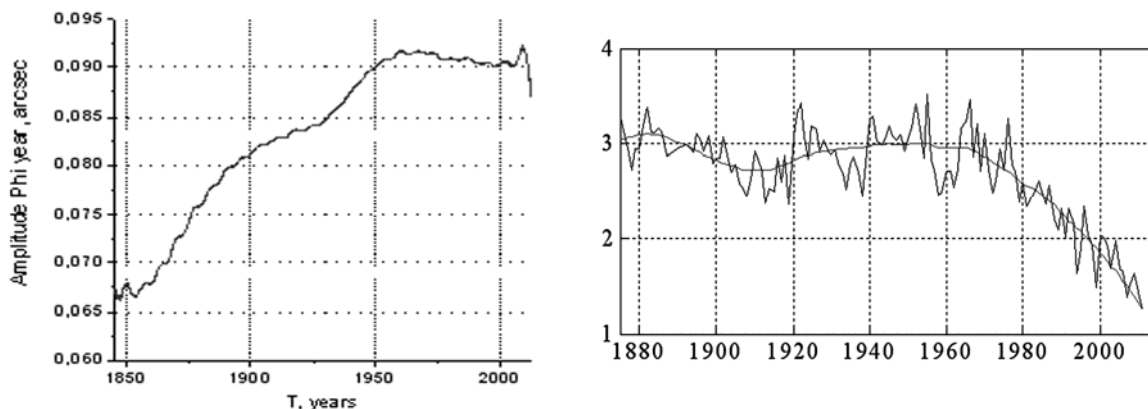


Рис. 4. Справа – изменение амплитуды годовой составляющей, слева – разница средних температур за ноябрь–март северного и южного полушарий.

5. Чандлеровская составляющая

На частоте Чандлеровского колебания ССА выделяет шесть компонент: Ч1–Ч6 (рис. 2) ($V = 64\%$ для Fi и $V = 44\%$ для Fi_{EOP}). Обычно в литературе исследуется процесс, представленный в нашем случае суммой всех шести компонент. Но, если рассмотреть отдельно сумму первых двух компонент ($V = 53\%$ для Fi) и четырех последних ($V = 11\%$ для Fi), можно обнаружить интересные закономерности. Сумму ЧДП1 = Ч1 + Ч2 назовём первой чандлеровской компонентой, а сумму ЧДП2 = Ч1 + Ч2 + Ч3 + Ч4 – второй чандлеровской компонентой. Таким образом ЧДП = ЧДП1 + ЧДП2.

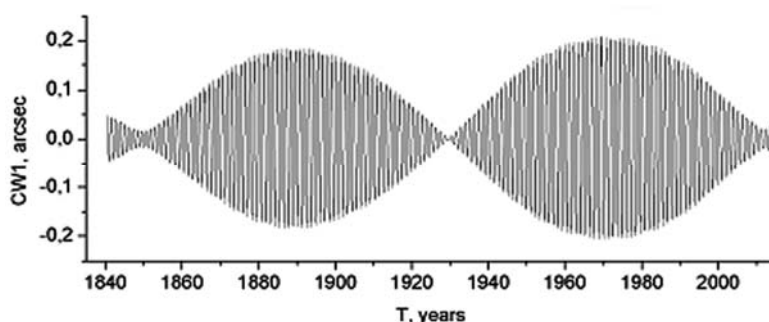


Рис. 5. Первая компонента ЧДП.

Первая чандлеровская компонента соответствует двум основным пикам спектра Фурье исходных рядов, а вторая – остальным значимым пикам [2]. ЧДП1 имеет два интервала со схожей структурой (рис. 5). Период повторяющейся структуры ЧДП равен $80 (\pm 2)$ годам при максимальном коэффициенте корреляции равном 0.93. Раздвоение пика ЧДП происходит только в том случае, если спектр вычисляется на интервале, включающем в себя резкое уменьшение амплитуды. Были вычислены параметры ЧДП:

период $P = 1.183; 1.185$ г., амплитуда $A = 0.18; 0.21''$, добротность $Q = 72; 76$ для каждого интервала повторяющейся структуры: 1850–1930 и 1930–2010, соответственно. Период и амплитуда вычислялись с помощью преобразования Фурье, оценка добротности производилась по ширине спектральной линии.

Если выполнить спектральный анализ изменения амплитуды второй компоненты ЧДП (рис. 6) на интервале после 1900 г., то в области низкочастотных компонент обнаруживаются пики, соответствующие 11, 20, 27, 40-летним периодам (рис. 7).

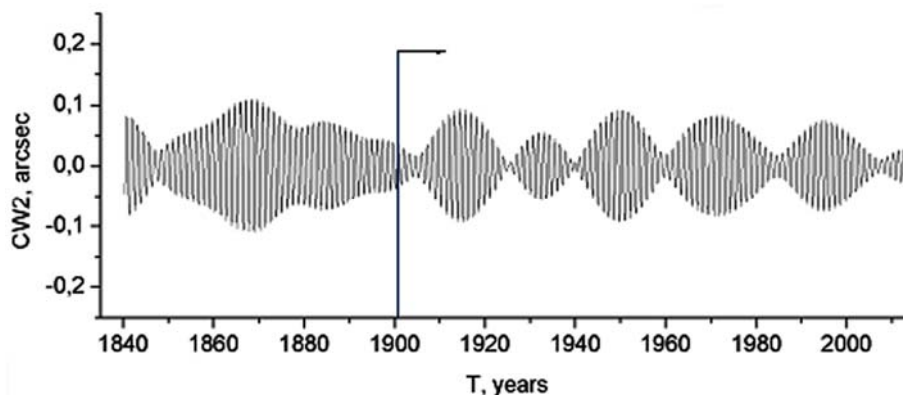


Рис. 6. Вторая компонента ЧДП.

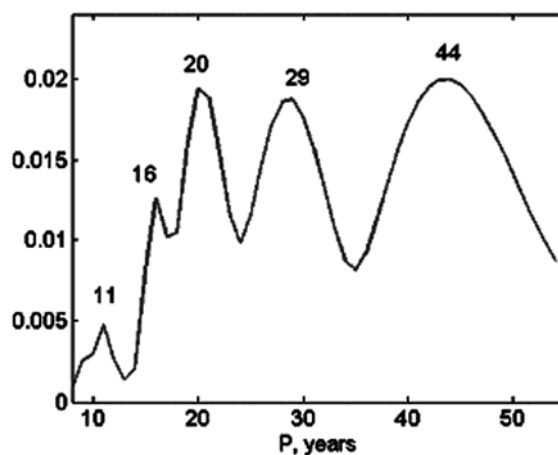


Рис. 7. Фурье спектр изменения амплитуды ЧДП2 после 1900 года.

6. Заключение

1. На примере ряда изменений широты Пулкова представлена схема полного исследования тонкой структуры движения полюса. Такое исследование стало возможным благодаря длинному ряду наблюдений (1840.4–2014.4 гг.) и математическим методам, позволяющим исследовать нестационарные временные ряды со сложной структурой.

2. В годовой компоненте присутствует рост амплитуды на $0.003''$ и фазы на 45° за 174 года.

3. С 1960 года меняется характер поведения суммарного тренда в движении полюса и характер поведения амплитуды годового колебания. График разницы средних зимних температур северного и южного полушария также показывает особенность в поведении тренда после 1960 года, что может говорить о возможном воздействии изменения климата на вращение Земли.

4. Период повторяющейся структуры ЧДП равен $80 (\pm 2)$ годам при максимальном коэффициенте корреляции равном 0.93.

5. Раздвоение пика ЧДП происходит только в том случае, если спектр вычисляется на интервале, включающем в себя резкое уменьшение амплитуды ЧДП.

6. Были вычислены параметры ЧДП: период $P = 1.183; 1.185$ г., амплитуда $A = 0.18; 0.21''$, добротность $Q = 72; 76$ соответственно для каждого интервала повторяющейся структуры: 1850–1930 гг. и 1930–2010 гг.

7. Спектральный анализ изменения амплитуды второй компоненты ЧДП после 1900 года на частотах, соответствующих периодам от 10 до 45 лет, показал наличие гармоник с периодами 11, 16, 20, 29, 44 года.

Литература

1. *Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A.* Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. – London: Chapman & Hall/CRC. 2001. P. 305.
2. *Миллер Н.О.* Чандлеровское колебание в изменениях широты Пулкова за 170 лет // *Астрономический вестник*. 2011. Том 45. № 4. С. 353–364.
3. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб: Гидрометеоздат. 2002. – С. 200.

PERIODICAL REGULARITIES OF POLAR MOTION IN THE PULKOVO LATITUDE VARIATIONS

Miller N.O.

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

The structure of the pole motion illustrated by Pulkovo latitude variations (1840–2014) is presented in this paper. The polar motion can be represented as the sum of the trend, Chandler Wobble, annual fluctuations and residues. The fine structure of each component was investigated. The peculiarities and regularities were discovered in their behavior. Some of the detected tendencies are noticeable only in the study of the long series of observations. For example, the nature of the trend over the last 20 years has changed significantly. It is not associated with the new methods of observation, because the latitudes were obtained on a same instrument. We used different methods of analysis of time series - singular spectral analysis, and Fourier and Hilbert transforms. For Chandler Wobble component the presence of repetitive structure with an interval of 80 years was confirmed. The maximum correlation coefficient (0.93) is in the interval 1850–1930, 1930–2010. There is small increase of the amplitude on $0.003''$ and phase on 45° for 174 years in annual fluctuation.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА С ПОМОЩЬЮ ССА

Миллер Н.О.

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

В работе представлены результаты тестирования метода сингулярного спектрального анализа для прогнозирования рядов координат полюса и изменения широты Пулкова. Было выполнено сравнение нескольких методов реализаций. Тестирование было выполнено для двух случаев: от 10 дней до года и от года до 25 лет. Долгосрочное прогнозирование было выполнено непосредственно методом ССА и с использованием эмпирической модели главной компоненты движения полюса.

1. Введение

Движение полюса земли можно представить как сумму чандлеровского, годового колебаний и тренда. В работе было выполнено тестирование метода сингулярного спектрального анализа для прогнозирования рядов координат полюса и изменения широты Пулкова. Чандлеровское колебание полюса имеет сложную структуру, которая подробно описана [1, 2]. Прогноз, выполненный на небольшом интервале, где чандлеровская компонента сохраняет свою амплитуду, получается достаточно точным, но точность резко падает, если интервал прогнозирования включает в себя некоторые особенности поведения исходного ряда. К таким особенностям можно отнести, например, три интервала резкого уменьшения амплитуды чандлеровского колебания в районе 1850, 1930 и 2010 годов, изменение характера тренда в 1960 г. В данной статье рассматривается возможность построения прогноза чандлеровской компоненты движения на длительном интервале методом сингулярного спектрального анализа (ССА) [3]. Подробное описание использования метода и выбора параметров для задач ПВЗ приведено в работе [4].

2. Метод

Сингулярный спектральный анализ (ССА) предназначен для исследования структуры временных рядов. Результатом применения ССА является разложение ряда на компоненты, т.е. получение структуры ряда. В случае прогнозирования выполняется продолжение структуры ряда с использованием рекуррентной формулы, порожденной собственным подпространством разложения.

Программная реализация метода позволяет находить коэффициенты рекуррентной формулы и, следовательно, выполнить прогноз. Таким образом, метод прогнозирования ССА позволяет учесть все особенности ряда на предшествующих прогнозу интервалах. Для задачи прогнозирования координат полюса X_p , Y_p было бы естественно выбрать многомерный метод ССА. Но в процессе тестирования было выяснено, что одномерная реализация отдельно по каждому ряду дает более устойчивый результат и меньшую ошибку прогноза.

Прогнозирование ССА включает в себя несколько этапов. При этом для каждого этапа существуют различные возможности их реализации. Эти возможности можно рассматривать как некоторые управляющие параметры. Исследование возможностей для каждого конкретного ряда позволяет подобрать оптимальные параметры для решаемой задачи прогнозирования.

На первом задаётся длина окна M для выполнения преобразования ряда в матрицу. Затем выполняется разложение матрицы на собственные вектора и главные компоненты, и выбирается число компонент, по которым восстанавливается ряд и строится

характеристический полином для аппроксимации ряда. Для ССА прогноза по виду и значимости главных компонент разложения можно оценить их количество необходимое для прогноза. После этого по выбранному набору главных компонент с помощью диагонального усреднения получается восстановленный ряд и затем выполняется аппроксимация ряда.

Этап аппроксимации можно рассматривать как предварительный к этапу прогноза ряда. Как аппроксимация, так и прогноз заключаются в задании начальных точек и затем их продолжении. Используя аппроксимацию, можно понять, насколько ряд соответствует модели, заложенной в основу прогноза. Оба метода аппроксимации (и прогноза) используют рекуррентную формулу, сходную с формулой широко используемого в ПВЗ авторегрессионного прогнозирования, но имеющую точную размерность $M - 1$. Таким образом, характеристический полином для прогнозирования в точности равен базису разложения.

В зависимости от того, делается диагональное усреднение до или после продолжения ряда, различают геометрический (векторный) и аналитический (рекуррентный) прогноз. Для геометрического способа (V) базовый вектор совпадает с восстановленным вектором, а для аналитического способа он может быть восстановленным (Rr), исходным (Ri) или аппроксимирующим (Ra).

Геометрический метод преобразует собственные вектора таким образом, чтобы первые $M - 1$ координат нового вектора были максимально близки к $M - 1$ последним координатам исходного вектора. Если выполнить несколько шагов такой процедуры, начав с базового восстановленного вектора, то в результате формируется матрица, из которой с помощью процедуры диагонального усреднения получается ряд аппроксимации (или прогноза). Аналитический метод аппроксимации использует рекуррентную формулу более явно. Начав с заданного вектора восстановленного ряда, каждое следующее значение получается с помощью рекуррентной формулы, примененной к $M - 1$ предшествующим точкам. Близость аналитического и векторного прогноза может свидетельствовать об устойчивости полученного прогноза.

3. Данные

Для прогнозирования использовались ряды координат полюса Xp , Yp IERS C04 и объединенный ряд изменений широты Пулкова Fi [1]. Полезный сигнал после применения ССА к этим рядам дает трендовую, чандлеровскую и годовую составляющие. Прогноз можно осуществлять либо используя весь восстановленный ряд, представляющий собой сумму этих компонент, либо по каждой компоненте отдельно, суммируя итоговый результат. В данной работе проверяется возможность построения долгосрочного прогноза. Расчеты выполняются для ряда изменений широты Пулкова за 1840–2014 гг. непосредственно методом ССА и с использованием эмпирической модели $ModCW1$ основной компоненты Fi_{CW1} чандлеровского движения полюса (ЧДП), представленной формулой (1) [5].

4. Результаты тестирования прогноза ССА от 10 дней до года

При выполнении прогноза ССА возникают вопросы выбора способа прогнозирования, оптимальных значений для M – длины окна, и B размера базиса. Кроме того, необходимо определиться с критерием выбора K – числа восстановленных компонент после разложения.

Число возможных разложений с помощью метода ССА велико и равно числу возможных вариантов выбора M . Для получения хорошего прогноза выбор M должен обеспечивать оптимальное разложение такое, чтобы обеспечить разделение шумовой и информативной компонент. Надо отметить, что чем больше значение M , тем больше

размер характеристического полинома в рекуррентной формуле при прогнозировании, что может привести к появлению побочных корней полинома.

В результате сопоставления прогнозов для разных опорных интервалов B : от 3 до 24 лет (ряд $C04$) был сделан вывод, что для прогнозов разной длины нужно выбирать разные опорные интервалы. Оценка среднеквадратичного отклонения была выполнена по 5 вариантам прогноза с длиной окна $M = 250$ и числом восстановленных компонент $K = 24$. В итоге был выбран интервал в 12 лет, который является средним на интервале прогноза до 200 дней и лучшим на более длительных (до трех лет) интервалах прогнозирования.

Таблица 1. Среднеквадратичные отклонения между предсказанными координатами полюса и рядом $C04$ при длине прогноза от 10 дней до года.

ПВЗ	Метод	Длина прогноза, сутки									
		10	20	30	40	60	90	120	150	180	365
Xp	V	1.31	4.24	8.91	13.43	17.18	15.00	26.60	36.06	33.29	45.07
	Rr	1.89	4.24	7.61	11.42	13.51	14.82	18.30	24.27	20.93	37.02
	Ri	1.38	3.51	7.3	11.72	15.52	18.12	22.13	23.85	20.65	37.70
	Ra	2.40	5.90	10.72	16.45	21.14	23.43	24.63	26.40	22.60	39.38
Yp	V	1.69	4.42	7.93	10.60	13.56	15.78	22.58	26.93	27.82	32.57
	Rr	1.87	4.44	6.40	8.47	13.06	17.26	22.44	25.84	27.61	33.48
	Ri	1.42	3.53	5.95	9.29	16.47	21.70	24.71	27.78	28.67	33.97
	Ra	2.85	6.14	8.88	10.76	17.27	21.35	27.96	30.67	30.14	35.31

В табл. 1 приведены результаты тестирования разных способов реализации прогнозирования ССА. Тестирование метода производилось по 15 прогнозам координат полюса с шагом в 30 дней, длина опорного интервала $B = 12$ лет (4380 точек) и длина окна $M = 438$ точек. На этапе восстановления выбиралось постоянное число компонент для Xp – 24 и для Yp – 22. Число компонент было выбрано таким образом, чтобы заведомо произошло отделение полезной информации от шума. Т.е., для некоторых разложений число компонент было увеличено, но не уменьшено. Для аппроксимации был выбран рекуррентный модифицированный метод. Максимальная разница между исходным и аппроксимирующим рядами составила менее 0.6 mas.

Из приведённых результатов видно, что для прогнозов разной длины разные методы являются лучшими. На интервале до 30 дней лучшим является аналитический прогноз, с исходным базовым вектором, а также неплохие результаты получаются при использовании векторного метода. На всем интервале в 365 дней прогноз координаты полюса Yp получается лучше, чем прогноз Xp , и наблюдается хорошее согласование между всеми построенными прогнозами. На интервале до 120 дней векторный и аналитический прогнозы практически совпадают. Это может говорить об устойчивости данного прогноза на этом временном интервале.

5. Результаты тестирования прогноза ССА от года до 25 лет

В данной работе возможность построения долгосрочного прогноза проверялась для различного сочетания главных компонент, полученных ССА из ряда изменений широты Пулкова Fi с шагом 0.1 г. Описание ряда изменений широты Пулкова и результаты разложения методом ССА, которые были использованы, приведены в работах настоящего сборника [2,5].

Для всех исследуемых рядов используется аналитический способ прогнозирования. Число компонент для всех рядов выбиралось таким образом, чтобы суммарный вклад в общий процесс был не меньше 99.98%.

Таблица 2. Среднее абсолютное уклонение прогнозируемой величины от наблюдаемой (mas) для долгосрочного прогноза.

		Длина прогноза, год							
		1	2	3	5	10	15	20	25
1	<i>Mod CW1</i>	0.08	0.10	0.12	0.50	0.27	0.42	0.60	1.64
2	<i>Mod & CW1</i>	0.87	1.19	1.47	1.78	2.07	4.78	6.02	7.20
3	<i>CW1</i>	0.24	0.40	0.58	0.99	2.57	4.52	6.25	7.61
4	<i>CW2</i>	1.99	1.76	2.84	5.60	13.05	15.89	18.08	22.86
5	<i>CW</i>	0.59	1.21	2.28	5.24	19.21	36.45	51.61	60.45
6	<i>KCW</i>	1.60	3.04	4.51	7.52	12.36	12.46	13.98	16.38
7	<i>Mod KCW</i>	1.37	1.71	4.65	9.09	25.53	40.63	50.97	59.67

Для исследования использовалась модель *Mod CW1* главной компоненты ЧДП, вычисленная по формуле 1 [5].

$$F(t) = a(t) \sin(t \omega_1 + \Psi_1), a(t) = A \sin(t \omega_2) + C, \quad (1)$$

где $\omega_1 = 0.845$ ($P_1 = 1.184$ г.); $\Psi_1 = 197.97^\circ$; $\omega_2 = 0.0062$ ($P_2 = 162$ г.); $A = 0.196$; $C = -0.01$.

В табл. 2 приводятся результаты тестирования долгосрочного прогноза ССА для разного сочетания компонент движения полюса. Было выполнено:

- 1) Построение прогноза эмпирической модели *Mod CW1* основной компоненты F_{iCW1} чандлеровского движения полюса (ЧДП). Строка 1 табл. 2.
- 2) Ряд F_{iCW1} был продолжен назад в прошлое на 80 лет с помощью модели *Mod CW1* и выполнен прогноз ряда на известном интервале. Строка 2 табл.2.
- 3) Выполнено тестирование прогноза ССА для главной компоненты ЧДП (*CW1*).
- 4) Выполнено тестирование прогноза ССА для второй компоненты ЧДП (*CW2*).
- 5) Выполнено тестирование прогноза ССА для ЧДП (*CW*).
- 6) Выполнено тестирование ССА прогноза ряда F_{iKCW} . Ряд F_{iKCW} включает в себя годовую и чандлеровскую компоненты. Строка 6 табл.2.
- 7) Тестирование прогноза этого же ряда (F_{iKCW}) с помощью модели *ModCW1*. Строка 7 табл.2.

Метод ССА позволяет получать прогноз, используя разную методику разложения и восстановления компонент ССА. При работе с методом возникает естественный вопрос, каким образом выполнять те или иные процедуры, чтобы получить оптимальный прогноз. С этой целью было выполнено тестирование метода на примере рядов, представленных в табл. 2 и описанных ниже.

В первой строке табл. 2 приведены результаты вычисления прогноза модели *Mod CW1*, поведение, которой определяется формулой (1), и поэтому хорошо известно, т.е., эта строка дает ошибку метода при долгосрочном прогнозировании. Вторая строка таблицы проверяет возможность с помощью модели продлевать ряд назад в прошлое. Это может быть интересно для сравнения с реальными наблюдениями обсерваторий всего мира в XVIII–XIX вв. Строки таблицы 3–7 показывают, что выбор методики не всегда однозначен и зависит как от длины прогноза, так и от задачи, которая решается в результате долгосрочного прогнозирования.

6. Заключение

В результате работы с методом можно сделать следующие выводы: метод прогноза ССА дает хорошие результаты с разным временным разрешением, но при выполнении прогноза того или иного ряда, требуется дополнительное исследование для выбора оптимальных параметров прогноза. Различные модификации метода и варианты мето-

дик прогнозирования требуют от исследователя принятия решения на том или ином этапе работы. Несмотря на то, что после выбора параметров программу можно перевести в автоматический режим, это создает дополнительные сложности для работы в режиме службы прогноза. Вместе с тем можно получать качественные разовые прогнозы как краткосрочные, так и долгосрочные.

Литература

1. *Миллер Н.О.* Чандлеровское колебание в изменениях широты Пулкова за 170 лет // *Астрономический вестник*, 2011, том 45, № 4, с. 353–364.
2. *Миллер Н.О.* Долгопериодические закономерности движения полюса, полученные из ряда изменения широты Пулкова за 1840–2014. – *Данный сборник*.
3. *Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A.* Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. London, 2001. P. 305.
4. *В.В. Витязев, Н.О. Миллер, Е.Я. Прудникова.* Использование сингулярного спектрального анализа при исследовании движения полюса // *Вестник СПбГУ. Сер. 1, вып.2, 2012. С. 139–147.*
5. *Воротков М.В., Миллер Н.О.* Моделирование движения полюса. – *Данный сборник*.

SSA PREDICTION POLAR MOTION

Miller N.

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

The testing results of the forecast singular spectrum analysis (SSA) of the time series of pole motion coordinates and the Pulkovo latitude variations were presented. Several different methods of SSA application were compared. Testing was performed in two cases – from 10 days to 365 days and from 1 year to 25 years. Long-term forecasting was carried out directly by the SSA. The empirical model of the main component of the polar motion was used.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

Миллер Н.О., Воротков М.В.

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

Предложена эмпирическая модель главной компоненты движения полюса, вклад, которой в исходный ряд составляет 64%. Рассматривается возможность мультипликативного подхода к созданию модели чандлеровского движения полюса. Полученные модели можно использовать для долгосрочного прогнозирования движения полюса.

1. Введение

История моделирования чандлеровского движения полюса (ЧДП) начинается с модели, которую предложил С. Чандлер в 1901 году. В 1891 г. С. Чандлер начал публикацию своих исследований изменчивости широт широты и впервые объявил о существовании периода в наблюдениях широты около 428 сут., который впоследствии был назван его именем [1]. Продолжая исследовать это колебание, он пришел к выводу, что оно состоит как минимум из двух гармоник: первая с периодом 428.5 сут. (1.17 г.) и амплитудой $0''.14$, а вторая с периодом 436 сут. (1.19 г.) и с меньшей амплитудой $0''.09$. Исходя из предположения наличия двух гармоник и учитывая значения их периодов, Чандлер предложил модель, в которой новое уменьшение амплитуды этого колебания должно было произойти около 1910 г. (рис. 1) [2].

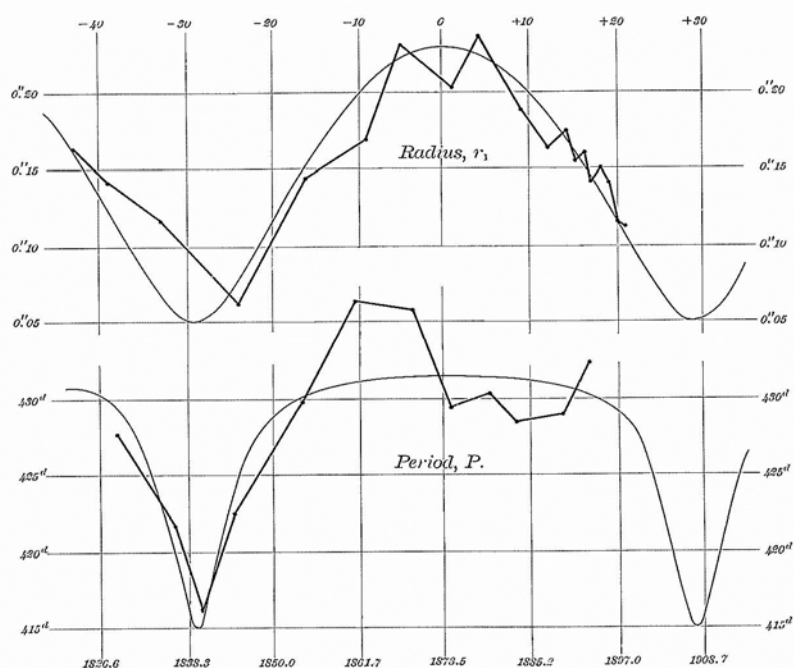


Рис. 1. Копия рисунка К. Чандлера [2]. Изменения радиуса и периода, вычисленные из наблюдений широты и на основе модели им предложенной.

В литературе часто предлагались различные модели, описывающие специфические особенности структуры ЧДП – однокомпонентные, двухкомпонентные, трехкомпонентные, многокомпонентные и другие. На сегодняшний день при моделировании движения полюса строится теоретическая модель, которая описывает вращательную динамику Земли, с учетом атмосферного и океанического момента импульса. Затем

предложенная модель проверяется непосредственно на наблюдениях. В современных расчетах при построении модели обычно используются сравнительно точные наблюдения после 1980 гг. Но известно, что в районе 1925 гг. амплитуда чандлеровского колебания сильно уменьшилась. И было бы интересно построить такую модель, которая позволила бы учитывать не только высокочастотные флуктуации движения полюса, но и низкочастотные составляющие этого колебания.

В наших исследованиях [3] продемонстрирована тонкая структура ЧДП, полученная сингулярным спектральным анализом (ССА) [4].

Для разложения ССА использовался ряд изменений широты Пулкова Fi (1950–2014). Изменение широты Пулкова можно представить в виде:

$$F = Fi_{tr} + Fi_{cw} + Fi_{year} + r, \quad (1)$$

где Fi_{tr} – трендовая составляющая, Fi_{cw} – чандлеровская составляющая, Fi_{year} – годовая составляющая, r – остатки.

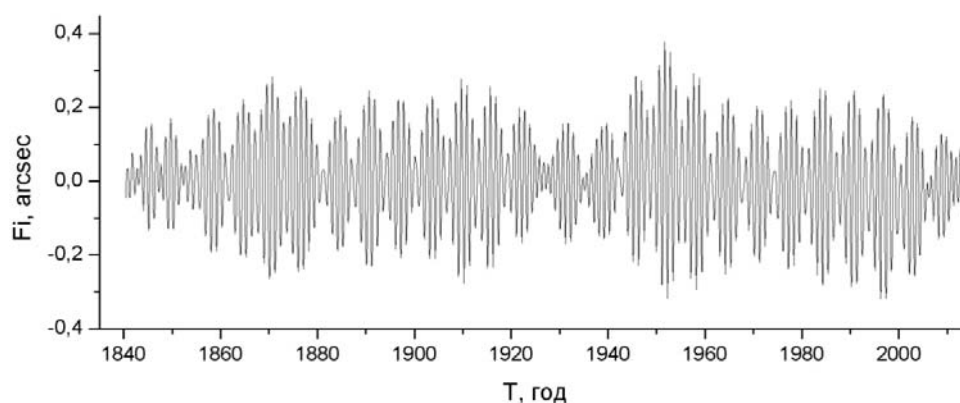


Рис. 2. Ряд изменений широты Пулкова Fi .

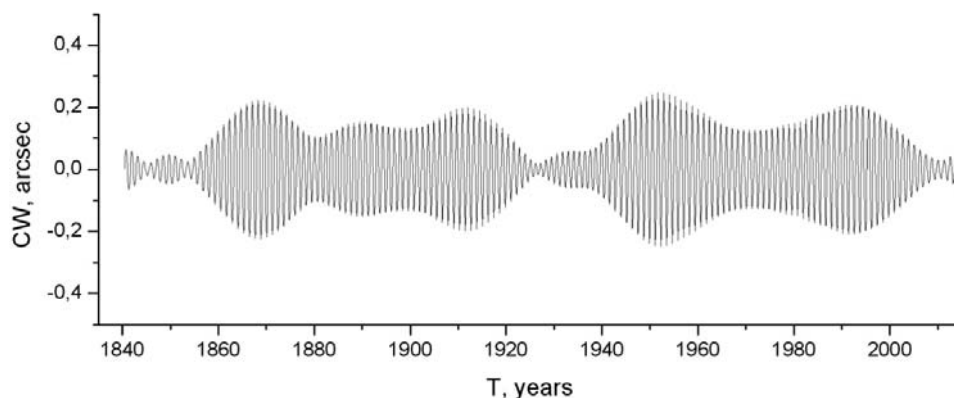


Рис. 3. Чандлеровская компонента Fi_{cw} .

После разложения методом ССА на компоненты, мы восстановили ряд, оставив в нем только полезный сигнал, т.е. получили ряд F (рис. 2). К этому ряду мы вновь применили метод ССА и получили ряд Fi вида:

$$Fi = Fi_{tr} + Fi_{cw} + Fi_{year}, \quad (2)$$

где $Fi_{cw} = Fi_{cw1} + Fi_{cw2}$,

Fi_{cw1} – первая компонента ЧДП (рис. 3),

Fi_{cw2} – вторая компонента ЧДП (рис. 4).

В данной работе рассмотрены возможные модели, описывающие изменение амплитуды и фазы ЧДП. Моделирование было выполнено для рядов Fi_{cw} и Fi_{cw1} . Для

подбора коэффициентов моделей методом наименьших квадратов выполнялась подгонка кривой. Для этой цели была разработана удобная программа с интерфейсом с использованием Matlab, позволяющий варьировать до 10 параметров модели.

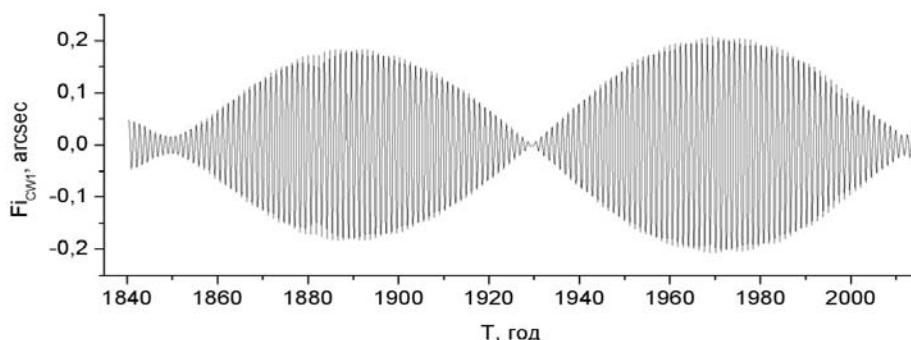


Рис. 4. Главный компонент ЧДП Fi_{cw1}

2. Возможные модели, описывающие изменение амплитуды и фазы ЧДП

Ряд Fi_{cw} можно представить в виде произведения двух функций времени:

$$F(t) = a(t) \sin(\omega t + \Psi(t)), \quad (3)$$

где $a(t)$ – модулирующая функция, ω – несущая частота, $\Psi(t)$ – фаза.

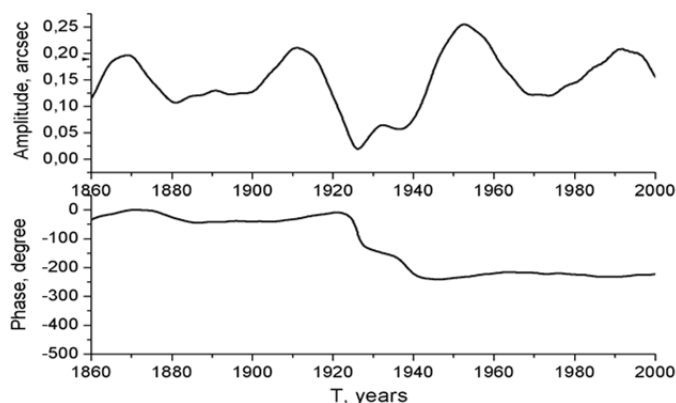


Рис. 5. $a(t)$ – модулирующая функция и фаза $\Psi(t)$.

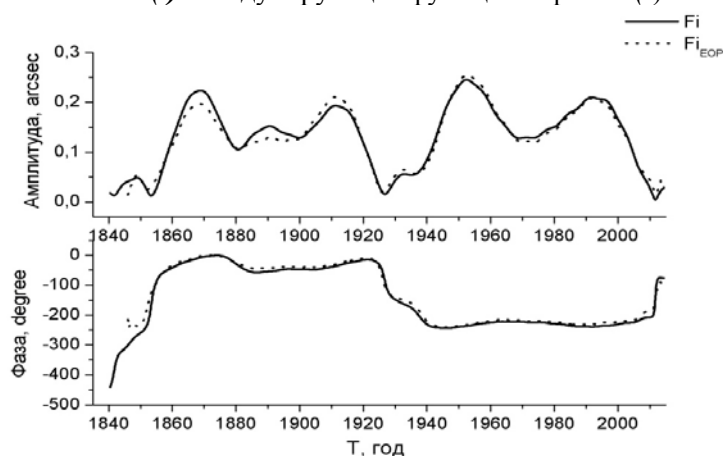


Рис. 6. Амплитуда и фаза ЧДП, вычисленная методом Гильберта.

С помощью математического моделирования можно подобрать эмпирические функции $a(t)$ и $\Psi(t)$. Нами рассматриваются два способа интерпретации поведения ЧДП.

1. Если считать, что $a(t)$ – амплитуда модулируемого гармонического процесса с частотой ω и фазой $\Psi(t)$ (т.е. $a(t) \geq 0$), тогда эмпирические кривые изменения амплитуды и фазы СВ должны иметь вид, представленный на рис. 5. Эти кривые хорошо согласуются с изменениями амплитуды и фазы, вычисленными методом Гильберта для исходного ряда (рис. 6). Наблюдается резкое изменение амплитуды с одновременной сменой фазы на 180° .

2. Допустим, что $a(t)$ может принимать отрицательные значения, тогда функции $a(t)$ и $\Psi(t)$ имеют вид, представленный на рис. 7. В этом случае происходит инвертирование амплитуды на половине ряда, а фаза практически не меняется. При этом кривые $a(t)$ и $\Psi(t)$ выглядят более гладкими, что может казаться более естественным. Но дать физическую интерпретацию этой модели, может быть затруднительно. Такие явления мультипликативного взаимодействия процессов с инвертированной амплитудой встречаются в природе значительно реже, чем взаимодействия с обычной амплитудной модуляцией. Часто похожую кривую дает аддитивное взаимодействие двух процессов с близкими периодами, так называемое, биение двух близких частот. Рассмотрение предлагаемой мультипликативной модели является альтернативой аддитивной модели.

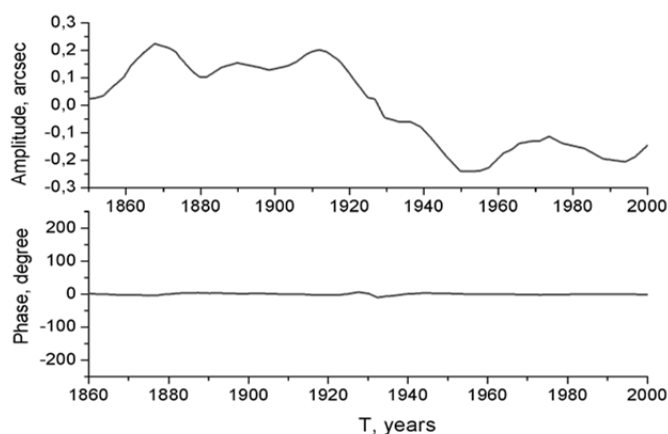


Рис. 7. $a(t)$ – управляющая функция и фаза $\Psi(t)$

В работе было выполнено качественное построение второй модели ЧДП двумя способами. Для первого способа модель имеет вид:

$$F_1(t) = a_1(t)\sin(t\omega + \Psi), \text{ где } \Psi - \text{constant.} \quad (4)$$

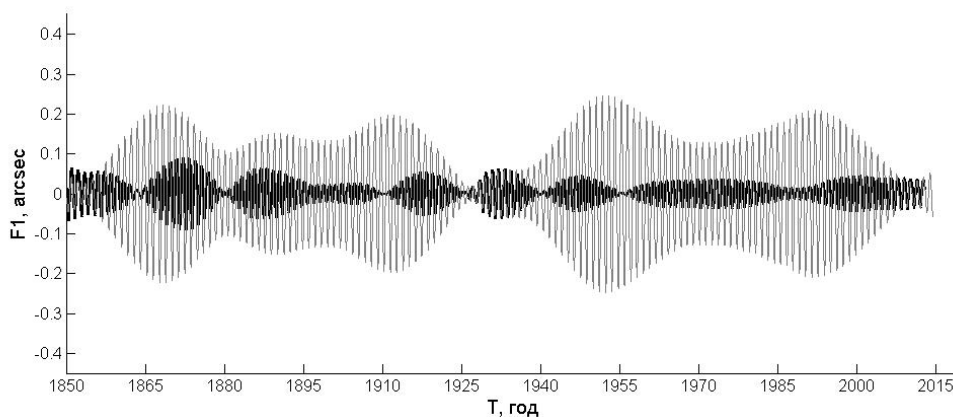


Рис. 8. Эмпирическая модель ЧДП с постоянной фазой.

Таким образом, в первом способе фаза не меняется со временем, а во втором регулируется, т.е. имеются незначительные плавные изменения фазы не более, чем на 10° . Вторая модель задаётся уравнением, имеющим вид:

$$F_2(t) = a_1(t)\sin(t\omega + \Psi(t)). \quad (5)$$

Регулировка фазы приводит к улучшению модели. На рис. 8 и рис. 9 приводятся эмпирические модели и разницы между исходными и модельными рядами (формулы 4, 5, соответственно).

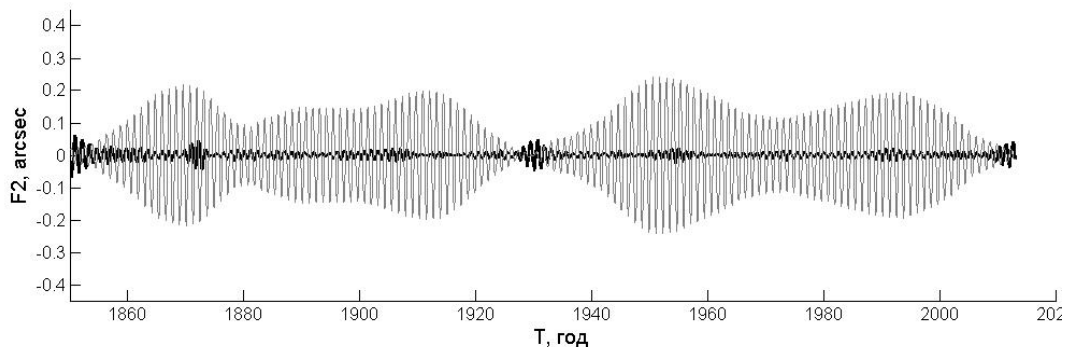


Рис. 9. Эмпирическая модель ЧДП с регулируемой фазой.

3. Модель главного компонента ЧДП (ModCW1)

Рассмотрим модель главного компонента ЧДП. Если бы $a(t)$ была гармонической, то наблюдаемая картина могла бы породиться биением двух близких по частоте сигналов. Это хорошо видно на примере ряда $F_{i_{CW1}}$ (рис. 4). Наблюдаемая картина часто интерпретируется как сумма двух гармоник:

$$F(t) = k_1(t) \sin(t\omega_1 + \Psi_1(t)) + k_2(t) \sin(t\omega_2 + \Psi_2(t)),$$

но может быть представлена мультипликативной моделью:

$$F(t) = k_1(t) \sin(t\omega_1 + \Psi_1(t)) \times \sin(t\omega_2 + \Psi_2(t));$$

Мультипликативная модель главного компонента ЧДП (ModCW1) (рис. 10) имеет вид:

$$F(t) = a(t) \sin(t\omega_1 + \Psi_1), a(t) = A \sin(t\omega_2), \quad (6)$$

где $\omega_1 = 0.845$ ($P_1 = 1.184$ г.); $\Psi_1 = 197.97^\circ$;

$\omega_2 = 0.0062$ ($P_2 = 162$ г.); $A = 0.196$;

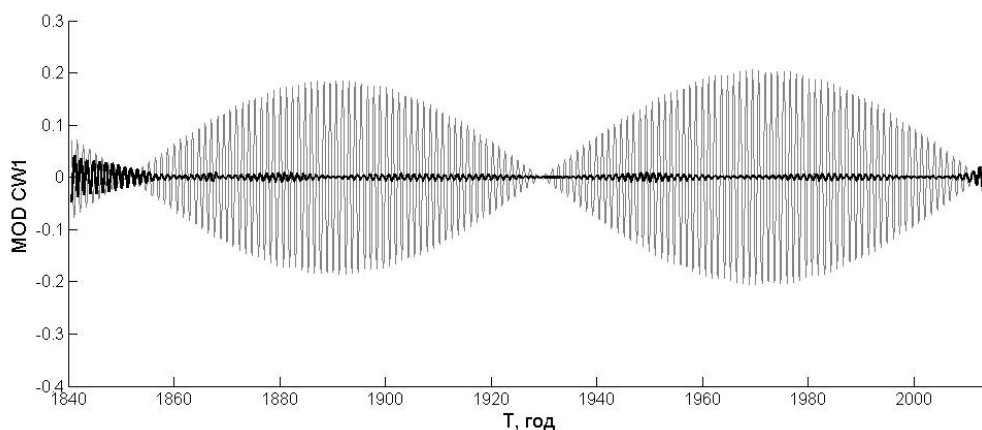


Рис. 10. Модель главного компонента ЧДП $F_{i_{CW1}}$.

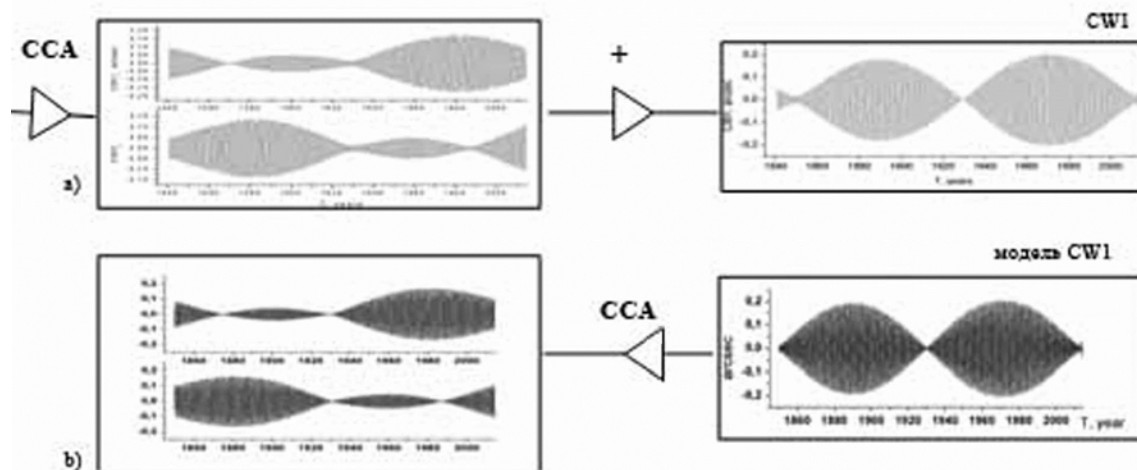


Рис. 11. Схема сравнения структуры модельного ряда со структурой ряда CW1.

Мы вычислили значение модельного ряда на интервале 1840–2014 гг., после этого получили разложение ССА модельного ряда. В результате получилась структура разложения точно соответствующая структуре исходного ряда. На рис. 11 в схематичном виде показано соответствие структуры разложения модели (b), аналогичному разложению исходного ряда (a). Такое совпадение может служить косвенным подтверждением правильности модели.

4. Заключение

Несмотря на то, что геофизический смысл модели мультипликативного взаимодействия с «инверсией амплитуды» пока непонятен, возможность рассмотрения такой модели может быть интересна, поскольку не требует объяснения резкого изменения фазы чандлеровских колебаний в 20-х–30-х годах двадцатого века. Модель *ModCW1* можно использовать для прогнозирования рядов движения полюса.

Литература

1. Chandler S.C. On the variation of latitude // Astron. J. 1891. 248. P. 59–61.
2. Chandler S.C. On a new component of the polar motion // Astron. J. 1901. 494. P. 109–112.
3. Миллер Н.О. Чандлеровское колебание в изменениях широты Пулкова за 170 лет // Астрономический вестник. 2011. Т. 45. № 4. С. 353–364.
4. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. – London. 2001. P. 305.

MODELING OF THE CHANDLER WOBBLE

Miller N.O., Vorotkov M.V.

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

The empirical model of the main components of the pole motions was presented. The contribution in the original series is 64%. The possibility of a multiplicative approach to creating models of the Chandler wobble was demonstrated. These models can be used for long-term forecasting of the pole motion.

УПРОЩЁННАЯ ФОРМА УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МОМЕНТА СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЦЕПЛЕНИЯ МАНТИИ И ЯДРА ЗЕМЛИ

Пасынок С.Л.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия

Для учёта временной зависимости моментов сил электромагнитного сцепления ядра и мантии, входящего в динамические уравнения вращения, необходимо, прежде всего, решить уравнения магнитной гидродинамики для возмущений. В работе показано, что в качестве невозмущённого состояния для этой задачи должно быть выбрано состояние магнитострофического равновесия, и что магнитострофические скорости проникнут в уравнения для возмущений через нелинейные члены. Поэтому прежде чем решать уравнения для возмущений необходимо сначала определить магнитострофические скорости. Кроме того, было показано, что нельзя пренебрегать полоидальной и тороидальной компонентами невозмущённого магнитного поля Земли в сравнении с радиальной в уравнениях для возмущений.

1. Введение

Анализ измерений последних лет показал, что принятая теория МАС2000 (IAU2000) обладает наилучшими характеристиками в сравнении с другими моделями нутации. Однако, из анализа остаточных расхождений углов нутации модели МАС2000 и измерений видно, что остаточные расхождения имеют довольно сложную структуру в отличие от предсказаний теории, что может привести к необходимости уточнения теории в связи с приближением точности определения параметров вращения Земли (ПВЗ) к субмикросекундному, а в перспективе и к микросекундному уровню. В связи с этим, Международным астрономическим союзом (IAU) в 2013 году была создана рабочая группа №19 по уточнению принятой теории нутации.

Предложенная Пасынком и Кузнецовой интерпретация остаточных расхождений (Пасынок С.Л., Кузнецова Л.А., 2014), в принципе, позволяет объяснить структуру остаточных расхождений теории и измерений [1]. Однако для построения высокоточной модели необходимо уточнить временную зависимость момента сил электромагнитного сцепления мантии и ядра Земли. Для этого нужно решить уравнения магнитной гидродинамики и определить временную зависимость возмущений магнитного поля, обусловленных дифференциальным вращением. Поскольку точные уравнения магнитной гидродинамики очень сложны, приходится делать ряд упрощений и допущений, позволяющих прийти к сравнительно простой форме уравнений. Эта процедура проводилась ранее в работах зарубежных авторов, например, в [2] и [3]. Однако вопрос о временной зависимости не стоял так остро, пока ею пренебрегали, но теперь для корректного определения точного вида этой зависимости, который необходимо определить для дальнейшего уточнения теории нутации, необходимо более детально рассмотреть какие упрощения и допущения возможно сделать и какие есть для этого основания.

В докладе рассматривается переход от точных уравнений магнитной гидродинамики к приближённым, обсуждаются допущения, приближения и упрощения, которые могут быть сделаны. Полученные упрощённые уравнения гидродинамики выносятся на обсуждение. Результаты работы планируется использовать для уточнения временной зависимости момента магнитных сил с целью дальнейшего уточнения теории нутации Земли.

2. Уравнения магнитной гидродинамики и выражение для момента сил

Точные уравнения магнитной гидродинамики имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + (\bar{v}_f \cdot \nabla) \bar{B} &= (\bar{B} \cdot \nabla) \bar{v}_f - \bar{B} \operatorname{div} \bar{v}_f - \nabla \otimes (v_m \nabla \otimes \bar{B}) \\ \frac{\partial \bar{v}_f}{\partial t} + (\bar{v}_f \nabla) \bar{v}_f + 2\bar{\Omega} \otimes \bar{v}_f + \dot{\bar{\Omega}} \otimes \bar{x} + \bar{\Omega} \otimes (\bar{\Omega} \otimes \bar{x}) &= \bar{f} + \bar{j} \otimes \bar{B} + \nu \Delta \bar{v}_f \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}_f) &= 0 \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{f} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \varphi_g$ – часть ускорения, обусловленная давлением и гравитационным потенциалом, \bar{B} – вектор индукции магнитного поля, ν – коэффициент кинематической вязкости, $\bar{j} = \frac{1}{\mu} (\nabla \otimes \bar{B})$ – плотность тока проводимости, v_m – магнитная вязкость, связанная с проводимостью σ_E и магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0 \mu_r$ соотношениями:

$$v_m = \frac{1}{\mu \sigma_E}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума, а μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Если уравнения (1) решены и найден вектор индукции магнитного поля, то момент сил электромагнитного сцепления может быть вычислен по формуле [4]

$$\bar{L}_m^{EM} \approx - \oint_{S_{\text{границы раздела}}} \frac{1}{\mu} ((\bar{x} \otimes \bar{B})(\bar{B} \bar{n})) dS. \quad (2)$$

Для полной формулировки задачи ещё необходимо добавить граничные условия. Уравнения являются чрезвычайно сложными нелинейными уравнениями. Поэтому упрощение этих уравнений производилось последовательно с использованием количественных оценок величин входящих в них членов. Для количественных оценок членов, входящих в состав уравнений магнитной гидродинамики использовались следующие данные:

– для оценки значений плотности, давления и сейсмических скоростей на поверхностях равной плотности в состоянии гидростатического равновесия использовались данные модели PREM [5] в виде рядов по степеням безразмерного радиального расстояния;

– для оценки значений индукции магнитного поля вне жидкого ядра использовались коэффициенты международной опорной модели главной части магнитного поля Земли, которая формируется рабочей группой по моделированию магнитного поля Земли Международной ассоциацией по геомагнетизму и аэрономии (IAGA) [6].

3. Результаты оценок и их обсуждение

Поскольку задача об определении момента сил электромагнитного сцепления не ставит себе целью решение задачи о генерации всего магнитного поля Земли, а только о его возмущениях, обусловленных дифференциальным вращением жидкого ядра вблизи его границ, то разумно искать решение системы уравнений методом теории возмущений.

Сначала в качестве невозмущённого состояния было принято состояние гидростатического равновесия. В результате для поправок были получены уравнения для опре-

деления поправок к невозмущённым значениям. Однако, количественные оценки входящих в них членов показали, что если считать, что скорости в жидком ядре обусловлены только приливными течениями, то полученные уравнения содержат члены различного порядка малости, отличающихся приблизительно на 3 порядка (оценки проводились по порядку величины).

Однако, оказалось, что если положить, что невозмущённые величины удовлетворяют уравнениям, известным как уравнения магнитострофического равновесия [7], то оказывается, что уравнения для возмущений содержат члены приблизительно одного порядка малости. Таким образом, было показано, что состояние гидростатического равновесия является плохим выбором невозмущённого состояния для метода последовательных приближений. В состоянии магнитострофического равновесия скорости отнюдь не равны нулю и обусловленные ими члены уравнений превосходят члены с приливными скоростями примерно на 3 порядка.

Факт того, что более близкими приближениями к реальному состоянию жидкого ядра Земли являются состояния геострофического (аналог магнитострофических течений для случая баланса сил Кориолиса и давления при отсутствии магнитного поля) и магнитострофического (а не гидростатического) равновесия хорошо известен в теории геодинамо [8].

Конечно же, сразу возникает вопрос: если поле скоростей магнитострофических течений действительно достаточно велико, то почему его не учитывают в теории вращения Земли. Следует заметить, что это не совсем так: дискуссия о возможности влияния геострофических течений на вращение Земли ведётся, начиная с работы [9].

В этой работе рассматривается влияние атмосферных геострофических течений на вращение Земли. Там показано, что момент сил, возникающий из-за одних лишь геострофических течений равен нулю и, таким образом, они не оказывают влияния на возбуждение вращения Земли. Кроме того, геострофические течения не имеют гармоник в нутационном частотном диапазоне и поэтому сразу же исключаются из уравнений нутации, если нелинейными членами можно пренебречь, как это и имеет место быть для атмосферы.

В более поздней работе [10], на основе проведенного в ней детального анализа, напротив, показано, что, хотя для атмосферы часть углового момента, обусловленная геострофическими течениями и равна нулю, однако, если бы атмосфера была достаточно протяжённой оболочкой (как жидкое ядро, например), то это бы, вообще говоря, не выполнялось. Кроме того, для атмосферы как для малого возмущающего фактора можно пренебречь нелинейными членами в уравнениях движения в сравнении с остальными членами, и совсем другая ситуация наблюдается в жидком ядре Земли, в котором нелинейные члены достаточно велики. Нелинейные члены, содержащие магнитострофические скорости, дадут гармоники в приливном частотном диапазоне и, таким образом, повлияют на решение возмущённых уравнений магнитной гидродинамики.

Таким образом, при применении метода возмущений в качестве невозмущённого состояния следует выбирать состояние магнитострофического равновесия.

Второй задачей численных оценок была проверка возможности пренебрежения полоидальной и тороидальной составляющими индукции невозмущённого магнитного поля $\bar{B}_{(0)}$ в сравнении с радиальной, которое допускается в [2,3] при решении уравнений магнитной гидродинамики (При таком пренебрежении уравнения значительно упрощаются).

Для оценок использовалась международная опорная модель магнитного поля, которая формируется рабочей группой по моделированию магнитного поля Земли Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии (IAGA) в виде [6]:

$$\bar{B}_{(0)} = -\bar{\nabla} V, \quad (3)$$

где:

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] \hat{P}_n^m(\theta)$$

$R = 6371,2$ км – опорный геомагнитный радиус Земли, а $\hat{P}_n^m(\theta)$ – присоединённые функции Лежандра, нормированные по Шмидту.

Поскольку токи, генерирующие геомагнитное поле сосредоточены, в основном, в жидком ядре Земли, то для проведения оценок величины магнитного поля и соотношения его составляющих вблизи границы ядро-мантия, воспользуемся аналитическим продолжением этого поля до этой границы.

Можно показать, что первые три члена потенциала магнитного поля Земли могут быть представлены в виде:

$$V(\bar{x}, t) = -\frac{R^3}{r^3} M_p^{(B)} x_p - \frac{1}{2} \frac{R^5}{r^5} M_{\langle pi \rangle}^{(B)} x_p x_i - \frac{1}{3} \frac{R^7}{r^7} M_{\langle ijp \rangle}^{(B)} x_i x_j x_p + \dots \quad (4)$$

где симметричные и бесследовые по любой паре индексов (STF) тензоры $M_p^{(B)}$, $M_{\langle pi \rangle}^{(B)}$ и $M_{\langle ijk \rangle}^{(B)}$ есть известные функции коэффициентов первых трёх порядков ($n = 1, 2, 3$) разложения (3). По дважды повторяющимся индексам идёт суммирование от 1 до 3 (правило суммирования Эйнштейна).

Что же касается поля внутри твёрдого ядра, то здесь для достоверной оценки необходимо иметь решение полных уравнений магнитной гидродинамики, приводящих к генерации главного магнитного поля Земли.

Поскольку токи, генерирующие геомагнитное поле сосредоточены, в основном, в жидком ядре Земли, то можно провести следующую композитную оценку. Будем полагать, что угловая зависимость у внутреннего поля такая же, как и у аналитического продолжения внешнего поля к границе твёрдого и жидкого ядер, а амплитуда редуцирована к значению, полученному в [11], которая составляет 20 мТл.

Тогда для магнитного потенциала поля внутреннего ядра получим:

$$V_{in}(\bar{x}, t) = -V_p^{(B)} x_p - \frac{1}{2} V_{\langle pi \rangle}^{(B)} x_p x_i - \frac{1}{3} V_{\langle ijp \rangle}^{(B)} x_i x_j x_p + \dots \quad (4)$$

На рис. 1 закрашены области, в которых модуль отношения радиальной составляющей индукции больше, чем модуль перпендикулярной ей составляющей для границы ядро-мантия. Для границы жидкое ядро – твёрдое ядро рисунок аналогичен: вся поверхность Земли делится на области в виде горизонтальных полос, где одна из составляющих индукции превалирует. Хотя, для границы твёрдое ядро – жидкое ядро общая площадь областей, где превалирует радиальная составляющая индукции невозмущённого магнитного поля несколько больше.

Таким образом, сразу же исключать из уравнений составляющую индукции магнитного поля, ортогональную радиальной (до решения уравнений магнитной гидродинамики) нельзя.

4. Уравнения метода последовательных приближений

Будем искать решение системы уравнений гидродинамики методом теории возмущений. Величины, соответствующие невозмущённому состоянию будем помечать индексом (0). Тогда:

$$\bar{B} = \bar{B}_{(0)} + \bar{b}, \quad \rho = \rho_{(0)} + \delta\rho, \quad p = p_{(0)} + \delta p, \quad \varphi_g = \varphi_{g0} + \delta\varphi_g. \quad (5)$$

Анализ порядка величины оставшихся членов показал, что удобно в качестве невозмущённого состояния выбрать состояние, описываемое уравнениями:

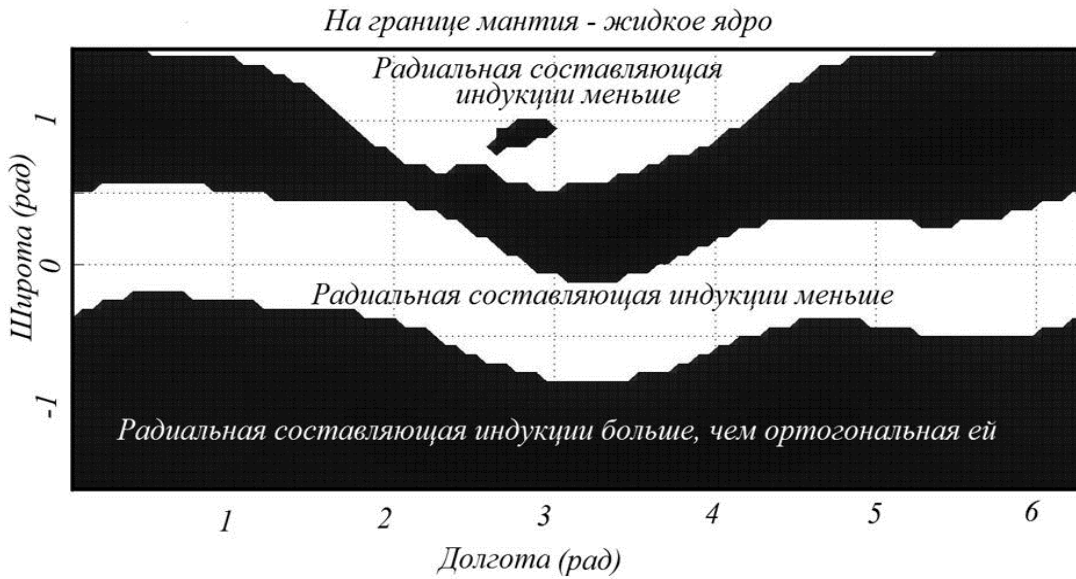


Рис. 1. Области, где радиальная составляющая индукции невозмущённого магнитного поля Земли на границе ядро-мантия больше (чёрный цвет) в сравнении с ортогональной ей составляющей и где она меньше (белый цвет).

$$\begin{aligned}
 (\bar{v}_{f(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{B}_{(0)} &= (\bar{B}_{(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{v}_{f(0)} - \bar{B}_{(0)} \operatorname{div} \bar{v}_{f(0)} \\
 (\bar{v}_{f(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{v}_{f(0)} + 2\Omega_0 \bar{e}_z \otimes \bar{v}_{f(0)} &= -\frac{1}{\rho_{(0)}} \bar{\nabla} p_{(0)} - \bar{\nabla} (\varphi_{g(0)} + \varphi_{c(0)}) + \frac{1}{\mu \rho_{(0)}} (\bar{\nabla} \otimes \bar{B}_{(0)}) \otimes \bar{B}_{(0)} \\
 \operatorname{div} (\rho_{(0)} \bar{v}_{f(0)}) &= (\bar{\nabla} \rho_{(0)} \bar{v}_{f(0)}) + \rho_{(0)} \operatorname{div} \bar{v}_{f(0)} = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

Эти уравнения известными как уравнения магнитострофического равновесия [7]. Подставляя (5) в уравнения магнитной гидродинамики и учитывая, что невозмущённые величины удовлетворяют уравнениям магнитострофического равновесия (6), получим:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{b}}{\partial t} - v_m \Delta \bar{b} &\approx (\bar{B}_{(0)} \cdot \bar{\nabla}) \delta \bar{v}_f - (\delta \bar{v}_f \cdot \bar{\nabla}) \bar{B}_{(0)} - \bar{B}_{(0)} \operatorname{div} \delta \bar{v}_f + \\
 &\quad + (\bar{b} \cdot \bar{\nabla}) \bar{v}_{f(0)} - (\bar{v}_{f(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{b} - \bar{b} \operatorname{div} \bar{v}_{f(0)} \\
 \frac{\partial \delta \bar{v}_f}{\partial t} - \nu \Delta \delta \bar{v}_f + (\bar{v}_{f(0)} \cdot \bar{\nabla}) \delta \bar{v}_f + (\delta \bar{v}_f \cdot \bar{\nabla}) \bar{v}_{f(0)} + 2\Omega_0 \bar{e}_z \otimes \delta \bar{v}_f &\approx -2\Omega_0 \bar{m} \otimes \bar{v}_{f(0)} + \\
 + \frac{\delta \rho}{(\rho_{(0)} + \delta \rho) \rho_{(0)}} \bar{\nabla} \left(p_{(0)} + \frac{B_{(0)}^2}{2\mu} \right) - \frac{1}{\rho_{(0)}} \bar{\nabla} \left(\delta p + \frac{\bar{\nabla} (\bar{B}_{(0)} \bar{b})}{\mu \rho_{(0)}} \right) - \bar{\nabla} (\delta \varphi_g + \delta \varphi_c) + \\
 + \frac{1}{\mu \rho_{(0)}} (\bar{B}_{(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{b} + (\bar{b} \cdot \bar{\nabla}) \bar{B}_{(0)} - \frac{\delta \rho}{\mu (\rho_{(0)} + \delta \rho) \rho_{(0)}} (\bar{B}_{(0)} \cdot \bar{\nabla}) \bar{B}_{(0)} \\
 \frac{\partial \delta \rho}{\partial t} + (\bar{\nabla} \rho_{(0)} \delta \bar{v}_f) + \rho_{(0)} \operatorname{div} \delta \bar{v}_f + (\bar{\nabla} \delta \rho \bar{v}_{f(0)}) + \delta \rho \operatorname{div} (\bar{v}_{f(0)}) &\approx 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

Отсюда видно, что магнитострофические течения проникают в эти уравнения через нелинейные члены и оценки порядка их величины показывают, что они вовсе не являются пренебрежимо малыми.

5. Выводы

В результате проведенных оценок и вычислений можно сделать следующие выводы:

- 1) Для решения уравнений магнитной гидродинамики необходимо, прежде всего, решить уравнения магнитострофического равновесия (6). Только после этого можно будет решить уравнения для возмущений (7).
- 2) Сразу же исключать из уравнений составляющую индукции магнитного поля, ортогональную радиальной (до решения уравнений магнитной гидродинамики) нельзя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-00735.

Литература

1. Кузнецова Л.А., Пасынок С.Л. Расщепление частоты свободной нутации ядра в магнитном поле Земли // Измерительная техника, 2014, № 6, С. 8.
2. B.A. Buffett, P.M. Mathews, T.A. Herring. Modeling of nutation and precession: Effects of electromagnetic coupling // J. Geophys. Res., 2002, 107(B4), 2070, 10.1029/2000JB000056.
3. Berangere Deleplace and Philippe Cardin. Visco-magnetic torque at the core mantle boundary // Geophys. J. Int. (2000) 142.
4. M.G. Rochester. Geomagnetic core-mantle coupling // J. Geophys. Res., 1962, V. 67, № 12, pp. 4833–4836.
5. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25 (1981), 297–356.
6. S. Maus, S. Macmillan, T. Chernova, S. Choi, D. Dater, V. Golovkov, V. Lesur, F. Lowes, H. Luhr, W. Mai, S. McLean, N. Olsen, M. Rother, T. Sabaka, A. Thomson, and T. Zvereva. The 10th-Generation International Geomagnetic Reference Field // Geophys. J. Int. (2005) 161, P. 561–565.
7. R. Hide. Proudman-Taylor theorem \\\ Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism, edited by D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, pp. 852–853, Springer, 2007, Dordrecht, electronic publication under ISBN 978-1-4020-4423-6.
8. М.Ю. Решетняк. Анизотропия в геострофической турбулентности // Геофизические исследования (2010), Том 11, №4, с. 5–19.
9. У. Манк, Г. Макдональд. Вращение Земли, (перевод с англ. В.В. Нестерова, под ред. П.Н. Успенского). – М.: Мир, 1964, с. 140–142.
10. J.M. Wahr. The effects of the atmosphere and oceans on the Earth's wobble - I. Theory // Geophys., J. R. Astr. Soc. 1982, 70, 349–372.
11. Kuang, W.J., and J. Bloxham. Numerical modelling of magnetohydrodynamic convection in a rapidly rotating spherical shell: Weak and strong field dynamo action // J. Comput. Phys., 1999, 153, 51–81.

A REDUCED FORM OF HYDRODYNAMIC EQUATIONS FOR PURIFICATION OF THE TIME DEPENDENCE OF THE ELECTROMAGNETIC COUPLING OF THE MONTLE AND EARTH'S CORE

Pasynok S.L.

National research institute of physico-technical and radio engineering measurements (FSUE "VNIIFTRI"), VNIIFTRI, Mendeleevo, Moscow reg., Russia

The magnetohydrodynamic equations for perturbations have to be solved for purification of the time dependence of the electromagnetic coupling of the Earth's core and montle. The evaluations of this paper yield two impotent results. Firstly, magnetostrophic currents have to be determined before equation solution for perturbations because of these currents are included in the nonlinear members and have to be took into account. Secondly, the radial component of the induction of the main magnetic field is compared with the orthogonal to it. So, both of these components have to be took into account in the equations for perturbations.

ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПВЗ В ГМЦ ГСВЧ

Пасынок С.Л., Безменов И.В., Цыба Е.Н.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия

В настоящей статье представлены результаты деятельности ГМЦ ГСВЧ, связанной с осуществлением функций оперативной службы определения ПВЗ ГСВЧ в 2014 году.

1. Введение

Работы по оперативному определению ПВЗ во ФГУП «ВНИИФТРИ» имеют долгую многолетнюю историю [1]. Они ведутся с самого момента создания ФГУП «ВНИИФТРИ» – с 1954 г. На рис. 1 показаны слева направо: первый начальник лаборатории определения ПВЗ ГМЦ ГСВЧ Д.Ю. Белоцерковский, один из первых бюллетеней ГМЦ ГСВЧ и павильоны, предназначенные для астрооптических измерений (фото 1975 г.).



Рис. 1. Первый начальник лаборатории определения ПВЗ ГМЦ ГСВЧ Белоцерковский Д.Ю. (слева), один из первых бюллетеней ГМЦ ГСВЧ (в центре) и астрономические павильоны ФГУП «ВНИИФТРИ» в 1975 г. (справа).


На ФГУП «ВНИИФТРИ» возложено выполнение функций Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ).

Согласно положению о ГСВЧ, утвержденному Постановлением Правительства РФ № 225, на ГСВЧ возложена ответственность за формирование официальной информации о времени, частоте и параметрах вращения Земли (ПВЗ). В настоящее время в связи с повсеместным применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) повышаются требования к значениям параметров вращения Земли (ПВЗ), формируемым ГСВЧ, прежде всего, в части оперативности и временного разрешения. Согласно положению о полномочиях федеральных органов исполнительной власти по поддержанию, развитию и использованию модернизированной ГНСС ГЛОНАСС, утвержденному Постановлением Правительства РФ № 323, на Ростехрегулирование возложена ответственность за обеспечение системы ГЛОНАСС эталонными значениями времени и частоты, национальной шкалой времени и данными о параметрах вращения Земли.

В настоящей статье представлены результаты деятельности ГМЦ ГСВЧ, связанные с осуществлением оперативной службы ПВЗ в 2014 году.

2. ГМЦ ГСВЧ как Центр совместной обработки и прогнозирования ПВЗ

В настоящее время совместная обработка всех измерений (комбинирование) производится по методике, разработанной и внедрённой М.Б. Кауфманом (см. рис. 2) в 2006 году [2].



М.Б. Кауфман
1938–2014

Кауфман Марк Борисович родился и вырос в Москве, в 1962 г. окончил Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. С 1965 г. и до самой смерти работал во ВНИИФТРИ: сначала в лаборатории астрономического времени в должностях младшего, затем старшего научного сотрудника; с 1987 г. – в лаборатории определения параметров вращения Земли старшим научным сотрудником, начальником лаборатории, ведущим научным сотрудником. Он был награжден медалью «Ветеран труда» и знаком «За заслуги в стандартизации», является автором более 70 опубликованных научных работ.

Кауфман М.Б. вёл научную и практическую работу по астрономическим наблюдениям с целью определений всемирного времени и координат полюса. Он является соавтором фундаментального труда «Каталог звездных положений служб времени СССР» (1971). Участвовал в разработке вероятностно-статистического метода вычислений параметров вращения Земли по данным наблюдений обсерваторий Государственной службы времени и частоты (1977), алгоритмов и программ комбинированной обработки астрономических, спутниковых и радио интерферометрических измерений с целью оперативного определения параметров вращения Земли. Занимался исследованиями теоретических и практических вопросов применения средств космических навигационных систем для решения задач ГСВЧ. Ответственный редактор официального бюллетеня Госстандарта «Всемирное время и координаты полюса» (с 1990).

Рис. 2. Создатель текущей методики совместной обработки (комбинирования) ГМЦ ГСВЧ – М.Б. Кауфман.

Источники данных, которые использовались для совместной обработки (комбинирования) в 2014 году, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Источники данных определений ПВЗ в 2014 г.

Центр вычислений	Технич. средства определений ПВЗ	Определяемые параметры
ГМЦ ГСВЧ	GPS	X, Y, UTI
ГМЦ ГСВЧ	РСДБ	$X, Y, UTI, d\psi, d\varepsilon$
ИПА РАН	Лаз. локация ИСЗ	X, Y, UTI
ИПА РАН	GPS	X, Y, UTI
ИПА РАН	РСДБ	$X, Y, UTI, d\psi, d\varepsilon$
СВОЭВП	GPS/ГЛОНАСС	X, Y, UTI
ИАЦ КВНО	GPS	X, Y
ИАЦ КВНО	Лаз. локация ИСЗ	X, Y

С 1 мая 2015 года для совместной обработки используется ряд ПВЗ, определённых в ГМЦ ГСВЧ по результатам лазерных измерений. Вычисления ведутся по программе, разработанной Цыбой Е.Н. [3, 4]. К концу первого квартала 2015 года ему удалось добиться повышения точности определяемых значений за счёт совершенствования методов определения орбит космических аппаратов [5].

Оценка точностных характеристик оперативных значений ПВЗ в 2014 году ежедневно проводилась в оперативном режиме графически и по специальным файлам-отчетам (рис. 3).

Оценка точностных характеристик оперативных значений ПВЗ проводилась также и в апостериорном режиме по результатам сравнения с опорными окончательными данными о ПВЗ Международной службы вращения Земли (МСВЗ-рус., IERS-англ.) и окончательными опорными данными ГСВЧ.

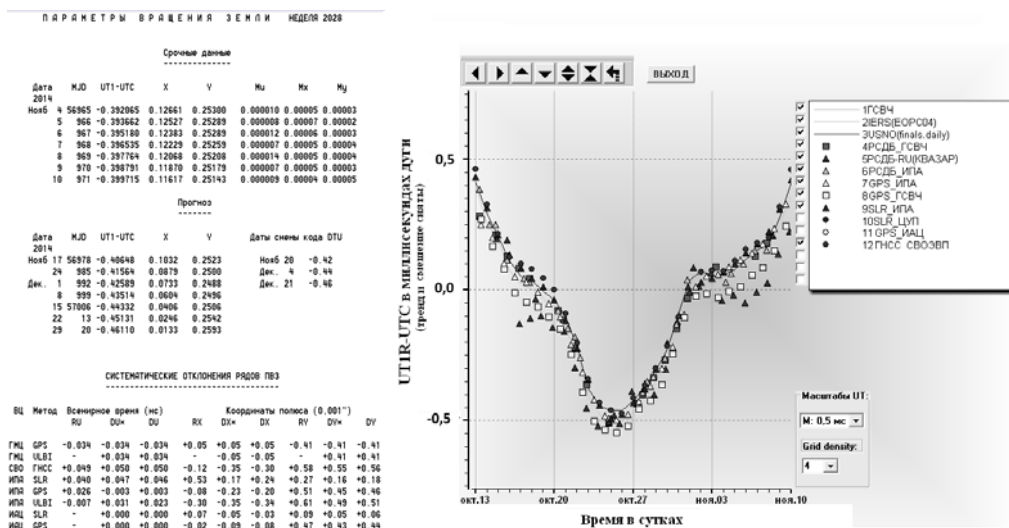


Рис. 3. Файл-отчёт (слева) и графическое представление информации о ПВЗ (справа), используемые для контроля точностных характеристик ПВЗ.

На рис. 4 слева показаны среднеквадратические отклонения (СКО) значений $UT1-UTC$ ГСВЧ и различных оперативных данных МСВЗ от окончательных опорных значений МСВЗ (серии ЕОРС04) в 2013 году (Сравнение проведено для 2013 года, поскольку результаты годового анализа МСВЗ, публикуемые в годовом отчёте, становятся доступными только спустя два года после окончания отчётного года).

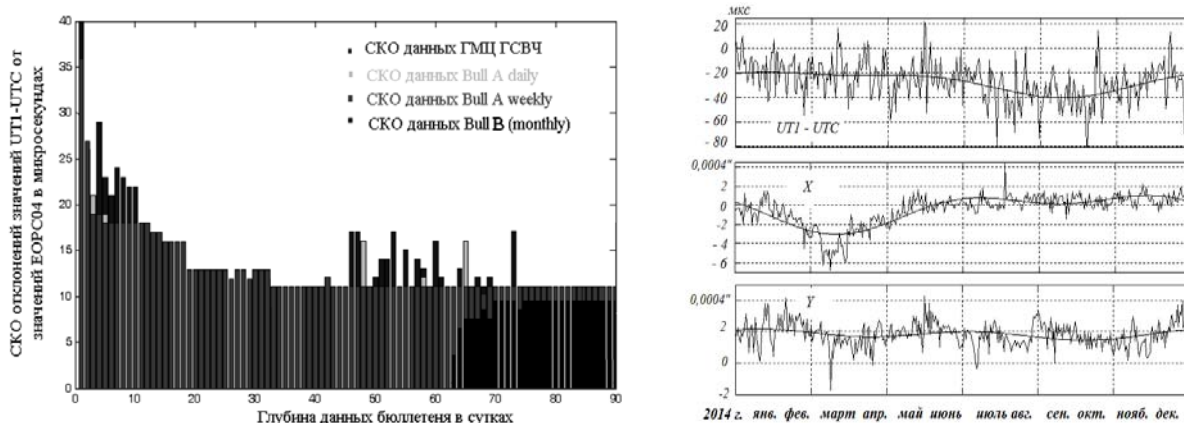


Рис. 4. Сравнение точностных характеристик значений $UT1-UTC$ ГСВЧ и различных оперативных данных о ПВЗ МСВЗ со значениями серии ЕОРС04 в 2013 г. (слева) и отклонения окончательных значений ПВЗ ГСВЧ от данных МСВЗ (справа).

Глубина данных бюллетеня определяется как разность в сутках между датой рассматриваемого значения из бюллетеня и датой публикации бюллетеня. Видно, что точность комбинирования ГСВЧ находится на высоком уровне.

Превышение СКО для данных второй части бюллетеня А ГСВЧ (см. участок между 40 и 75 сутками по оси абсцисс на рис. 4) в сравнении с данными МСВЗ той же оперативности объясняется, главным образом, разностью в подходах для определения систематической части. В алгоритме построения оперативных значений МСВЗ [6] систематически несмещёнными считаются сглаженные значения серии ЕОРС04, интерполированные на текущий момент времени. Таким образом, в асимптотике их значения практически в точности совпадают, потому что начинают сравниваться практически сами с собою. ГМЦ ГСВЧ при построении своих опорных данных никак не опирается

на данные серии ЕОРС04 и формирует их независимо. Поэтому неисключенная часть систематических расхождений ЕОРС04 и данных ГСВЧ дает дополнительный вклад в оценку СКО.

«Окончательные» данные ГМЦ ГСВЧ в действительности формируются примерно с такой же задержкой, как и данные бюллетеня «В» МСВЗ, т.е. являются ежемесячными (monthly) данными. Их отклонения от окончательных опорных данных МСВЗ (серии ЕОРС04) показаны на рис. 4 справа. Сплошные линии представляют собою систематическую часть этих отклонений.

Отклонения прогнозных значений Всемирного времени, переданных в составе коротковолновых радиосигналов в 2014 году, от определённых впоследствии по измерениям значений составили $\pm 0,015c$ ($UT1-UTC=DUT1+dUT1\pm 0,015c$). Причём отклонения 95% всех переданных значений не вышли за пределы $\pm 0,010c$.

По результатам сводных значений $UT1-UTC$ регулярно определяются среднегодовое значение вариаций угловой скорости вращения Земли и отклонения относительно него (рис. 5).

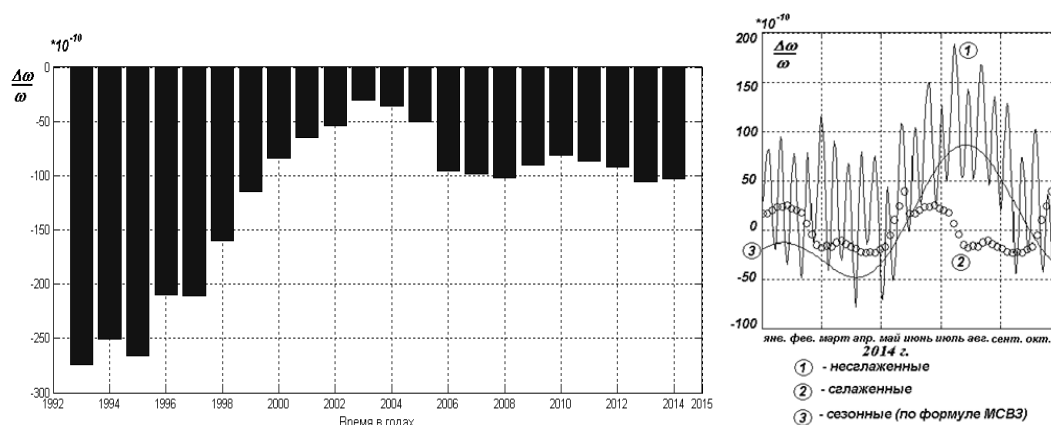


Рис. 5. Средние значения относительных вариаций угловой скорости вращения Земли за последние 22 года (слева) и отклонения относительно этого уровня в 2014 г. (справа).

Данные о ПВЗ формируются ежесуточно до 10 часов утра в виде официальных бюллетеней установленной формы. В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ формируются следующие виды бюллетеней:

- бюллетень Q с ежесуточными данными о ПВЗ (содержит вычисленные значения за предшествующие моменту определения сутки и прогноз на последующие 30 суток) ;
- бюллетень А (его первая часть выходит еженедельно и содержит вычисленные значения за неделю, предшествующую неделе момента определения данных, и прогноз на следующие 7 недель с шагом в одну неделю, а вторая часть выходит ежемесячно и содержит окончательные значения за предшествующий прошедшему месяцу);
- бюллетень Е (выходит ежеквартально и содержит исходные данные, использованные для комбинирования, и окончательные значения из второй части бюллетеня А. Бюллетень Е за четвёртый квартал содержит также краткий годовой анализ работы ГСВЧ за прошедший год);
- по мере необходимости в бюллетене Г публикуется извещение о введении скачущей секунды.

Внешний вид бюллетеней с информацией о ПВЗ ГСВЧ показан на рис. 6.

Они выкладываются на сервер ГМЦ ГСВЧ и отправляются потребителям по автоматизированному каналу связи, выкладываются на ftp-сервер ФГУП «ВНИИФТРИ» (ftp.vniiftri.ru), рассылаются по электронной почте в соответствии со списком рассылки. Информация $dUT1$, являющаяся составляющей приближенного значения разности

UT1–UTC, сообщается на радиостанции с целью передачи потребителям в составе эталонных сигналов времени. Бюллетени А и Е ГСВЧ выпускаются также в печатном виде и рассылаются по почте в соответствии со списком рассылки, утверждённым начальником ГМЦ ГСВЧ. За 2014 год всего выпущено и передано 52 бюллетеня серии «А», 365 бюллетеня серии «Q», 4 бюллетеня серии «Е», а также сформированы и направлены 19 информационных сообщений DT. Бюллетени серий «А» и «Е» выпущены также в печатном виде тиражами 125 и 185 экземпляров соответственно и отправлены по почте.



Рис. 6. Бюллетени с информацией о ПВЗ ГСВЧ.

3. Деятельность ГМЦ ГСВЧ, связанная с определением ПВЗ

Помимо сводной обработки, описанной выше, в настоящее время в ГМЦ ГСВЧ ведется (по мере поступления данных измерений) обработка результатов измерений с помощью радиointерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ), приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и спутниковых дальномеров (СЛД) с помощью высокоточного современного специального программного обеспечения. Подробно эта деятельность описана в работах [2,5,7].

В ГМЦ ГСВЧ разработаны также алгоритм и программа расчета опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС на основе обработки данных по орбитам, предоставляемых ежедневно несколькими центрами обработки и анализа данных [8]. Расхождение (СКО) в получаемых сводных комбинированных орбитах VNF и IGL находится на уровне сантиметра.

В части проведения измерений с целью определения ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ проводятся навигационные и спутниковые лазерные дальномерные измерения (ГНСС и СЛД). Пункт ГМЦ ГСВЧ, расположенный в гп. Менделеево, является одним из 5 измерительных пунктов для целей определения ПВЗ РОССТАНДАРТА (остальные 4 пункта расположены в городах Иркутске, Новосибирске, Хабаровске и Петропавловске-Камчатском). На двух из этих пунктов (в гп. Менделеево и г. Иркутске) реализована частичная колокация (имеются средства ГНСС и СЛД). Положение внутренних шкал времени ГНСС приёмников относительно PPS стандартов, от которых они берут частоту, непрерывно контролируются с субнаносекундной точностью. Работы по проведению измерений с помощью спутниковых лазерных дальномеров рассмотрены в [9-11].

4. Заключение

В 2014 году в ГМЦ ГСВЧ проводилась непрерывная деятельность по определению и прогнозированию параметров вращения Земли. Полученные результаты были опубликованы в виде бюллетеней установленной формы и распространены с помощью

средств связи. Точностные характеристики полученных результатов соответствуют международному уровню исследований в области определения и прогнозирования ПВЗ. Определения параметров вращения Земли носят характер постоянной метрологической работы и будут продолжаться.

Литература

1. *Кауфман М.Б., Синенко Л.А., Юношев Л.С.* Государственная служба определения параметров вращения Земли: краткая история и современное состояние // Труды ИПА РАН, вып. 6, «Астрометрия и небесная механика», 2001, 24–33.
2. *Кауфман М.Б.* Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений // Точные измерения для высоких технологий. Монография, ФГУП «ВНИИФТРИ» – Менделеево, 2008, 80–118.
3. *Кауфман М.Б., Е.Н. Цыба.* Вычисление ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ по данным спутниковой лазерной дальнометрии, Метрология времени и пространства. Материалы 6-го Международного симпозиума, 17–19 Сентября 2012 г., гп. Менделеево Солнечногорского р-на Московской обл., Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ", 2012, 287–288.
4. *E.N. Tsyba, M.B. Kaufman.* Improvement of the software BERNESE for SLR data processing in the Main Metrological Center of the State Time and Frequency Service, Proceedings of the Journées 2014 "Systemes de reference spatio-temporels", Z. Malkin and N. Capitaine (eds), Pulkovo observatory, 2015, ISBN 978-5-9651-0873-2 & ISBN 978-2-901057-70-3, 235-236.
5. *Е.Н. Цыба, Пасынок С.Л.* Определение параметров вращения Земли по результатам лазерной локации ИСЗ в ГМЦ ГСВЧ, настоящий выпуск.
6. *McCarthy D.D. and Luzum, B.J.* 1991, Combination of Precise Observations of the Orientation of the Earth // Bulletin Géodésique, 65, 22.
7. *С.Л. Пасынок, И.В. Безменов, М.Б. Кауфман.* Развитие методов и средств измерений Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника, 2015, №1, 9–14.
8. *Безменов И.В., Пасынок С.Л.* Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии, ISSN 2313-8068, 2015, №2, 143–158.
9. *Igor Yu. Ignatenko, Vitaliy G. Palchikov, Anatoly G. Zhestkov.* New generation of the SLR station "Mendeleevo". Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodaesie, vol. 48, Frankfurt, 2012, 363–365.
10. *A. Goncharov, I. Ignatenko, A. Kapitonov, A. Kurchanov, Y. Smirnov.* The Laser station synchronization and reference frequency system and its metrological support, 19-th International Workshop on Laser Ranging, Celebrating 50 Years of SLR: Remembering the Past and Planning for the Future", Annapolis, MD, USA, October 27–31, 2014.
11. *I. Blinov, I. Ignatenko.* Metrological provision of uniformity of measurements of time and frequency in the Satellites Laser-Ranging system, 19-th International Workshop on Laser Ranging, Celebrating 50 Years of SLR: Remembering the Past and Planning for the Future", Annapolis, MD, USA, October 27–31, 2014.

RAPID EOP COMBINATION IN MMC SSTF

Pasynok S.L., Bezmenov I.V., Tsyba E.N.

National research institute of physicotecnical and radio engineering measurements (FSUE "VNIIFTRI"), VNIIFTRI, Mendeleevo, Moscow reg., Russia

VNIIFTRI as the Main metrological center of Russian time, frequencies and Earth rotation service (MMC SSTF) carried out the rapid EOP processing based on GNSS, VLBI and SLR observations for many years. The results of EOP activity of VNIIFTRI as MMC SSTF in 2014 are presented.

ОКЕАНИЧЕСКИЙ НАГРУЗОЧНЫЙ ЭФФЕКТ

Спиридонов Е.А., Виноградова О.Ю.

Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

Усовершенствована методика расчета нагрузочных чисел Лява, предназначенных для вычисления океанического нагрузочного эффекта. Для этого осуществлен учет диссипации и добавлена возможность работы по более современной модели строения Земли IASP91. При расчете океанического гравиметрического эффекта высоты основных приливных волн океанической приливной модели FES2012 разложены по сферическим функциям до 1120 порядка. Для нужд гравиметрии разработана программа прогноза параметров земных приливов ATLANTIDA3.1_2014. После небольшой доработки с учетом пожеланий заинтересованных специалистов программа также сможет вычислять приливные смещения, изменения потенциала, деформации и напряжения как в недрах Земли, так и на ее поверхности. В работе приведена оценка точности расчета вертикальных смещений, полученная по гравиметрическим данным.

1. Введение

Настоящая работа в основном посвящена океаническому гравиметрическому эффекту. В тоже время сравнение расчетов с данными наблюдений, производимых на сети сверхпроводящих гравиметров Глобального геодинамического проекта позволяет сделать выводы в том числе и о точности прогноза смещений земной поверхности. А это уже важно для обработки GNSS-наблюдений. Во втором разделе дан краткий обзор основных методов вычислений и численных результатов, касающихся гравиметрических наблюдений. Здесь также рассмотрены уточнения, применяемые при вычислении обычных чисел Лява для упругой Земли без океана. В частности, это касается зависимости значений этих чисел от широты. Третий раздел посвящен обсуждению возможной точности прогноза океанических нагрузочных вертикальных смещений.

2. Методы вычислений и основные численные результаты

Для расчета обычных и нагрузочных чисел Лява сформулирована краевая задача для упругой, самогравитирующей, сжимаемой сферы с зависящими от широты и глубины распределениями плотности, упругих параметров Ламе и геопотенциала [8] (обобщение задачи М.С. Молоденского [3]). В отличие от работ других авторов, решение не зависит от внешнего потенциала. Путем численного интегрирования полученной системы шестого порядка получены значения чисел Лява для упругой Земли без океана второго и третьего порядка, а также нагрузочные числа h'_n и k'_n до порядка $n = 10000$.

Система интегрируется при граничных условиях на поверхности сферы и на границе ядро-мантия. Отличительной особенностью здесь является зависимость в этих условиях ускорения свободного падения и плотности от широты. При расчете нагрузочных чисел Лява нормальное напряжение на поверхности принимается отличным от нуля.

В вычисляемые обычные числа Лява для полусуточных волн вводились поправки за относительные и кориолисовы ускорения, вычисленные Сергеем Молоденским в начале 80-х годов [4]. В самое последнее время эти поправки были уточнены авторами настоящей работы, что привело к лучшему совпадению прогноза с данными наблюдений.

Все расчеты проводились для двух моделей строения Земли – PREM и IASP91 [1].

Для учета диссипации профили скоростей продольных и поперечных сейсмических волн пересчитывались при помощи логарифмической функции крипа с референц-

периода 1 с. на периоды приливных волн. Далее по ним определялись значения параметров Ламе, которые вместе с кривыми плотности, ускорения свободного падения и сжатия являлись исходными данными для численного интегрирования упомянутой выше краевой задачи. В формулировку этой задачи, как уже было сказано, были введены усовершенствования, позволяющие определять зависимость обычных и нагрузочных чисел Лява от широты.

Высоты прилива шести океанических моделей раскладывались в ряд по сферическим функциям. Для этого были применены рекуррентных формулы не для полиномов Лежандра, а сразу для интегралов от них, взятых по элементарным сферическим площадкам [2]. После умножения на косинус и синус фазы полученные действительная и мнимая части высоты прилива котидальных карт пяти океанических моделей раскладывались по сферическим функциям до 720 порядка. Разложение океанической модели *FES2012* велось до 1120 порядка. Показано, что подход, основанный на применении сферических функций, на практике приводит к более точным результатам, чем основанный на вычислении океанического нагрузочного эффекта при помощи функций Грина с учетом ближней зоны.

По полученным нагрузочным числам Лява и коэффициентам разложения высоты прилива вычислялись нагрузочная и ньютоновская составляющие океанического эффекта, а также специально для настоящей работы нагрузочная вертикальная составляющая смещения. В свою очередь по амплитудам и фазам этого эффекта, а также дельта-факторам для упругой Земли без океана определялись прогнозные амплитудные факторы для Земли с океаном, а также прогнозные временные ряды прилива. Прогнозные амплитудные дельта-факторы и сдвиги фаз вычисляются путем сложения прилива в упругой Земле и океанического эффекта.

Все приведенные выше теоретические соображения были реализованы в программе прогноза параметров земных приливов *ATLANTIDA3.1_2014* [9]. Программа позволяет вычислять амплитуды и фазы океанического гравиметрического эффекта с учетом диссипации по шести океаническим приливным моделям и двум моделям строения Земли. Помимо этого она выдает значения амплитудных дельта-факторов для упругой Земли без океана с учетом их широтной зависимости, а также прогнозные амплитудные факторы и сдвиги фаз для упругой Земли с океаном. Возможно получение временных рядов приливов. Среди дополнительных возможностей можно выделить: расчет амплитуд и фаз океанического гравиметрического эффекта в узлах сетки, а также расчет горизонтальных составляющих океанического эффекта. Подробное описание программы и руководство по ее установке содержится в работе [9].

Вычисляемые нашей программой средние значения амплитудных дельта-факторов суточных и полусуточных волн (без учета их широтной зависимости) для упругой Земли без океана (модель строения *IASP91*) отличаются от результатов негидростатической модели *DDW* [7] на единицы в пятом знаке после запятой, т.е. эти результаты фактически полностью совпадают. Почти на порядок больше разности для волн *M3* и *M4*. Это связано с меньшей точностью их определения в моделях *DDW*. Так амплитудные факторы волны *M4* рассчитываются в этой модели с точностью лишь до третьего знака после запятой. Главным здесь является совпадение амплитудных факторов для волны *M2*, на частоте которой не действуют резонансные эффекты. Совпадение факторов суточных приливных волн является следствием применения нами резонансной кривой из работы [7]. Также независимыми являются совпадения значений для волн *M3* и *M4*.

Что касается наших расчетов для *PREM*, то здесь полученные значения лежат практически посередине между моделями *DDW/NH* и *DDW/H* с точностью до четверто-

го-пятого знака после запятой, находясь в целом несколько ближе к гидростатической модели.

В целом, полученные нами результаты очевидно свидетельствует о переоценке роли негидростатичности в модели *DDW/NH* для *PREM* почти в два раза и полном отсутствии необходимости ее введения для модели *IASP91*.

Несмотря на указанное совпадение средних широтные зависимости амплитудных факторов нашей модели и моделей *DDW* существенно различны [8]. Амплитудный фактор нашей модели для полусуточных волн меняется от экватора к полюсу на 0.0014 для *PREM* и 0.0021 для *IASP91*, что составляет 0.12% и 0.18% соответственно от его средней величины. Эти изменения с широтой в несколько раз превосходят таковые для *DDW*.

Как уже было отмечено выше, суммарный учет объемного прилива и океанического гравиметрического эффекта позволяет вычислять значения прогнозных дельта-факторов для упругой Земли с океаном. На территории Европы отклонение величины прогнозного амплитудного фактора от среднего составляет одну-три сотых. В арктических областях эти отклонения достигают 5, 6 сотых. Что касается прогнозного сдвига фазы, то по мере приближения к атлантическому побережью Западной Европы, его значения достигают нескольких градусов. Интересно, что нулевая изолиния сдвига фазы на континенте вытянута преимущественно вдоль меридиана, соответствующего 37 градусам восточной долготы, т.е. представляет собой своеобразный московский меридиан.

В результате сравнения прогноза параметров земных приливов с данными наблюдений [5], полученных на сети сверхпроводящих гравиметров Глобального геодинимического проекта (*GGP*), выяснено, что выдаваемые нашей программой результаты в целом лучше соответствуют наблюдениям чем полученные при помощи программы *PREDICT* из пакета Венцеля [10]. Это достигается как за счет применения более современной океанической модели и модели строения Земли, так и уточнения амплитудных факторов для упругой Земли без океана. Определенную положительную роль здесь также играет усовершенствование методики расчета океанического нагрузочного эффекта [6].

Полученные при помощи *ATLANTIDA3.1_2014* амплитуды разностных векторов (прогноз минус наблюдения) составляют десятки наногал (табл.1). Определенные проблемы пока еще остаются для волн *S2* и *K1*. Причем, если улучшение ситуации для волны *S2* в основном связано с дальнейшим совершенствованием океанических моделей, то уменьшение амплитуд разностных векторов суточных волн может быть достигнуто за счет применения более современной резонансной кривой.

Таблица 1. Амплитуды разностных векторов (нГал).
Прогноз *ATLANTIDA3.1_2014 (IASP91, FES2012)* минус наблюдения.

	Q1	O1	P1	K1	N2	M2	S2	K2
BAD HOMBURG	9.8	8.5	13.1	55.1	7.2	14.0	67.8	5.1
PECNY	6.1	13.6	3.5	56.9	5.8	13.1	66.9	7.3
SCHILTACH	10.9	27.2	14.2	43.9	21.6	12.0	82.8	11.1
VIENNE	5.8	20.7	12.3	52.7	3.3	8.2	68.3	2.2
WETZELL	4.7	21.9	4.3	45.0	5.1	15.3	70.8	4.5
MEAN	7.4	18.4	9.5	50.7	8.6	12.5	71.3	6.0
SIGMA	2.7	7.4	5.1	5.9	7.4	2.7	6.6	3.4

В настоящей работе, как уже было сказано, применена резонансная кривая из [7]. Несмотря на близость к этой кривой экспериментальных точек, получаемых из данных

наблюдений на сверхпроводящих гравиметрах, ее дальнейшая доработка и улучшение способны уменьшить амплитуды разностных векторов суточных волн в среднем на 50%. Этого можно достичь, например, за счет увеличения на 7% модуля амплитуды резонанса на чандлеровской частоте, либо путем варьирования резонансных амплитуд собственных колебаний с периодом 54 минуты в пределах 0.1%.

3. Некоторые результаты расчета вертикальных нагрузочных смещений

Если полагать, что отклонения прогноза от данных гравиметрических наблюдений в основном определяются неточностями океанической приливной модели, то показанные выше гравиметрические амплитуды разностных векторов (табл. 1) можно легко пересчитать в таковые для вертикальных смещений (табл.2). Для этого необходимо умножить данные табл.1 на средний радиус Земли и разделить на удвоенную величину ускорения свободного падения. Помимо этого вводился повышающий множитель порядка 1.3 (для каждой станции он свой), учитывающий частичную компенсацию нагрузочных ускорений, вызванных вертикальными смещениями земной поверхности и изменением потенциала вследствие деформации.

Таблица 2. Погрешности определения вертикального смещения (мм), установленные по данным гравиметрических наблюдений.

	Q1	O1	P1	K1	N2	M2	S2	K2
BAD HOMBURG	0.039	0.034	0.052	0.220	0.029	0.056	0.271	0.020
PECNY	0.027	0.061	0.016	0.253	0.026	0.058	0.298	0.033
SCHILTACH	0.046	0.115	0.060	0.185	0.091	0.051	0.350	0.047
VIENNE	0.027	0.095	0.056	0.242	0.015	0.038	0.313	0.010
WETZELL	0.020	0.095	0.019	0.195	0.022	0.066	0.306	0.019
MEAN	0.032	0.080	0.041	0.219	0.037	0.054	0.308	0.026
SIGMA	0.010	0.032	0.022	0.029	0.031	0.011	0.028	0.014

Обратим внимание на волну *M2*. Здесь прогноз отличается от наблюдений в среднем на 5 сотых миллиметра. В то же время характерная амплитуда вертикального нагрузочного смещения на указанных европейских станциях составляет порядка 5 мм. Таким образом, при помощи нашей программы уже сейчас возможно вычисление вертикальных нагрузочных смещений с относительной погрешностью около 1%.

В качестве примера рассмотрим океанический нагрузочный эффект для волны *M2* в Пулково. При помощи нашей программы мы посчитали амплитуды и фазы вертикальных нагрузочных смещений для трех океанических моделей. Результаты еще по 4-м моделям получены с сайта Шерника. Амплитуда вертикального нагрузочного смещения волны *M2* составила порядка 2 мм (табл.3). Соответственно, погрешность определения этой амплитуды лежит в пределах 0.02 мм (1%).

В то же время рассмотрение отношений амплитуд разностных векторов между океаническими моделями к средней амплитуде эффекта (табл.4) показывает, что характерный разброс от модели *FES2012* вариантов расчета по другим океаническим моделям (первый столбец) составляет от 6 до 16%.

Таким образом, применение океанических приливных моделей прошлого поколения приводит к практически десятикратной потере точности по сравнению с приведенной выше оценкой по гравиметрическим данным. В этом состоит главный вывод настоящей работы.

Таблица 3. Океанический нагрузочный эффект в Пулкове.
Амплитуды и фазы вертикального смещения (мм).
Волна *M2*.

	AMPL	PHASE
FES2012_ATL	2.02	295.20
NAO99b_ATL	1.76	290.69
CSR40_ATL	1.83	298.97
NAO99b_Sch	1.84	292.10
FES2004_Sch	1.83	293.30
CSR40_Sch	1.93	297.30
TPXO.6.2_Sch	1.96	292.50
MEAN	1.88	294.29
SIGMA	0.09	2.99

Таблица 4. Отношение амплитуд разностных векторов нагрузочного вертикального смещения к средней амплитуде (%). Волна *M2*. Пулкове.

	FES2012_ ATL	NAO99b_ ATL	CSR40_ ATL	NAO99b_ Sch	FES2004_ Sch	CSR40_ Sch
FES2012_ATL	-					
NAO99b_ATL	15.9	-				
CSR40_ATL	12.3	14.2	-			
NAO99b_Sch	11.2	4.8	11.7	-		
FES2004_Sch	10.8	5.7	9.6	2.1	-	
CSR40_Sch	6.2	14.4	6.2	10.3	8.8	-
TPXO.6.2_Sch	6.0	11.0	13.3	6.4	7.1	8.8

4. Заключение

Показанное в работе усовершенствование методики расчета нагрузочных и обычных чисел Лява совместно с применением наиболее современной океанической приливной модели и модели строения Земли привело к наиболее точному совпадению прогноза параметров земных приливов с данными гравиметрических наблюдений. Это позволило, в частности, произвести оценку по гравиметрическим данным достижимой к настоящему времени точности прогноза приливных (прилив в упругой Земле плюс океаническая нагрузка) вертикальных смещений земной поверхности. Согласно этой оценке вертикальные смещения уже сейчас можно прогнозировать с относительной погрешностью порядка 1%.

Дальнейшее усовершенствование методики и связанное с этим повышение точности достижимо за счет введения более современной резонансной кривой, улучшенных поправок за относительные и кориолисовы ускорения, а также поправок за нутацию для суточных волн. Важное значение также имеет постоянный мониторинг и введение в программу наиболее современных океанических моделей (например, *TPXO8*).

Все перечисленные возможности авторы настоящей работы надеются реализовать в следующей версии своей программы *ATLANTIDA3.1_2017*, выход которой планируется на осень 2016 года. К этому моменту в программу также предполагается включить возможность расчета приливных вертикальных и горизонтальных смещений, а также, в случае проявления в этом заинтересованности со стороны других специалистов, вычисление деформаций, напряжений и потенциала.

Литература

1. *Виноградова О.Ю., Спиридонов Е.А.* Сравнительный анализ океанических поправок в ускорение силы тяжести, рассчитанных по моделям PREM и IASP91 // *Физика Земли*. 2012. № 1–2. С. 74–83.
2. *Виноградова О.Ю., Спиридонов Е.А.* Сравнение двух методов расчета нагрузочных приливов // *Физика Земли*. 2013. № 1–2. С. 88–97.
3. *Молоденский М.С.* Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли // *Тр. Геофизического ин-та АН СССР*, 1953, №19(146), С. 3–52.
4. *Молоденский С.М.* Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. М.: ИФЗ РАН, 1984, 216 с.
5. *Спиридонов Е.А.* Результаты сравнения прогнозных значений параметров земных приливов с данными наблюдений // *Сейсмические приборы*. 2015а, Т. 51, № 2, с. 31–44.
6. *Спиридонов Е.А.* О влиянии диссипации и выбора модели строения Земли на качество прогноза параметров земных приливов // *Сейсмические приборы*. 2015, Т. 51, № 3, с. 5–16.
7. *Dehant, V., Defraigne, P., Wahr, J.M.* Tides for a convective Earth // *J. Geophys. Res.*, 1999, 104, 1035–1058.
8. *Spiridonov Evgeny.* Tidal-Amplitude Delta-Factors and Their Dependence on Latitude *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-1296, 2014.
9. *E. Spiridonov, O. Vinogradova, E. Boyarskiy, and L. Afanasyeva.* ATLANTIDA3.1_2014 FOR WINDOWS: A SOFTWARE FOR TIDAL PREDICTION // *Bull. Inf. Marées Terrestres*, Feb. 2015, № 149, 12063–12082.
10. *Wenzel H.G.* The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package Eterna3.30 // *Bull. D'Inf. Maree Terr.*, 1996, 124, 9425–9439.

OCEANIC LOADING EFFECT

Spiridonov E.A., Vinogradova O.Yu.

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Method of calculating the load Love numbers, designed to calculate the oceanic load effects, has improved. For this the accounting of dissipation has been made and the possibility of working on a more modern model of the Earth structure (IASP91) was added. In the process of the oceanic gravimetric effect calculating the heights of the main tidal waves of the ocean tidal model FES2012 were expanded in spherical harmonics up to 1120 order. Software for tidal prediction ATLANTIDA 3.1_2014 was developed for the needs of gravimetry. After a little refinement to the wishes of interested specialists the program will also be able to calculate the tidal displacements, potential change, strain and stress in the Earth's interior and on the surface. In the work an estimation of the accuracy of vertical displacements calculation derived from gravity data is shown.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРА ВИНЕРА-ЛИУВИЛЛЯ К АНАЛИЗУ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА И ВОЗМУЩАЮЩИХ ФУНКЦИЙ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Цуркис И.Я., Кучай М.С., Рыбин А.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

В работе использован вариант спектрального анализа, предназначенный для изучения возмущающих функций атмосферы и океана, а также наблюдаемого движения полюса. Проанализированы ряды возмущающих функций атмосферы, полученные Международной службой вращения Земли за период с 01.01.1980 по 20.06.2014. Показано, что угловой момент атмосферы (УМА) содержит регулярную моду с периодом ~16 месяцев; источником этой моды предположительно является Исландская депрессия.

1. Введение

Как известно, УМА содержит моду с периодом 365 суток. Частота этой моды $1.72 \cdot 10^{-2} \text{ сут}^{-1}$ близка к частоте свободной нутации Земли, т.е. к чандлеровской частоте $\omega = 1.45 \cdot 10^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Вопрос о наличии в УМА других близкочандлеровских составляющих окончательно не решён. Этим составляющим должны соответствовать моды в наблюдаемом движении полюса, которые на фоне резонансного (чандлеровского) пика в спектре Фурье могут «потеряться». Поэтому для идентификации близкочандлеровской моды в движении полюса необходим специальный математический аппарат. Такой аппарат есть, это спектральное разложение Винера-Лиувилля (В.-Л.), см. [4] и п.2 настоящей статьи. С его помощью в УМА и в движении полюса удалось обнаружить устойчивую моду с периодом 485...490 суток. Источником этой моды предположительно является Исландская депрессия – область пониженного атмосферного давления, мигрирующая над северной частью Атлантического океана, [3].

2. Спектральное разложение Винера-Лиувилля

А) Начнём с построения билинейной формы (скалярного произведения) В.-Л. $\langle *, * \rangle$. Пусть $\omega = 1.45 \cdot 10^{-2} \text{ сут}^{-1}$ – чандлеровская частота; $z(t), w(t)$ – комплексные функции времени, значения которых заданы в «точках опроса» $t = 0, \Delta, 2\Delta, \dots, T = N\Delta$, где Δ - шаг дискретизации. Тогда

$$\langle z, w \rangle = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} (z_{n+1} - e^{i\omega\Delta} z_n)(\overline{w_{n+1}} - e^{-i\omega\Delta} \overline{w_n}), \quad (1)$$

где $z_n = z(n\Delta)$, $w_n = w(n\Delta)$.

Б) Движение полюса может быть описано уравнением Лиувилля:

$$(1 - i/2Q)\dot{x} - i\omega x = f, \quad (2)$$

где $x = x_1 + ix_2$ радиус-вектор полюса; Q – добротность мантии (по современным оценкам $50 \leq Q \leq 500$); $f(t)$ – функция, линейным образом связанная с экваториальными составляющими углового момента [2]. А.Н. Колмогоров высказал гипотезу, согласно которой $f(t)$ представляет собой случайную функцию, а точнее – белый шум. Это значит, что

$$Kf(t)f(\tau) = M(f(t)\overline{f(\tau)}) - Mf(t) \cdot M\overline{f(\tau)} = a\delta(t - \tau), \quad (3)$$

где a – интенсивность белого шума (коэффициент диффузии), [1]. Если гипотеза (3) верна, то в силу теоремы Дуба $x(t)$ – нормальный марковский процесс. Важно, что на

больших временах решение стохастического уравнения (2) с нулевым средним и любая детерминированная функция $u(t)$ «почти ортогональны» в смысле (1): если $Mf(t) = 0$, то для любого $Q_0 > 0$ существует не зависящая от $u(t)$ константа $C = C(Q_0)$ такая, что при всех $Q \in [Q_0, \infty[$ справедлива оценка

$$M|\langle x, u \rangle|^2 \leq C \cdot \langle u, u \rangle \Delta / T.$$

Это позволяет использовать форму (1) для оценки детерминированной части решения уравнения (2) при $Q \gg 1$.

В) Введём в рассмотрение нормированную гармонику $h_\sigma(t)$: если $\sigma \neq \omega + 2\pi n / \Delta$; $n = 0, \pm 1, \dots$, то:

$$h_\sigma(t) = e^{i\sigma t} / \sqrt{\langle e^{i\sigma t}, e^{i\sigma t} \rangle} = \frac{e^{i\sigma t} \sqrt{\Delta}}{2 |\sin((\sigma - \omega)\Delta / 2)|};$$

под h_ω будем понимать нормированную в смысле (1) функцию, пропорциональную резонансу $te^{i\omega t}$:

$$h_\omega(t) = \frac{te^{i\omega t}}{\sqrt{\langle te^{i\omega t}, te^{i\omega t} \rangle}} = \frac{t}{\sqrt{\Delta}} e^{i\omega t}.$$

Спектром В.-Л. функции $z(t)$ назовём комплексную функцию частоты $Z_{V.-L.}(\sigma)$:

$$Z_{V.-L.}(\sigma) = \sqrt{\frac{T}{\Delta}} \langle z, h_\sigma \rangle, \quad \sigma \in [-\pi / \Delta, \pi / \Delta].$$

Функция $Z(\sigma)$ имеет период $2\pi / \Delta$ и непрерывна всюду, кроме частот $\sigma = \omega + 2\pi n / \Delta$, в которых её фаза скачком меняется на π . Зная $Z_{V.-L.}(\sigma)$, оригинал $z(t)$, где $t = n\Delta$; $n = 0, 1, \dots, N$, можно восстановить с точностью до слагаемого, пропорционального чандлеровской гармонике $\exp(i\omega t)$: справедлива формула обращения, аналогичная формуле обратного преобразования Фурье:

$$z(t) = \frac{\sqrt{T\Delta}}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta}^{\pi/\Delta} Z_{V.-L.}(\sigma + \omega) h_{\sigma+\omega}(t) d\sigma + \frac{1}{2} (z(0) + \exp(-i\omega T)z(T)) \exp(i\omega t).$$

Аналогом тождества Парсеваля служит формула:

$$\langle z, z \rangle = \frac{\Delta}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta}^{\pi/\Delta} |Z_{V.-L.}|^2 d\sigma.$$

3. Анализ атмосферной составляющей движения полюса

Под атмосферной составляющей движения полюса $x(t)$ мы будем понимать решение уравнения (2) при $Q = \infty$ с правой частью, соответствующей УМА. Это решение можно записать в виде

$$x(t) = -\frac{\omega}{(C-A)\Omega} \left(\frac{1}{\Omega} (\chi(t) - \chi(0)e^{i\omega t}) + i \left(1 + \frac{\omega}{\Omega} \right) \int_0^t \chi(\tau) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau \right), \quad (4)$$

где C и A экваториальный и аксиальный момент инерции Земли, Ω – угловая скорость суточного вращения, $\chi(t)$ – возмущающая функция атмосферы: $\chi = \chi^P + \chi^W$, где $\chi^P(t)$ и $\chi^W(t)$ – барическая и ветровая возмущающая функция (pressure & wind terms), [4]. Данные IERS об УМА представляют собой значения функций $\chi^P(t)$ и $\chi^W(t)$; функция (4) – форма представления этих данных: нам удобнее анализировать не $\chi(t)$, а

$x(t)$. Подставив вместо $\chi(t)$ в (4) $\chi^P(t)$ или $\chi^W(t)$, мы получим барическую (или ветровую) составляющую движения полюса.

Начнём с анализа барической составляющей движения полюса в приближении Non-IB (не учитывающем реакцию океана) по данным IERS за период с 01.01.1980 по 20.06.2014. На рис. 1 а) показан спектр В.-Л. этой составляющей, вычисленный при шаге $\Delta = 100 \text{ сут}$ – это минимальный шаг по времени, при котором последовательность $x(n\Delta)$ представляет собой марковский процесс. Главный максимум спектра отвечает частоте $\sigma_1 = 0$. Кроме него, мы видим только годовые пики на частотах $\sigma_{\pm} = \pm 2\pi/365 \text{ сут}^{-1}$. Чтобы проявилась тонкая структура спектра, вычтем из $x(t)$ низкочастотную компоненту, т.е. заменим $x(t)$ на $x - \langle x, h_1 \rangle h_1$, где h_1 – нормированная в смысле (1) константа: $h_1 \equiv \sqrt{\Delta} / (2 \sin(\omega\Delta/2))$; см. рис. 1 б). Теперь кроме годовых максимумов мы видим пики на частотах $\sigma' = -2.86 \cdot 10^{-2}$ и $\sigma_{485} = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Первый физически относится к частоте $\sigma_{1/2} = \sigma' + 2\pi/\Delta \approx 4\pi/365 \text{ сут}^{-1}$ и представляет сезонную моду, второй – моду с периодом 485 суток, которая является предметом исследования, см. также рис. 1 в). Чандлеровский пик отсутствует: вращение $e^{i\omega t}$ не даёт вклада в спектр В.-Л., т.к. $\langle z, e^{i\omega t} \rangle = 0 \forall z(t)$. Кроме того, в $\chi^P(t)$, очевидно, нет моды с частотой ω , иначе решение (4) содержало бы резонанс $te^{i\omega t}$, и максимум на частоте ω в спектре В.-Л. имел бы место. Приведём (без вывода) оценку амплитуды 485-суточной моды в барической составляющей движения полюса:

$$A_{485} = (2.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-7} \text{ рад}.$$

Для сравнения: амплитуда чандлеровской компоненты движения полюса $\approx 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$.

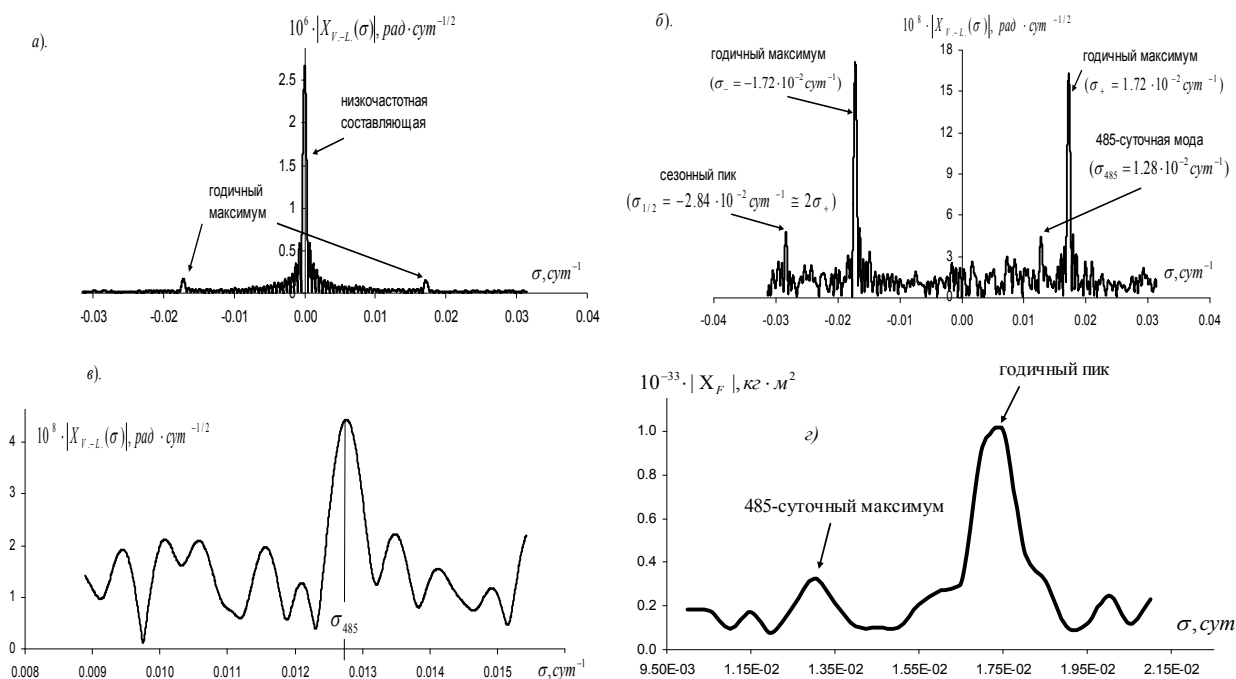


Рис. 1. Спектральный анализ функции $\chi^P(t)$ по данным Non-IB с 01.01.1980 по 20.06.2014: а). Спектр В.-Л. барической составляющей движения полюса; б). Спектр В.-Л. барической составляющей с исключённой константой; в). Фрагмент спектра В.-Л. барической составляющей, содержащий 485-суточную моду; г). Фрагмент спектра Фурье функции $\chi^P(t)$.

Максимум на частоте σ_{485} присутствует и в Фурье-спектре функции $\chi^p(t)$; см. рис. 1 г). Но в спектре ветровой составляющей движения полюса пика на этой частоте нет, хотя вариациям барического поля должен сопутствовать массоперенос. Ещё удивительнее то, что 485-суточный максимум отсутствует в спектре барической ИВ-составляющей, вычисленной с учётом реакции океана. Тем не менее, если мы обнаружим этот максимум в спектре В.-Л. движения полюса, существование 485-суточной атмосферной моды будет доказано.

4. Анализ данных о движении полюса

Спектр В.-Л. движения полюса с исключённой константой, вычисленный с шагом $\Delta = 100$ суток по данным IERS за период с 01.01.1980 по 20.06.2014, показан на рис. 2 а). Мы видим «остаток» низкочастотной моды (центральный максимум), два годовых пика, гораздо менее интенсивную сезонную моду и совсем слабый всплеск на частоте σ_{485} , см. также рис. 2 б). Этот всплеск может быть только реакцией на 485-суточную составляющую УМА. Оценка амплитуды 485-суточной моды в наблюдаемом движении полюса, полученная в рамках вероятностного подхода, гласит:

$$A'_{485} = (7.4 \pm 6.1) \cdot 10^{-8} \text{ рад}.$$

Отношение «сигнал/шум» – величина порядка 1, это согласуется с рис. 2.б).

Более убедительны результаты, относящиеся к 53-летнему ряду данных, с 01.01.1962 по 20.06.2014. В спектре В.-Л. этого ряда тоже доминирует низкочастотный максимум, представляющий собой суперпозицию пяти гармоник. Из них наибольшую амплитуду имеет константа; после её исключения спектр В.-Л. выглядит так, как показано на рис. 3 а). Наличие в этом спектре 485-суточной моды не вызывает сомнений, см. также рис. 3 б). Амплитуда этой моды:

$$A''_{485} = (7.5 \pm 4.9) \cdot 10^{-8} \text{ рад}.$$

В амплитудном спектре Фурье движения полюса тоже присутствует пик на частоте $0.0128 \text{ сутки}^{-1}$. Но непонятно, является ли он «самостоятельной единицей» или ассоциирован с чандлеровским максимумом. Тем более затруднительно (с помощью стандартного анализа) оценить его интенсивность.

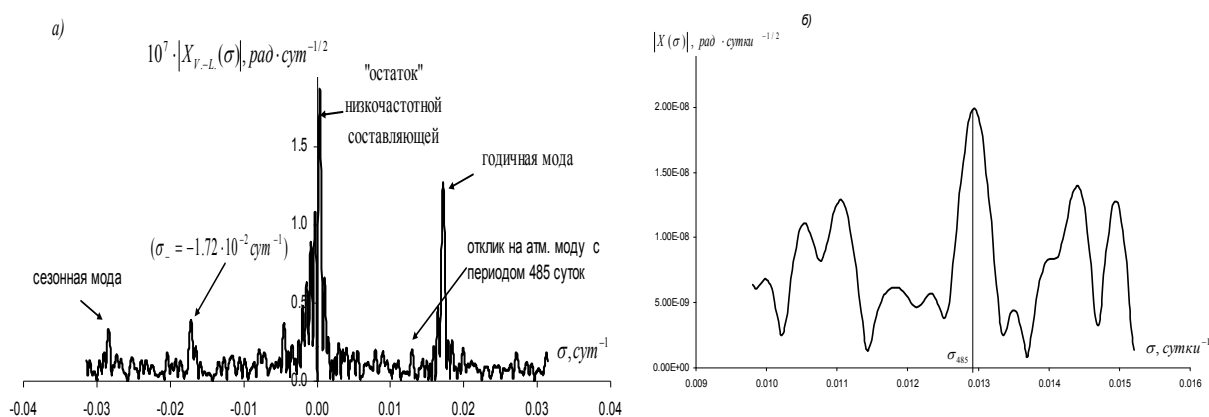


Рис. 2. Анализ движения полюса с 01.01.1980 по 20.06.2014 по данным IERS:
 а). Спектр В.-Л. с исключённой константой; шаг по времени $\Delta = 100$ суток;
 б). Фрагмент спектра, содержащий отклик на 485-суточную атмосферную моду.

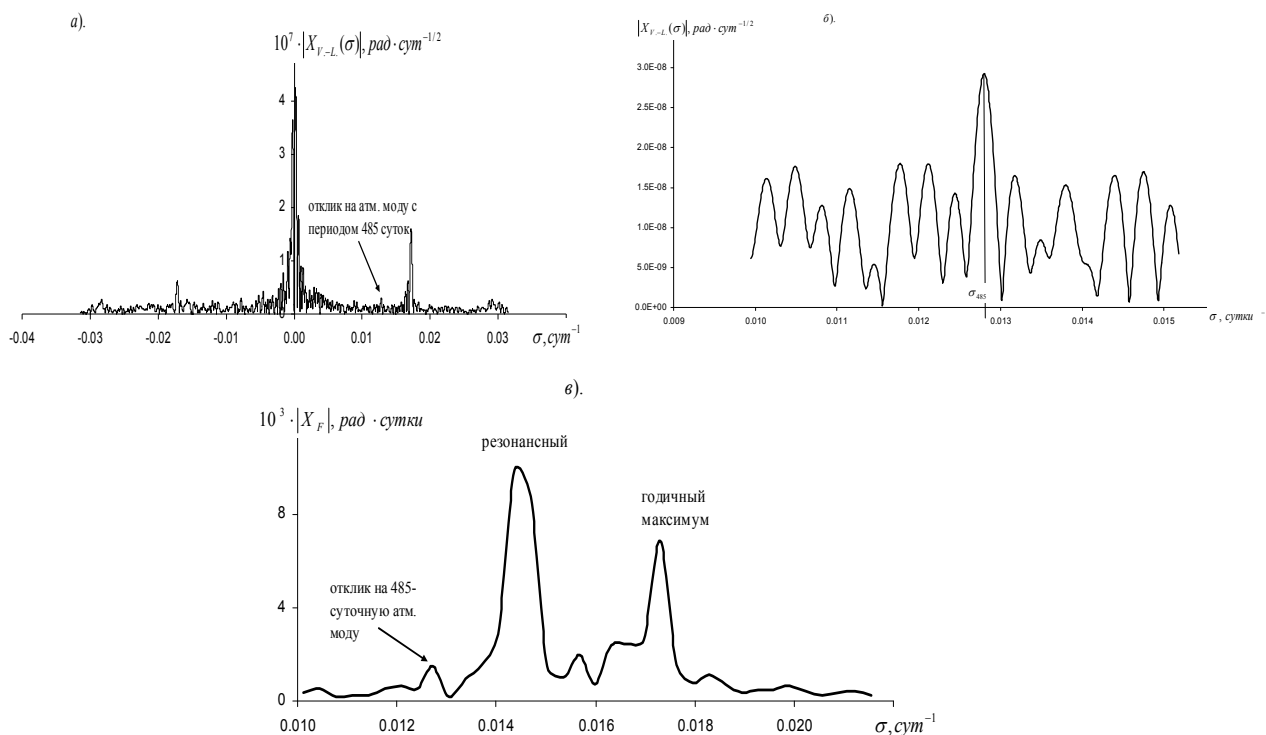


Рис. 3. Анализ данных о движении полюса с 01.01.1962 по 20.06.2014.
 а). Спектр В.-Л. с исключённой константой (шаг по времени $\Delta = 100$ суток);
 б). Фрагмент спектра В.-Л., содержащий отклик на 485-суточную моду;
 в). Фрагмент спектра Фурье.

5. Обсуждение результатов

Итак, УМА содержит моду с периодом ≈ 16 месяцев, это – основной результат, полученный в работе. Уточним: данные IERS об УМА содержат 2 ряда значений возмущающих функций, IB (Inverted Barometer) & Non-IB values. Значения IB, в отличие от Non-IB, учитывают изменение уровня океана, вызванное вариациями барического поля [7]. При этом ряд Non-IB – содержит явно выраженную 485-суточную моду, а в последовательности IB её нет. Если бы движение полюса возбуждалось только атмосферой, амплитуда 16-месячной полюсной моды согласно данным Non-IB была бы равна

$$A = 132 \pm 38 \text{ см}, \quad (5)$$

т.е. $\sim 15\%$ от амплитуды чандлеровского движения. Если считать «правильными» значения IB, 485-суточной моды в движении полюса нет. Решающий аргумент в пользу существования 485-суточной атмосферной моды – то, что мода с периодом 485 суток, хотя и весьма слабая, присутствует в наблюдаемом движении полюса. Поскольку период 485 суток близок к чандлеровскому, идентифицировать её с помощью спектра Фурье невозможно. В работе использовано разложение В.-Л., специально предназначенное для анализа решений уравнения Лиувилля со случайной правой частью. Рассмотрение данных IERS за период с 1980 по 2014 г.г. приводит к оценке амплитуды 485-суточной полюсной моды:

$$A = 47 \pm 39 \text{ см}.$$

Если использовать 52-летний ряд наблюдений (с 1962 по 2014), то

$$A = 48 \pm 31 \text{ см}. \quad (6)$$

Мы видим, что математическое ожидание амплитуды практически не изменилось, хотя длина ряда наблюдений увеличилась в 1.5 раза. Следовательно, 485-суточная полюсная мода носит стационарный характер. Но оценка (6) по сравнению с (5) завышена

в 2.5–3 раза, хотя ни угловой момент океана, ни ряд данных IV моды с периодом 485 суток не содержат. Это можно объяснить тем, что атмосфера почти полностью отдаёт 16-месячную составляющую углового момента океану, океан – мантии, а мантия – частично – жидкому ядру.

Гипотеза о том, что в атмосфере присутствует мода с периодом 14–16 месяцев, принадлежит Х.-П. Плагу [6]. Х.-П. Плаг предположил, что она вносит основной вклад в возбуждение чандлеровского движения. Эта гипотеза отчасти подтвердилась: УМА действительно содержит моду с периодом 16, но никак не 14 месяцев. И не она является причиной ЧДП: амплитуда ответной полюсной моды на порядок меньше амплитуды чандлеровской составляющей.

Говоря о природе близчандлеровской атмосферной моды, Х.-П. Плаг ссылается, в частности, на ст. [3], в ней проанализирована миграция Исландской депрессии (области пониженного атмосферного давления над Атлантическим океаном). И.В. Максимов обнаружил в этом движении моду с периодом, в точности (!) равным чандлеровскому. Если бы это соответствовало действительности, в спектре В.-Л. атмосферной составляющей движения полюса присутствовал бы максимум на чандлеровской частоте, а его там нет. Не исключено, что Исландская депрессия «отвечает» за присутствие в УМА 485-суточной моды: И.В. Максимов с соавторами анализировали 14-летние ряды данных, слишком короткие для того, чтобы надёжно разделить периоды 14 и 16 месяцев.

Литература

1. *Арато, М., Колмогоров, А.Н., Синай, Я.Г.* Об оценке параметров комплексного стационарного гауссовского марковского процесса // Доклады Академии наук СССР. Том 146. № 4. 1962. С. 13–17.
2. *Манк, У., Макдональд, Г.* Вращение Земли. – М.: Мир. 1964. – 384 с.
3. *Максимов, И.В., Карклин, В.Н., Саруханян, Э.И., Смирнов, Н.И.* Нутационная миграция исландского минимума атмосферного давления // Доклады Академии наук СССР. Том 177, №1. 1967. С. 88–91.
4. *Цуркис, И.Я., Кучай М.С., Спиридонов, Е.А.* Вероятностный анализ данных о моменте импульса атмосферы за период с 1980 по 2003 гг. // Физика Земли, № 4, 2012. С.57–71.
5. *Barnes, R., Hide, R., White, A., Wilson, C.* Atmospheric angular momentum fluctuations, length-of-day changes and polar motion // Proc. R. Soc. London, Ser. A, 387, P.31–73, 1983.
6. *Plag, H.-P.* Chandler wobble and pole tide in relation to interannual atmosphere-ocean dynamics, in Tidal Phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences, 66, pp. 183–218, Springer, Berlin, 1997.
7. *Salstein, D.A., Kann M.D., Miller, A.J., Rosen, R.D.* The Sub-bureau for atmospheric angular momentum of the International Earth rotation service: A Meteorological data center with geodetic applications // Bulletin American Meteorological Society, Vol. 74, No. 1, P. 67–85, 1993.

AN APPLICATION OF WIENER – LIUVILLE SPECTRUM TO INVESTIGATION OF POLE MOTION AND EXCITATION FUNCTIONS OF THE ATMOSPHERE

Tsurkis I.J., Kuchay M.S., Rybin A.A.

Shmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia

A modification of spectral analysis which is invented for investigation of pole motion and excitation functions of atmosphere and ocean is used. The sequence of excitation functions of atmosphere, obtained by International Earth Rotation Service till 01.01.1980 to 20.06.2014 is studied. It is shown, that the atmospheric angular momentum contains a deterministic mode which period is about 16 months. Probably, the source of this mode is the Island Depression.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ИСЗ В ГМЦ ГСВЧ

Цыба Е.Н., Пасынок С.Л.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия

В конце 2014 года в ГМЦ ГСВЧ завершена разработка программы определения параметров вращения Земли (ПВЗ) по данным лазерной локации ИСЗ. После доработки этой программы с учётом результатов экспериментальных вычислений в ГМЦ ГСВЧ организованы регулярные определения ПВЗ по данным измерений с сети спутниковых лазерных дальномеров с точностью, соответствующей современным требованиям. С 15 мая 2015 года полученные значения ПВЗ используются при совместной обработке (комбинировании) всей совокупности данных о ПВЗ для формирования официальной информации о ПВЗ ГСВЧ.

1. Введение

В России обязанность по формированию и выдаче справочных (опорных) данных о параметрах вращения Земли (ПВЗ), согласно Постановлению Правительства РФ № 225 от 23 марта 2001 года, возложена на Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ). Значения, публикуемые в бюллетенях ГМЦ ГСВЧ, являются обязательными к применению на территории нашей страны. Они формируются в ГМЦ ГСВЧ в результате совместной обработки (комбинирования) данных измерений с приёмников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) и спутниковых лазерных дальномеров (СЛД-рус., SLR-англ.). Каждый из видов измерений обладает своими преимуществами и недостатками, поэтому совместное решение приводит к оптимальному результату. Особое место среди спутниковых видов измерений (ГНСС и СЛД) занимают измерения, проводимые с помощью спутниковых лазерных дальномеров. Метод спутниковой лазерной дальнометрии, в отличие от наблюдений радиосигналов спутников, может применяться только при безоблачной погоде, но зато он свободен от влияния погрешностей часов и фазовых неоднозначностей измеряемых дальностей, присущих радионавигационным спутниковым методам, и потому может служить по отношению к ним в качестве калибровочного. Таким образом, средства СЛД обеспечивают прослеживаемость измеренных дальностей к Государственному специальному эталону длины (ГСЭД), расположенному во ФГУП «ВНИИФТРИ».

Обработка результатов лазерных спутниковых дальномерных измерений для цели определения параметров вращения Земли (ПВЗ) ведётся в ГМЦ ГСВЧ с 1995 г. Результаты измерений наклонных дальностей до пассивных геодезических спутников Lageos 1 и Lageos 2 выполнялась при помощи программы ITALAS, разработанной по заказу ГМЦ ГСВЧ И.С. Гаязовым в Институте теоретической астрономии РАН и модифицированной во ВНИИФТРИ в 1997 г. и затем в 2000 г. [1]. За последующие 15 лет были разработаны новые спутниковые лазерные дальномеры, и точность вычислений ПВЗ по данным лазерной дальнометрии заметно повысилась. К сожалению, возможности, заложенные в вычислительной программе ИТАЛАЗ, уже не могли обеспечивать выполнение новых требований, и использование ее в ГМЦ ГСВЧ в 2010 году было приостановлено [2]. Кроме того, за последние полтора десятка лет были разработаны новые спутниковые лазерные дальномеры с высокими точностными характеристиками, обработка измерительной информации с которых потребовала корректировки алгорит-

мов и теоретических моделей в соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли и опорных систем отсчёта (МСВЗ). Требовалась разработка нового аппаратно-программного комплекса (АПК), предназначенного для вычисления ПВЗ по данным СЛД.

Настоящая статья посвящена результатам большой работы, целями которой являлись разработка нового АПК для обработки СЛД-измерений, возобновление регулярных определений ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ по результатам СЛД-измерений, и, наконец, внедрение АПК в комплекс программ ГМЦ ГСВЧ и использования результатов определений ПВЗ по СЛД в ГМЦ ГСВЧ в совместной обработке всех данных о ПВЗ.

2. Программный комплекс и результаты вычисления ПВЗ по данным спутниковой лазерной дальнометрии

В 2014 году в ГМЦ ГСВЧ была завершена разработка нового АПК, предназначенного для вычисления ПВЗ по данным лазерной локации ИСЗ (Lageos 1, Lageos 2), который с мая 2015 года используется ГМЦ ГСВЧ в ежесуточном определении ПВЗ [2–4]. В нём для вычисления ПВЗ и определения и прогноза орбит используются модели и параметры, рекомендованные Международной службой вращения Земли и опорных систем отсчёта (МСВЗ-рус., IERS-англ.) и закреплённые в стандартах МСВЗ 2010 года (IERS Conventions (2010)) [5].

Блок-схема программного комплекса представлена на рис. 1.

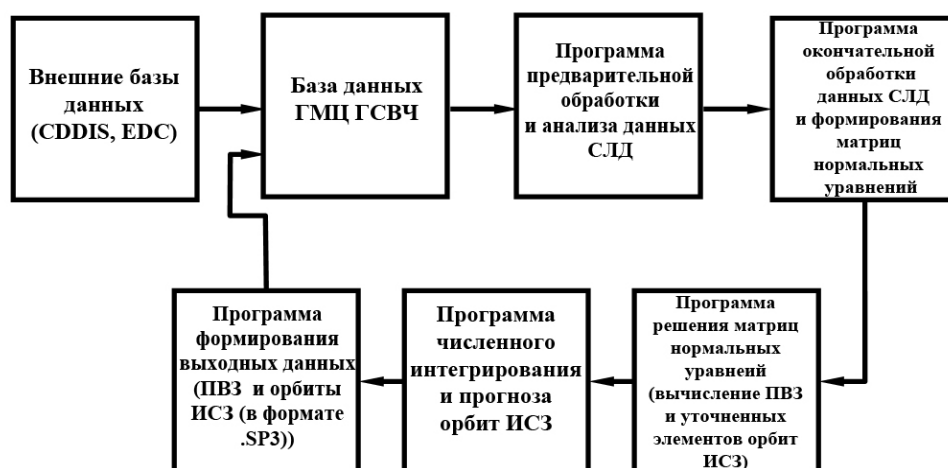


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса вычисления ПВЗ по данным спутниковой лазерной дальнометрии.

В 2015 году АПК был доработан в части автоматизации вычислений, а также в части совершенствования методов определения орбит наблюдаемых космических аппаратов. Благодаря этому удалось добиться высокой точности получаемых результатов (цифры будут приведены ниже). После экспериментальных вычислений в режиме службы, с 15 мая 2015 года результаты определения ПВЗ по данным СЛД, полученные с помощью разработанного АПК в ГМЦ ГСВЧ, участвуют в совместной обработке всех данных о ПВЗ и вносят вклад в формируемые выходные данные ПВЗ ГСВЧ.

Ежесуточно в Центр обработки и анализа данных (ЦОАД) ГМЦ ГСВЧ поступает измерительная информация со всех активных измерительных пунктов сети Международной службы лазерной локации спутников и Луны (ILRS). Список станций наблюдения представлен в табл. 1. Программа в автономном режиме (без участия оператора) анализирует полученные данные и выполняет в оперативном режиме расчет ПВЗ.

Таблица 1. Список станций спутниковой лазерной дальнометрии, измерения которых используются для вычисления ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ

№	ID	SITE	№	ID	SITE
1	1824	Golosiv, Ukraine	20	7249	Beijing, China
2	1868	Komsomolsk, Russia	21	7308	Koganei, Japan
3	1873	Simeiz, Russia	22	7358	Tanegashima, Japan
4	1874	Mendeleevo 2, Russia	23	7403	Arequipa, Peru
5	1879	Altay, Russia	24	7405	Concepcion, Chile
6	1884	Riga, Latvia	25	7406	SanJuan, Argentina
7	1886	Arkhyz, Russia	26	7501	Hartebeesthoek, SouthAfrica
8	1887	Baikonur, Kazakhstan	27	7810	Zimmerwald, Switzerland
9	1888	Svetloe, Russia	28	7821	Shanghai, China
10	1889	Zelenchukskya, Russia	29	7824	SanFernando, Spain
11	1890	Badary, Russia	30	7825	MtStromlo, Australia
12	1893	Katzively, Crimea	31	7838	Simosato, Japan
13	7080	McDonald Observatory, Texas	32	7839	Graz, Austria
14	7090	Yarragadee, Australia	33	7840	Herstmonceux, UK
15	7105	Greenbelt, Maryland	34	7841	Potsdam, Germany
16	7110	MonumentPeak, California	35	7845	Grasse, France
17	7119	Haleakala, Hawaii	36	7941	Matera, Italy
18	7124	Tahiti, FrenchPolynesia	37	8834	Wetzell, Germany
19	7237	Changchun, China			

Результаты вычислений и вся собранная измерительная информация хранится в базе данных аналитического центра ФГУП ВНИИФТРИ. На рис. 2 и рис. 3 представлены графики отклонений вычисленных в ГМЦ ГСВЧ значений ПВЗ (x_p, y_p) от окончательных опорных значений IERS EOPC04.

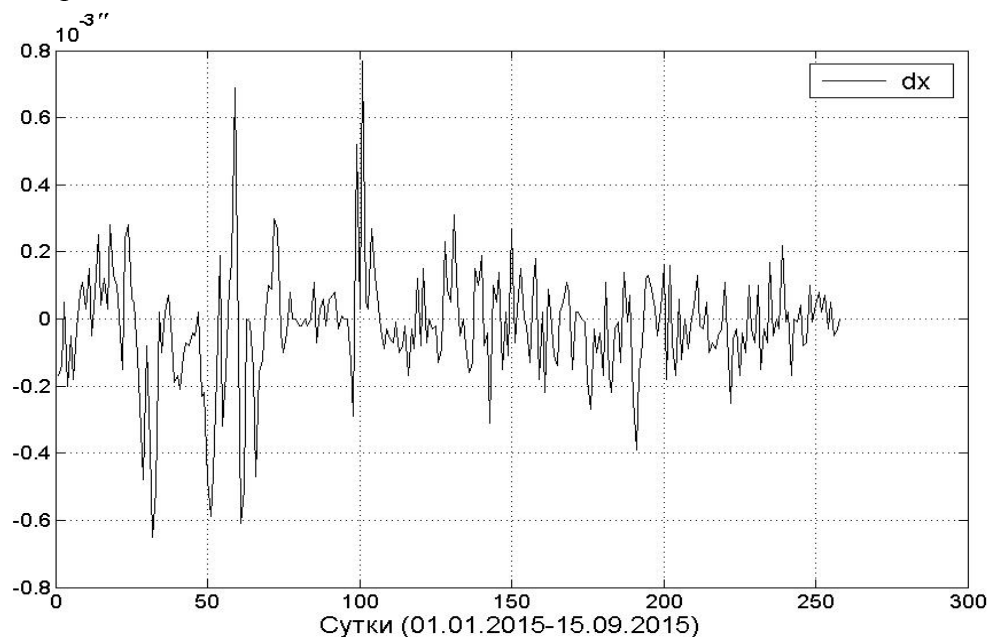


Рис. 2. Отклонение вычисленных значений ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ (x_p) от данных IERS EOPC04 (время в сутках, отклонения в (10^{-3})).

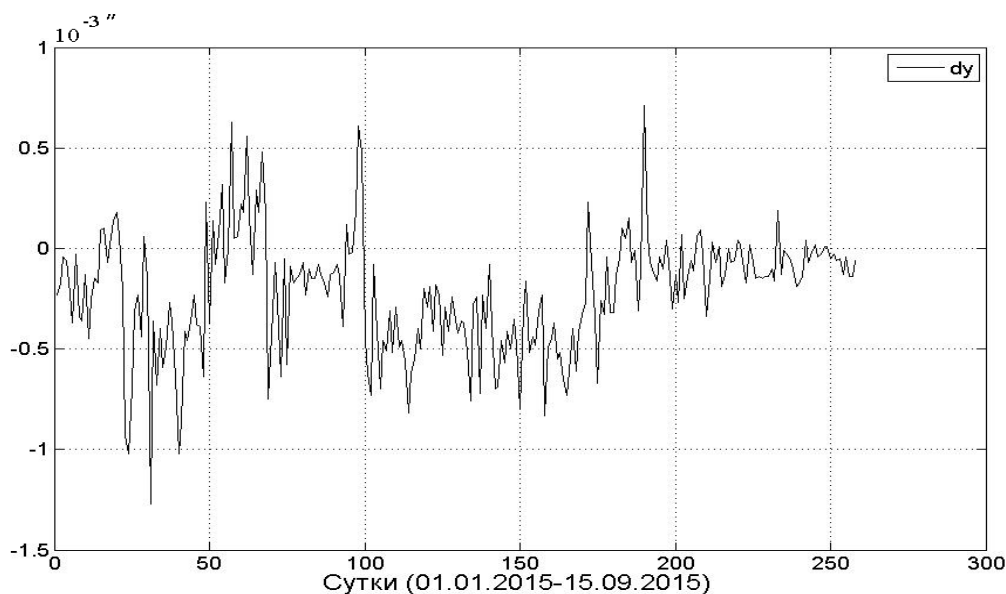


Рис. 3. Отклонение вычисленных значений ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ (y_p) от данных IERS04 (время в сутках, отклонения в ($''$)).

Среднеквадратические отклонения (СКО) определения ПВЗ за 2015 год координат земного полюса x_p и y_p составляют $0,17 \cdot 10^{-3}''$ и $0,28 \cdot 10^{-3}''$ соответственно.

Сравнение СКО определения ПВЗ по данным лазерной спутниковой дальнометрии с ведущими российскими центрами обработки и анализа данных (ИПА РАН и ИАЦ КВНО (ФГУП ЦНИИмаш)) показывает, что точность вычисления координат полюса в ГМЦ ГСВЧ соответствует точностям последних (см. ступенчатые диаграммы, приведенные на рис. 4).

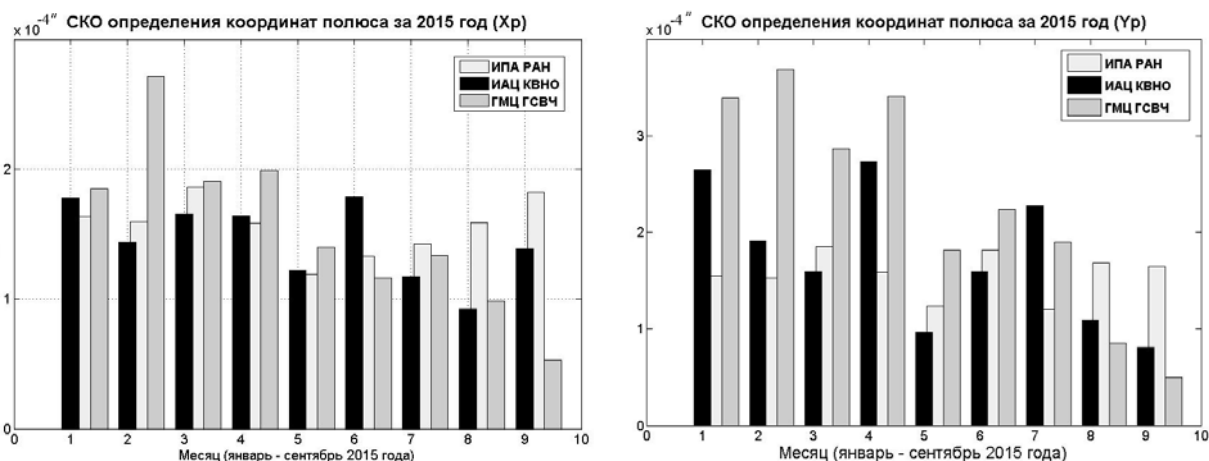


Рис. 4. Сравнение СКО определения ПВЗ по результатам СЛД ИСЗ (по оси абсцисс отложены номера месяцев, СКО в ($''$)).

При решении задачи по определению ПВЗ по измерениям на станциях сети ILRS получают уточненные орбиты наблюдаемых космических аппаратов в форматах .ELE (элементы орбит) и .SP3[6, 7].

Уточненные орбиты позволяют проанализировать качество работы станций лазерной локации, измерительная информация с которых была использована при вычислении параметров вращения Земли. Оценка качества основывается на анализе разностей *Observation – Calculated* (разность между измеренными и вычисленными дальностями).

стями соответственно). На рис. 5 и рис. 6 представлены блок-схема вычисления Rb (*range bias*) и Tb (*time bias*) для станций наблюдения (поправки в измеренную дальность и местную шкалу времени), а также график их влияния на результаты наблюдения.

В настоящий момент завершается разработка нового программного модуля для прогнозирования орбит ИСЗ, который в дальнейшем планируется интегрировать в действующий программно-аппаратный комплекс. Первые полученные результаты для ИСЗ ЛАГЕОС показывают хорошую согласованность с результатами прогнозирования зарубежных ЦОАД НТС (США), SGF (Англия), и JAXA (Япония), например, значения вычисленных в ГМЦ ГСВЧ прогнозных координат спутника отличаются от значений, полученных центром обработки НТС, не более чем на 0,8 м.

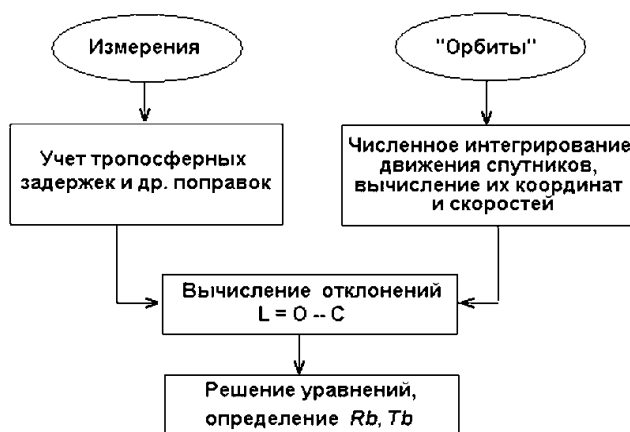


Рис. 5. Блок-схема программы определения Rb и Tb .

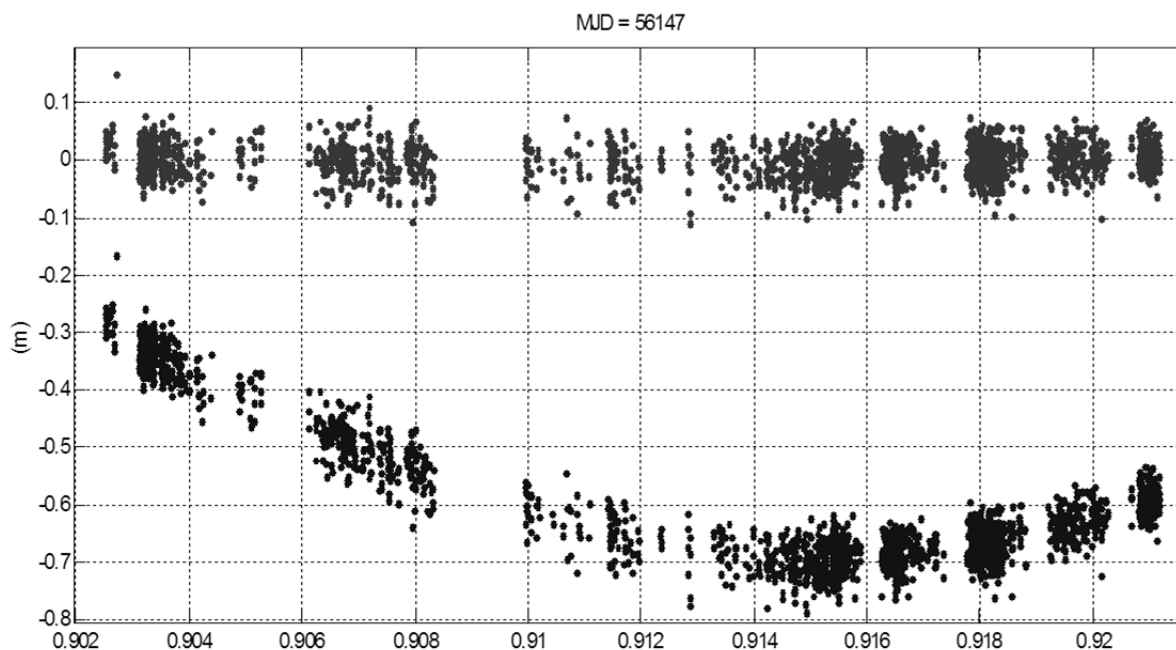


Рис. 6. Разности $O-C$ до (внизу) и после (вверху) учета в измерениях на станции Менделеево Rb и Tb .

3. Заключение

Программа обработки результатов измерений спутниковой лазерной дальнометрии, разработанная в ГМЦ ГСВЧ, позволяет решать широкий круг задач по обработке наблюдений SLR. Результаты практических вычислений параметров вращения Земли показали, что точность определяемых ПВЗ соответствует современным требованиям к ней. С помощью разработанной программы в ГМЦ ГСВЧ организовано регулярное ежесуточное оперативное определение ПВЗ по данным SLR с минимальной (суточной) задержкой (т.е. время между моментом вычисления и последними использованными измерениями составляет одни сутки). Полученные оперативные значения ПВЗ используются в ГМЦ ГСВЧ в процессе совместной обработки (комбинирования) вместе с другими данными для формирования оперативных данных о ПВЗ ГСВЧ [4].

Литература

1. *I.S. Gayazov, M.B. Kaufman.* Analysys of the weekly ERP calculations on the basis of SLR data // *Annales Geophysicae.* EGS, Suppl. 1 to the Vol. 14, Pt. 1, 1996.
2. *Кауфман М.Б., Цыба Е.Н.* Вычисление параметров вращения Земли в ГМЦ ГСВЧ по данным спутниковой лазерной дальнометрии // *Метрология времени и пространства.* 6-ой международный симпозиум: материалы конференции. – Менделеево, 17–19 сентября 2012. – С. 287–288.
3. *Tsyba E., Kaufman M.* Improvement of the software Bernese for calculation of the Earth rotation parameters according to the data of satellite laser ranging (Lageos 1, Lageos 2) in the Main Metrological Centre of the State Time and Frequency Service // *Materials of the Conference Journees 2014: Pulkovo Observatory, 22–24 September 2014, St. Petersburg, Russia.*
4. *Цыба Е.Н.* Вычисление параметров вращения Земли по результатам спутниковой лазерной дальнометрии международной сети ILRS // *Труды Института прикладной астрономии РАН,* вып. 32, 2015.
5. IERS Conventions (2010). *Gérard Petit and Brian Luzum* (eds.). (IERS Technical Note 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
6. *Urschl C., Beutler G., Gurtner W., Hugentobler U., Schaer S.* GPS/GLONASS orbit determination based on combined microwave and SLR data analysis. University of Bern, 2005.
7. Bernese GPS Software Version 5.0, Users guide, AIUB, 2007, edited by *Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez and Michael Meindl.*

EARTH ROTATION PARAMETERS DETERMINATION BASED ON SATELLITE LASER RANGING DATA IN MMC SSTF

Tsyba E.N., Pasynok S.L.

*National research institute of physicotecnical and radio engineering measurements (FSUE "VNIIFTRI"),
Mendeleevo, Moscow reg., Russia*

The development of Earth rotation parameters software based on the results of satellite laser ranging was completed in MMC SSTF in 2014. A regular real-time computing of the Earth Rotation Parameters with accuracy complying with up-to-date demands is organized on the base of new software developments in 2015. The results of EOP determination on the data of satellite laser ranging received in 2015 are submitted in present work.

Секция 3

ЭФЕМЕРИДНАЯ АСТРОНОМИЯ, КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПОСАДОЧНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ЭФЕМЕРИДЫ ЛУНЫ

Васильев М.В., Шуйгина Н.В., Ягудина Э.И.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Все три современные лунные эфемериды DE, INPOP и EPM-ERA получены из сравнения динамических моделей орбитально-вращательного движения Луны с современными светолокационными наблюдениями, охватывающими период с 1969 года по настоящее время. Китайский проект лунного посадочного модуля Чанъэ-3 [1] открывает новые возможности для построения эфемерид Луны с использованием других типов наблюдений, таких как РСДБ и радиолокационные измерения. Целью данной работы было получение оценок влияния новых типов наблюдений на точность лунных эфемерид в ближайшей и более дальней перспективе. Такие оценки были получены методом математического моделирования для различных сетей наземных радиотелескопов и различных точностных характеристик измерений. Математическое обеспечение для моделирования разработано в рамках программного комплекса ЭРА [2].

1. Введение

Современные эфемериды Луны развиваются и поддерживаются в Лаборатории реактивного движения (США), Институте небесной механики и вычисления эфемерид (Франция) и ИПА РАН (Россия). Все перечисленные эфемериды получены в результате обработки современной высокоточной лазерной локации Луны (ЛЛЛ), которая ведется с 1969 года по настоящее время. Состав и количество ЛЛЛ-станций на протяжении этих лет менялись, сейчас наиболее активными и продуктивными станциями являются Мак-Дональд (США), Грац (Франция) и Апаче (США). Ошибки современных ЛЛЛ-наблюдений варьируются от нескольких миллиметров на станции Апаче до нескольких сантиметров на остальных станциях. Дальнейшее развитие и уточнение современных эфемерид Луны может происходить по следующим направлениям: уточнение модели орбитально-вращательного движения Луны, увеличение интенсивности ЛЛЛ-наблюдений, построение новых ЛЛЛ-станций и использование новых типов наблюдений, сравнимых по точности с ЛЛЛ. Наиболее точная теория орбитально-вращательного движения Луны представлена в статье [3]. В настоящее время существует 2 проекта новых ЛЛЛ-станций: Российский проект ЛЛЛ-станции на Алтае, который уже реализуется и будет завершен в 2017 г., и разрабатываемый Европейский проект ЛЛЛ-станции Ла Силья. В [4] проведен анализ влияния дополнительных измерений, полученных на новых ЛЛЛ-станциях, на точность эфемериды Луны.

В нашей работе анализируются новые возможности повышения точности лунной эфемериды, связанные с РСДБ- и радиолокационными (РЛЛ) наблюдениями посадочных аппаратов на Луне.

2. Проекты исследования и освоения Луны

Из существующих в настоящее время проектов, которые могут быть использованы для уточнения параметров лунной эфемериды на основе радиотехнических наблюдений посадочных аппаратов на Луне, можно выделить следующие:

1. Китайский проект исследования и освоения Луны Чанъэ. Начиная с третьего этапа посадочные аппараты, запущенные в рамках проекта, оснащаются приемопередающими устройствами (транспондерами), позволяющими производить радиолокационные и РСДБ-наблюдения. Действующий транспондер посадочного аппарата Чанъэ-3 работает в X-диапазоне частот примерно 10 дней в месяц (4 часа каждый

день) в окрестности фазы полной Луны. К настоящему моменту получены радиолокационные фазовые и РСДБ-наблюдения Чанъэ-3. Предварительные оценки инструментальной погрешности измерений варьируются от нескольких миллиметров до единиц сантиметров.

2. Японский проект освоения Луны. В 2018 году предположительно будет запущен космический аппарат с посадочным модулем, который будет оснащен транспондером для проведения РЛЛ-наблюдений [5].
3. Российская программа освоения Луны. Планируется, что посадочные аппараты ЛУНА-ГЛОБ И ЛУНА-РЕСУРС [6] будут размещены в приполярных областях Луны и оснащены транспондерами, работающими в X - и Ka -диапазонах частот. Для наземной поддержки проекта предполагается использовать радиотелескопы сети «Квазар-КВО» [7].

Предполагается, что все три проекта будут координироваться для обеспечения совместимости аппаратуры и частотных диапазонов для проведения РЛЛ-наблюдений.

3. Численное моделирование

Для оценки потенциального влияния радиолокационных наблюдений лунных посадочных аппаратов на точность эфемерид Луны был применен метод математического моделирования. Эфемерида строилась путем численного интегрирования уравнений орбитально-вращательного движения Луны, использованных в [8] при формировании последней версии эфемериды EPM-ERA 2013. Итеративный процесс улучшения эфемериды проводился с помощью программного комплекса ЭРА [2] на основе 18700 ЛЛЛ-измерений за период 1970–2013, взятых из базы данных НАСА CDDISa [10], и моделируемых радиотехнических наблюдений. Предполагалось, что аппарат, подобный китайскому посадочному модулю Чанъэ-3, наблюдается станциями Международной РСДБ-сети для астрометрии и геодезии (IVS) на интервале 2006–2013 гг. в двух режимах: РСДБ или радиолокации. Интервал между последовательными наблюдениями брался равным 2 часам. Рассматривались два варианта средней квадратической погрешности (СКО) моделируемых радиотехнических наблюдений: 0.06 м и 2 м для наблюдений с исключенными и неисключенными атмосферными погрешностями соответственно. Рассматривались следующие сценарии проведения радиотехнических наблюдений:

1. РЛЛ-наблюдения на обсерватории «Зеленчукская» комплекса «Квазар-КВО».
2. РЛЛ-наблюдения на всех обсерваториях РСДБ-сети «Квазар-КВО».
3. РЛЛ-наблюдения на всех обсерваториях сети IVS.
4. РСДБ-наблюдения на станциях сети IVS.

Считалось, что координаты станций РСДБ-сети известны и не требуют уточнения. Список определяемых параметров эфемериды Луны EPM-ERA приведен в табл. 1.

Таблица 1. Параметры эфемериды Луны EPM-ERA 2013.

Номер параметра	Параметр
1-6	Начальные координаты и скорости Луны
7-12	Начальные углы либрации и их производные
13-22, 62-67, 23-40	Координаты отражателей, координаты ЛЛН-станций
42-53	Коэффициенты разложения селенопотенциала
41, 60	Запаздывание приливов на Земле и Луне
54-59	Вековые тренды поправок к параметрам ориентации земного экватора и поправок звездных углов для Земли и Луны
61	Число Лава k_2 для Луны

4. Результаты

Полученные в ходе математического моделирования результаты носят в основном предварительный характер. Причиной этому является то, что многие параметры математической модели РЛЛ наблюдений пока не определены точно и требуют дополнительного изучения в ходе обработки реальных радиолокационных измерений, которая проводится в настоящее время. Однако даже та модель, которая использовалась для численных экспериментов, позволяет сделать качественные выводы об актуальности использования РЛЛ-наблюдений для уточнения эфемерид Луны.

На рис. 1 и 2 приведено относительное (в процентах) улучшение точности определяемых параметров эфемериды EPM-ERA 2013 по сценарию 3. Первый из рисунков соответствует случаю СКО РЛЛ-наблюдений, равному 2 м, второй – 0.06 м. По оси абсцисс здесь и далее отложены номера уточняемых параметров в соответствии с табл. 1.

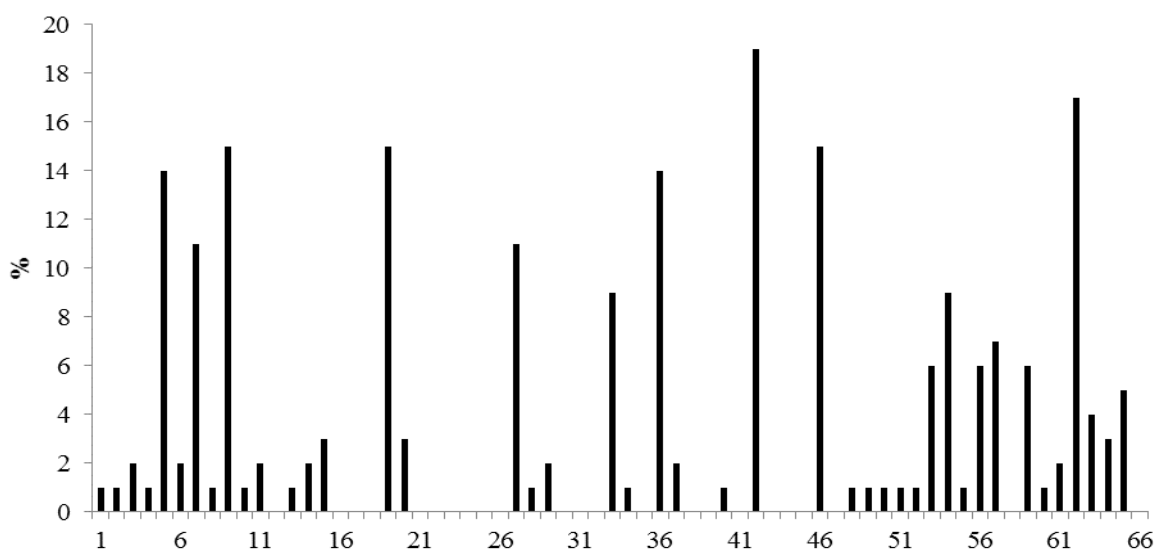


Рис. 1. Ожидаемое уточнение параметров эфемериды EPM-ERA при использовании РЛЛ-наблюдений на РСДБ сети IVS, СКО наблюдений 2 м.

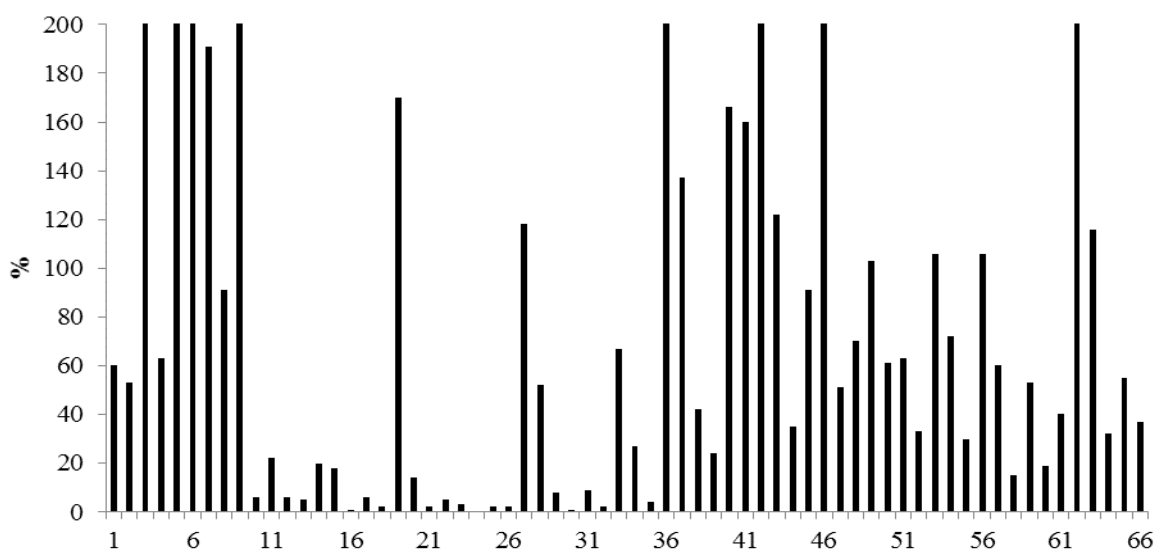


Рис. 2. Ожидаемое уточнение параметров эфемериды EPM-ERA при использовании РЛЛ-наблюдений на РСДБ сети IVS, СКО наблюдений 0.06 м.

На рис. 3 и 4 приведены аналогичные данные для сценариев 2 и 1, в которых РЛЛ-наблюдения проводятся сетью «Квазар-КВО» и станцией «Зеленчукская» при СКО измерений 0.06 м.

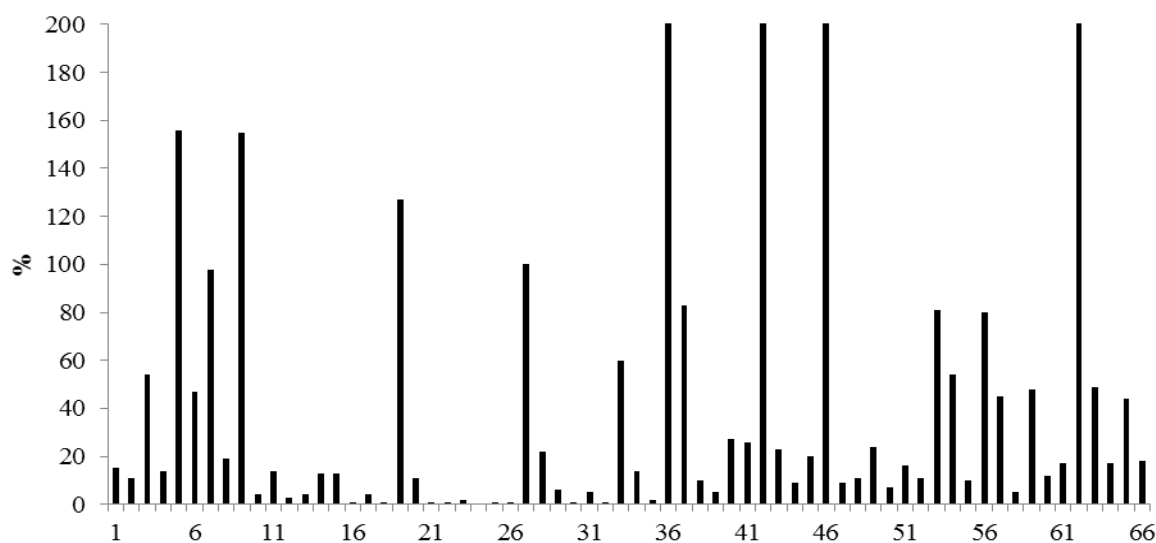


Рис. 3. Ожидаемое уточнение параметров эфемериды EPM-ERA при использовании РЛЛ-наблюдений на РСДБ сети «Квазар-КВО», СКО наблюдений 0.06 м.

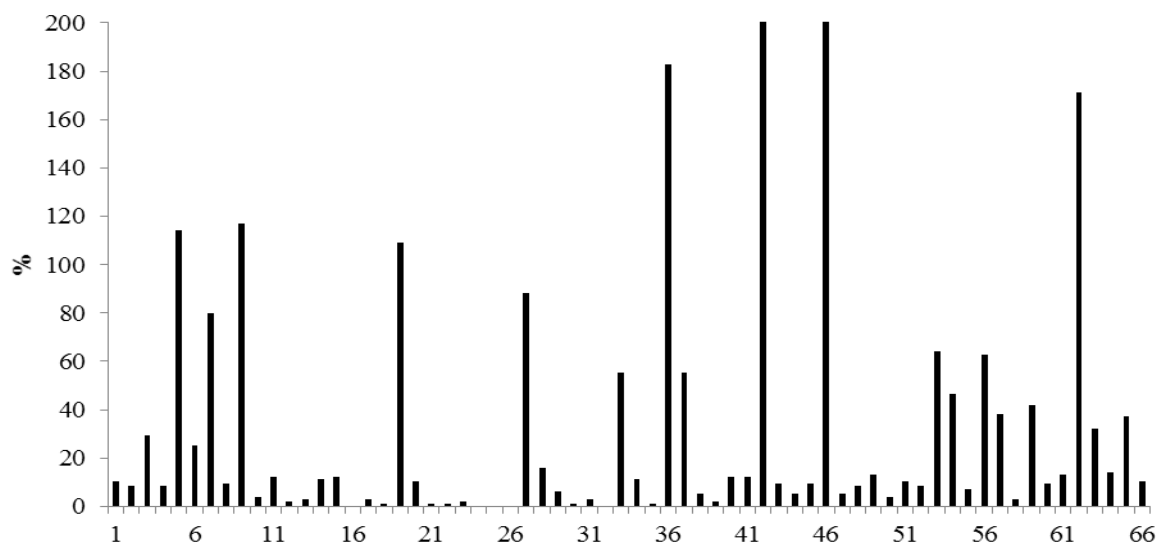


Рис. 4. Ожидаемое уточнение параметров эфемериды EPM-ERA при использовании РЛЛ-наблюдений на станции «Зеленчукская», СКО наблюдений 0.06 м

Приведенные выше данные показывают заметное, в несколько раз, увеличение точности лунных эфемерид при использовании РЛЛ-наблюдений сантиметрового уровня точности. Даже для сценария 1, в котором моделируются измерения только одной станции комплекса «Квазар-КВО», можно отметить больший выигрыш в точности лунных эфемерид, чем выигрыш, достижимый при реализации европейского проекта лунного лазерного дальномера Ла Силья [4, 9].

Численное моделирование сценариев 1, 2 и 4 с СКО РЛЛ-наблюдений, равным 2 м, показывает лишь незначительный, на несколько процентов, выигрыш в точности определения параметров эфемериды EPM-ERA, откуда можно сделать вывод о нецелесообразности проведения таких измерений.

На рис. 5 приведены данные для сценария 4, в которых РСДБ-наблюдения посадочного модуля Чаньэ-3 проводятся РСДБ сетью IVS при СКО измерений 0.06 м. Результаты моделирования показывают, что РСДБ-наблюдения лунных посадочных аппаратов имеют смысл только при использовании глобальной РСДБ-сети. РСДБ-наблюдения на региональных сетях типа РСДБ комплекса «Квazar-КВО» не вносят заметного вклада в уточнение лунных эфемерид. Моделирование показало, что РСДБ-наблюдения посадочного модуля Чаньэ-3 гораздо менее информативны, чем РЛЛ-наблюдения на той же сети станций.

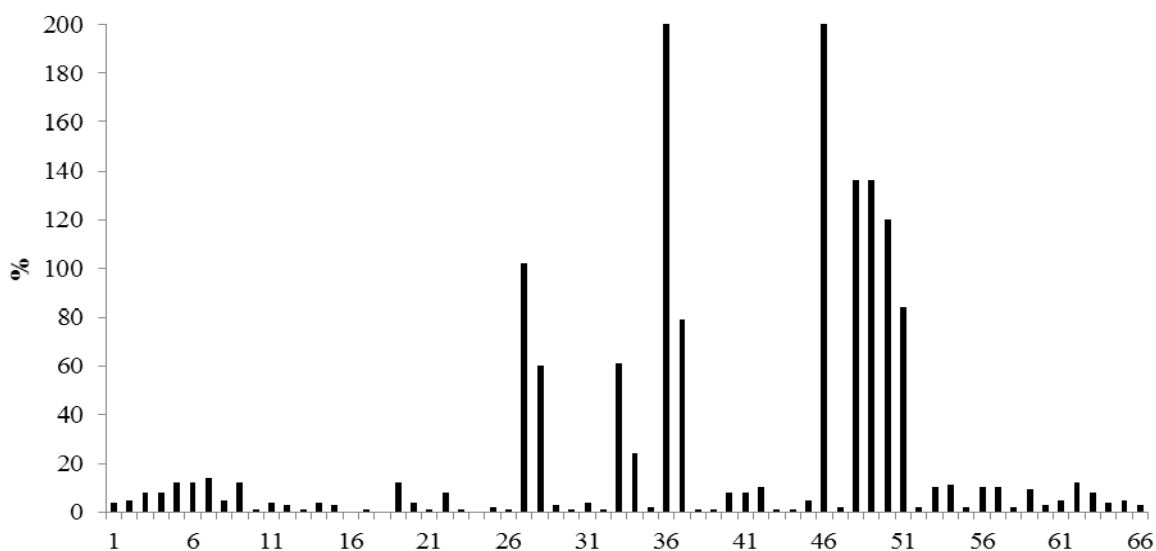


Рис. 5. Ожидаемое уточнение параметров эфемериды EPM-ERA при РСДБ-наблюдениях на сети IVS, СКО наблюдений 0.06 м.

Таким образом, РЛЛ и РСДБ-наблюдения посадочных аппаратов на Луне могут существенно дополнить современные высокоточные ЛЛЛ-измерения в части построения лунных эфемерид за счет известных преимуществ радиотехнических методов измерений: всепогодности, высокой точности измерений, большого объема данных.

4. Заключение

1. Было разработано программное обеспечение для оценки влияния радиолокационных и РСДБ-наблюдений лунных посадочных аппаратов на точность эфемериды Луны методом математического моделирования.
2. Моделирование радиотехнических наблюдений проведено для двух вариантов исключения атмосферных задержек.
3. Показано, что радиотехнические наблюдения посадочных аппаратов на Луне могут стать существенным дополнением к современным высокоточным ЛЛЛ-наблюдениям и значительно, в несколько раз, повысить точность определения параметров эфемериды Луны.
4. Планируется использование радиотехнических наблюдений посадочного аппарата Чаньэ-3 для анализа и последующего уточнения параметров теории орбитально-вращательного движения Луны.

Литература

1. *Qinghui Liu et al.* Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover // *Radio Science*, 2014, Vol. 49, Issue 11, 80–86.

2. *Krasinsky G.A., Vasiliev M.V.* ERA: knowledge base for ephemeris and dynamical astronomy // IAU Coll. 165, Eds. Wytrzyszczak I. M., Kluwer Acad. Publ., 1997, 229–244.
3. *Williams J.G., Boogs D.H., Folkner W.M.* DE430 Lunar Orbit, Physical Libration and Surface coordinates // Interoffice memorandum, IOM 335-JW, DB, WF-2013, 1–19.
4. *Vasilyev M.V., Yagudina E.I., Torre J.-M., Feraudy D.* Planned LLR station in Russia and its impact on the Lunar ephemeris accuracy // Journees 2014, St. Petersburg, 22–24 September, 112–116.
5. *Takashi K. et al.* Rover Missions and Technology Exploration. – Rover Workshop, JAXA, 2009.
6. *Kosov A.* Radio Science Experiments in Russian “Luna-Resource” and “Luna-Glob” Projects. – Radio Science Team, ICI, 2014.
7. *Инатов А.В.* Радиointерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук, 2013, т. 183, 769–777.
8. *Васильев М.В., Ягудина Э.И.* Российская эфемерида Луны EPM-ERA 2012 // Астрон. вестник, 2014, т. 48, № 2, 169–176.
9. *Fienga A., Courde C., Torre J.-M., et al.* Interest of a New Lunar Laser Instrumentation on the ESO NTT Telescope // ArXiv: 1404.0473v1, 2014.
10. <ftp://cddis.gsfc.gov/pub/str/data/npt/moon> [электронный ресурс] (дата обращения: 23.11.2015).

THE USAGE OF RADIO TECHNICAL OBSERVATIONS OF LUNAR LANDERS FOR LUNAR EPHEMERIDES IMPROVEMENT

Vasilyev M.V., Shuygina N.V., Yagudina E.I.

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

Modern lunar ephemerides DE, INPOP, EPM-ERA are constructed on the basis of comparison dynamical theory of orbital and rotational motion of the Moon with all available high accuracy lunar laser observations (LLR). The main purpose of the paper is to evaluate the impact of adding new types of observations on the accuracy of lunar ephemerides. These types are VLBI and radio ranging observations of lunar lander equipped with a transponder like the Chinese space project Chang'E-3 with the Yutu rover placed on the Moon's surface. The evaluation was obtained through the mathematical simulation method for different net of radio telescopes and measurement accuracies. The simulation was carried out in the frame of ERA-system developed in the IAA RAS. The simulation shows that attracting additional radio ranging observations with the LLR ones can improve considerably (up to several times) the accuracy of some lunar ephemeris parameters.

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ТРОЯНЦЕВ ЮПИТЕРА

Виноградова Т.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Получена оценка количества троянцев Юпитера с диаметрами больше 1 км $N = 6 \times 10^5$. При этом количество астероидов такого размера около точки либрации L4 $N_{L4} = 4 \times 10^5$ в два раза больше, чем около точки L5 $N_{L5} = 2 \times 10^5$. Величина N_{L4}/N_{L5} возрастает с увеличением абсолютной звездной величины астероидов, то есть с уменьшением их размера. Это можно объяснить тем, что в области L4 обнаружены семейства астероидов, а в области L5 заметных семейств не найдено. Сравнение количества троянцев и астероидов в главном поясе показывает, что в области троянцев количество астероидов в пять раз меньше, чем в главном поясе.

1. Введение

Троянцы Юпитера сопровождают Юпитер при его движении по орбите и сосредоточены в двух группах. Первая группа находится около точки либрации L4 и движется впереди Юпитера, другая группа расположена вблизи точки L5 и движется позади Юпитера. Исследования последних лет показали, что троянцы представляют собой пористые ледяные тела, подобные кометным ядрам. Эти тела покрыты толстым слоем нелетучих веществ, которые имеют низкую отражательную способность. В настоящее время нет единого мнения о происхождении троянцев. Неизвестно, существуют ли они с момента формирования Солнечной системы, или были захвачены позднее. Поэтому общее количество троянцев и распределение их количества между двумя группами представляет интерес с точки зрения формирования и эволюции Солнечной системы.

Большие полуоси орбит троянцев располагаются в интервале (5.0–5.4) а.е. В настоящее время открыто свыше 5 тыс. троянцев Юпитера, которые наблюдались в нескольких оппозициях и имеют надежные орбиты. Это в 100 раз меньше количества открытых астероидов в главном поясе. Но надо иметь в виду, что троянцы расположены значительно дальше от Земли и, кроме того, характеризуются низким альбедо. В действительности, их количество велико. Рядом ученых было высказано предположение, что количество троянцев сравнимо с количеством астероидов главного пояса [Yoshida & Nakamura 2005; Jewitt et al. 2000].

В настоящей работе был произведен прогноз количества мелких астероидов в зоне троянцев Юпитера на основе наблюдаемого распределения этих астероидов по абсолютной звездной величине. Необходимые для вычислений сведения об орбитах и абсолютных звездных величинах астероидов были взяты из каталога элементов орбит MPC (IAU Minor Planet Centre) версии 2015 July 02.

2. Прогноз количества мелких троянцев

В настоящее время в области троянцев можно считать открытыми все астероиды с абсолютной звездной величиной $H < 12.5^m$. Вывод об этом можно сделать, рассмотрев, какую абсолютную звездную величину имеют астероиды-троянцы, открытые в 2014–2015 годах. Мы исключили из рассмотрения астероиды, наблюдавшиеся только в одной оппозиции, ввиду ненадежности их орбит. Во внимание были приняты только астероиды, наблюдавшиеся более чем в одной оппозиции и получившие предварительные обозначения из интервала 2014TA – 2015MA. Распределение (a, H) для этих астероидов показано на рис. 1. Распределение построено отдельно для астероидов из областей L4 и L5 для того, чтобы показать отсутствие наблюдательной селекции в этих группах. Левая граница распределений показывает, до какого значения H астероиды полностью

открыты на разных расстояниях от Солнца в двух группах троянцев. Абсолютная звездная величина определена для каждого астероида с известной орбитой, она дает возможность оценить диаметр астероида, если размеры астероида не определены другим, более точным, способом. Известная формула [Shoemaker et al., 1979] связывает диаметр астероида D , выраженный в километрах, с абсолютной звездной величиной H и геометрическим альбедо в визуальных лучах p_v :

$$\log D = 3.122 - 0.5 \log p_v - 0.2 H \quad (1)$$

В последние годы наши сведения о физических характеристиках троянцев значительно пополнились. Необходимые для данной работы альбедо и диаметры для большого количества троянцев были определены в результате работы нескольких космических и наземных программ. Из разных источников нами были собраны значения диаметров и альбедо для 1771 троянца. Таким образом, в настоящее время размеры определены для трети троянцев. Подавляющее большинство альбедо и диаметров были получены в результате работы ИСЗ WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) [Grav и др., 2011].

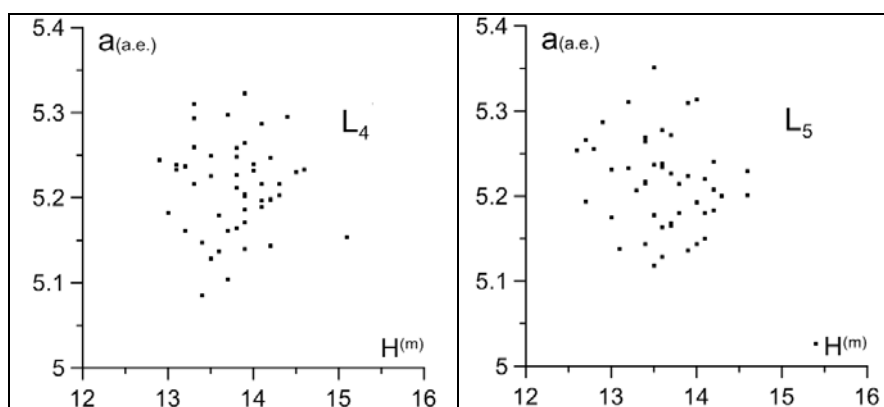


Рис. 1. Распределение (a,H) астероидов, открытых в 2014–2015 годах.

Как известно, троянцы имеют очень низкое альбедо. Разными авторами среднее альбедо троянцев оценивается от 0.041 ± 0.002 [Fernandez et al., 2003] до 0.07 ± 0.03 [Grav et al., 2011]. Мы получили для среднего альбедо троянцев оценку 0.057 ± 0.016 , используя все найденные значения альбедо для этих астероидов. Если использовать это значение, то из формулы (1) можно получить, что в настоящее время открыты все троянцы с диаметрами >18 км. А самые мелкие астероиды-троянцы, которые доступны для наблюдений и открываются в настоящее время, имеют диаметр около 7 км.

Прогноз количества астероидов обычно производится до размера диаметра 1 км или 2 км. Троянцы таких размеров в настоящее время не могут наблюдаться. Для того чтобы определить количество таких астероидов, необходимо знать, как нарастает количество мелких астероидов с уменьшением их диаметра или с увеличением абсолютной звездной величины H . Дифференциальный закон возрастания логарифма количества астероидов $\log dN$ в зависимости от H для троянцев приведен на рис. 2а. Хорошо видно, что график практически линейен в интервале $11^m - 13^m$. Это позволяет произвести линейную экстраполяцию графика и определить закон нарастания количества еще не открытых астероидов. Методом наименьших квадратов для интервала $11^m - 13^m$ и шага 1.0^m получена зависимость $\log dN(H) = (0.42 \pm 0.01) H - (2.49 \pm 0.08)$. Отсюда можно получить, что количество астероидов-троянцев, диаметр которых превышает 1 км, равно примерно 600 тыс. Такие же графики распределения астероидов по H были построены по отдельности для двух групп троянцев вблизи точек либрации $L4$ и $L5$. Эти гра-

фики приведены на рис.2б. С использованием этих графиков, было получено прогнозируемое количество таких астероидов в этих группах: $N_{L4} = 400$ тыс., $N_{L5} = 200$ тыс.

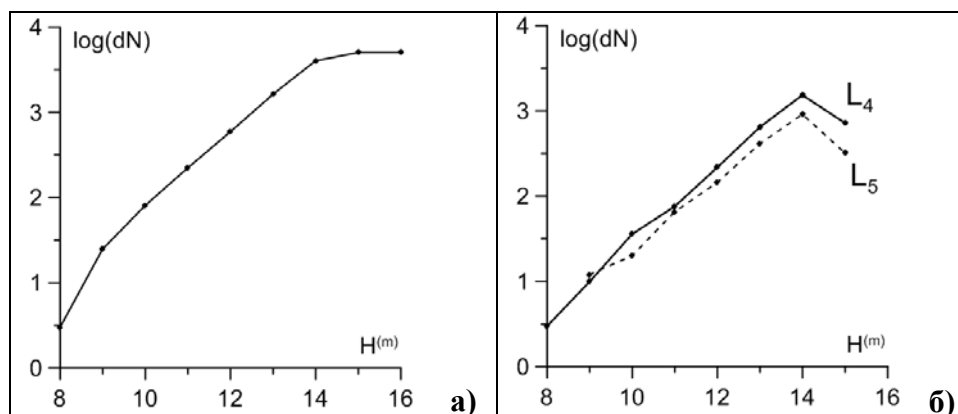


Рис. 2. Дифференциальный закон увеличения количества троянцев в зависимости от абсолютной звездной величины H : **а)** для всех троянцев, **б)** для областей $L4$ и $L5$.

3. Соотношение количества астероидов N_{L4}/N_{L5}

В настоящее время открыто 3258 $L4$ -троянцев и 1884 $L5$ -троянцев с надежными орбитами. Таким образом, в области $L4$ открыто в 1.7 раз больше астероидов, чем в области $L5$. Разными авторами величина N_{L4}/N_{L5} оценивалась по-разному, от 1.34 ($D > 50 \text{ km}, H < 10^m$) [Grav et al., 2012] до 1.8 ($D > 2 \text{ km}$) [Nakamura & Yoshida, 2008]. В действительности эта величина не является постоянной, она увеличивается с ростом H .

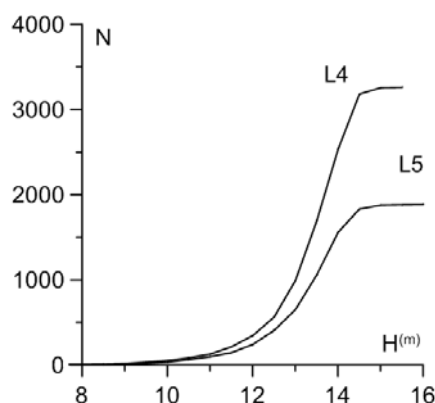


Рис. 3. Увеличение суммарного количества троянцев в зависимости от абсолютной звездной величины H для области $L4$ (верхний график) и $L5$ (нижний график).

На рис. 3 приведены графики возрастания интегрального количества открытых астероидов в каждой группе в зависимости от абсолютной звездной величины. Хорошо видно, что отношение N_{L4}/N_{L5} увеличивается с ростом H . Как уже говорилось, в настоящее время можно считать открытыми все астероиды-троянцы с $H < 12.5^m$, для них $N_{L4}/N_{L5} = 1.4$. Открытие астероидов с $H < 13^m$ почти завершено, для таких астероидов это отношение равно 1.5. Астероиды с $H > 13^m$ открыты не полностью, но, по-видимому, соотношение их наблюдаемого количества для значений $H < 14^m$ и $H < 15^m$ отражает реальное положение дел, если предположить отсутствие существенной наблюдательной селекции для двух групп троянцев. В таблице 1 приведены значения отношения N_{L4}/N_{L5} , вычисленные для разных значений H . Увеличение этого отношения говорит о разных скоростях роста количества астероидов в этих популяциях с уменьшением их размера.

Таблица 1. Соотношение суммарного количества открытых астероидов в двух группах троянцев в зависимости от абсолютной звездной величины H или диаметра D .

$H <$	11^m	12^m	13^m	14^m	15^m	19^m
$D(\text{км}) >$	35	22	14	9	6	1
N_{L4}/N_{L5}	1.3	1.4	1.5	1.7	1.8	2.0 (прогноз)

Асимметрия в распределении количества троянцев около точек либрации $L4$ и $L5$ была обнаружена относительно недавно. Для ее объяснения были предложены разные гипотезы. Простым, но ошибочным, объяснением является влияние наблюдательной селекции. В работах [Jewitt et al., 2004; Grav et al., 2011] указывается на то, что область $L5$ в последние годы является более неудобной для наблюдения по сравнению с областью $L4$, и, поэтому, здесь открыто меньше астероидов. Но распределения на рис. 1 говорят о том, что никакой заметной наблюдательной селекции нет, так как границы построенных для этих областей распределений совпадают.

Другие авторы относят возникновение асимметрии в распределении троянцев ко времени формирования Солнечной системы. Ими производятся сложные численные эксперименты, рассматривающие эволюцию планетозималей на стадии формирования Юпитера. В результате, при некоторых предположениях, они получают асимметрию в распределении количества сформировавшихся троянцев около двух точек либрации.

Еще одним объяснением асимметрии является более активная столкновительная эволюция астероидов около точки $L4$. Здесь обнаружены достаточно крупные для этой популяции семейства астероидов 3548 Eurybates и 2148 Ereios [Vinogradova, 2015], а в области $L5$ таких семейств нет. Существование крупных семейств в области $L4$ может объяснить увеличение отношения N_{L4}/N_{L5} с ростом H . Как известно, семейства астероидов возникли в результате дробления родительских тел, что сопровождается образованием большого количества мелких астероидов. Но эта гипотеза не может объяснить, почему суммарная масса $L4$ -троянцев в два раза больше, чем масса $L5$ -троянцев [Виноградова, Чернетенко, 2015]. Дробление астероидов не может изменить величину их суммарной массы. Как известно, мелкие астероиды вносят незначительную поправку в общую массу, несмотря на их огромное количество. Суммарная масса определяется, как правило, небольшим количеством крупных астероидов. Действительно, в области $L4$ крупных астероидов больше. Здесь находятся три самых крупных троянца: 624 Hektor, 911 Agamemnon, 1437 Diomedes, диаметр которых превышает 160 км. Тогда вопрос об асимметрии в распределении троянцев может быть поставлен так: является ли случайным то, что около точки $L4$ сосредоточено больше крупных троянцев, чем около $L5$.

4. Сравнение с результатами других авторов

Мы произвели сравнение полученного количества троянцев с результатами других авторов. В таблице 2 приводятся результаты, полученные нами и другими авторами для каждой группы в отдельности и для всех астероидов-троянцев в целом. Кроме количества астероидов в таблицу включен линейный коэффициент k функции дифференциального распределения астероидов по абсолютной звездной величине $\log dN(H) = kH + c$. Значения этого коэффициента, полученные разными авторами, достаточно хорошо согласуются в пределах точности.

Прогнозируемое количество астероидов приводится для размеров диаметров >1 км и >2 км. Это вызвано тем, что одни авторы приводят количество астероидов с диаметрами >1 км, а другие – количество астероидов с радиусами >1 км, то есть с диаметрами >2 км. Для удобства сравнения были вычислены обе эти величины. Оценки, получен-

ные до 2008 года, заметно отличаются от полученных нами. Более поздние оценки [Nakamura & Yoshida, 2008; Fernandez et al., 2009] близки к нашему результату.

Таблица 2. Оценки количества троянцев, полученные разными авторами.

	k	N ($\times 10^5$) (D>2км)	N($\times 10^5$) (D>1км)	Author
Троянцы L4	0.40±0.05	1.6		Jewitt et al., 2000
Троянцы L4	0.38±0.05	2.4	6	Yoshida, F., Nakamura, T., 2005
Все троянцы	0.44±0.05	2.4±0.4	10	Szab'ó et al. (2007)
Троянцы L4		0.63±0.10		Nakamura & Yoshida, 2008
Троянцы L5		0.34±0.05		
Троянцы L4		0.9	3	Fernandez et al. 2009
Все троянцы	0.42±0.01	1.2	6	Эта работа, 2015 ($p_v=0.056$)
Троянцы L4	0.44±0.02	0.8	4	
Троянцы L5	0.39±0.02	0.4	2	

5. Соотношение количества троянцев и астероидов главного пояса

Представляется интересным также сравнить количество троянцев с количеством астероидов в главном поясе. Некоторыми авторами было высказано предположение, что количество астероидов в этих популяциях почти одинаково. В работе [Ivezic et al. 2001] количество астероидов с $D>1$ км в главном поясе оценено как 6.7×10^5 . При сравнении этой величины с некоторыми данными [Szabó et al., 2007] из таблицы 2 может возникнуть представление, что астероидов главного пояса меньше, чем троянцев. По нашим расчетам [Виноградова, 2015] в главном поясе (1.8 а.е.–3.8 а.е.) существует около 3×10^6 астероидов с $D>1$ км, то есть в 5 раз больше, чем троянцев таких же размеров. На рис. 4 показаны графики возрастания суммарного количества астероидов в зависимости от H для этих популяций.

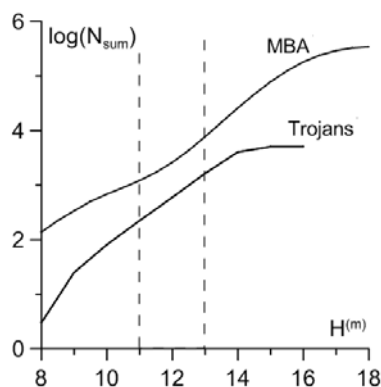


Рис. 4. Увеличение суммарного количества астероидов в зависимости от H в области троянцев и в главном поясе (MBA).

То, что число астероидов главного пояса в несколько раз больше числа троянцев можно подтвердить, если обратиться к количеству уже открытых астероидов. В настоящее время в области троянцев полностью открыты практически все астероиды с $H < 12.5^m$, их насчитывается около 1 тыс. В области главного пояса существует около 4 тыс. таких астероидов, то есть в 4 раза больше. Если производить подсчет количества астероидов в зависимости от диаметра, отношение количества астероидов N_{MBA}/N_{TR} немного уменьшится. Звездной величине 12.5^m в области троянцев соответствует диаметр приблизительно 18 км, если предположить, что среднее альbedo равно 0.056.

В главном поясе среднее альbedo астероидов равно 0.12, поэтому диаметру 18 км здесь соответствует $H = 11.6^m$. Мы постарались использовать для вычисления все опубликованные данные о диаметрах астероидов. В результате получено, что в главном поясе имеется в 3 раза больше астероидов с $D > 18$ км, чем среди троянцев. Как уже говорилось, все астероиды такого размера можно считать уже открытыми даже в области троянцев. Но нарастание количества мелких астероидов ($H > 12.0^m$) с ростом абсолютной звездной величины в главном поясе происходит быстрее. Для интервала $12^m < H < 14^m$ получена зависимость $\log dN = (0.52 + 0.01)H - (3.0 + 0.1)$ при единичном шаге по H . Таким образом, линейный коэффициент графика роста количества астероидов в главном поясе ($k = 0.52$) заметно больше, чем аналогичный коэффициент для троянцев ($k = 0.42$). Поэтому в рамках линейного прогноза величина отношения N_{MBA}/N_{TR} может только увеличиться с уменьшением размера астероидов.

Литература

1. *Виноградова Т.А.* Масса пояса астероидов и его отдельных зон // Труды ИПА, 2015, вып. 33, с. 22.
2. *Виноградова Т.А., Чернетенко Ю.А.* Суммарная масса троянцев Юпитера // *Астрономический Вестник*, 2015, том 49, № 6, с. 428–434.
3. *Fernandes, Yanga R.; Sheppard, Scott S.; Jewitt, David C.* The albedo distribution of Jovian Trojan asteroids // *The Astronomical Journal*, 2003, 126 (3): 1563–1574.
4. *Grav, T., Mainzer, A.K., Bauer, J., et al.* WISE/NEOWISE observations of the Jovian trojans: Preliminary results // *Astrophys. J.*, 2011, 742:40.
5. *Ivezic, Z., S. Tabachnik, R. Rafikov, R.H. Lupton, T. Quinn, M. Hammergren, L. Eyer, J. Chu et al.* Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data // *AJ*, 2001, 122, 2749–2784.
6. *Jewitt D.C., Trujillo C.A., Luu J.X.* Population and size distribution of small jovian Trojan asteroids // *Astron. J.*, 2000, 120, 1140–1147.
7. *Nakamura T., Yoshida F.* A New Surface Density Model of Jovian Trojans around Triangular Libration Points // *PASJ*, 2008, 60, 293.
8. *Shoemaker E.M., Williams J.G., Helin E.F., and Wolfe R.F.* Earth-crossing asteroids: orbital classes, collision rates with Earth, and origin // in *Asteroids*. ed. T. Gerels. – Univ. Arizona Press, 1979. P. 253–282.
9. *Szabó G.M., Ivezić Ž., Jurić M., Lupton R.* The properties of Jovian Trojan asteroids listed in SDSS Moving Object Catalogue 3 // *MNRAS*, 2007, 377, 1393.
10. *Yoshida, F.; Nakamura, T.* Size distribution of faint Jovian L4 Trojan asteroids // *The Astronomical Journal*, 2005, 130, 2900–2911.
11. *Vinogradova T.A.* Identification of asteroid families in Trojans and Hildas // *MNRAS*, 2015, 454, 2436–2440.

ESTIMATION OF A NUMBER OF JUPITER TROJANS

Vinogradova T.A.

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

A number of Jupiter Trojans with diameters larger than 1 km is estimated as 6×10^5 . The number of these asteroids about the L4 Lagrangian point ($N_{L4} = 4 \times 10^5$) is two times higher than that about the L5 ($N_{L5} = 2 \times 10^5$). It is found that the N_{L4}/N_{L5} ratio increases at smaller asteroid sizes or higher absolute magnitudes. This can be explained by the existence of asteroid families in L4 swarm. The number of Trojans is found to be five times less than the number of asteroids in the main belt.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЗ

**Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Башакова Е.А.,
Куприянов В.В., Русов С.А., Ляшенко А.Ю., Петрова С.Н., Мартюшева А.А.,
Наумов К.Н., Иванов А.В., Слесаренко В.Ю., Сокова И.А., Соков Е.Н.,
Зиновьев С.В., Мельников А.В., Ершов В.Н., Карашевич С.В.**

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

На телескопах Пулковской обсерватории ЗА-320М и МТМ-500М ведутся наблюдения сближающихся с Землёй астероидов. Результаты наблюдений подвергаются астрометрический и фотометрической обработке. На основе наблюдательных данных для астероидов (99942) Apophis, 2005 YU55, 2006 DP14, 2010 XZ67, 2013 TV135, 251346, 285263, (367943) Diende и др. проведено улучшение орбит, исследована эволюция орбит, определены фотометрические характеристики астероидов. Для объектов 2014 HQ124 и (357439) 2004 VL86 проведены базисные астрометрические наблюдения (метод триангуляции) с целью повышения точности определения элементов их орбит.

1. Введение

В Лаборатории наблюдательной астрометрии и Секторе эфемеридного обеспечения Пулковской обсерватории ведутся комплексные исследования различных групп астероидов. Значительное внимание уделяется астероидам, сближающимся с Землёй. Основу исследований составляют астрометрические и фотометрические наблюдения, получаемые на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М.

Телескоп ЗА-320М (Кассегрен, $D = 320$ мм, $F = 3200$ мм) расположен в Пулковской обсерватории (Санкт-Петербург) [1]. Он оборудован ПЗС-камерой SBIG STX-16803 (4096×4096 пикселей размером 9×9 мкм (используется биннирование 3×3), поле зрения около 39'×39').

Телескоп МТМ-500М (Максутов-Кассегрен, $D = 500$ мм, $F = 4100$ мм) установлен на Горной астрономической станции ГАО РАН в горах северного Кавказа близ Кисловодска на высоте 2100 м над уровнем моря [2]. Он оборудован ПЗС-камерой SBIG STL-1001E (1024 × 1024 пикселей размером 24 × 24 мкм, поле зрения около 21' × 21'). Оба телескопа оснащены турелями с широкополосными светофильтрами BVRI.

Астрометрическая и фотометрическая обработка ПЗС-наблюдений выполняется с помощью программного пакета АРЕХ-II, разработанного в Пулковской обсерватории [3]. В качестве опорного каталога при астрометрической обработке используется UCAC-4. При фотометрической обработке звёздные величины опорных звёзд в видимом диапазоне вычисляются из данных инфракрасного обзора 2MASS в соответствии с методикой, предложенной Уорнером в статье [4].

Эфемеридная поддержка наблюдений, а также улучшение орбит астероидов и моделирование их орбитальной эволюции выполняется с помощью программного пакета ЭПОС, также разработанного в Пулкове [5].

Результаты астрометрической обработки – положения астероидов – отправляются в Международный центр малых планет (MPC), а также используются для улучшения и исследования орбит. Некоторые результаты представлены в настоящем докладе.

2. (99942) Apophis

Знаменитый потенциально опасный астероид Апофис наблюдался во время его последнего тесного сближения с Землёй в начале 2013 года. Наблюдения проводились

в рамках наблюдательных кампаний GAIA FUN SSO [6] и «Программы координированных наблюдений опасных объектов» под эгидой ИНАСАН [7].

По наблюдениям в январе и феврале 2013 было получено 515 положений Апофиса с точностью $0''.07-0''.4$ по прямому восхождению и $0''.07-0''.5$ по склонению. По наблюдениям со светофильтрами были сделаны оценки показателей цвета: $B-V = 0.81^m \pm 0.06^m$, $V-R = 0.42^m \pm 0.06^m$, $R-I = 0.28^m \pm 0.07^m$.

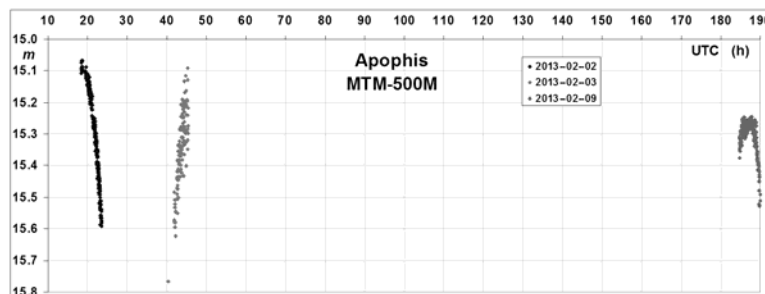


Рис. 1. Отрезки кривой блеска астероида Апофис, полученные на телескопе MTM-500M.

Также было получено несколько отрезков кривой блеска Апофиса, три из которых имели продолжительность около 5 часов (см. рис. 1).

3. 308635 (2005 YU55)

Астрометрические и фотометрические наблюдения этого астероида были выполнены в период, соответствующий максимальному его сближению с Землей, с 9 по 20 ноября 2011 г. в рамках очередной международной тренировочной кампании наземной поддержки миссии GAIA (GAIA FUN SSO) [8, 9].

На основе наблюдений было определено около тысячи астрометрических положений. С использованием этих положений, а также с привлечением других наблюдений, выполненных в мире, была определена измененная после тесного сближения с Землей новая орбита астероида. На основе данной орбиты было предвычислено тесное сближение с Венерой 19 января 2029 года с оценкой расстояния в момент максимального сближения – 359 тыс. км. Кроме того, было рассчитано влияние давления солнечного излучения на орбитальное положение астероида; оно составило: ≈ 3.1 км в год в радиальном направлении и ≈ 10 км в год вдоль орбиты.

Наблюдения кривых блеска позволили уточнить период осевого вращения астероида: 16.3 ± 0.4 часа. Кроме того, было заподозрено присутствие в кривых блеска ещё одного периода длительностью около 1 часа.

По наблюдениям со светофильтрами были определены показатели цвета: $B-V = 0.67^m \pm 0.07^m$, $V-R = 0.34^m \pm 0.09^m$, $R-I = 0.30^m \pm 0.07^m$. Основываясь на этих значениях и на статье [10], нами для этого астероида была сделана оценка таксономического класса по Толену. Форма спектра астероида в оптическом диапазоне, определенная из наших наблюдений, наиболее близка к спектрам классов B, F, C, G; ближе всего – к классу B.

4. 388188 (2006 DP14)

Астероид 2006 DP14 наблюдался в период его сближения с Землей в феврале 2014 года. На телескопе MTM-500M в течение 5 ночей были получены отрезки кривой блеска продолжительность от 0.6 до 6.6 часа. Кроме того, по нашей просьбе в течение 9 ночей этот астероид наблюдался в Уссурийской обсерватории. На левой панели рис. 2 приведена кривая блеска, наблюденная в течение двух ночей.

По наблюдаемым отрезкам кривой блеска, охватывающим интервал в 17 суток (с 12 февраля по 2 марта), был с хорошей надёжностью определён период осевого вращения астероида: 5.7846 ± 0.0005 часа (см. правую панель рис. 2). Форма полученной кривой блеска: 2 минимума, 2 максимума. Максимумы примерно одинаковой высоты. Один из минимумов глубже другого примерно на 0.15^m . Эволюция формы не прослеживается.

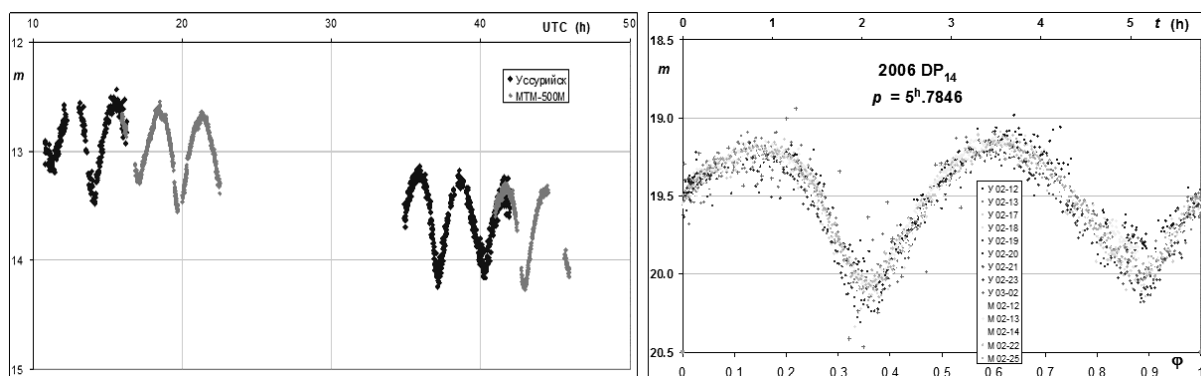


Рис. 2. *Левая панель* – Наблюдённые значения блеска 2006 DP14 по наблюдениям МТМ-500М и Уссурийской обсерватории 12 и 13 февраля 2014 года. *Правая панель* – Кривая блеска астероида 2006 DP14, фазированная с периодом 5.7846 часа, построенная по всем наблюдениям МТМ-500М (М) и Уссурийской обсерватории (У).

5. 2010 XZ67

Наблюдения кривой блеска велись 1 января 2014 года на телескопе МТМ-500М без светофильтра. В период наблюдений астероид был довольно ярким: около 14^m в полосе *V*. Точность измерения относительных изменений блеска оценивается в 0.02^m . По-видимому, этот астероид обладает очень большим периодом вращения, так как за время наблюдений в течение примерно четырёх с половиной часов выявился только почти равномерный спад блеска примерно на 0.2^m (см. рис. 3).

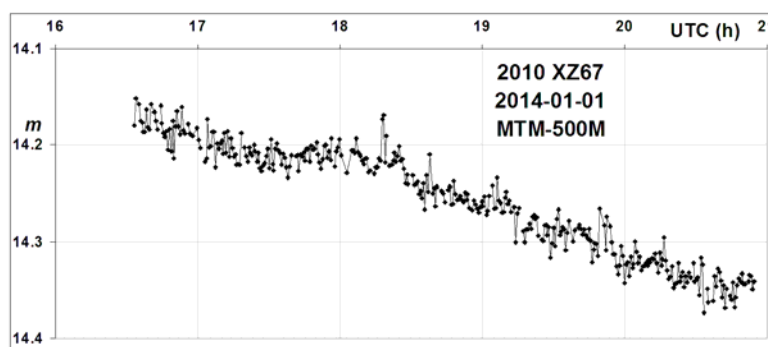


Рис. 3. Отрезок кривой блеска астероида 2010 XZ67.

Также по наблюдениям со светофильтрами были определены показатели цвета астероида: $B-V = 0^m.76 \pm 0^m.04$, $V-R = 0^m.32 \pm 0^m.02$, $R-I = 0^m.12 \pm 0^m.03$.

6. 2013 TV135

Этот астероид наблюдался с октября 2013 г. по январь 2014 г. в рамках международной наблюдательной кампании GAIA FUN SSO. В результате наблюдений было получено 335 астрометрических положений со средней точностью $0.''28$ по склонению и прямому восхождению.

В октябре – ноябре 2013 года на телескопе МТМ-500М были проведены наблюдения шести отрезков кривой блеска длительностью от 1.2 до 8.4 часа. После редукиций за расстояния астероида от Земли и от Солнца по средним значениям блеска этих отрезков была построена фазовая зависимость. По ней определены параметр наклона фазовой зависимости $G = -0.062 \pm 0.034$ и средняя абсолютная звёздная величина астероида в интегральной полосе МТМ-500М: $H_C = 18^m.67 \pm 0^m.12$. Поскольку интегральная полоса МТМ-500М ближе всего соответствует полосе R международной фотометрической системы (их средние длины волн близки), то $H_R \approx H_C = 18^m.7 \pm 0^m.2$. Так как наблюдения велись при больших фазовых углах (37° – 58°), то надёжность полученных значений параметров, как считается, невысока.

Наблюденные отрезки кривой блеска охватывают интервал более 16 суток, что позволяет надёжно определить период осевого вращения астероида. Наблюдения выполнялись без фильтра. Блеск астероида 2013 TV135 в период наблюдений был около 18^m , т.е. слишком слабый для точных фотометрических измерений на телескопе с полуметровой апертурой. Тем не менее, обнаруженная высокая амплитуда колебаний блеска астероида позволила получить надёжные результаты. По нашим наблюдениям, обработанным методом Скаргла [11], период вращения астероида составил 2.3512 ± 0.0004 часа (см. рис. 4). Наиболее точный и длительный фрагмент, наблюденный 28 октября, показывает размах колебаний примерно $0^m.35$, остальные же четыре, измеренные с худшей точностью, показывают размах около $0^m.4$ и более.

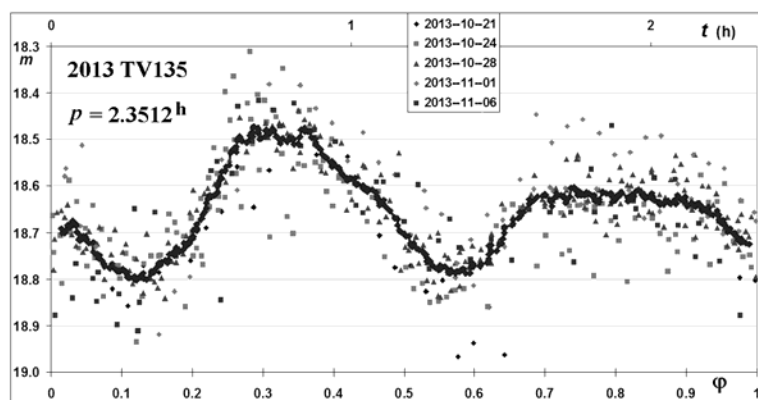


Рис. 4. Фазированная кривая блеска астероида 2013 TV135, полученная по 5-ти отрезкам.

7. 251346 (2007 SJ)

Наблюдения отрезков кривой блеска этого потенциально опасного астероида были проведены в течение 4 ночей в ноябре – декабре 2013 года на телескопе ЗА-320М без светофильтров. По этим наблюдениям было определено 120 астрометрических положений со средней точностью $0''.23$ по прямому восхождению и $0''.12$ по склонению. Точность определения относительного изменения блеска для каждого отрезка менялась в пределах 0.025^m – 0.050^m .

Была предпринята попытка построения фазовой зависимости и определения параметра наклона и абсолютной звёздной величины. Зависимость строилась по средним значениям каждого отрезка кривой блеска. Поскольку угол фазы астероида в период наблюдений был очень большим (42° – 79°), полученные параметры определились, конечно, очень неуверенно. Однако построенная зависимость позволила произвести учёт фазы. Полученные таким образом абсолютные значения всех наблюденных отрезков кривой блеска хорошо совпали между собой.

Период собственного вращения астероида уже известен: на сайте JPL приводится его значение 2.718 часа [<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>]. Этот период подходит к нашим

наблюдениям. (Наши отрезки кривой блеска разнесены по времени на 29 суток). На рис. 5 приведена кривая блеска астероида 251346, построенная по нашим отрезкам и фазированная с указанным периодом. Размах колебаний блеска составил около 0.18^m . Похоже, что кривая блеска этого астероида имеет не 2, а 3 максимума: один более высокий, а два других ниже и примерно равные между собой.

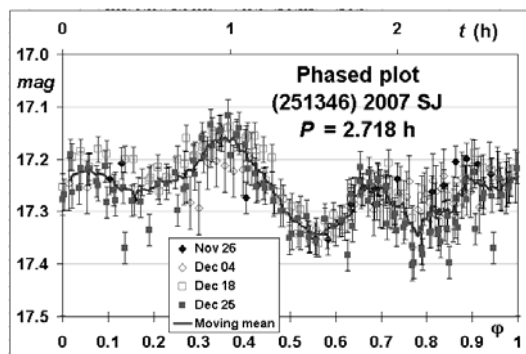


Рис. 5. Кривая блеска астероида 251346, фазированная с периодом 2.718 часа.

8. 285263 (1998 QE2)

Астероид 285263 наблюдался в июне–июле 2013 года на телескопах ЗА-320М в Пулковской обсерватории и МТМ-500М на Горной астрономической станции ГАО РАН. В разные ночи было получено 7 отрезков кривой блеска астероида на телескопе ЗА-320М и 4 отрезка на МТМ-500М. Кроме того, на МТМ-500М в другие ночи были проведены отдельные наблюдения для определения положений астероида, а также выполнены наблюдения в фильтрах для определения его показателей цвета. Наблюдения на ЗА-320 проводились в период «белых ночей» в Санкт-Петербурге, к тому же небо не всегда было фотометрического качества. Поэтому только два отрезка кривой блеска оказались пригодными для исследований; остальные имели слишком большой разброс. Таким образом, кривая блеска астероида строилась по шести отрезкам, полученным в течение июня 2013 года: двум на ЗА-320М, и четырём на МТМ-500М.

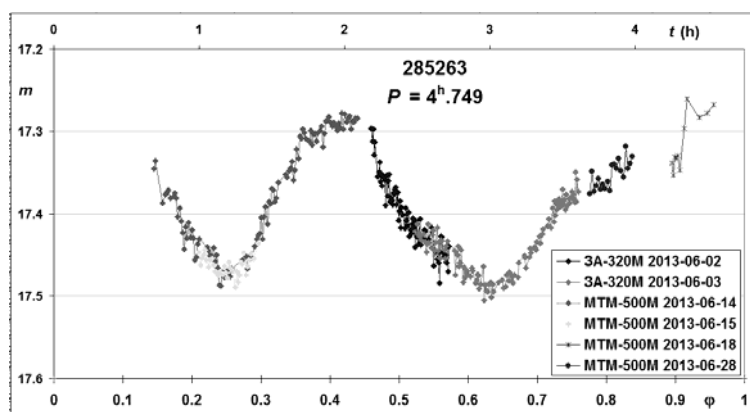


Рис. 6. Кривая блеска астероида 285263, фазированная с периодом 4.749 часа.

Фазовые углы, при которых астероид наблюдался, слишком велики для того, чтобы правильно определить его фазовую зависимость (параметр наклона и абсолютную звёздную величину). Эта зависимость на наблюдаённом диапазоне угла фазы (17° – 40°) аппроксимировалась линейной зависимостью, которая и использовалась для учёта фазы. Тем самым значения блеска астероида были почти правильно приведены к абсолютным значениям. Однако после всех редуций разные отрезки отличались друг от

друга по блеску слишком сильно, для того чтобы можно было по ним строить общую кривую. Тогда к некоторым отрезкам были прибавлены произвольные нуль-пункты величины до 0.1^m , чтобы привести их к одному уровню.

Период собственного вращения астероида уже известен: на сайте JPL приводится его значение 4.749 часа [<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>]. Этот период подходит к нашим наблюдениям. На рис. 6 приведена кривая блеска астероида 285263, построенная по нашим отрезкам и фазированная с указанным периодом.

По наблюдениям со светофильтрами, выполненными в течение 5 ночей на телескопе МТМ-500М, были определены показатели цвета: $B-V = 0.68^m \pm 0.08^m$, $V-R = 0.33^m \pm 0.06^m$, $R-I = 0.34^m \pm 0.05^m$.

9. 367943 Duende (2012 DA14)

Астрометрические и фотометрические наблюдения астероида Duende были проведены на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М сразу после его тесного сближения с Землёй 15 февраля 2013 года [12]. По результатам наблюдений получено 436 астрометрических положения со средней точностью $0''.43$ по прямому восхождению и $0''.26$ по склонению.

Численными методами была исследована эволюция орбиты Дуэнде. Этот астероид вращается вблизи резонанса 1:1 с Землёй по среднему движению. Было показано, что при прежних тесных сближениях он изменял тип своего орбитального движения относительно Земли: совершал переходы между циркулирующей и подковообразной орбитами и, в принципе, мог бы стать квазиспутником Земли. Однако в результате последнего сближения он отдалился от области резонанса 1:1.

Были сделаны оценки влияния на орбитальное движение астероида Дуэнде давления солнечного излучения и эффекта Ярковского.

По наблюдениям со светофильтрами, выполненными в течение 5 ночей на телескопе МТМ-500М, были определены показатели цвета: $B-V = 0.86^m \pm 0.15^m$, $V-R = 0.39^m \pm 0.04^m$, $R-I = 0.36^m \pm 0.03^m$.

По наблюдениям 16 и 19 февраля 2013 года было построено два отрезка кривой блеска астероида длительностью около 10 часов каждый. Сопоставление этих отрезков с другими, наблюденными в соседние промежутки времени на других обсерваториях, показало, что вращение астероида около его сближения с Землёй имело сложный характер. Численное моделирование вращения астероида при воздействии гравитации Земли во время его пролёта (на основе наблюденных нами отрезков кривой блеска) продемонстрировало, что Дуэнде в это время находился в состоянии вращения не вокруг главной оси инерции – т.н. «вращения с кувырканием».

10. Триангуляционные наблюдения астероидов

В 2014 году нам поступило предложение из обсерватории Дрездена принять участие в синхронных наблюдениях астероида **2014 HQ124** с целью определения расстояний до него триангуляционным методом во время его сближения с Землёй 10 июня 2014 года. Предполагалось, что в этой международной наблюдательной кампании примут участие 6 обсерваторий. Но из-за погодных условий провести наблюдения удалось лишь на трёх: Николаевской астрономической обсерватории, Киевской кометной станции и Горной астрономической станции ГАО РАН (телескоп МТМ-500М). Предварительные результаты этих наблюдений были опубликованы в докладе [13]. Результаты этой первой кампании показали, что, получая одновременно информацию о положении астероида на небесной сфере и расстоянии до него (без использования радарных наблюдений), можно по наблюдениям одной ночи построить орбиту с точностью, срав-

нимой с точностью орбиты, построенной по многомесячным определениям его небесных координат.

В 2015 году в Пулковской обсерватории было принято решение организовать подобную же кампанию по квазисовременным наблюдениям астероида **(357439) 2004 BL86** при его сближении с Землёй 27 января 2015 года. Для этого мы постарались привлечь обсерватории, расположенные как можно шире по земной поверхности. В наблюдениях приняли участие следующие обсерватории (с востока на запад): Уссурийская обсерватория, обсерватория ИСЗФ в Мондах (Саяны близ Иркутска), Алма-Атинская обсерватория, Горная астрономическая станции ГАО РАН (телескоп МТМ-500М), обсерватория Краснодарского университета, Пулковская обсерватория (телескоп ЗА-320М), обсерватория университета Валенсии (Испания). Наблюдения продолжались с 27 января по 11 февраля. Часть интервалов наблюдений на различных обсерваториях пересекаются. Результаты наблюдений сейчас находятся в процессе обработки и интерпретации.

Литература

1. *Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С.* Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II // Изв. ГАО РАН, 2004, № 217, с. 505–530.
2. *Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б., Ибрагимов Ф.М., Куприянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В.* Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М // Изв. ГАО РАН, 2009, № 219, вып. 1, с. 192–218.
3. *Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А.* Программные пакеты «Апекс-1» и «Апекс-2» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // *Астрономический вестник*, 2010, том 44, № 1, с. 74–87.
4. *Warner B.D.* Initial Results from a Dedicated H-G Project // *Minor Planet Bulletin*, 2007, vol. 34, p. 113–119.
5. *Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // *Астрономический Вестник*, 2012, том 46, № 2, с. 190–192.
6. *Gorshanov D.L., Devyatkin A.V. et al (16 authors)* Pulkovo observations in last campaigns of GAIA FUN SSO // *Proc. of GAIA-FUN-SSO 2014 Workshop (IMCCE, Paris, 2014, Nov. 24–26)*, p. 89–92.
7. *Ибрагимов М.А., Барабанов С.И. и др. (ещё 28 соавторов)* Программа координированных наблюдений опасных объектов: предпосылки, создание и первый опыт координированных наблюдений // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2013, № 4, том 2, с. 60–65.
8. *Gorshanov D.L., Devyatkin A.V., Bashakova E.A., Ivanov A.V., Karashevich S.V., Kouprianov V.V., L'vov V.N., Naumov K.N., Romas E.S., Slesarenko V.Yu., Sokov E.N., Tsekmeister S.D., Vereschagina I.A., Zinov'ev S.V.* Observations of asteroids with ZA-320M and MTM-500M Pulkovo observatory telescopes for GAIA FUN SSO program // *Proceedings of second «Gaia-FUN-SSO-2» workshop (IMCCE, Paris, 2012)*, p. 73–76.
9. *Vereshchagina I.A.; Sokov E.N.; Gorshanov D.L.; Devyatkin A.V.; L'vov V.N.; Tsekmeister S.D.; Romas E.S.; Martyusheva A.A.* Astrometry and photometry of asteroid (308635) 2005 YU55 // *Solar System Research*, 2014, Volume 48, Issue 5, pp. 382–390.
10. *Dandy C.L., Fitzsimmons A., and Collander-Brown S.J.* Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit // *Icarus*, 2003, vol. 163, p. 363–373.
11. *Scargle J.D.* Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data // *Ap.J.*, 1982, **263**, p. 835–853.
12. *Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Наумов К.Н., Петрова С.Н., Мартюшева А.А., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Мельников А.В.* Астрометрия и фотометрия астероида (367943) 2012 DA14 на телескопах ГАО РАН // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2013, № 4, вып. 2, с. 46–52.

13. Eggle S., Ivantsov A. et al (13 authors) GAIA-FUN-SSO: Triangulation Observations of 2014 HQ₁₂₄ // Proc. of GAIA-FUN-SSO 2014 Workshop (IMCCE, Paris, 2014, Nov. 24–26), p. 71–75.

THE RESULTS OF NEAS INVESTIGATION

**Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Bashakova E.A.,
Kouprianov V.V., Rusov S.A., Lyashenko A.Yu., Petrova S.N., Martyusheva A.A.,
Naumov K.N., Ivanov A.V., Slesarenko V.Yu., Sokova I.A., Sokov E.N.,
Zinovyev S.V., Melnikov A.V., Yershov V.N., Karashevich S.V.**
Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

CCD observations of Near Earth Asteroids are made in Pulkovo Observatory with ZA-320M and MTM-500M telescopes. The observations are astrometrically and photometrically processed. On the base of observational data of asteroids (99942) Apophis, 2005 YU55, 2006 DP14, 2010 XZ67, 2013 TV135, 251346, 285263, (367943) Duende and other, their orbits are improved, evolution of the orbits is investigated, photometrical parameters are determined. For asteroids 2014 HQ124 and (357439) 2004 BL86, the triangulation observations were made in order to improve the accuracy of their orbit determination.

ОЦЕНКА МАССЫ СПУТНИКОВ ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ В КОЛЬЦАХ САТУРНА

Довгалеv И.С.¹, Питъев Н.П.²

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Спутники Сатурна, двигающиеся достаточно близко от колец или сближающиеся с ними, вызывают заметные гравитационные возмущения. Выполнено моделирование возмущений кольца, состоящего из двигающихся по почти круговым орбитам частиц, от спутника. Для исследования используются методы задачи N тел. Учитывается сжатие Сатурна и несферичность возмущающего спутника. При интегрировании уравнений движения пряди колец моделировались цепочками сотен частиц. Найдены соотношения амплитуды возмущений и смещения относительно возмущающего спутника в зависимости от его массы и расстояния до кольца. Полученные результаты применены для оценки масс Прометей и Дафниса.

1. Введение

Быстро вращающаяся, подвижная среда колец является чувствительным индикатором различных гравитационных возмущений. Кольца содержат очень большое число

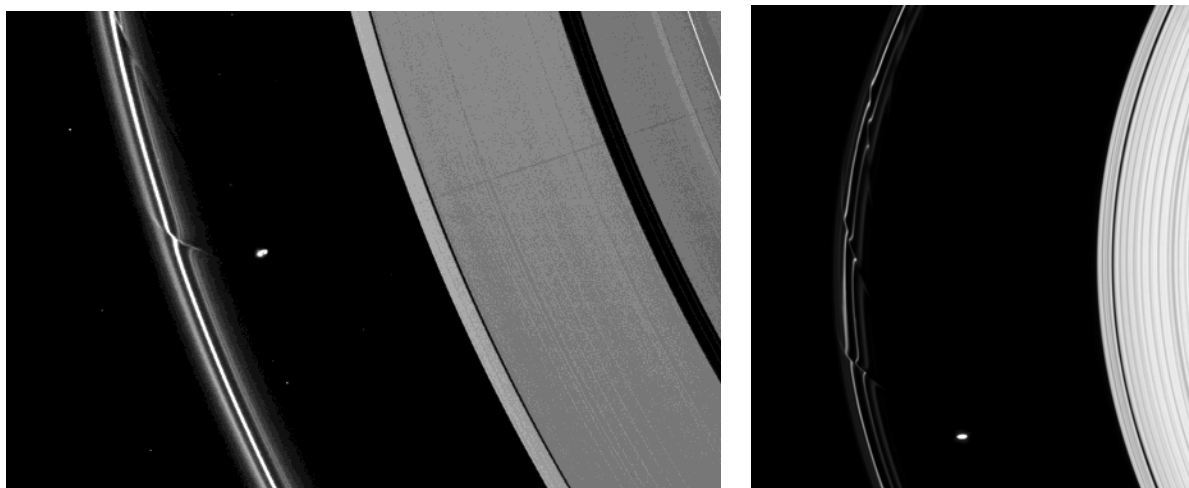


Рис. 1. Кольцо F и спутник Прометей: http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA_12537 и [10489](http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA_10489).

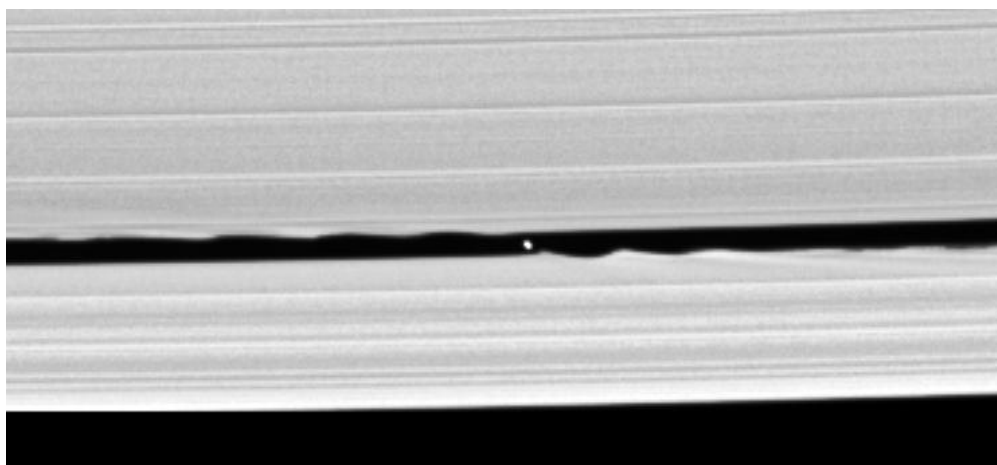


Рис. 2. Щель Keeler и спутник Daphnis: http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA_06237.

мелких частиц от метровых до менее сантиметра, и в структуре этой внешне почти непрерывной среды отражаются тонкие эффекты гравитационного влияния многочисленных, в том числе небольших спутников Сатурна.

Одним из таких эффектов является волнообразная деформация краев и прядей кольца под действием проходящего близкого спутника. Это хорошо видно на снимках при приближении спутника Прометея к кольцу F (рис. 1), и возмущения обоих краев щели Keeler, где двигается небольшой спутник Daphnis (рис. 2).

2. Моделирование возмущений

Исследование гравитационных возмущений проводилось методами задачи N-тел. Для решения задачи N тел была написана программа численного интегрирования уравнений движения, используя метод Э. Эверхарта [1]. В качестве входных данных в ней задаются координаты и скорости всех тел на начальный момент, а на каждом шаге интегрирования программа может выводить полученные положения тел или другие параметры, индивидуальные для конкретно взятой задачи. Контролем точности интегрирования является сохранение интеграла энергии и интегралов площадей. В программе не предусмотрено формального ограничения на число тел, фактически, оно ограничено лишь доступной оперативной памятью компьютера и приемлемым временем счета. Наибольшее число тел, использованное при вычислениях с этой программой, было около 4 тысяч. Так же, программа позволяет задавать тела как нулевой, так и отличной от нуля массы, что дает возможность одновременно интегрировать движение частиц кольца и возмущающих спутников. Программа позволяет проследить изменение возмущений одновременно нескольких прядей на заданном интервале времени, выводить данные на каждом шаге интегрирования, получать положения частиц кольца и спутника. Это дает возможность проследить возникновение и эволюцию возмущений на некотором интервале времени и получить картину возможных форм возмущения границы кольца или пряди для сравнения с наблюдениями. За начало системы координат при вычислениях брался центр Сатурна. Использовалась также сопутствующая система координат, центр которой движется по круговой орбите с угловой скоростью равной среднему движению спутника и радиусом равным большой полуоси его орбиты.

Моделирование взаимодействия кольца F и спутника Прометей осуществлялось при следующих предположениях:

- Моделируемый участок кольца считался круговым. Так как эксцентриситет кольца мал и длина участка не превышала нескольких градусов дуги, то это предположение достаточно корректно. Моделируется тот участок кольца, который сближается с Прометеем при подходе спутника к апоцентру.

- Участок представлялся цепочкой материальных точек нулевой массы. Так как кольцо F состоит в основном из частиц от нескольких микрон до нескольких метров, то масса этих частиц мала по сравнению с массой Прометея, не говоря уже о массе Сатурна.

- Движение частиц на моделируемом участке принималось круговым.

- Движение всех частиц и Прометея считалось происходящим в одной плоскости. Это предположение связано с малыми углами плоскостей орбиты Прометея (0.008°) и кольца F (0.0065°) относительно экваториальной плоскости Сатурна.

- При моделировании Сатурн рассматривался как сжатое тело, и учитывались зональные гармоники [2, 3].

- При взаимодействии с частицами кольца Прометей считался вытянутым телом, а при взаимодействии с Сатурном - точечной массой, так как на расстояниях порядка большой полуоси орбиты Прометея, эффект от вытянутости очень мал.

Аналогичные предположения были сделаны при моделировании возмущений, создаваемых спутником Дафнис.

3. Спутник Прометей и кольцо F

Спутник Прометей периодически приближается к внутренней стороне кольца F в силу небольшой вытянутости своей орбиты и создаёт в нём гравитационные возмущения, величина которых зависит от степени сближения со спутником и его массы.

В программе моделирования для приближенного учета вытянутости Прометей, при его взаимодействии с частицами кольца, он был представлен тремя радиально-расположенными точками, одна из которых находилась в центре спутника, а две другие отстояли от нее на 35 километров с каждой стороны вдоль направления на Сатурн. Масса каждой точки равнялась 1/3 массы Прометей. Также программа позволяет интегрировать уравнения движения частиц, расположенных сразу на нескольких дугах, находящихся на разных расстояниях от Сатурна, что дает возможность моделировать возмущения нескольких прядей или поведение кольца конечной ширины. Эта возможность является важной при обработке снимков, так как на них элементы кольца имеют конечную ширину и используются возмущения нескольких прядей.

Были также написаны программы для рассмотрения относительного движения спутника и частицы, а также для обработки полученных результатов и их графического представления. Пример такого моделирования представлен на рис. 3. Каждая дуга длиной приблизительно 3° состояла из около 1000 точек.

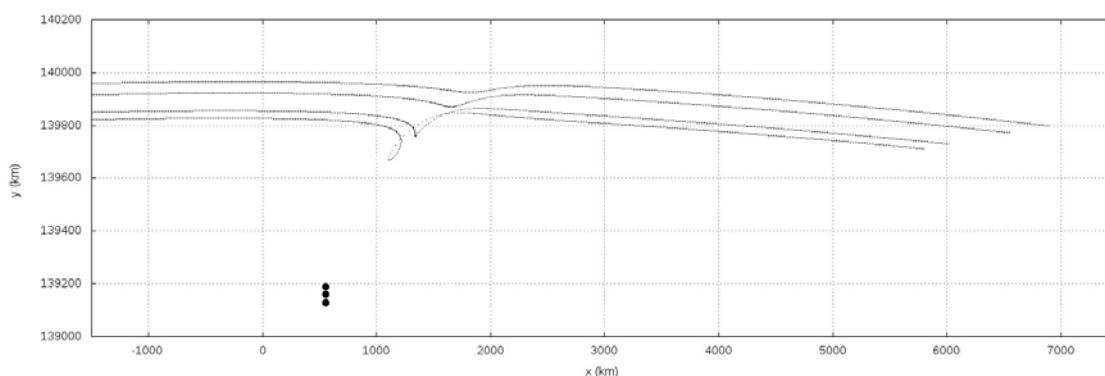


Рис. 3. Моделирование гравитационных возмущений кольца F от спутника Прометей.

Для оценки массы использовалась серия снимков с космического аппарата "Кассини", на которых запечатлены моменты сближения спутника с несколькими прядями кольца. Величину возмущений на каждом снимке можно измерить, если знать масштаб снимка, поэтому основным критерием для отбора снимков являлось наличие на них широкого участка, относящегося к внешней части кольца A, ширина которого известна. К сожалению, такие факторы, как проекционные искажения, недостаточная чёткость снимков и сравнительно небольшое количество подходящих для анализа снимков, позволили получить только границы для оценки массы Прометей.

На каждом снимке измерялись возмущения нескольких прядей кольца F и величина сближения со спутником. По известной ширине внешней части кольца A можно найти масштабный множитель для отдельного снимка, с помощью которого определяются необходимые реальные величины. Далее с помощью методов численного интегрирования строилась модель возмущений. Рассматривалась плоскостная модель небольшого участка кольца, считающегося круговым, граница каждой пряди задавалась цепочкой тел нулевой массы. В модели учитывались сжатие Сатурна и вытянутость спутника. Масса спутника варьировалась и подбиралась таким образом, чтобы модель-

ные возмущения качественно и по величине оказались схожи с возмущениями на каждом снимке. Также необходимо было оценить фазу сближения, влияющую на форму и величину возмущений. После этого находилось среднее значение по полученным массам Прометея.

По оценке, полученной при анализе снимков, масса Прометея оказалась в пределах $0.00960-0.01090 \text{ км}^3/\text{с}^2$, что согласуется с результатами, полученными в ранее опубликованных работах [7].

4. Спутник Daphnis и щель Keeler

Щель Keeler расположена во внешней части кольца А и довольно узка (ширина 35 км). Спутник Дафнис в щели Keeler был обнаружен на снимках, полученных 1 мая 2005 года с аппарата “Кассини”. Оценка размеров спутника с учетом разрешения изображения дает диаметр спутника примерно 6–8 км. Спутник Daphnis в узкой щели Keeler создает заметные на протяжении нескольких градусов возмущения краев волнистого характера. Полученные с борта космического аппарата “Кассини” с высоким разрешением изображения позволяют достаточно точно определить форму волны возмущения, линейное расстояние между волнами, амплитуду и смещение относительно спутника.

Колеблющиеся с эпициклической частотой возмущенные частицы кольца на краю щели и спутник медленно расходятся из-за различия орбитальных скоростей, при этом частицы на внутреннем крае щели обгоняют спутник, а на внешнем отстают. Поэтому волновые черты, создаваемые возмущенными частицами, будут видны на внутреннем крае щели впереди по ходу спутника, на внешнем - сзади.

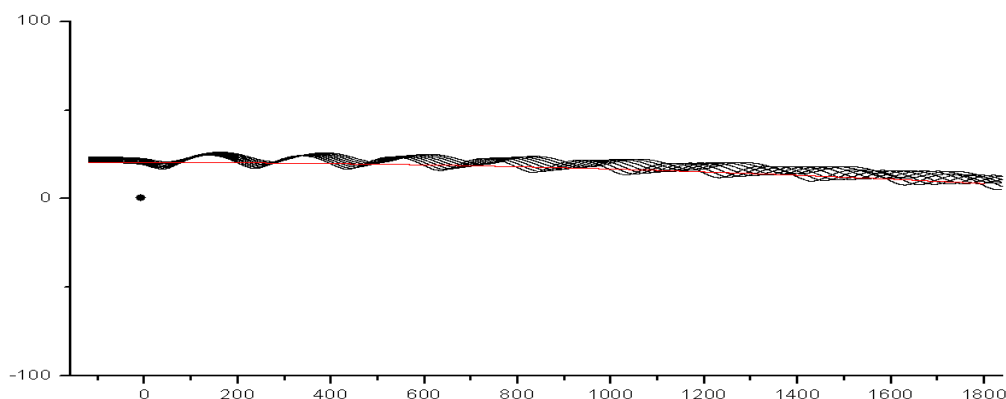


Рис. 4. Моделирование возмущения внешнего края щели Keeler.
Амплитуды и расстояние вдоль края щели в км.

Форма возмущенного края деформируется, поскольку ее очертание определяется огибающей участков волн не только находящихся на краю частиц, но и отстоящих более глубоко от края частиц. Происходит замывание волн на краях щели, причем из-за нарастающего с глубиной различия периодов колебаний более дальний к спутнику фронт волны становится более пологим, чем ближний.

Для оценки массы спутника была использована вычисленная зависимость амплитуды колебаний частиц щели от массы спутника и расстояния от края, а также аналогичная зависимость смещения первой волны возмущения относительно спутника. Наблюдательные данные и параметры колец были взяты на сайтах: <http://ciclops.org/>; <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/>; http://pds-rings.seti.org/Saturn/saturn_tables.html, [5].

Для исследования характера волнообразных возмущений краев щели Keeler из ряда снимков щели, приведенных на сайте NASA <http://saturn.jpl.nasa.gov/>, было использовано наиболее четкое изображение PIA 06237, полученное 2 мая 2005 года

(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA06237>). Аппарат “Кассини” находился над плоскостью колец на расстоянии 525 тыс. км, от центра Сатурна – в 594 тыс. км. Снимок был получен узко-угольной камерой, разрешение на снимке около 3 км на 1 пиксель.

Для нахождения углового смещения относительно положения спутника орбитальный радиус Daphnis был взят равным 136505 км [6]. Ширина щели Keeler была принята равной 35 км (http://pds-rings.seti.org/Saturn/saturn_tables.html), при этом внешний край щели Keeler равен 136522 км, внутренний край щели Keeler — 136487 км, верхний край кольца A — 136780 км. По снимку 06237 было получено четыре оценки массы Дафнис: по амплитудам возмущений и смещению первой волны на внешнем и внутреннем краю щели Keeler (табл. 1).

Таблица 1. Оценки массы спутника Дафнис, в массах Сатурна.

Щель Keeler	По амплитуде возмущения	По смещению первой волны возмущения
Внешний край	$1.48 \cdot 10^{-13}$	$1.53 \cdot 10^{-13}$
Внутренний край	$1.63 \cdot 10^{-13}$	$1.76 \cdot 10^{-13}$

Среднее значение для массы Дафнис равно:

$$m = (1.60 \pm 0.23) \cdot 10^{-13} M_{\text{sat}}.$$

В табл. 2 приведем предыдущие оценки массы спутника Дафнис.

Таблица 2. Предыдущие оценки массы спутника Дафнис.

Год	Значение массы	Авторы
2007	$(1.48 \pm 0.21) \cdot 10^{-13} M_{\text{sat}}$	Porco, Thomas, Weiss et al. [4]
2009	$(1.20 \pm 0.30) \cdot 10^{-13} M_{\text{sat}}$	Weiss, Porco, Tiscareno [8]
2010	$(1.35 \pm 0.26) \cdot 10^{-13} M_{\text{sat}}$	Thomas [7]

6. Заключение

По гравитационным возмущениям, создаваемыми спутниками в кольцах Сатурна, получены следующие оценки: масса Прометея лежит в пределах **$0.00960-0.01090 \text{ км}^3/\text{с}^2$** , масса спутника Daphnis **$(1.60 \pm 0.23) \cdot 10^{-13} M_{\text{sat}}$** . Форма возникающей волны возмущения на краях колец и ее постепенное замывание определяются колебаниями частиц, расположенных на разной глубине приграничного слоя и имеющих разные амплитуды и периоды.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ 6.37.341.2015 и гранта РФФИ 15-02-04340.

Литература

1. Everhart E. Implicit Single-sequence Methods for Integrating Orbits // *Celest. Mech.*, 1974, V. 10, 35–55.
2. Jacobson, R.A., Antreasian, P.G., Bordi, J.J., et al. The gravity field of the Saturnian system and the orbits of the major Saturnian satellites // *BAAS*, 200, V. 37, P. 729.
3. Jacobson R.A., Antreasian P.G., Bordi J.J., Criddle K.E., Ionasescu R., Jones J.B., Mackenzie R.A., Pelletier F.J., Owen Jr. W.M., Roth D.C., Stauch J.R. The gravity field of the Saturnian system from satellite observations and spacecraft tracking data // *Astron. J.*, 2006, V. 132, 2520–2526.

4. *Porco C.C., Thomas P.C., Weiss J.W., Richardson D.C.* Saturn's small inner satellites: Clues to their origins // *Science*, 2007, V. 318, 1602–1607.
5. Ring and Ring Gap Nomenclature \\http://planetarynames.wr.usgs.gov/append8.html.
6. *Spitale J.N., Jacobson, R. A., Porco C.C., Owen Jr.W.M.* The orbits of Saturn's small satellites derived from combined historic and Cassini imaging observations // *Astron. J.*, 2006. V. 132, 692–710.
7. *Thomas P.C.* Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission // *Icarus*, 2010, V. 208, 395–401.
8. *Weiss J.W., Porco C.C., Tiscareno M.S.* Ring edge waves and the masses of nearby satellites // *Astron. J.*, 2009, V. 138, 272–286.

ESTIMATION OF SATELLITE MASSES BY GRAVITATIONAL PERTURBATIONS IN THE SATURN RINGS

Dovgalev I.C., Pitjev N.P.

*Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia
St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

The satellites of Saturn, moving close enough to its rings or approaching them, cause noticeable gravitational perturbations. Simulation of perturbations from a satellite of the ring consisting of particles moving on almost circular orbits has been done. Methods of the N-body problem are used for investigation. The Saturn oblateness and a non-sphericity of disturbing satellite are taken into account. Equations of motion of the ring strands are modeled by chains of hundreds of particles while integrating. The ratios of a perturbation amplitude and offset from disturbing satellite depending on its mass and its distance to the ring have been found. The obtained results have been used to estimate the masses of Prometheus and Daphnis.

О ПОСТРОЕНИИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВРАЩЕНИЯ ЛУНЫ В ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

Иванова Т.В.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Целью данной работы является практическая реализация построения тригонометрической теории вращения Луны без фиктивных вековых членов в рамках общей планетной теории. Эта теория основывается на разделении быстрых и медленных угловых переменных как в уравнениях движения больших планет и Луны, так и в уравнениях вращения Луны. При этом объединенная система уравнений движения больших планет и Луны и уравнений вращения Луны сводится с помощью ряда нормализующих преобразований переменных к автономной вековой системе, решение которой можно получить в тригонометрической форме. В качестве переменных, характеризующих вращение Луны, как правило, берутся параметры, непосредственно связанные с углами Эйлера. В настоящей работе используются малые отклонения этих параметров от их некоторых номинальных значений, что повышает практическую эффективность методики общей планетной теории. Получены основные члены разложений параметров вращения в чисто аналитическом виде относительно малых параметров, характеризующих форму Луны, и в тригонометрическом виде относительно времени.

1. Уравнения вращения Луны

Семь дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих вращение Луны, аналогичны полученным в работе [1]. Они представляются в типичной для общей планетной теории (GPT) форме:

$$\dot{X} = i N [PX + R(X, t)], \quad (1)$$

где X и R являются 7-мерными векторами переменных и правых частей, соответственно:

$$X = (X_i) = (u, \bar{u}, v, \bar{v}, m', \bar{m}', m_3), \quad R = (R_i), \quad (i=1, 2, \dots, 7).$$

Первые четыре компоненты вектора X представляют собой параметры Эйлера, которые связаны между собой тождеством $u\bar{u} + v\bar{v} \equiv 1$. Эти параметры выражаются через обычные углы Эйлера φ, ψ, θ с помощью соотношений:

$$u = -\sin \frac{\theta}{2} \exp\left(-i \frac{\psi + \varphi}{2}\right), \quad v = i \cos \frac{\theta}{2} \exp\left(i \frac{\psi - \varphi}{2}\right).$$

Последние три компоненты вектора X представляют собой малые безразмерные величины, являющиеся функциями компонент угловой скорости вращения Луны $\omega = (\omega_i), (i=1, 2, 3)$:

$$\omega_1 = \Omega m_1, \quad \omega_2 = \Omega m_2, \quad \omega_3 = \Omega(1 + m_3).$$

Здесь Ω — средняя скорость вращения Луны, определяемая в согласии с обозначениями предыдущих статей в виде $\Omega = -2n, \quad n = \text{const}$.

Чтобы упростить динамические уравнения вращения Луны, вместо комплексно-сопряженных переменных m вводятся новые комплексно-сопряженные переменные m' :

$$m_1 = 2\sqrt{k_2} m'_1, \quad m_2 = 2\sqrt{k_1} m'_2, \quad m = m_1 + i m_2, \quad m' = m'_1 + i m'_2, \\ k_1 = \frac{I_3 - I_1}{2I_2}, \quad k_2 = \frac{I_3 - I_2}{2I_1},$$

где I_1, I_2, I_3 — главные моменты инерции Луны.

N , и P — диагональные матрицы 7-го порядка, имеющие следующую структуру:

$$N = \text{diag}(n, n, n, n, n, n, n), \quad P = \text{diag}(1, -1, 1, -1, \varepsilon, -\varepsilon, 0), \quad \varepsilon = -4\sqrt{k_1 k_2}.$$

Отсюда сразу видно, что главные частоты для переменных u , v и m' равны n , n и $n\varepsilon$, соответственно. Для переменной m_3 частота равна нулю.

2. Правые части уравнений вращения Луны

Правые части R_i являются малыми величинами и определяются с помощью соотношений

$$R_1 = m_3 u - m \bar{v}, \quad R_2 = -\bar{R}_1, \quad R_3 = m_3 v + m \bar{u}, \quad R_4 = -\bar{R}_3, \quad (2)$$

$$R_5 = -4\sqrt{k_1 k_2} m_3 m' - \frac{1}{4n^2} \left(\frac{1}{\sqrt{k_1}} \frac{M_2}{I_2} - \frac{i}{\sqrt{k_2}} \frac{M_1}{I_1} \right), \quad R_6 = -\bar{R}_5, \quad (3)$$

$$R_7 = 2\sqrt{k_1 k_2} \frac{I_1 - I_2}{I_3} (m'^2 - \bar{m}'^2) + \frac{i}{2n^2} \frac{M_3}{I_3}. \quad (4)$$

Здесь M_1, M_2, M_3 — компоненты вектора момента

$$M_1 + iM_2 = i \left(-v \frac{\partial}{\partial \bar{u}} + u \frac{\partial}{\partial \bar{v}} \right) U, \quad M_3 = \frac{i}{2} \left(-u \frac{\partial}{\partial u} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial \bar{u}} - v \frac{\partial}{\partial v} + \bar{v} \frac{\partial}{\partial \bar{v}} \right) U.$$

где U — силовая функция для Луны. В квадрупольном приближении она имеет вид:

$$U = 2n^2 I_3 \left\{ K \left[\left(\frac{A_3}{r_0} \right)^5 \left(\frac{z'_0}{A_3} \right)^2 + \varepsilon_0 \left(\frac{A_E}{r_E} \right)^5 \left(\frac{z'_E}{A_E} \right)^2 \right] + L \left[\left(\frac{A_3}{r_0} \right)^5 \frac{1}{A_3^2} (x_0'^2 - y_0'^2) + \varepsilon_0 \left(\frac{A_E}{r_E} \right)^5 \frac{1}{A_E^2} (x_E'^2 - y_E'^2) \right] \right\}.$$

$$\varepsilon_0 = \frac{M_3 - M_9}{M_0} \left(\frac{A_3}{A_9} \right)^3, \quad \sigma = \left(1 - \frac{M_9}{M_3} \right) \frac{A_9}{A_3}, \quad K = \frac{-3}{4} \left(1 - \frac{I_1 + I_2}{2I_3} \right) \frac{GM_0}{A_3^3 n^2}, \quad L = \frac{-3}{8} \frac{I_1 - I_2}{I_3} \frac{GM_0}{A_3^3 n^2},$$

G — гравитационная постоянная, M_0, r_0, M_E, r_E — массы и селеноцентрические радиус-векторы Солнца и Земли, соответственно, M_9, r_9 — масса и геоцентрический радиус-вектор Луны. M_3, r_3 — масса и гелиоцентрический радиус-вектор барицентра Земля–Луна. Штрихованные координаты относятся к вращающейся системе координат, жестко связанной с телом Луны, нештрихованные связаны с инерциальной системой координат.

Общая планетная теория, в рамках которой строится теория вращения Луны, имеет дело с безразмерными комплексными переменными p_i и вещественными переменными w_i , характеризующими отклонения реальных движений планет от плоских круговых движений с радиусами A_i и средними движениями n_i и связанными с прямоугольными координатами x_i, y_i, z_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) с помощью выражений

$$x_i + iy_i = A_i(1 - p_i)\zeta_i, \quad z_i = A_i w_i, \quad \zeta_i = \exp i\lambda_i, \quad \lambda_i = n_i t + \varepsilon_i, \\ n_i^2 A_i^3 = G(M_0 + M_i) \quad (i = 1, 2, \dots, 8), \quad n_9^2 A_9^3 = GM_3.$$

Здесь λ_i — средние долготы планет.

Для селеноцентрических координат Солнца имеем выражения

$$x_0 + iy_0 = -A_3[(1 - p_3)\zeta_3 + \sigma(1 - p_9)\zeta_9], \quad z_0 = -A_3(w_3 + \sigma w_9).$$

Селеноцентрические координаты Земли представляются в виде:

$$x_E = -x_9, \quad y_E = -y_9, \quad z_E = -z_9.$$

В новых переменных выражение для силовой функции уравнений вращения Луны, зависящей от действия Солнца и Земли, в квадрупольном приближении представляется в виде:

$$U = 2n^2 I_3 \{ K[k + u^2 \bar{v}^2 f + \bar{u}^2 v^2 \bar{f} + 2u\bar{v}(u\bar{u} - v\bar{v})g + 2\bar{u}v(u\bar{u} - v\bar{v})\bar{g} + 2u\bar{u}v\bar{v}h] + \\ + L[\frac{1}{2}(u^4 + \bar{v}^4)f + \frac{1}{2}(\bar{u}^4 + v^4)\bar{f} + 2(-u^3 v + \bar{u}\bar{v}^3)g + 2(-\bar{u}^3 \bar{v} + uv^3)\bar{g} - (u^2 v^2 + \bar{u}^2 \bar{v}^2)h] \}$$

Комплексные функции f , g , и вещественная функция h зависят от координат Солнца и Луны. Таким образом, силовая функция представляется здесь как функция четвертого порядка относительно параметров Эйлера для Луны u , \bar{u} , v , \bar{v} с коэффициентами в виде рядов Пуассона со степенными переменными p_i , q_i , w_i ($q_i = \bar{p}_i$) и экспоненциальными переменными ζ_i для $i = 3$ и $i = 9$. В результате, выражения для компонент вектора момента можно представить в виде

$$M_1 + iM_2 = i 4n^2 I_3 (KS - L\bar{S}), \quad M_3 = i 2n^2 I_3 L(T - \bar{T}) \\ S = u^3 \bar{v}f - \bar{u}v^3 \bar{f} + u^2 (u\bar{u} - 3v\bar{v})g + v^2 (v\bar{v} - 3u\bar{u})\bar{g} + uv(u\bar{u} - v\bar{v})h, \\ T = (-u^4 + \bar{v}^4)f + 4(u^3 v + \bar{u}\bar{v}^3)g + 2u^2 v^2 h.$$

3. Номинальное решение

С теоретической точки зрения систему уравнений для вращения Луны можно решать совместно с системой уравнений, описывающих орбитальное движение больших планет и Луны в рамках общей планетной теории. При этом, благодаря тождеству между параметрами Эйлера и специфической структуре правых частей не возникает трудностей, связанных с особенностями в P . Однако, с практической точки зрения более адекватно иметь дело не с самими переменными u , v , m' , m_3 , а с их малыми отклонениями от некоторых номинальных величин, например, от номинального решения X_0 , удовлетворяющего уравнениям системы

$$\dot{X}_0 = i NP X_0$$

или в явном виде уравнения

$$\dot{u}_0 = i n u_0, \quad \dot{v}_0 = i n v_0, \quad \dot{m}'_0 = i \varepsilon n m'_0, \quad \dot{m}_3 = 0.$$

Отсюда сразу для компонент X_0 имеем решения

$$u_0 = a \exp i n t, \quad v_0 = b \exp i n t, \quad m'_0 = c \exp i \varepsilon n t, \quad m_3 = 0$$

с постоянными a, b, c . Нулевое значение для m_3 всегда может быть обеспечено соответствующим выбором значения для средней скорости вращения Луны Ω . В Эйлеровых углах это номинальное приближение представляется выражениями

$$\varphi = -2nt + \varphi_0, \quad \psi = \psi_0, \quad \theta = \theta_0$$

с постоянными $\varphi_0, \psi_0, \theta_0$. Тогда постоянные a, b и c имеют вид:

$$a = -\sin \frac{\theta_0}{2} \exp\left(-i \frac{\psi_0 + \varphi_0}{2}\right), \quad b = i \cos \frac{\theta_0}{2} \exp\left(i \frac{\psi_0 - \varphi_0}{2}\right), \quad c = -\frac{1}{4n} \left(\frac{\omega_{0,1}}{\sqrt{k_2}} + i \frac{\omega_{0,2}}{\sqrt{k_1}} \right)$$

с тождеством, аналогичным тождеству между параметрами Эйлера: $a\bar{a} + b\bar{b} \equiv 1$. Здесь $\omega_{0,i}$ ($i = 1, 2$) — компоненты угловой скорости вращения Луны на начальный момент времени t_0 .

Возвращаясь к исходным уравнениям (1), мы представляем вектор X в форме.

$$X = X_0 + \delta X,$$

в результате чего исходные уравнения сводятся к уравнениям

$$\delta \dot{X} = i N \left[P \delta X + R \left(X_0 + \delta X, t \right) \right]. \quad (5)$$

Уравнения (1) и (5) имеют одну и ту же форму, но компоненты вектора δX гораздо меньше, чем компоненты вектора X . Правые части в (1) представляются тригонометрическими функциями от средних долгот больших планет и Луны. Правые части в (5) содержат два дополнительных тригонометрических аргумента nt и εnt , связанных с вращением Луны. С численными значениями для комплексных констант a, b, c легко получить разложения для правых частей (2–4). После этого уравнения (5) можно решать традиционным способом, используя итерации типа Пикара по степеням δX либо менее традиционным методом, комбинируя (5) с уравнениями общей планетной теории для планет и Луны и находя нормализующее преобразование для построения объединенной вековой системы, которую можно решить без фиктивных вековых членов.

4. Поправки к номинальному решению

Ниже дается набор формул для вычисления начальных членов разложений для переменных, связанных с вращением Луны. Для этого сохраняются лишь члены нулевого порядка относительно δX в правых частях уравнений (5) и, используя номинальные решения, получаем уравнения для поправок к параметрам Эйлера.

$$\delta \dot{u} = i n (\delta u - m_0 \bar{v}_0) = i n \delta u - i n \bar{b} \left[(\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}) c \exp i(-1 + \varepsilon)nt + (\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}) \bar{c} \exp i(-1 - \varepsilon)nt \right],$$

$$\delta \dot{v} = i n (\delta v + m_0 \bar{u}_0) = i n \delta v + i n \bar{a} \left[(\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}) c \exp i(-1 + \varepsilon)nt + (\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}) \bar{c} \exp i(-1 - \varepsilon)nt \right].$$

Решение этих уравнений имеет форму:

$$\delta u = \bar{b} \left[c \frac{\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}}{2 - \varepsilon} \exp i(-1 + \varepsilon)nt + \bar{c} \frac{\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}}{2 + \varepsilon} \exp i(-1 - \varepsilon)nt \right], \quad (6)$$

$$\delta v = -\bar{a} \left[c \frac{\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}}{2 - \varepsilon} \exp i(-1 + \varepsilon)nt + \bar{c} \frac{\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}}{2 + \varepsilon} \exp i(-1 - \varepsilon)nt \right]. \quad (7)$$

Аналогично строятся решения для $\delta m'$ и δm_3 .

$$\delta \dot{m}' = i n \varepsilon \delta m' - \frac{1}{4n} \left(\frac{1}{\sqrt{k_2}} \frac{M_1}{I_1} + \frac{i}{\sqrt{k_1}} \frac{M_2}{I_2} \right),$$

$$\delta \dot{m}_3 = -\frac{1}{2} i n \varepsilon \frac{I_1 - I_2}{I_3} \left[c^2 \exp 2 i \varepsilon nt - \bar{c}^2 \exp(-2 i \varepsilon nt) \right] - \frac{1}{2n} \frac{M_3}{I_3},$$

$$\delta m' = -\frac{1}{4n} \left[\int \left(\frac{1}{\sqrt{k_2}} \frac{M_1}{I_1} + \frac{i}{\sqrt{k_1}} \frac{M_2}{I_2} \right) \exp(-i n \varepsilon t) dt \right] \exp i n \varepsilon t, \quad (8)$$

$$\delta m_3 = -\frac{1}{4} \frac{I_1 - I_2}{I_3} \left[c^2 \exp 2 i \varepsilon nt + \bar{c}^2 \exp(-2 i \varepsilon nt) \right] - \frac{1}{2n} \int \frac{M_3}{I_3} dt. \quad (9)$$

И, наконец, приведем начальные члены разложений для $\delta m'$ и δm_3 .

$$\begin{aligned}
 \delta m' = & (1 + \varepsilon_0)(1 - 2a\bar{a}) \left[ab \frac{KC_1 + LC_2}{2 - \varepsilon} e^{2imt} + \bar{a}\bar{b} \frac{KC_2 + LC_1}{2 + \varepsilon} e^{-2imt} \right] \\
 + & \sum_{j=3,9} (\delta_{j3} + \varepsilon_0 \delta_{j9}) \times \left[a\bar{b}^3 \frac{KC_2 + LC_1}{2 + 2n'_j + \varepsilon} e^{-2i(mt+\lambda_j)} - \bar{a}^3 b \frac{KC_2 + LC_1}{2 - 2n'_j + \varepsilon} e^{-2i(mt-\lambda_j)} \right. \\
 - & a^3 \bar{b} \frac{KC_1 + LC_2}{2 - 2n'_j - \varepsilon} e^{2i(mt-\lambda_j)} + \bar{a}b^3 \frac{KC_1 + LC_2}{2 + 2n'_j - \varepsilon} e^{2i(mt+\lambda_j)} \left. \right] + \frac{1}{2} \sigma C_1 \left\{ a\bar{b}^3 L \left[9 \frac{e^{-i(2nt+\lambda_3+\lambda_9)}}{2 + n'_3 + n'_9 + \varepsilon} + 5 \frac{e^{-i(2nt+3\lambda_3-\lambda_9)}}{2 + 3n'_3 - n'_9 + \varepsilon} \right] \right. \\
 + & \bar{a}b^3 K \left[9 \frac{e^{i(2nt+\lambda_3+\lambda_9)}}{2 + n'_3 + n'_9 - \varepsilon} + 5 \frac{e^{i(2nt+3\lambda_3-\lambda_9)}}{2 + 3n'_3 - n'_9 - \varepsilon} \right] - \bar{a}^3 b L \left[9 \frac{e^{-i(2nt-\lambda_3-\lambda_9)}}{2 - n'_3 - n'_9 + \varepsilon} + 5 \frac{e^{-i(2nt-3\lambda_3+\lambda_9)}}{2 - 3n'_3 + n'_9 + \varepsilon} \right] \\
 - & a^3 \bar{b} K \left[9 \frac{e^{i(2nt-\lambda_3-\lambda_9)}}{2 - n'_3 - n'_9 - \varepsilon} + 5 \frac{e^{i(2nt-3\lambda_3+\lambda_9)}}{2 - 3n'_3 + n'_9 - \varepsilon} \right] + 7(1 - 2a\bar{a})\bar{a}\bar{b} L \left[\frac{e^{-i(2nt+\lambda_3-\lambda_9)}}{2 + n'_3 - n'_9 + \varepsilon} + \frac{e^{-i(2nt-\lambda_3+\lambda_9)}}{2 - n'_3 + n'_9 + \varepsilon} \right] \\
 & \left. + 7(1 - 2a\bar{a})abK \left[\frac{e^{i(2nt+\lambda_3-\lambda_9)}}{2 + n'_3 - n'_9 - \varepsilon} + \frac{e^{i(2nt-\lambda_3+\lambda_9)}}{2 - n'_3 + n'_9 - \varepsilon} \right] \right\},
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\delta m_3 = B + \bar{B}, \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 B = & L \left\{ -\frac{1}{2}(1 + \varepsilon_0)a^2b^2e^{4imt} + \sum_{j=3,9} \frac{1}{2}(\delta_{j3} + \varepsilon_0\delta_{j9}) \left[a^4 \frac{e^{2i(2nt-\lambda_j)}}{2 - n'_j} + b^4 \frac{e^{2i(2nt+\lambda_j)}}{2 + n'_j} \right] \right. \\
 + & \frac{1}{2}\sigma \left\{ a^4 \left[9 \frac{e^{i(4nt-\lambda_3-\lambda_9)}}{4 - n'_3 - n'_9} + 5 \frac{e^{i(4nt-3\lambda_3+\lambda_9)}}{4 - 3n'_3 + n'_9} \right] + b^4 \left[9 \frac{e^{i(4nt+\lambda_3+\lambda_9)}}{4 + n'_3 + n'_9} + 5 \frac{e^{i(4nt+3\lambda_3-\lambda_9)}}{4 + 3n'_3 - n'_9} \right] \right. \\
 - & \left. \left. 14a^2b^2 \left[\frac{e^{i(4nt+\lambda_3-\lambda_9)}}{4 + n'_3 - n'_9} + \frac{e^{i(4nt-\lambda_3+\lambda_9)}}{4 - n'_3 + n'_9} \right] \right\} \right\} - \frac{1}{4} \frac{I_1 - I_2}{I_3} c^2 e^{2i\varepsilon nt}.
 \end{aligned}$$

В этих выражениях:

$$C_1 = \frac{I_3(I_1\sqrt{k_2} + I_2\sqrt{k_1})}{2I_1I_2\sqrt{k_1k_2}}, \quad C_2 = \frac{I_3(I_2\sqrt{k_1} - I_1\sqrt{k_2})}{2I_1I_2\sqrt{k_1k_2}},$$

$n'_j = \frac{n_j}{n}$ ($j = 3, 9$), δ_{ij} — символ Кронекера.

5. Заключение

Все аналитические вычисления выполнены с помощью эшелонированного пуассоновского процессора. Методика данной работы может быть применена для изучения вращательного движения любого трехосного твердого небесного тела.

Литература

1. *Brumberg V.A., Ivanova T.V.* On constructing the general Earth's rotation theory // *Celest. Mech. & Dyn. Astron.* 2011. Vol. 109. P. 385–408.

ON CONSTRUCTING ANALYTICAL TRIGONOMETRIC MOON'S ROTATION THEORY

Ivanova T.V.

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

This paper aims to simplify the practical development of the Moon's rotation theory in the framework of the general planetary theory avoiding the non-physical secular terms and involving the separation of the fast and slow angular variables, both for planetary-lunar motion and Moon's rotation. The combined system of the equations of motion for the principal planets and the Moon and the equations of the Moon's rotation is reduced to the autonomous secular system with theoretically possible solution in a trigonometric form. As a rule, the Moon's rotation is treated in Euler parameters. The trivial change of the Euler parameters to their small declinations from some nominal values may improve the practical efficiency of the normalization of the Moon's rotation equations. This technique may be applied to any three-axial rigid planet. The initial terms of the corresponding expansions are given as well.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ САТУРНА И ЕГО СПУТНИКОВ ПО ОЦИФРОВАННЫМ АСТРОНЕГАТИВАМ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ 1972–1974 ГГ.

Киселева Т.П., Васильева Т.А., Рощина Е.А., Измайлов И.С.

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

В работе представлены результаты новой редукции старых фотографических наблюдений в Пулковской обсерватории 1972–74 гг. по оцифрованным фотопластинкам системы спутников Сатурна, полученным на 26-дюймовом рефракторе и нормальном астрографе. Получены точные положения 2–6-го и 8-го спутников и Сатурна и относительные (взаимные) координаты спутников. Списки абсолютных и относительных координат спутников и Сатурна размещены в Пулковской базе данных по телам Солнечной системы и доступны в Интернете по адресу www.puldb.ru. С помощью программного комплекса MULTISAT выполнено сравнение результатов старой и новой редукций с новейшими эфемеридами спутников Сатурна. На основе этого сравнения выполнен анализ точности результатов наблюдений, сделана оценка точности современных теорий движения спутников. Точность результатов наблюдений в новой редукции оказалась в 3 раза выше точности координат спутников в старой редукции, выполненной по измерениям на Аскорекорде и с использованием опорного каталога AGK3. Ошибки одного наблюдения спутника, независимые от ошибок теории, составили 68 mas по двум координатам. Точность современных эфемерид спутников Сатурна по результатам наблюдений на 26-дюймовом рефракторе оказалась на уровне 41–58 mas. Делается вывод о целесообразности переработки большого массива старых наблюдений спутников планет по оцифрованным пластинкам в системе новых современных каталогов опорных звезд с целью повышения точности координат спутников и Сатурна.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-02-000675-а.

1. Введение

Построение и уточнение теорий движения систем спутников больших планет требует проведения длительных и регулярных астрономических наблюдений на больших интервалах времени. Этой проблеме посвящена пулковская программа позиционных наблюдений тел Солнечной системы, начиная с 60-х годов прошлого века по настоящее время.

В стеклянной библиотеке Пулковской обсерватории собраны более 6500 астронегативов с наблюдениями тел Солнечной системы, из них около 1300 пластинок с изображениями системы Сатурна. Большая часть этого материала обработана, получены точные положения относительно опорных звезд из каталогов AGK3 и PPM. Результаты, их анализ и методика обработки представлены в публикациях [1–4] и в Пулковской базе данных по телам Солнечной системы www.puldb.ru [5]. Однако точность этих наблюдений, основанных на старых звездных каталогах, в настоящее время недостаточна для уточнения современных теорий движения и выявления тонких эффектов в движениях спутников.

Поэтому повышение точности выполненных в прошлом длительных рядов наблюдений является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена выяснению возможности повышения точности старых фотографических наблюдений с помощью современных методов астрометрической обработки на основе оцифровки и редукции в единой системе ICRS, обеспеченной новейшими опорными каталогами TYCHO-2, UCAC2, UCAC3.

Данная работа представляет первый этап этой большой работы с целью выяснить возможность повышения точности результатов Пулковских рядов наблюдений.

2. Наблюдательный материал

В качестве первого этапа переобработки старых фотографических наблюдений на основе оцифровки и переизмерений были взяты наблюдения Сатурна и его первых восьми спутников 1972–1974 гг. на 26-дюймовом рефракторе и нормальном астрографе Пулковской обсерватории. Для этого было отобрано около 150 пластинок, которые и были оцифрованы с помощью мобильного цифрового устройства MDD (Mobile Device to Digitize) с цифровой камерой Canon EOS 5D Mark II [6].

Ранее эти фотопластинки были измерены в 1970-е годы на полуавтоматическом измерительном приборе с визуальным наведением – Аскорекорд, астрометрическая редуция выполнялась с помощью звездного каталога AGK3. Результаты в виде экваториальных координат приведены в статье в Известиях ГАО в Пулкове [1], и в Базе данных Пулковской обсерватории по телам Солнечной системы. Однако в этой работе не было выполнено сравнение наблюдений с эфемеридами ввиду отсутствия в то время высокоточных эфемерид спутников планет. Сравнение результатов старой редуции с современными эфемеридами сделано в настоящей работе.

В новой редуции была поставлена задача: получить новые значения положений спутников – абсолютных (звездных) и относительных (взаимных), а также определить координаты Сатурна по спутникам без измерения изображений планеты; сравнить полученные координаты с эфемеридными, вычисленными по современным теориям движений спутников и Сатурна, сравнить результаты старой и новой редуции, выполнить оценку точности наблюдений и современных теорий движения Сатурна и его спутников и сделать вывод о целесообразности подобных переизмерений и редуции всех имеющихся рядов наблюдений с целью повышения точности наблюдений.

3. Оцифровка астронегативов

Оцифровка производилась с помощью устройства MDD – Mobile Device to Digitize с цифровой камерой Canon EOS Mark II, использующей ПЗС-матрицу КМОП размером 36×24 мм с эффективным разрешением 21.1 млн. пикселей [6]. В процессе оцифровки при перефотографировании фотопластинок вносятся искажения за счет aberrаций объектива и особенностей матрицы. Для устранения этих искажений была проведена калибровка камеры с помощью специального шаблона, представляющего собой фотографическую пластинку, на которой фотографическим методом нанесены около 200 звездобразных меток размером 250–300 микрон.

Таким образом были выявлены и учтены систематические ошибки измерений, возникающие при оцифровке. Для контроля калибровки перед каждой серией пластинок, предназначенных для оцифровки, вновь фотографируется шаблон.

4. Измерения и астрометрическая редуция оцифрованных пластинок

Измерения оцифрованных пластинок выполнялись с помощью программного пакета IZMCCD, разработанного И.С. Измайловым [7]. Центры изображений звезд и спутников определялись с помощью профиля Лоренца [8]. Сатурн на фотопластинках 26-дюймового рефрактора не измерялся из-за сильного ореола вокруг изображения планеты; на пластинках Нормального астрографа изображения Сатурна были измерены по центру, поскольку наблюдения велись с помощью светофильтра. В качестве опорных звезд выбирались 6–20 звезд из каталогов TYCHO-2, UCAC2, UCAC3. Преимущество отдавалось каталогу TYCHO-2, поскольку он ближе по средней эпохе его наблюдений (1990-е годы) к средней эпохе наших наблюдений (1973 г.), чем другие, более поздние современные каталоги. Астрометрическая редуция выполнялась методом Тернера (метод 6-ти постоянных). Учитывалась дифференциальная рефракция [9]. Определялись абсолютные координаты – прямое восхождение и склонение спутников и

Сатурна, а также относительные (взаимные) координаты спутников вида «спутник минус спутник». При обработке наблюдений на 26-дюймовом рефракторе каждая экспозиция системы спутников на пластинке редуцировалась отдельно, без усреднения серии изображений, на пластинках нормального астрографа – определялись нормальные места – средние положения спутников из четырех изображений системы на пластинках.

5. Оценка точности результатов новой редукции. Сравнение с результатами старой редукции

Наблюдаемые положения спутников и Сатурна на соответствующие моменты времени сравнивались с эфемеридными значениями с помощью программного комплекса MULTI-SAT [10]. Полученные разности (O-C) позволяют оценить внешнюю точность результатов. В таблице 1 приводятся средние значения (O-C) для спутников 3–8 по всему периоду наблюдений, а также среднеквадратические ошибки одного наблюдения (внешняя точность) – $\sigma_{(O-C)\alpha \cos\delta}$, $\sigma_{(O-C)\delta}$ – как для новой редукции наблюдений по оцифрованным пластинкам, так и для старой редукции.

Таблица 1. Внешняя точность результатов наблюдений спутников Сатурна 1972–1974 гг.

Телескоп	$(O-C)_{\alpha} \cos\delta$ arcsec	$(O-C)_{\delta}$ arcsec	$\sigma_{(O-C)\alpha \cos\delta}$ arcsec	$\sigma_{(O-C)\delta}$ arcsec	Число наблюдений
Новая редукция					
26"R	-0.0152	-0.0119	± 0.0892	± 0.0798	302
NA	-0.0324	-0.0277	± 0.1555	± 0.1848	109
Старая редукция					
26"R	0.0127	-0.1279	± 0.1482	± 0.1762	120
NA	0.0413	-0.0445	± 0.2140	± 0.1941	63

Внешняя точность положений спутников Сатурна в новой редукции примерно вдвое выше точности положений в старой редукции. Она зависит не только от ошибок наблюдаемых положений, но и от ошибок теории. Ошибку положений, свободную от ошибок теории, зависящую только от наблюдений и измерений можно вычислить по известным ошибкам измерений и ошибкам редукции, которые определяются в процессе обработки наблюдений. В следующей таблице 2 приводятся значения ошибок измерений, ошибок редукции и вычисленные ошибки наблюдаемых положений спутников по всему наблюдательному материалу.

Таблица 2. Ошибки измерений, редукции и вычисленные ошибки наблюдений Сатурна.

Редукция	Телескоп	ϵ_{mX}	ϵ_{mY}	$\epsilon_{R\alpha}$	$\epsilon_{R\delta}$	$\sigma_{\alpha} \cos\delta$	σ_{δ}	N
		arcsec		arcsec		arcsec		
Новая	26"R	± 0.057	± 0.057	± 0.036	± 0.038	± 0.068	± 0.068	302
	NA	± 0.138	± 0.131	± 0.060	± 0.090	± 0.150	± 0.159	109
Старая	26"R	± 0.110	± 0.100	± 0.170	± 0.150	± 0.202	± 0.180	120
	NA	± 0.130	± 0.150	± 0.180	± 0.180	± 0.222	± 0.234	63

Здесь $\epsilon_{mX,Y}$ – ошибки измерений, вычисленные по нескольким наблюдениям в одну ночь; $\epsilon_{R\alpha}$, $\epsilon_{R\delta}$ – ошибки редукции в методе 6-ти постоянных; $\sigma_{\alpha} \cos\delta$, σ_{δ} – вычисленные ошибки наблюдаемых положений спутников.

Таким образом, данные таблицы 2 свидетельствуют о более высокой внутренней точности – в 3 раза – результатов новой редукции по оцифрованным пластинкам 26-дюймового рефрактора по сравнению с результатами старой редукции этих же пластинок. Для нормального астрографа это различие не столь велико.

Кроме того, результаты новой редукции показали, что, во-первых, ошибки редукции очень малы, что говорит о высокой точности положений опорных звезд в современных каталогах, и, во-вторых, ошибки измерений объектов становятся источником главных ошибок положений спутников. В старой редукции этих же пластинок соотношение ошибок редукции и измерений обратное.

6. Оценка точности теорий движения спутников Сатурна

Сопоставление вычисленных из наблюдений ошибок положений спутников с ошибками положений, вычисленными по (О-С), дает возможность оценить ошибки теории движения V.Laineу-2011, на основании которой вычисляются положения спутников с помощью сервера MULTI-SAT [10].

$$\sigma_{(O-C)\alpha,\delta}^2 = \sigma_{O\alpha,\delta}^2 + \sigma_{C\alpha,\delta}^2$$

Используя значения $\sigma_{(O-C)\alpha,\delta}$ и $\sigma_{\alpha,\delta}$ из таблиц 1 и 2, получаем оценку точности теории движения, приведенную в следующей таблице 3.

Таблица 3. Оценка точности теории движения спутников Сатурна по наблюдениям 1972–1974 гг. на 26-дюймовом рефракторе и нормальном астрографе в новой редукции.

Телескоп	$\sigma_{C\alpha\cos\delta}$, arcsec	$\sigma_{C\delta}$, arcsec
26"R	± 0.0581	± 0.0411
NA	0.0406	0.0948

Таким образом, в случае наблюдений на 26-дюймовом рефракторе точность теории движения спутников сопоставима с точностью наблюдаемых положений. По наблюдениям на нормальном астрографе результаты наблюдений примерно втрое менее точны, чем теория.

7. Определение положений Сатурна по наблюдениям спутников и относительных положений спутников вида "спутник минус спутник"

Положения Сатурна определены по наблюдаемым экваториальным координатам спутников 4, 5, 6, 8 и теоретическим сатурноцентрическим координатам этих спутников, вычисленным с помощью программного комплекса MULTISAT по теории V.Laineу-2011. Результаты определения по всем четырем спутникам усреднены. В таблице 4 приведены средние значения (О-С) за весь период наблюдений с использованием теории INPOP10 и среднеквадратические ошибки положений Сатурна [11].

Таблица 4. Средние (О-С) и среднеквадратические ошибки положений Сатурна.

Телескоп	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$ arcsec	$(O-C)_{\delta}$ Arcsec	$\sigma_{\alpha\cos\delta}$ arcsec	σ_{δ} arcsec	Число наблюдений
26"R	-0.0152 ± 0.0094	-0.0119 ± 0.0074	± 0.0897	± 0.0703	91
NA	-0.0324 ± 0.0208	-0.0277 ± 0.0246	± 0.1139	± 0.1349	30

Были определены также относительные координаты спутников вида "спутник – спутник" (взаимные координаты). Сравнение с теоретическими относительными координатами дает значения средних (О-С) и ошибок относительных положений спутников, приведенные в таблице 5.

Таблица 5. Относительные координаты спутников Сатурна "спутник – спутник".
Средние (О-С) и среднеквадратические ошибки относительных положений.

Телескоп	$(O-C)_{\Delta\alpha}\cos\delta$ arcsec	$(O-C)_{\Delta\delta}$ Arcsec	$\sigma_{\Delta\alpha}\cos\delta$ arcsec	$\sigma_{\Delta\delta}$ arcsec	Число положений
26"R	- 0.0178	0.0193	± 0.1358	± 0.1118	532
NA	- 0.0150	0.0043	± 0.1946	± 0.1847	157

8. Заключение

На основе старых фотографических наблюдений прошлого века в Пулкове получены новые, более точные положения 2–6-го, 8-го спутников Сатурна с применением новой методики оцифровки и измерений и астрометрической редукиции.

Точность новых положений спутников превосходит точность старых положений примерно в 3 раза в случае наблюдений на 26-дюймовом рефракторе за счет уменьшения ошибок измерений и ошибок редукиции с использованием современных высокоточных звездных каталогов.

При сравнении результатов новой редукиции с новейшими эфемеридами систематических ошибок не обнаружено. Таким образом, опыт новой редукиции по оцифрованным пластинкам открывает возможность переработки большого массива фотографических наблюдений с целью увеличения их точности, необходимой для улучшения теорий движения спутников планет.

Новые результаты содержатся в Пулковской базе данных по наблюдениям тел Солнечной системы и доступны в Интернете по адресу: www.pulldb.ru.

Литература

1. Киселева Т.П., Панова Г.В., Калиниченко О.А. Позиционные фотографические наблюдения Сатурна и его спутников в 1971–1974 гг. в Пулкове // Известия ГАО в Пулкове, 1977, № 195, С. 49–66.
2. Толбин С.В. Результаты позиционных наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе за период 1975-1982 гг. // 1991. ГАО АН СССР. Деп ВИНТИ 18 июля 1991 г., № 3077-В91. 20 с.
3. Толбин С.В. Результаты позиционных наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулкове на нормальном астрографе за период 1975-1984 гг. // 1991. ГАО АН СССР. Деп ВИНТИ 18 июля 1991 г., № 3078-В91. 17 с.
4. Киселева Т.П., И.С. Измайлов, О.А. Калиниченко, Т.А. Васильева. Астрометрические исследования рядов фотографических и ПЗС наблюдений системы Сатурна на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в период 1995–2007 гг. // Астрономический вестник, 2010, т. 44, № 1, с. 65–73.
5. Киселева Т.П., Хруцкая Е.В. Астрометрические наблюдения тел Солнечной системы в Пулкове с 1898 по 2005 гг. База данных результатов наблюдений // Астр. Вестник, 2007, т. 41, № 1, С. 77–85.
6. Grosheva E.A., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V. Mobile Device to Digitize the photographic plates: first results // NAROO-GAIA workshop, Paris Observatory, 20–22 June 2012.
7. Izmailov I.S. IZMCCD Software Package for Astrometric Processing of Digital Images of Celestial Bodies, 2005, Available from: <http://izmccd.pulldb.ru/index2.htm>.
8. Franz O.G. Observational Procedures for Visual Double-Star Work // J. Roy. Astron. Soc. Can. 1973, vol. 67, p. 81.
9. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. – М.: Наука, 1998, 260 с.
10. Emelianov N.V., Arlot J.E. The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // A&A, 2008, 487, 759–765.
11. Fienga A., Laskar J., Kuchynka P., Manche H., Desvignes G., Gastineau M., Cognard I., Theureau G. The INPOP10a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2011. Volume 111, Issue 3, pp. 363–385.

**DETERMINATION OF PRECISE POSITIONS OF SATURN AND ITS SATELLITES
FROM DIGITIZED ASTROGRAPHIC PLATES OF PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS
MADE IN 1972–1974**

Kiseleva T.P., Vasilieva T.A., Roshchina E.A., Izmailov I.S.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The old photographic images of Saturnian Satellites recorded with the 26" Refractor and the Normal Astrograph at Pulkovo Observatory in the period from 1972 to 1974 have been recently digitized to obtain the highly accurate positions and relative coordinates of Saturn and its satellites 2–6 and 8. The lookup tables of the absolute and relative coordinates of Saturn and its satellites are now available from the Pulkovo Solar System celestial bodies database at www.puldb.ru. The recent and past reduction results have been compared with the latest ephemerides of Saturn and its satellites calculated with the software suit MULTISAT. Based on this comparison, the accuracy of observation results and the accuracy of satellite motion equations have been estimated. The accuracy of the observation results in the new reduction was found to be 3 times better than the satellite coordinates obtained in the past with the coordinate measurement system "Ascorecord" and based on the catalog of reference stars AGK-3. The error of a single two coordinates observation (independent of the theoretical accuracy) have been estimated as 68 mas. The accuracy of the contemporary ephemerides based on the observations done with the 26" Refractor instrument was found to be in the range of 41 to 58 mas. We arrive at conclusion that the reevaluation of the digitized photographic records of planetary satellites accumulated in the past decades in the framework of the modern catalogs of reference stars is meaningful if the accuracy of coordinates of Saturn and its satellites is to be improved.

О ПРИЛИВНОЙ СИЛЕ ВНУТРИ КОЛЬЦА ГАУССА

Кондратьев Б.П.

*ГАИШ, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Решена задача о приливном гравитационном влиянии на центральную планету от возмущающего тела (спутника), движущегося по эллиптической орбите. В окрестности активного фокуса выражение приливного потенциала состоит из трёх групп координат пробной точки, коэффициенты перед которыми зависят только от координат спутника. При усреднении потенциала по полному периоду движения остается только один коэффициент, а два других обращаются в нуль. Это означает, что тангенциальная составляющая приливной силы при усреднении исчезает, поэтому приливная сила во всех плоскостях, параллельных орбите спутника, оказывается чисто радиальной, как если бы эллиптическая орбита спутника была просто круговой. Данный результат проверен прямым разложением пространственного потенциала эллиптического кольца Гаусса в кратный ряд Тейлора и не зависит от эксцентриситета кольца.

1. Введение

Напомним некоторые сведения из теории потенциала. Дано гравитирующее круговое кольцо радиусом R и массой $m = 2\pi R\mu_0$, где μ_0 – одномерная плотность. Потенциал кольца на оси симметрии Ox_3 равен

$$\varphi(z) = \frac{Gm}{\sqrt{R^2 + x_3^2}}. \quad (1)$$

В приливном приближении (приливный потенциал) формула (1) дает

$$\varphi(x_3) \approx \frac{Gm}{R} \left(1 - \frac{x_3^2}{2R^2} \right). \quad (2)$$

Аналогично, из полного пространственного потенциала круглого кольца [1]

$$\varphi(x_i) = \frac{4G\mu_0 R}{\sqrt{(R+r) + x_3^2}} K \left(\sqrt{\frac{4Rr}{(R+r) + x_3^2}} \right), \quad (3)$$

находим приливный потенциал в его центральной области

$$\varphi(x, y, z) \approx \frac{Gm}{4R^3} (x_1^2 + x_2^2 - 2x_3^2), \quad (4)$$

где постоянные отброшены. По симметрии исходного круглого кольца, приливный потенциал (4) также имеет азимутальную симметрию.

2. Постановка задачи. Приливный потенциал

Рассмотрим теперь задачу [2] о приливном влиянии на центральную планету M возмущающего тела m , которое движется по эллиптической орбите (рис. 1). Смещением центра тяжести центрального тела мы пренебрегаем. Неинерциальную декартову систему координат строим так, чтобы начало координат было в центре масс главного тела, ось абсцисс смотрит в перицентр эллипса, ось ординат перпендикулярна ей и лежит в плоскости орбиты спутника, третья ось нормальна плоскости орбиты.

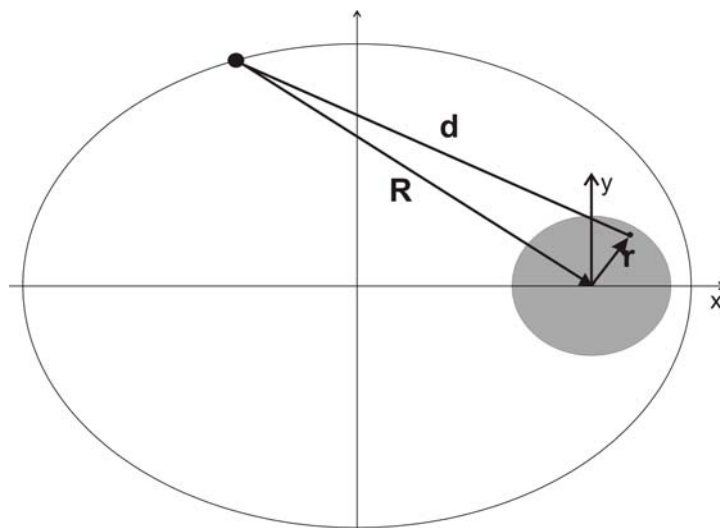


Рис. 1. Схема для расчета приливного потенциала при движении спутника по эллипсу вокруг центральной массы. Здесь \mathbf{R} – вектор расстояния между центрами тел, \mathbf{r} – радиус-вектор пробной внутренней точки, \mathbf{d} – вектор расстояния пробной точки от центра спутника

Пусть в принятой системе отсчета $\mathbf{R}(x', y', z')$ – координаты спутника, а $\mathbf{r}(x, y, z)$ – координаты пробной точки внутри центрального тела. Чтобы считать начало координат неподвижным, центру главного тела следует сообщить дополнительное ускорение от массы m . Это ускорение, согласно закону всемирного тяготения, будет равно $a_0 = \frac{Gm}{R^2} = \frac{Gm}{x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2}$, поэтому вектор ускорения центрального тела есть

$$\mathbf{a}_0 \left(\frac{mG}{R^3} x_1', \frac{mG}{R^3} x_2', \frac{mG}{R^3} x_3' \right). \quad (5)$$

Приливная сила воздействия спутника на пробную точку внутри центрального тела образуется вычитанием из силы

$$\mathbf{a} \left(\frac{Gm}{d^3} (x_1' - x_1), \frac{Gm}{d^3} (x_2' - x_2), \frac{Gm}{d^3} (x_3' - x_3) \right), \quad (6)$$

найденного выше ускорения (5):

$$\mathbf{F}_{\text{прил}} = \mathbf{a} - \mathbf{a}_0. \quad (7)$$

Отсюда следует, что полный потенциал приливной силы с точностью до некоторой постоянной будет иметь вид

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{Gm}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} - \frac{Gm(xx' + yy' + zz')}{(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{3/2}}. \quad (8)$$

Последний член в (8) есть линейная функция от координат пробной точки; он нужен, поскольку приливной потенциал Φ записан в неинерциальной системе отсчета.

Далее разложим потенциал $\Phi(\mathbf{r})$ в кратный ряд Тейлора по степеням координат пробной точки и сохраним лишь члены, квадратичные по координатам. Для сокращения выкладок сразу заметим, что в силу указанного выбора системы координат движение возмущающего спутника происходит в главной плоскости, и целесообразно потребовать в исходном потенциале $z' = 0$. Имеем

$$\frac{1}{\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z^2}} = \frac{1}{R} + \frac{xx'+yy'}{R^3} + \frac{3x'^2-R^2}{2R^5}x^2 + \frac{3y'^2-R^2}{2R^5}y^2 - \frac{z^2}{2R^3}. \quad (9)$$

Если отбросить в (6) постоянную $\frac{1}{\sqrt{x'^2+y'^2}}$ и учесть, что члены $\frac{xx'+yy'}{R^3}$ также сократятся (см. формулу (8)), приливной потенциал будет равен

$$\Phi(x, y, z) = \frac{Gm}{2} \left[x^2 \frac{3x'^2-R^2}{R^5} + y^2 \frac{3y'^2-R^2}{R^5} - \frac{z^2}{R^3} + 6xy \frac{x'y'}{R^5} \right]. \quad (10)$$

Выражение (10) можно записать в эквивалентной форме

$$\Phi(x, y, z, x', y') = \alpha(x', y')(x^2 + y^2 - 2z^2) + \beta(x', y')(x^2 - y^2) + \gamma(x', y')xy, \quad (11)$$

где коэффициенты α, β, γ также зависят от координат возмущающего тела и равны

$$\begin{aligned} \alpha(x', y') &= \frac{Gm}{4R^3}, \\ \beta(x', y') &= \frac{3Gm}{4R^5}(x'^2 - y'^2), \\ \gamma(x', y') &= \frac{3Gm}{R^5}x'y', \\ R &= \sqrt{x'^2 + y'^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Потенциал (11) зависит от времени (т.к. координаты спутника $x'_1(t), x'_2(t)$ есть функции от t), поэтому для нахождения вековых возмущений потенциал (11) следует усреднить по орбите тела. Мы установили, что при усреднении по периоду движения возмущающего тела $T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM}}$ коэффициенты β и γ обращаются в нуль

$$\begin{aligned} \langle \beta(x', y') \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \beta(x', y') dt = 0, \\ \langle \gamma(x', y') \rangle &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Для коэффициента $\gamma(x'_1, x'_2)$ нулевой результат усреднения в силу симметрии эллипса очевиден, но для доказательства $\langle \beta(x'_1, x'_2) \rangle = 0$ были выполнены сложные расчеты.

После усреднения по времени, приливный потенциал (11) примет вид

$$\Phi(x_1, x_2, x_3) = \frac{Gm}{4a_2^3}(x_1^2 + x_2^2 - 2x_3^2), \quad (14)$$

где мы использовали равенство

$$\langle \alpha(x'_1, x'_2) \rangle = \frac{Gm}{8\pi a^3} \int_0^{2\pi} \frac{dE}{(1 - e \cos E)^2} = \frac{Gm}{4a_1^3(1-e)^{3/2}} = \frac{Gm}{4a_2^3}. \quad (15)$$

Здесь $a_1 \geq a_2$ – полуоси эллипса.

Необходимо подчеркнуть, что усредненный по эллипсу приливный потенциал (14) с точностью до коэффициента совпадает с приливным потенциалом (4) от массы, движущейся по кругу. Нетривиальность ситуации в том, при движении по эллипсу круговая

симметрия до усреднения отсутствует. Однако при усреднении в (14) также появляется симметрия круга. В физическом отношении это означает, что при усреднении исчезает тангенциальная компонента приливной силы, и этот важный результат имеет место для кеплеровской орбиты *с любым эксцентриситетом*.

3. Приливный потенциал кольца Гаусса

Для разъяснения полученного выше результата обратимся к нашей задаче с другой стороны. А именно: если при усреднении по эллиптической орбите приливный потенциал (14) оказывается чисто радиальным, то возникает догадка: **не означает ли это, что и приливной потенциал эллиптического кольца Гаусса (который, кстати, ранее не изучался) для эллиптической орбиты будет иметь в точках гравитирующей центральной массы тот же самый вид**

$$\varphi_{tidal} = \alpha(x_1^2 + x_2^2 - 2x_3^2), \quad (16)$$

где ось Ox_3 перпендикулярна плоскости кольца и выходит из точки активного фокуса.

Напомним, что при вычислении вековых возмущений от материальной точки массой m , движущейся, в соответствии с законами Кеплера, по эллиптической орбите

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \nu}, \quad p = a_1(1 - e^2) \quad (17)$$

(ν – угол истинной аномалии), одним из основных методов является метод колец Гаусса. Суть метода получения кольца Гаусса заключается в «размазывании» массы спутника m по эллипсу орбиты с одномерной плотностью $\mu(\nu)$ тем большей, чем дальше в своем движении находится на соответствующей дуге ds тело. При этом орбита возмущающего спутника превращается в стационарное неоднородное эллиптическое кольцо (кольцо Гаусса) с максимальной плотностью в апоцентре и минимальной в перигентре. После указанного «размазывания» массы спутника вычисление вековых возмущений первого порядка сводится к нахождению гравитационного влияния данного кольца на пробные тела. Закон распределения плотности в кольце Гаусса имеет вид [3]

$$\mu(\nu) = \frac{m\sqrt{1-e^2}}{2\pi a_1} \frac{1}{\sqrt{1+e^2+2e\cos\nu}}. \quad (18)$$

Задача о потенциале кольца Гаусса была решена в конечном аналитическом виде лишь недавно [3,4]. В статье [3] гравитационный потенциал кольца Гаусса был детально изучен. Мы рассмотрим здесь частный случай потенциала в точках оси ординат Ox_3

$$\begin{aligned} \varphi(0, 0, x_3) &= \frac{2Gm}{\pi\sqrt{\lambda-\nu}} \left\{ K(k) + \frac{e^2 a_1^2}{a_1^2 + \nu} [\Pi(n, k) - K(k)] \right\}, \\ \begin{pmatrix} \lambda \\ \nu \end{pmatrix} &= \frac{x_3^2 - a_2^2 \pm \sqrt{(x_3^2 - a_2^2)^2 + 4a_1^2 x_3^2}}{2}, \\ n &= \frac{a_1^2 + \nu}{\lambda - \nu}; \quad k = \sqrt{\frac{a_2^2 + \nu}{\lambda - \nu}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь λ и ν – эллипсоидальные координаты пробной точки, а $K(k)$ и $\Pi(n, k)$ стандартные полные эллиптические интегралы первого и третьего рода.

4. Скрытая симметрия кольца Гаусса

Чтобы проверить высказанную выше догадку (см. начало раздела 3), необходимо найти приливный потенциал кольца Гаусса в окрестности главного фокуса, где расположена центральная масса. Однако прямое решение этой задачи получить не удастся из-за значительных математических трудностей. Дело в том, что весьма трудоемким является процесс разложения общего потенциала кольца Гаусса в кратный ряд Тейлора по малым значениям x_i (даже с учетом того, что удерживать при разложении следует только квадратичные по координатам члены).

Справиться с поставленной задачей все же можно, если свести её к одномерному варианту и находить приливный потенциал только в точках оси ординат Ox_3 , которая перпендикулярна плоскости кольца и выходит из точки активного фокуса. Переход к двумерному случаю будет основываться на том, что внешний потенциал гравитирующих тел является гармонической функцией координат. Итак, требуется разложить потенциал (19) в ряд Тейлора с удержанием членов x_3^2 . Подчеркнем, что и в такой постановке поставленная задача остается весьма сложной (мат. программа Maple помощи здесь не оказывает). Поэтому задача о разложении потенциала решалась нами вручную.

Фактически, надо найти постоянную α в формуле (16). Так как

$$\alpha = -\frac{1}{2} \frac{d^2 \varphi}{dx_3^2} \Big|_{x_3=0}, \quad (20)$$

то надо найти вторую производную от функции (19). При этом требуется находить первые и вторые производные не только от эллиптических интегралов (что уже громоздко), но ещё и от эллипсоидальных координат. А так как производные от тех и других выражений перемножаются, это делает расчет чрезвычайно трудоемким. Из-за громоздкости мы не можем здесь привести эти выкладки. Но очень трудоемкие вычисления дают **изумительно простой результат**:

$$\alpha = \frac{Gm}{4a_2^3}. \quad (21)$$

Таким образом, приливный потенциал кольца Гаусса описывается простой формулой

$$\Phi(x_1, x_2, x_3) = \frac{Gm}{4a_2^3} (x_1^2 + x_2^2 - 2x_3^2), \quad (22)$$

которая совпадает с выражением (14).

Следовательно, приливная сила от возмущающего тела во всех плоскостях, параллельных орбите спутника оказывается чисто радиальная, как если бы орбита спутника была просто круговая.

5. Заключение

Мы установили, что при осреднении по времени приливного потенциала, сила во всех сечениях главного тела, параллельных плоскости орбиты оказывается чисто радиальной, причем результат осреднения для тангенциальной компоненты силы не зависит от эксцентриситета орбиты, как если бы орбита была просто круговая. Кроме применений этого результата в задачах по изучению вековой эволюции планет и орбит спутников, можно также заключить, что приливное влияние Луны даже в принципе не может быть физической причиной чандлеровского периода в движении полюса Земли.

Литература

1. *Кондратьев Б.П.* Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. – М.: Мир, 2007. С. 512.
2. *Кондратьев Б.П.* К вопросу о приливной силе от тела, обращающегося по эллиптической орбите // Вестник Удмуртского университета. Серия Математика. Механика. Компьютерные науки, 2013. No. 1, 109-113.
3. *Kondratyev B.P.* Potential of a Gaussian ring. A new approach, 2012 // Sol. Syst. Res., V. 46, No. 5, 352-362.
4. *Антонов В.А., Никифоров И.И., Холиевников К.В.* Элементы теории гравитационного потенциала и некоторые случаи его явного выражения. – 2008. Изд-во С.-Петербургского университета.

ON THE TIDAL FORCE INSIDE GAUSS RING

Kondratyev B.P.

*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Russia
Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

It was posed and solved the problem of tidal gravitational effect on the central planet of the perturbing body (satellite), moving in an elliptical orbit. It was found that in the vicinity of the active focus in terms of the tidal potential in the three groups coordinate of a test point are coefficients that depend only on the coordinates of the satellite. When averaging the potential of the full period of the motion of these factors is only one factor and two vanish. This means that the tangential component of the tidal force by averaging disappears, so tidal force in all planes parallel to the orbit of the satellite is purely radial, as if the orbit of the satellite was just pie. This result verified the direct decomposition of the spatial potential of the elliptical Gauss's ring and is independent of the ring eccentricity.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ ПО ДВУМ ВЕКТОРАМ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОДОЛЖЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРУ С НАИЛУЧШЕЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИЕЙ

Кузнецов В.Б.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена старая классическая задача определения орбиты небесного тела по двум его положениям в два момента времени. Исследование основывается на методе Шефера, который свободен от неопределённостей и может быть применим для всех типов кеплеровских движений. Этот метод использует одно трансцендентное уравнение с одним неизвестным, однако для некоторых гиперболических орбит требуется альтернативная формула. В настоящей работе получено универсальное трансцендентное уравнение содержащее Φ функцию Лерха и применимое для любых начальных данных. Для решения уравнения предлагается использовать метод продолжения решения по параметру с наилучшей параметризацией. Данный метод сводится к решению задачи Коши системы двух дифференциальных уравнений с начальными условиями, независимыми от начальных данных исходного трансцендентного уравнения. При этом находятся все возможные решения. К недостаткам метода следует отнести потерю эффективности и точности для орбитальных дуг близких к 2π .

1. Введение

Классическая задача определения орбиты по двум векторам положения в два момента времени известна очень давно. Она имеет более чем двухвековую историю от Гаусса [1] до настоящего времени. После Гаусса метод был модернизирован Херриком [2], Данчиком [3] и др. авторами. Данная работа базируется на формулах метода Шефера [4], которые свободны от неопределенностей. Ее целью является вывод универсальных формул, которые применимы ко всем типам кеплеровского движения. В качестве метода независимого от начальных условий, для решения уравнений предлагается использовать метод продолжения по параметру с наилучшей параметризацией.

2. Метод Шефера

Метод Шефера основывается на одном уравнении с одним неизвестным. Нам известны векторы положения \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 в два момента времени t_1 и t_2 :

$$\left(\bar{r} + \phi\left(x - \frac{1}{2}\right)\right)\left(\phi + \left(\bar{r} + \phi\left(x - \frac{1}{2}\right)\right)X(x)\right)^2 = \tau^2, \quad (1)$$

где $\tau = k(t_1 - t_2)$, $k = 0.01720209895$ — постоянная Гаусса (или ее аналог), $\theta = \theta_2 - \theta_1$ — угол между \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 , $\bar{r} = \frac{r_1 + r_2}{2}$, $\phi = 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2}$, $X(x) = \frac{4}{3}F\left(1, 3, \frac{5}{2}, x\right)$ — гипергеометрическая функция. Неизвестная $x \in (-\infty, 1]$, причем $x < 0$ для гиперболы, $x = 0$ для параболы и $x > 0$ для эллипса. Как известно, гипергеометрический ряд сходится для $x \in [-1, 1]$, поэтому для гипербол нужно использовать вместо x : $x/(x-1)$ и функция примет вид:

$$F\left(1, 3, \frac{5}{2}; x\right) = \frac{1}{(1-x)^3} F\left(3, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}; \frac{x}{x-1}\right). \quad (2)$$

Если тело движется по эллиптической орбите и $\theta > 2\pi$, то необходимо использовать формулу:

$$\left(\bar{r} + \phi\left(x - \frac{1}{2}\right)\right)\left(\phi + \left(\bar{r} + \phi\left(x - \frac{1}{2}\right)\right)X(x)\right)^2 = \left(\tau - 2\pi\lambda \left(\frac{\bar{r} + \phi\left(x - \frac{1}{2}\right)}{4x(1-x)}\right)^{\frac{3}{2}}\right)^2, \quad (3)$$

где λ — число полных оборотов тела вокруг притягивающего центра.

3. Универсальные уравнения

В качестве первого этапа модернизации уравнений Шефера проведём их универсализацию путём поиска рядов, сходящихся для $x \in (-\infty, 1]$. Для этого воспользуемся преобразованием, предложенным Д'Амарио и Синноттом [5]:

$$\frac{4}{3}F\left(1, 3; \frac{5}{2}; x\right) = \frac{1}{1-x} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{1-x}(\sqrt{1-x}+1)} \left(1 - \frac{1}{5} \frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1} F\left(\frac{1}{2}, 1; \frac{7}{2}; \frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}\right)\right)\right). \quad (4)$$

Ряд справа можно выразить через Фи-функцию Лерха [6]:

$$F\left(\frac{1}{2}, 1; \frac{7}{2}; \frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}\right) = \frac{5}{4(\sqrt{1-x}+1)^2} \left(1-x + \sqrt{1-x} + 3\Phi\left(\frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}, 1, \frac{5}{2}\right)\right). \quad (5)$$

Функцию Лерха можно определить так:

$$\Phi(z, s, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{(\nu+n)^s}, \quad z \in [-1, 1]. \quad (6)$$

Тогда её выражение в (5) примет вид:

$$\Phi\left(\frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}, 1, \frac{5}{2}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{2n+5} \left(\frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}\right)^n. \quad (7)$$

Производная функции Φ выражается через неё же, что по сравнению с гипергеометрическим рядом позволяет уменьшить объем вычислений при численном решении уравнений:

$$\frac{d\Phi\left(x, 1, \frac{5}{2}\right)}{dx} = \frac{1}{x(1-x)} - \frac{5}{2} \frac{\Phi\left(x, 1, \frac{5}{2}\right)}{x}. \quad (8)$$

Окончательное выражение для $X(x)$ примет вид:

$$X(x) = \frac{4}{3}F\left(1, 3; \frac{5}{2}; x\right) = \frac{\sqrt{1-x}(6x^2 - 51x + 64) + 4(6x^2 - 21x + 16)}{6(1-x)^{\frac{3}{2}}(\sqrt{1-x}+1)^4} + \frac{3(1-\sqrt{1-x})}{6(1-x)^{\frac{3}{2}}(\sqrt{1-x}+1)^4} \Phi\left(\frac{\sqrt{1-x}-1}{\sqrt{1-x}+1}, 1, \frac{5}{2}\right). \quad (9)$$

4. Метод продолжения по параметру с наилучшей параметризацией

В качестве метода решения универсальных уравнений Шефера рассмотрим продолжение решения по параметру [7].

Идея метода заключается в следующем: пусть $H(x, \mu) = 0$ уравнение, которое мы хотим решить, а μ — некий параметр. Тогда для некоторого значения $x = x_0$ решение известно, т. е. $H(x_0, \mu) = 0$ и в этой точке выполняется теорема о неявной функции. Тогда, рассмотрим глобальную гомотопию:

$$G(x, \mu) = H(x) - \mu H(x_0) = 0, \quad (10)$$

где $\mu \in [0, 1]$ и x_0 — начальное приближение ($x_0 = 0$).

- Если $\mu = 0$, тогда $G(x, 0) = H(x) = 0$ — исходное уравнение.
- Если $\mu = 1$, тогда $G(x, 1) = H(x) - H(x_0) = 0$ и $x = x_0$, т. е. получаем известное решение.

Введём новый параметр $s \in [0, L]$, $L = \text{const}$:

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (d\mu)^2, \quad (11)$$

где s — длина дуги интегральной кривой. Параметр s — наилучший параметр для поиска решения [8].

Тогда уравнение (10) можно записать как:

$$G(x(s), \mu(s)) = H(x(s)) - \mu(s) H(x_0) = 0. \quad (12)$$

Рассмотрим задачу Коши в начальной точке $|x_0$:

$$\frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{ds} - H(x_0) \frac{d\mu}{ds} = 0. \quad (13)$$

Она приводит к нормальной системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) из двух уравнений:

$$\frac{dx}{ds} = H(x_0) \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right]^{-1} \frac{d\mu}{ds}, \quad \frac{d\mu}{ds} = \sqrt{1 - \frac{(dx)^2}{(ds)^2}}. \quad (14)$$

Следует интегрировать систему (14) в направлении роста параметра « s », пока не будет достигнуто $\mu = 0$. Это будет первое решение. Интегрируя дальше, до заданного L , мы найдём остальные решения (если они существуют).

5. Метод продолжения для универсальных уравнений

Запишем (1) с учётом (9) как:

$$\sqrt{r_1 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} (2x-1) + r_2} \left(\sqrt{2r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{2} \frac{r_1 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} (2x-1) + r_2}{24(1-x)^{3/2} (\sqrt{1-x} + 1)^4} \right) \cdot \left(\sqrt{1-x} (6x^2 - 51x + 64) + 4(6x^2 - 21x + 16) + 3(1 - \sqrt{1-x}) \Phi \left(\frac{\sqrt{1-x} - 1}{\sqrt{1-x} + 1}, 1, \frac{5}{2} \right) \right) - \tau = 0. \quad (15)$$

Тогда получим систему ОДУ (14):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= \tau - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{r_1 - 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} + r_2} \left(r_1 + \sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} + r_2 \right), \\ \frac{d\mu}{ds} &= - \frac{A \cdot \Phi \left(\frac{\sqrt{1-x} - 1}{\sqrt{1-x} + 1}, 1, \frac{5}{2} \right) + B}{8\sqrt{2} (1-x)^{3/2} (\sqrt{1-x} + 1)^5 \sqrt{r_1 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\theta}{2} (2x-1) + r_2}} \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A &= 12r_1r_2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 [4x^3 - 6x^2 + 4x - 1] + 12(r_1 + r_2)\sqrt{r_1r_2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)(3x^2 - 3x + 1) + 3(r_1 + r_2)^2(2x - 1), \\ B &= 4r_1r_2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 [(22x^3 - 116x^2 + 123x - 25) - \sqrt{1-x}(62x^2 - 110x + 25)] + 4\sqrt{r_1r_2}(r_1 + r_2) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \\ &\cdot [\sqrt{1-x}(10x^3 - 55x^2 + 43x + 25) - (2x^4 - 29x^3 + 78x^2 - 30x - 25)] + (r_1 + r_2)^2 \cdot \\ &\cdot [\sqrt{1-x}(20x^2 - 100x + 103) - 4x^3 + 56x^2 - 151x + 103]. \end{aligned}$$

При $x \rightarrow 1$, длина дуги интегральной кривой $s \rightarrow \infty$, поэтому здесь происходит резкий рост затрачиваемого на интегрирование времени и потеря точности вычислений.

Для случая более чем одного оборота (3) может быть записано как:

$$\begin{aligned} &(8x(1-x))^{\frac{3}{2}} \sqrt{r_1 + 2\sqrt{r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2}(2x-1) + r_2} \left(\sqrt{2r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{2} \frac{\left(r_1 + 2\sqrt{r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2}(2x-1) + r_2 \right)}{24(1-x)^{\frac{3}{2}} (\sqrt{1-x} + 1)^4} \right) \cdot \\ &\cdot \left(\sqrt{1-x}(6x^2 - 51x + 64) + 4(6x^2 - 21x + 16) + 3(1 - \sqrt{1-x}) \Phi \left(\frac{\sqrt{1-x} - 1}{\sqrt{1-x} + 1}, 1, \frac{5}{2} \right) \right) - \quad (17) \\ &- \tau(8x(1-x))^{\frac{3}{2}} + 2\pi\lambda \left(r_1 - 2\sqrt{r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2}(2x-1) + r_2 \right)^{\frac{3}{2}} = 0. \end{aligned}$$

Система ОДУ примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= 48\sqrt{2}\pi\lambda \left(r_1 - 2\sqrt{r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2} + r_2 \right)^{\frac{3}{2}}, \\ \frac{d\mu}{ds} &= \frac{A \cdot \Phi \left(\frac{\sqrt{1-x} - 1}{\sqrt{1-x} + 1}, 1, \frac{5}{2} \right) + B + C\lambda\pi + D\tau}{\sqrt{1-x}\sqrt{2}\sqrt{r_1 + 2\sqrt{r_1r_2} \cos \frac{\theta}{2}(2x-1) + r_2}} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A &= 6\sqrt{x} \left(4r_1r_2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 [\sqrt{1-x}(32x^3 - 70x^2 + 43x - 8) - (48x^3 - 86x^2 + 47x - 8)] + \right. \\ &\left. + 4(r_1 + r_2)\sqrt{r_1r_2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [\sqrt{1-x}(13x^2 - 24x + 8) - (21x^2 - 28x + 8)] + (r_1 + r_2)^2 [\sqrt{1-x}(5x - 8) - 9x + 8] \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B &= 8r_1r_2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \sqrt{x} \left[\sqrt{1-x} (220x^3 - 643x^2 + 484x - 96) + 392x^3 - 824x^2 + 524x - 96 \right] - \\
 &- 8\sqrt{r_1r_2} (r_1 + r_2) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{x} \left[\sqrt{1-x} (60x^4 - 483x^3 + 838x^2 - 428x + 48) + 216x^4 - 876x^3 + 1076x^2 - \right. \\
 &- 460x + 48 \left. \right] - 2\sqrt{x} (r_1 + r_2)^2 \left[\sqrt{1-x} (54x^3 - 399x^2 + 572x - 192) + 192x^3 - 672x^2 + 676x - 192 \right], \\
 C &= 4r_1r_2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \left[\sqrt{1-x} (336x^3 - 984x^2 + 840x - 216) - (96x^4 - 738x^3 + 1377x^2 - 948x + 216) \right] + \\
 &+ 4(r_1 + r_2) \sqrt{r_1r_2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\sqrt{1-x} (132x^2 - 300x + 144) - (39x^3 - 264x^2 + 372x - 144) \right] + \\
 &+ (r_1 + r_2)^2 \left[24\sqrt{1-x} (2x - 3) - 3(5x^2 - 28x + 24) \right], \\
 D &= -24\sqrt{2} \sqrt{x} \sqrt{r_1 + 2\sqrt{r_1r_2} \cos\frac{\theta}{2} (2x - 1) + r_2} \cdot \\
 &\cdot \left[\sqrt{1-x} (11x^4 - 90x^3 + 175x^2 - 120x + 24) + 4(10x^4 - 41x^3 + 58x^2 - 33x + 6) \right].
 \end{aligned}$$

6. Заключение

В настоящей работе получены универсальные уравнения для метода Шефера определения орбиты по двум векторам положения. Это позволяет рассмотреть задачу с общих позиций. К тому же, переход к Ф функции Лерха приводит к повышению скорости вычислений из-за того, что ее производная выражается через саму функцию. В качестве альтернативы итерационным методам, в работе был рассмотрен метод продолжения решения по параметру с наилучшей параметризацией, сводящий решение задачи к решению системы ОДУ при единых начальных условиях для всех случаев. К недостаткам такого подхода следует отнести потерю эффективности и точности для орбитальных дуг близких к 2π .

Литература

1. Гаусс К.Ф. Теория движения небесных тел обращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям. – М.: Типография Бахметева, 1861.
2. Херрик С. Астродинамика. – М.: Мир, 1977, Т. 1.
3. Danchick R. Gauss meets Newton again: How to make more efficient and robust with Newton-Raphson iterations // Appl. Mathem. and Comput, 2008, Vol. 195, 364–375.
4. Шефер В.А. Новый метод определения орбиты по двум векторам положения, основанный на решении уравнений Гаусса // Астрономический Вестник, 2010, Том 44, No. 3, 273–288.
5. D'Amario L.A. and Synnott S.P. A comparison of solutions of Kepler's and Lambert's problems // Report of Massachusetts institute of technology. 1969.
6. Lerch M. Note sur la fonction $\sum_{k=0}^{\infty} e^{2\pi kx} (w+k)^{-s}$ // Acta Math. 1887, Vol. 11, 11–24.
7. Давиденко Д.Ф. Об одном новом методе численного решения нелинейных уравнений // ДАН СССР. 1953, Т. 88, No 4, 601–602.
8. Шалашилин В.И., Кузнецов Е.Б. Метод продолжения решения по параметру и наилучшая параметризация в прикладной математике и механике. – Эдиториал УРСС. Москва. 1999.

**DETERMINATION OF ORBIT FROM TWO POSITION VECTORS BY
THE CONTINUATION METHOD WITH OPTIMAL PARAMETRIZATION**

Kuznetsov V.B.

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

The old classical problem of finding the orbit of a celestial body from its two position vectors in two instants of time is considered. The history of the problem is more than two centuries old and there are many approaches to its solution. Current investigation is based on the Shefer's method, whose solution is free from uncertainties and may be applied to all kinds of keplerian motions. This method uses one transcendental equation with one unknown, but for some hyperbolic orbit an alternative equation is needed. In this work the universal transcendental equation is produced. It contains Φ Lerch's function. For solving of this equation the continuation method with best parametrization is proposed. For this, on the base of global homotopy we will make analog of our equation. It depends on parameter of homotopy and initial values of the problem. The solution of such extended equation is produced through generation of a system of ordinary differential equations with initial conditions. This method was suggested by Davidenko and it is named as continuous continuation. The optimal parameter of continuation is the length of arc along the current solution curve. The problem is reduced to solving the Cauchy problem of two differential equations with initial conditions what doesn't depend on from transcendental equation data. The disadvantage of method is loss of efficiency and reliability when orbital arc is tending to 2π .

СОГЛАСОВАНИЕ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ ICRF С ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ КООРДИНАТ DE405 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ АСТЕРОИДОВ

Кузнецов В.Б.¹, Майгурова Н.В.², Медведев Ю.Д.¹, Чернетенко Ю.А.¹

¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

В ИПА РАН для подготовки материалов ежегодника «Эфемериды малых планет» выполнено уточнение орбитальных параметров 427 393 нумерованных астероидов. При этом использовано 111394 532 позиционных наблюдений этих тел. Работа выполнена в двух вариантах – без учета систематических ошибок каталогов в наблюдениях с 2001 г. и с этим учетом. По значениям $O-C$, полученным по исправленным наблюдениям, используя опорные каталоги USNO-A1.0, USNO-SA1.0, USNO-A2.0, UCAC-1, Tycho-2, GSC-1.1, USNO-B1.0, UCAC-4, UCAC-2, UCAC-3, 2MASS, вычислены параметры вращения опорной системы ICRF (каталога сравнения) относительно системы координат динамических эфемерид DE405 для нескольких вариантов решений. Значение ε_x составляет десятки *mas*, значения $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ – несколько *mas*, смещение экватора – ~ 80 *mas*.

1. Введение

В настоящей работе для определения ориентации звездной системы координат относительно динамической используется следующий подход. Система координат опорного каталога определяется углами вращения (против часовой стрелки) относительно осей динамической системы координат

$$\varepsilon_{xt} = \varepsilon_x + \omega_x(t - t_0), \varepsilon_{yt} = \varepsilon_y + \omega_y(t - t_0), \varepsilon_{zt} = \varepsilon_z + \omega_z(t - t_0), \quad (1)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – начальные значения углов вращения и угловых скоростей вращения, соответственно. Для $O-C$ можно написать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \cos \delta \Delta \alpha &= \cos \alpha \sin \delta(\varepsilon_{xt}) + \sin \alpha \sin \delta(\varepsilon_{yt}) - \cos \delta(\varepsilon_{zt}), \\ \Delta \delta &= -\Delta D - \sin \alpha(\varepsilon_{xt}) + \cos \alpha(\varepsilon_{yt}), \end{aligned} \quad (2)$$

где ΔD – постоянная систематическая ошибка системы склонений каталога, не связанная с углами вращения.

В [1] параметры ориентации системы каталога Hipparcos относительно системы координат эфемерид DE405 были определены по 50464 оптическим наблюдениям 116 астероидов. В это число входили наблюдения избранных малых планет, приведенные на систему каталога Hipparcos с помощью депенденсов, наблюдения малых планет, полученные спутником Hipparcos, и наблюдения, выполненные на обсерваториях 673 и 689 в системе каталога АСТ (до 2007 г.). В [2] эти вычисления были повторены на большем наблюдательном интервале для тех же 116 астероидов и уже для 4-х динамических эфемерид: DE405, DE421, EPM-2008, EPM-2011 с использованием 141952 оптических наблюдений. Параметры ориентации определялись в результате совместного решения МНК относительно элементов орбит всех рассматриваемых астероидов и этих параметров. Сделан вывод о том, что рассогласование систем координат рассмотренных динамических эфемерид и каталога Hipparcos составляет несколько *mas*, а скоростей – меньше 1 *mas/год*.

В табл. 2 представлены результаты сравнения оптических (каталоги UCAC2, UCAC3, UCAC4) систем координат и ICRF по наблюдениям радиисточников, видимых в оптическом диапазоне. Необходимо отметить, что в работах [4] и [5] принято

отличное от (2) выражение для уравнения по $\Delta\delta$, а именно, для поправки экватора используется величина $+B_0$, тогда как в настоящей работе используется $-AD$.

Основные выводы из этих работ – 1) несогласование системы координат DE405 и Hipparcos составляет несколько *mas*. 2) оптические каталоги UCAC2, UCAC3 и UCAC4 не совпадают с ICRF также в пределах нескольких *mas*.

Таблица 1. Параметры ориентации системы каталога Hipparcos по отношению к координатным системам 4-х динамических эфемерид (углы – в *mas*, скорости – в *mas/год*). Эпоха J2000.0. В скобках приводится число возмущающих астероидов – (BA).

Параметры	Использовано 141952 оптических наблюдения 116 астероидов				
	DE405 (3 BA)	DE405 (304 BA)	DE421 (67BA)	EPH-2008 (3 BA)	EPH-2011 (3 BA)
ε_x	0.26 ± 1.06	0.46 ± 1.18	1.34 ± 1.15	1.22 ± 1.07	1.33 ± 1.07
ε_y	3.43 ± 1.22	6.97 ± 1.36	2.56 ± 1.31	2.90 ± 1.22	2.97 ± 1.22
ε_z	-0.22 ± 1.70	0.04 ± 1.89	-0.50 ± 1.82	-0.63 ± 1.71	-0.68 ± 1.71
ω_x	0.08 ± 0.06	0.17 ± 0.07	0.07 ± 0.06	0.06 ± 0.06	0.05 ± 0.06
ω_y	0.15 ± 0.08	0.68 ± 0.08	0.16 ± 0.08	0.17 ± 0.08	0.17 ± 0.08
ω_z	-0.43 ± 0.12	-0.80 ± 0.14	-0.51 ± 0.13	-0.57 ± 0.13	-0.56 ± 0.13

Таблица 2. Параметры вращения систем координат каталогов UCAC2, UCAC3, UCAC4 относительно ICRF (в *mas*). N_i – число объектов, включенных в решение.

Звездный каталог	ε_x	ε_y	ε_z	Смещение экватора, B_0	N_i	Работа
UCAC2	-0.2 ± 5.8	7.2 ± 5.5	7.0 ± 4.5	–	130	[3]
UCAC3	-0.1 ± 6.1	6.4 ± 5.8	-1.8 ± 2.4	–	152	[3]
UCAC2	-0.4 ± 3.2	3.5 ± 2.8	6.8 ± 2.3	–	302	[4]
UCAC2	3.8 ± 3.4	1.3 ± 2.8	6.8 ± 2.3	-14.0 ± 2.3	172	[4]
UCAC2	-1.0 ± 3.2	4.1 ± 2.8	6.8 ± 3.3	-3.9 ± 2.2	302	[4]
UCAC2	$+4.55 \pm 1.42$	-5.11 ± 1.32	$+7.78 \pm 1.20$	-5.14 ± 1.07	413	[5]
UCAC4	$+4.60 \pm 1.56$	-3.71 ± 1.44	$+3.92 \pm 1.37$	-3.60 ± 1.19	413	[5]

При наблюдениях астероидов используется гораздо большее число опорных каталогов. Поэтому представляет интерес вопрос о том, как с их использованием выполняется условие согласования динамической и звездной систем координат.

2. Вычисления

В настоящем исследовании был применен другой по сравнению с [1] и [2] подход к решению задачи, состоящий в том, что уточнение орбитальных параметров и определение параметров вращения выполнялось отдельно. Систематические ошибки звездных каталогов в наблюдениях, выполненных после 2001 г., стало возможным определять практически для каждого астероида. Это стало возможным с появлением работы [6], а также использованием при обработке наблюдений звездных каталогов, опирающихся на систему ICRF (реализация Tycho-2) и включающих слабые звезды. В этой работе в качестве каталога, относительно которого определяются ошибки остальных каталогов, принят каталог 2MASS.

Работа [7] 2014 г. выполнена на расширенном, по сравнению с работой [6], наборе каталогов. Авторы в качестве каталога сравнения выбирают часть звезд каталога PRMXL, которые используют положения 2MASS и имеют собственные движения. В отличие от работы [6] 2010 г., работа 2014 г. [7], кроме разностей положений, содержит разности собственных движений.

После учета систематических ошибок в наблюдениях по работе [7], для которых есть указание на опорный каталог, по 111 394 532 позиционным наблюдениям выполнено уточнение орбитальных параметров 427 393 нумерованных астероидов. Такие же вычисления проведены с использованием неисправленных за ошибки каталогов наблюдений. Эта работа регулярно выполняется в ИПА РАН для подготовки материалов ежегодника «Эфемериды малых планет». При выполнении улучшения орбит уравнения движения совместно с уравнениями в вариациях интегрируются методом Эверхарта 15-го порядка. Учитываются возмущения от всех больших планет, а также Плутона, Цереры, Паллады и Весты в соответствии с эфемеридами DE405. Возмущения от Земли и Луны рассматриваются отдельно. Учитываются также возмущения от сжатия Солнца и Земли.

Результаты уточнения орбитальных параметров получены для двух вариантов: без учета ошибок каталогов и с этим учетом. Соответствующие остаточные разности, O–C, для наблюдений с середины 2001 г. использованы для дальнейшего анализа и определения параметров рассогласования динамической системы координат и системы координат каталога сравнения.

Для уменьшения влияния систематических (возникающих из-за ошибок элементов астероидов) ΔC_i^2 и случайных ошибок χ_i^2 при вычислениях часть наблюдений отбраковывалась. Здесь $i = 1, \dots, n$, а n – число наблюдений. Процедура отбраковки была следующая. При улучшении орбит астероидов значения систематических ошибок ΔC_i^2 оценивались по элементам корреляционной матрицы для вычисленных прямых восхождений и склонений по формуле [8]:

$$C_{\alpha, \delta} = \sigma_0^2 A_i C_E A_i^T, \quad (3)$$

где σ_0 – среднеквадратическая ошибка наблюдений, A_i – матрица коэффициентов условных уравнений на момент t_i размером 2×6 , C_E – корреляционная матрица элементов E , индекс “ T ” обозначает транспонирование матрицы. Диагональные элементы матрицы $C_{\alpha, \delta}$ являются дисперсиями значений для вычисленных значений α и δ , т.е. величинами ΔC_i^2 . Мы исключали O–C, для которых значения дисперсии ошибок вычисленных положений были больше $0.09''$ ($C_i^2 > 0.09''$). Для уменьшения влияния случайной составляющей ошибки также исключались O–C, для которых выполняется условие

$$\chi_i^2 = (\alpha_i^o - \alpha_i^c)^2 \cos^2 \delta + (\delta_i^o - \delta_i^c)^2 > 5''.$$

3. Полученные результаты

В табл. 3 приводятся последовательно по столбцам номер каталога по порядку, название каталога, число наблюдений, средние значения по прямому восхождению, средние значения по склонению при решениях без учета систематических ошибок и те же значения для решений с учетом систематических ошибок. Название каталогов, для которых в наблюдениях учтены его систематические ошибки, выделены жирным шрифтом.

Необходимо иметь в виду, что в изменениях средних значений O–C в результате учета ошибок каталогов проявляются не только сами эти ошибки, но и изменения орбитальных параметров в результате исправления всех наблюдений за ошибки и других каталогов. Можно отметить, что для каталогов Tycho-2 и Hipparcos 2 значения O–C являются наименьшими, что и следовало ожидать.

Таблица 3. Средние значения $O-C$ для двух вариантов решений. N – число наблюдений. Названия каталогов, для которых выполнена редукция за систематические ошибки, выделены жирным шрифтом.

№ п/п	Каталог	Средние $O-C$, без учета поправок каталогов			Средние $O-C$, с учетом поправок каталогов		
		N	$O-C_\alpha$ (mas)	$O-C_\delta$ (mas)	N	$O-C_\alpha$ (mas)	$O-C_\delta$ (mas)
1	USNO-A1.0 (*)	1863277	-21.8	-21.4	1809824	22.9	32.0
2	USNO-SA1.0 (*)	295263	-22.4	-109.7	292586	23.8	-46.5
3	USNO-A2.0 (*)	36257114	85.3	294.8	35952276	43.8	79.2
4	USNO-SA2.0	1490471	-51.4	207.5	157940	-149.4	110.8
5	UCAC-1 (*)	457110	-4.4	-23.7	456987	29.6	-4.2
6	Tycho-2 (*)	375887	14.8	-0.8	374932	39.0	9.4
7	GSC-1.0	2283	-120.7	-18.7	2200	-83.4	8.4
8	GSC-1.1 (*)	548860	-162.2	-101.2	544862	-69.6	-86.4
9	GSC-1.2	14693	15.2	-23.3	14461	50.8	0.2
10	GSC-2.2	263	-366.1	14.7	259	-341.5	47.1
11	ACT	116816	-75.8	-12.1	116608	-26.6	-14.7
12	GSC-ACT	344771	-18.5	84.9	331371	1.6	17.8
13	SDSS-DR8	4140	61.7	-62.4	4137	76.5	-30.9
14	USNO-B1.0 (*)	12080295	-115.9	148.0	11977009	-64.3	52.6
15	PPM	35497	41.9	17.8	34429	145.1	105.2
16	UCAC-4 (*)	6236471	10.4	79.9	6147960	7.5	102.8
17	UCAC-2 (*)	26297335	-88.3	35.7	25923483	-59.6	48.4
18	USNO-B2.0	381	10.1	107.2	374	55.6	136.2
19	PPMXL	65571	21.5	-7.2	65289	25.2	10.7
20	UCAC-3 (*)	2119435	-34.00	73.2	2090259	-10.9	82.0
21	NOMAD	41318	-20.5	122.2	41066	31.9	42.3
22	CMC-14	335517	11.1	-23.4	329396	12.5	61.1
23	Hipparcos 2	87	-21.2	4.8	87	7.3	5.2
24	GSC	249137	-63.8	-63.7	238625	0.2	-35.6
25	AC	5518	-22.1	166.0	5281	71.8	174.2
26	SAO 1984	1201	277.2	-169.1	1175	324.8	-117.8
27	SAO	25478	-187.7	-208.6	24466	-66.0	-188.2
28	AGK 3	3578	-39.6	-32.6	3345	41.4	-11.7
29	ACRS	1360	-688.6	-43.8	1278	-518.0	-7.7
30	Lick Gaspra	221	-44.1	63.5	221	-14.6	20.2
31	Ida93Catalog	53	-76.4	-200.3	53	-37.9	-155.3
32	Perth 70	10	518.5	-105.0	10	443.7	-11.6
33	COSMOS/UKSTS	69	-25.8	-61.8	69	16.6	-40.2
34	Yale	33492	8.9	-678.3	32199	89.1	-582.2
35	2MASS (*)	12026378	53.4	72.8	11984643	50.5	71.0
36	GSC-2.3	40	249.9	-46.0	41	228.4	-23.5
37	SDSS-DR7	786817	34.9	-2.6	785974	31.3	56.5
38	SST-RC1	34	-55.9	-15.3	34	-49.4	38.7
39	MPOSC3	12387	7.8	-2.5	12307	48.7	52.5
40	CMC-15	292	29.1	13.8	291	42.0	66.9
41	SST-RC4	1849679	46.7	59.4	1840957	43.0	76.4

Далее был выполнен ряд решений МНК для определения рассогласования систем координат каталога сравнения и эфемерид DE405 в соответствии с (2). В решение включались O-C, наблюдения для которых (с середины 2001 г.) получены в системах 11-ти каталогов и приведены на систему каталога сравнения. Эти каталоги отмечены в табл. 3 значком (*). Решения получены для нескольких вариантов, для того чтобы оценить реальные ошибки полученных результатов. Результаты решений приводятся в табл. 4.

Таблица 4. Результаты определения параметров вращения и поправки экватора (углы – в *mas*, скорости – в *mas/год*). Эпоха J2000.0. N_{eq} – число условных уравнений.

	Без учета поправок каталогов			С учетом поправок каталогов			
	Без весов обсерваторий			С весами обсерваторий	Без весов обсерваторий		
ε_x	-38.79±.11	-87.37±.24	75.70±.12	-27.10±.10	-12.48±.10	-11.42±.21	33.54±.10
ε_y	-2.98±.09	-5.11±.18	2.12±.09	-3.46±.08	-3.63±.08	-7.13±.16	-1.34±.08
ε_z	-0.92±.07	33.18±.16	-1.37±.07	1.00±.07	-2.38±.06	15.97±.14	-2.58±.06
ω_x	–	6.37±.03	–	–	–	-0.14±.02	–
ω_y	–	0.28±.02	–	–	–	0.46±.02	–
ω_z	–	-4.47±.02	–	–	–	-2.40±.02	–
ΔD	–	–	-198.5±.1	–	–	–	-79.8±.1
σ_0	0.496	0.496	0.496	0.328	0.434	0.434	0.434
N_{eq}	103420172			101539946			

Обзор решений, приведенных в табл. 4, позволяет сделать следующие выводы. Все решения получены с высокой точностью, что можно объяснить большим количеством измерений, включенных в решения. Но это формальные ошибки. Реальная точность оцениваемых параметров составляет, по-видимому, несколько *mas*. Для всех вариантов близкие значения получены для параметра ε_y . Значения параметра ε_x заметно различаются для разных вариантов. Смещение экватора достаточно велико, примерно на порядок по абсолютной величине больше соответствующего значения, полученного в работах [4] и [5]. Для каталога сравнения получена заметная составляющая скорости ω_z , которая все же меньше по абсолютной величине, чем для варианта без учета систематических ошибок опорных каталогов. Но очевидно, что было бы желательно выполнить такую же работу, основываясь на учете систематических ошибок каталогов по работе [6].

4. Заключение

Получены величины рассогласования систем координат каталога сравнения и эфемерид DE405, которые составляют десятки *mas*. Различные варианты решения показывают, что ошибки этих параметров могут достигать нескольких *mas*. Можно отметить наличие заметного смещения экватора, которое, возможно, объясняется включением в общее решение наблюдений, основанных на каталогах USNO-A2.0 и USNO-B1.0. Как видно из табл. 3, для этих каталогов средние значения O-C по склонению превышают 100 *mas*.

Необходимо отметить, что в настоящей работе задачи уточнения орбитальных параметров астероидов и определения параметров ориентации разделены из-за большого количества астероидов. Это, безусловно, вносит некоторые ошибки в результаты наших вычислений из-за корреляции параметров ориентации и орбитальных параметров. Тем

более интересно, что полученные оценки для параметров рассогласования систем координат имеют тот же порядок, что и более корректные их значения, определенные в работах [3], [4] и [5].

Литература

1. Чернетенко Ю.А. Ориентация системы каталога Hipparcos по отношению к координатным системам эфемерид DE403/LE403 и DE405/LE405 на основе наблюдений астероидов // Письма в Астрон. журн. 2008. Том 34, № 4, С.266–270.
2. Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А. Ориентация систем динамических эфемерид DE405 и DE421 относительно системы каталога Hipparcos // Труды ИПА РАН. 2013. Вып.27. С. 483–486.
3. Maigurova N., Martynov M., Pinigin G. Optical positions of ICRF sources using UCAC3 reference stars // Proceedings of the Journies 2010 “Systèmes de reference spatio-temporels” (JSR2010): New challenges for reference systems and numerical standards in astronomy, Observatoire de Paris, 20–22 September 2010, Edited by Nicole Capitaine, pp.121–124.
4. Aslan Z., Gumerov R., Jin W., Khamitov I., Maigurova N., Pinigin G., Tang Z., and Wang S. Optical counterpart positions of extragalactic radio sources and connecting optical and radio reference frames // Astronomy & Astrophysics. 2010. 510, A10.
5. Zacharias N. and Zacharias M.I. Radio-optical reference frame link using the U.S. Naval Observatory astrograph and deep CCD imaging // The Astron. Journal, 2014, V. 147:95, (18 pp.)
6. Chesley, S.R., Baer, J., Monet, D.G. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations // Icarus. 2010. V.210. P. 158–181.
7. Farnocchia D., S.R. Chesley, A.B. Chamberlin, D.J. Tholen Star catalog position and proper motion corrections in asteroid astrometry // Icarus. 2015. V. 245, P. 94–111.
8. Carpino M., Milani A., and Chesley S.R. Errors statistics of asteroid astrometric observations // Icarus. 2003. V. 166. P. 248–270.

AGREEMENT OF REFERENCE FRAME HCRF WITH RESPECT TO EPHEMERIDES DE405 AS OBTAINED FROM OBSERVATIONS OF ASTEROIDS

Kuznetsov V.B.¹, Maigurova N.V.², Medvedev Yu.D.¹, Chernetenko Yu.A.¹

¹IAA RAS, St. Petersburg, Russia

²Research Institute Nikolaev Astronomical Observatory, Nikolaev, Ukraine

The orbital parameters of 427 393 asteroids using 111 394 532 position observations were improved with accounting systematic errors of star catalogues [7] and without these corrections. The O-C values based on catalogues USNO-A1.0, USNO-SA1.0, USNO-A2.0, UCAC-1, Tycho-2, GSC-1.1, USNO-B1.0, UCAC-4, UCAC-2, UCAC-3, 2MASS were used for estimation of rotation parameters of the catalogue of comparison with respect to the ephemerides DE405. Value of ε_x is equal to dozens of *mas*, values of ε_y , ε_z are equal to several *mas*, the declination offset term is evaluated as ~ 80 *mas*.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ

Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е., Гламазда Д.В.

*Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия*

Исследуется динамическая эволюция объектов в окрестности движения высокоэллиптических спутников. Численное моделирование выполняется с помощью «Численной модели движения ИСЗ», разработанной в НИИ ПММ ТГУ. Модель возмущающих сил учитывает основные возмущающие факторы: гравитационное поле Земли, притяжение Луны и Солнца, приливы в теле Земли, световое давление с учетом тени Земли, влияние эффекта Пойнтинга-Робертсона, сопротивление атмосферы. Отношение миделева сечения к массе объекта варьируется от малых значений, соответствующих спутникам Земли, до больших, соответствующих космическому мусору. Анализируются особенности прохождения объектами через зоны резонансов высоких порядков с целью определения начальных условий, обеспечивающих наибольшую продолжительность существования объектов при минимальном эволюционном изменении значений позиционных элементов орбиты.

1. Введение

Высокоэллиптические орбиты типа «Молния» при эксцентриситетах e , превышающих 0.65, испытывают влияние сопротивления атмосферы. На каждом витке в окрестности перицентра орбиты спутник проходит через верхние слои атмосферы, что приводит к вековым возмущениям большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона орбиты i . При рассмотрении орбитальной эволюции на длительных интервалах времени или при больших отношениях площади миделева сечения к массе (парусности γ) необходимо учитывать влияние эффекта Пойнтинга-Робертсона. Большая полуось сферически-симметричного спутника испытывает вековые возмущения, обусловленные эффектом Пойнтинга-Робертсона. Совместное влияние сопротивления атмосферы и эффекта Пойнтинга-Робертсона, приводят к прохождению спутником через зоны резонансов высоких порядков. Последовательные прохождения через резонансы высоких порядков приводит к формированию слабо стохастических траекторий [3, 4].

Будем считать, что резонанс $p : q$ является резонансом высокого порядка, если $|p| + |q| > 5$. В этом случае система не застревает в резонансе, а испытывает временный захват или проходит через резонанс.

2. Резонансные значения большой полуоси

Частоты ν возмущений, обусловленных влиянием секториальных и тессеральных гармоник гравитационного потенциала Земли, являются линейными комбинациями среднего движения спутника, угловых скоростей движения перицентра и узла его орбиты, угловой скорости вращения Земли. Условие $\nu \approx 0$ соответствует резонансу между орбитальным движением спутника и угловой скоростью вращения Земли.

В многочастотной системе основной резонанс может сопровождаться субрезонансами на близких частотах. Рассмотрим три критических аргумента, соответствующих субрезонансам,

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= p(M + \Omega + g) - qS = \Phi_{01} + \nu_1 t, \\ \Phi_2 &= p(M + g) + q(\Omega - S) = \Phi_{02} + \nu_2 t, \\ \Phi_3 &= pM + q(g + \Omega - S) = \Phi_{03} + \nu_3 t.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь p, q — целые числа, M — средняя аномалия, Ω — долгота восходящего узла, g — аргумент перицентра, S — гринвичское звездное время, $\Phi_{01}, \Phi_{02}, \Phi_{03}$ — начальные фазы, ν_1, ν_2, ν_3 — частоты критических аргументов Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

Условие $\nu_1 \approx 0$ соответствует резонансу между средним движением спутника и угловой скоростью движения Земли (резонанс n -типа). Условие $\nu_2 \approx 0$ — резонансу i -типа, при котором положение восходящего узла орбиты периодически повторяется во вращающейся системе координат. Условие $\nu_3 \approx 0$ резонансу e -типа, при котором принимается во внимание уже положение линии апсид.

Эти условия позволяют оценить резонансные значения большой полуоси a_{res} . При получении оценок a_{res} учитывались вековые возмущения элементов M, Ω, g , обусловленные сжатием Земли, притяжением Луны и Солнца, влиянием светового давления.

На рис. 1 показано распределение резонансных значений большой полуоси a_{res} , соответствующих резонансам $p:q$ (траектория замыкается через p звездных суток или через q периодов обращения спутника), в зависимости от значений знаменателя q . Числа возле точек дают значения числителя p . Стрелкой отмечено положение зоны резонанса $22:45$.

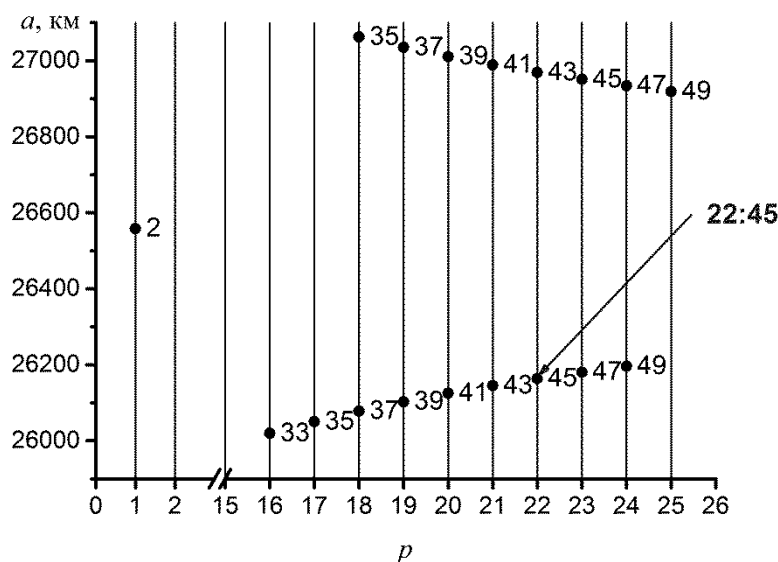


Рис. 1. Резонансные значения большой полуоси.

3. Моделирование орбитальной эволюции

Моделирование орбитальной эволюции объектов выполнялось с помощью «Численной модели движения искусственных спутников Земли», разработанной в НИИ Прикладной математики и механики Томского государственного университета [1, 2].

Модель возмущающих сил учитывала основные возмущающие факторы: несферичность гравитационного поля Земли (модель EGM96, гармоники до 50 порядка и степени включительно), притяжение Луны и Солнца, приливы в теле Земли, прямое световое давление с учетом тени Земли, эффект Пойнтинга-Робертсона, сопротивление атмосферы. Коэффициент отражения полагался равным 1.44. Отношение миделева сечения к массе варьировалось от малых значений, соответствующих спутникам, до больших значений, соответствующих космическому мусору. Интегрирование уравнений движения выполнялось методом Эверхарта 19 порядка.

Начальные условия соответствовали высокоэллиптическим орбитам с эксцентриситетом 0.6 и критическим наклоном 63.4° . Значения большой полуоси варьировались в окрестности резонансного значения 26560 км в интервале 500 км. Интервал интегрирования составлял 24 года.

Эффект Пойнтинга-Робертсона приводит к вековому уменьшению большой полуоси орбиты сферически симметричного спутника. В резонансных областях влияние этого эффекта слегка уменьшается. Надежные оценки вековых возмущений большой полуоси были получены на основе результатов численного моделирования: -5 м/год при парусности 0.02 м²/кг, -0.5 км/год при парусности 2 м²/кг, -1 км/год при парусности 14 м²/кг.

Орбитальная эволюция существенно зависит от начального значения долготы восходящего узла (ориентации плоскости орбиты в пространстве). На 24-летнем интервале времени объект входит в плотные слои атмосферы и прекращает существование при парусности 3 м²/кг для начального значения долготы восходящего узла 270° , а при начальном значении долготы восходящего узла 33° — при парусности 16 м²/кг.

Для объектов, движущихся по высокоэллиптическим орбитам, сопротивление атмосферы в окрестности перицентра приводит к уменьшению большой полуоси орбиты и к прохождению через зоны резонансов высоких порядков. При эксцентриситетах орбиты, превышающих 0.7 , и при больших значениях парусности влияние атмосферы становится доминирующим фактором, приводящим к уменьшению большой полуоси. Существенное уменьшение большой полуоси приводит к быстрому прохождению через области резонансов. В этом случае стохастические свойства траекторий, связанные с прохождением через области резонансов высоких порядков, становятся пренебрежимо малыми.

Надлежащим выбором начального положения плоскости орбиты можно обеспечить длительное время существования высокоорбитального объекта даже при больших значениях парусности. На рис. 2–5 показана эволюция позиционных элементов орбиты в окрестности резонанса $22 : 45$ при значении парусности 14 м²/кг (начальное значение долготы восходящего узла 33°). Долгопериодические возмущения эксцентриситета и наклона (резонанс Лидова-Козаи) в данном случае предотвращают вход спутника в плотные слои атмосферы.

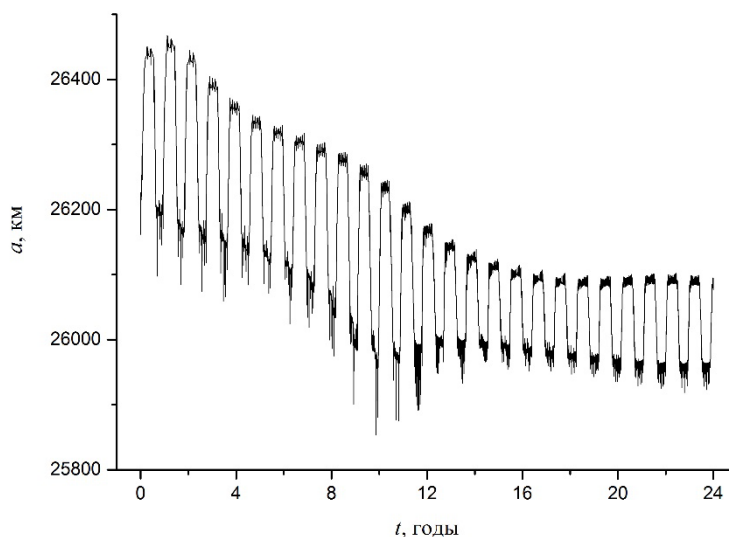


Рис. 2. Эволюция большой полуоси a .

Прохождение через резонанс $22 : 45$ при $t = 12$ лет (либрация критического аргумента Φ_1 (рис. 5)) приводит к изменению режима эволюции большой полуоси (рис. 2), эксцентриситета (рис. 3) и наклона орбиты (рис. 4). При прохождении через резонанс амплитуда долгопериодических возмущений наклона увеличивается, значения эксцентриситета уменьшаются, также уменьшается амплитуда колебаний большой полуоси. Это приводит к тому, что спутник в перицентре орбиты уже не попадает в плотные

слои атмосферы. Такая орбита обеспечивает длительный период существования спутника. Рис. 5 показывает, что спутник несколько раз захватывался в резонанс при $t \approx 1.5, 2.5, 3.5, 12, 19, 23.5$ года, когда среднее значение большой полуоси становится равным резонансному.

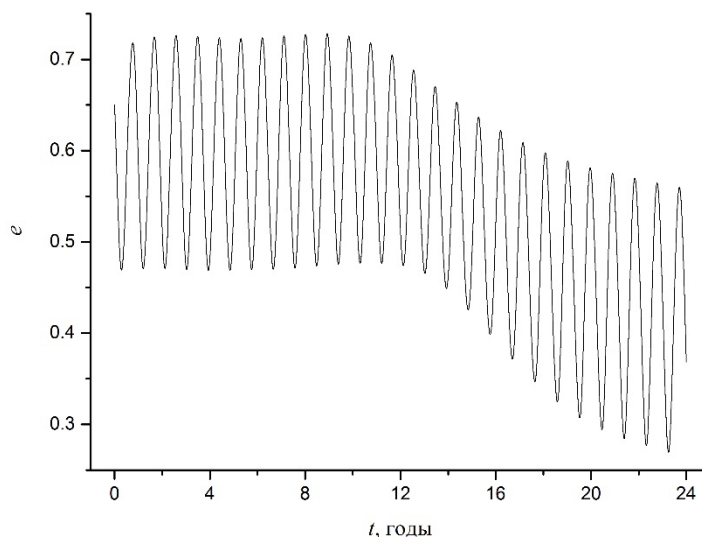


Рис. 3. Эволюция эксцентриситета e .

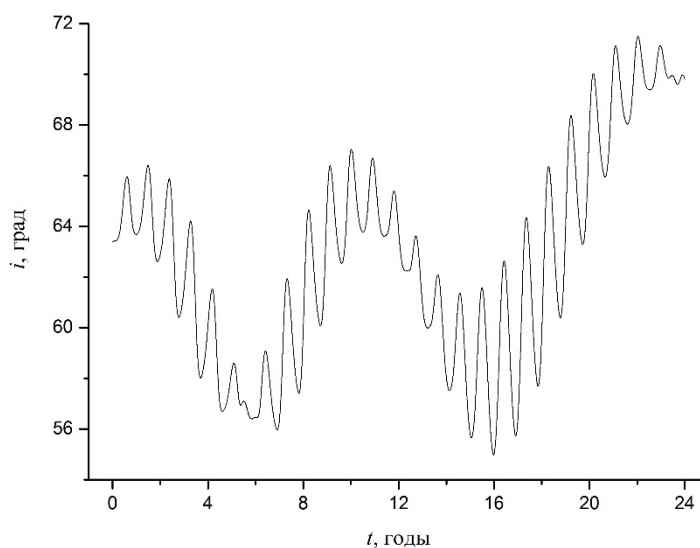


Рис. 4. Эволюция наклона i .

Для анализа стохастических свойств траекторий используется интегральная автокорреляционная функция A [5], определяемая как среднее значение квадратов последовательности автокорреляционных функций A_k по смешанным моментам. Для постоянных временных рядов интегральная автокорреляционная функция A асимптотически стремится к 1. Для равномерного временного ряда, представляющего периодическую функцию типа синус, $A = 0.5$. Для других периодических и квазипериодических временных рядов A стремится к конечному значению, близкому к 0.5. Для хаотических траекторий A асимптотически стремится к нулю.

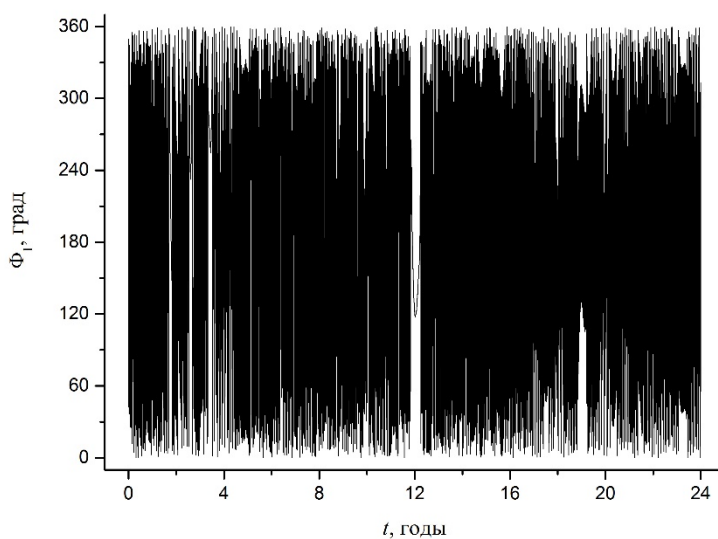


Рис. 5. Эволюция критического аргумента Φ_1 .

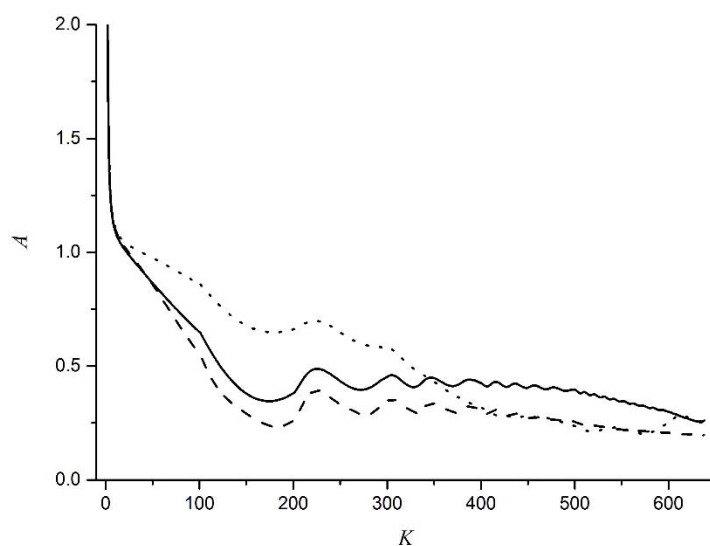


Рис. 6. Значения интегральной автокорреляционной функции для большой полуоси (сплошная линия), эксцентриситета (штриховая линия), наклона (пунктирная линия) в зависимости от базового числа K .

На рис. 6 приведены значения интегральной автокорреляционной функции A для большой полуоси (сплошная линия), эксцентриситета (штриховая линия), наклона (пунктирная линия) при начальном значении долготы восходящего узла 33° значение парусности $14 \text{ м}^2/\text{кг}$). Под влиянием эффекта Пойнтинга-Робертсона вековые возмущения большой полуоси ведут к формированию слабо стохастических траекторий.

Формирование слабо стохастических траекторий происходит в том случае, если возмущения от сопротивления атмосферы имеют порядок, сравнимый с возмущениями, обусловленными влиянием эффекта Пойнтинга-Робертсона. При сильных возмущениях от сопротивления атмосферы вековые возмущения большой полуоси орбиты приводят к быстрому прохождению спутником областей резонансов высоких порядков, что исключает возможность формирования слабо стохастических траекторий на основе описанного механизма.

4. Заключение

Результаты численного моделирования движения объектов, движущихся по высокоэллиптическим орбитам, показывают, что орбитальная эволюция существенно зависит от начального значения долготы восходящего узла. В зависимости от ориентации плоскости орбиты в пространстве падение объектов с большой парусностью на Землю происходит при значениях парусности от 3 до 16 м²/кг. Вековые возмущения большой полуоси орбиты, вызываемые сопротивлением атмосферы и эффектом Пойнтинга–Робертсона, приводят к прохождению спутником через зоны резонансов высоких порядков. Последовательные прохождения через резонансы высоких порядков приводит к формированию слабо стохастических траекторий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 13-02-00026-а) и Минобрнауки РФ (базовая часть задания, РК №01201465056).

Литература

1. *Бордовицына Т.В.* Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984.
2. *Бордовицына Т.В., Батулин А.П., Авдюшев В.А., Куликова П.В.* Численная модель движения ИСЗ. Новая версия // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. С. 60–65.
3. *Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е., Гламазда Д.В., Кудрявцев С.О.* Влияние резонансов высоких порядков на орбитальную эволюцию объектов в окрестности геостационарной орбиты // Астрон. вестн. 2014. Т.48, № 6. С.482–494.
4. *Kuznetsov E.D., Zakharova P.E.* Dynamical evolution of space debris on high-elliptical orbits near high-order resonance zones // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 406–413.
5. *Wytrzyszczak I., Breiter S., Borczyk W.* Regular and chaotic motion of high altitude satellites // Adv. Space Res. 2007. V. 40. P. 134–142.

DYNAMICAL EVOLUTION OF HIGH-ORBITAL SATELLITES NEAR RESONANCE ZONES

Kuznetsov E.D., Zakharova P.E., Glamazda D.V.

Kourovka Astronomical Observatory, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Dynamical evolution of high-elliptical satellites is researched. Numerical simulation is carried out using A Numerical Model of the Motion of Artificial Earth's Satellites" developed by the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of the Tomsk State University. The model of disturbing forces accounts the nonsphericity of the gravitational field of the Earth, the attraction of the Moon and the Sun, the tides in the Earth's body, the direct radiation pressure, taking into account the shadow of the Earth, the Poynting-Robertson effect, and the atmospheric drag. Area to mass ratio values are varied from small values corresponding to satellites to large values corresponding to space debris. Features of objects pass through the regions of high-order resonances are analyzed to determine initial conditions that correspond to maximal lifetime of objects under minimal evolution variation of positional orbital elements.

ВЕКОВАЯ ДИНАМИКА ПЛАНЕТЫ В СИСТЕМЕ 16 Cyg

Мельников А.В.

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

Рассмотрена вековая орбитальная динамика планеты в кратной звездной системе 16 Cyg. Единственная в данной системе планета имеет существенный эксцентриситет орбиты $e = 0.69$. Ранее Хольман и др. [1] предположили возможность наличия хаоса в орбитальной динамике планеты из-за близости системы 16 Cyg к сепаратрисе резонанса Лидова-Козаи (ЛК). Нами проведено массовое вычисление характеристических показателей Ляпунова на множестве допустимых значений орбитальных параметров планеты. Во всех случаях динамика системы 16 Cyg является регулярной с ляпуновским временем более 30 000 лет. Построив сечения фазового пространства в окрестности резонанса ЛК, мы установили, что в фазовом пространстве система 16 Cyg находится вдали от сепаратрисы резонанса ЛК, а хаотический слой в окрестности сепаратрисы весьма узок. Поэтому хаотическое поведение в вековом орбитальном движении планеты в системе 16 Cyg маловероятно.

Введение

Широкая визуально-двойная звездная система 16 Cyg состоит из компонент 16 Cyg A (HD 186408) и 16 Cyg B (HD 186427) спектральных классов G2V и G5V с массами [2]: $(1.046 \pm 0.014) M_{\odot}$ и $(0.992 \pm 0.012) M_{\odot}$, соответственно, где M_{\odot} – масса Солнца. Обе звезды являются относительно яркими $V \sim 6^m$ и расположены от нас на расстоянии ≈ 21 пк. Орбитальный период системы 16 Cyg и эксцентриситет ее орбиты составляют [2]: $P = 18\,212$ лет и $e = 0.862$.

В 1997 г. у компоненты 16 Cyg B была обнаружена [3] планета 16 Cyg Bb с наибольшей известной на тот момент величиной эксцентриситета орбиты $e_p = 0.634 \pm 0.082$, орбитальным периодом $P_p = (800.8 \pm 11.7)$ суток и массой $m_p = 1.5 m_J / \sin i_p$, где m_J – масса Юпитера, i_p – наклонение орбиты планеты к картинной плоскости. Существенный эксцентриситет орбиты планеты был объяснен в [1] действием резонансного механизма Лидова-Козаи (ЛК) [4, 5]. Предполагая, что параметры системы 16 Cyg таковы, что в фазовом пространстве она расположена в окрестности сепаратрисы резонанса ЛК, в [1] было указано на возможное наличие хаоса в орбитальном движении планеты.

Целью настоящего исследования являлось выяснение возможности существования хаоса в вековой орбитальной динамике планеты 16 Cyg Bb. Для этого на представительных множествах допустимых значений орбитальных параметров планеты мы вычислили характеристические показатели Ляпунова (ХПЛ) и получили оценки ляпуновского времени (оценки времени предсказуемой динамики системы) для системы 16 Cyg. Для нескольких из возможных моделей орбиты планеты 16 Cyg Bb мы построили представительные сечения фазового пространства системы 16 Cyg и рассмотрели возможное ее местоположение относительно сепаратрисы резонанса ЛК.

Устойчивость планетных орбит

Моделирование орбитальной динамики системы 16 Cyg проводилось посредством численного интегрирования исходных уравнений движения в рамках полной задачи трех тел. Для этого мы использовали разработанные нами ранее алгоритмы и программы [6], позволяющие определять момент распада тройной системы из гравитирующих тел и одновременно проводить вычисление полного спектра ХПЛ. Интегрирование уравнений движения проводилось на промежутке времени в 10^6 лет.

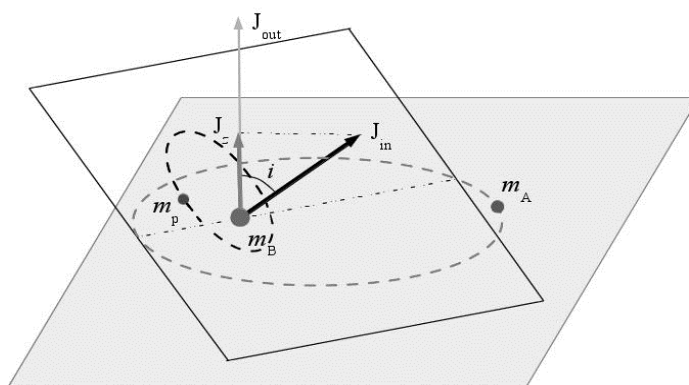


Рис. 1. Конфигурация системы.

Схематичное изображение системы 16 Cyg представлено на рис. 1. Символами m_A , m_B и m_p обозначены компоненты системы. Символами \mathbf{J}_{in} и \mathbf{J}_{out} обозначены вектора угловых моментов планетной и звездной систем. Величина J_z представляет собой проекцию вектора \mathbf{J}_{in} на ось Oz параллельную \mathbf{J}_{out} . Под углом i подразумевается угол между векторами \mathbf{J}_{in} и \mathbf{J}_{out} .

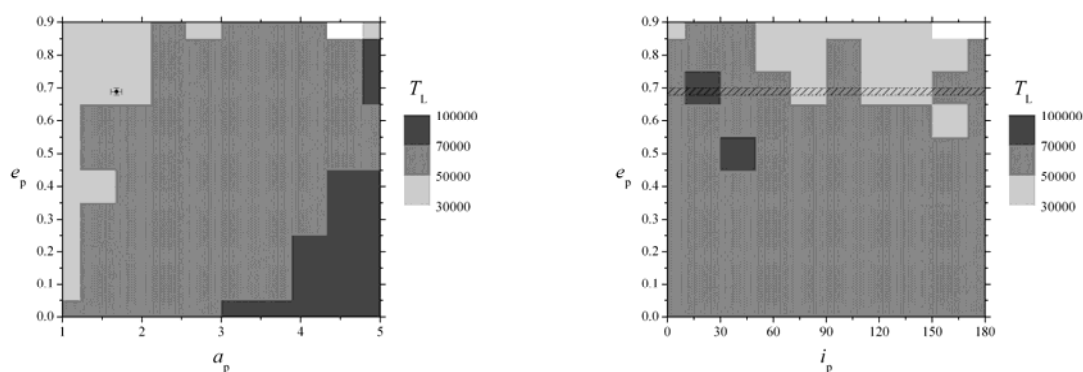


Рис. 2. Ляпуновские времена (в годах) системы 16 Cyg. Указано положение [3, 9] планеты 16 Cyg Bb с учетом ошибок определения ее орбитальных параметров (точка с барами ошибок и заштрихованная полоса). Белый цвет соответствует ляпуновскому времени $T_L < 30\,000$ лет.

Посредством вычисления ХПЛ на множестве допустимых значений орбитальных параметров планеты 16 Cyg Bb, мы определяли характер орбитальной динамики системы 16 Cyg. ХПЛ имеют смысл средней скорости экспоненциальной расходимости траекторий фазового пространства динамической системы в окрестности пробной траектории. Ненулевая величина максимального ХПЛ (L_1) указывает на хаотический (неустойчивый), а нулевая – на регулярный (устойчивый) характер движения. Также нами были получены оценки величины ляпуновского времени для системы 16 Cyg, формально полагая его равным величине, обратной максимальному ХПЛ – $T_L = 1/L_1$.

Величины ХПЛ и ляпуновских времен для системы 16 Cyg определялись на плоскостях начальных значений орбитальных параметров планеты: (a_p, e_p) , (a_p, i_p) , (i_p, e_p) и (Ω_p, i_p) , где a_p , e_p , i_p и Ω_p – большая полуось, эксцентриситет, наклонение (относительно картинной плоскости) и долгота восходящего узла. Отметим, что значения i_p и Ω_p для 16 Cyg Bb в настоящее время не известны. Вычисление ХПЛ для всех рассмотренных множеств начальных значений орбитальных параметров планеты показало, что динамика системы 16 Cyg является регулярной (все ХПЛ равны нулю), по крайней мере, на промежутке времени в 10^6 лет. На рис. 2 представлены вычисленные нами на плоско-

стях (a_p, e_p) и (i_p, e_p) величины ляпуновских времен для системы 16 Суг. Из рис. 2 видно, что для большинства допустимых значений орбитальных параметров планеты ляпуновское время системы 16 Суг составляет 30 000–100 000 лет.

Сечения фазового пространства

Построив представительные сечения фазового пространства системы 16 Суг для нескольких возможных моделей планетной орбиты, мы определили местоположение системы относительно сепаратрисы резонанса ЛК. Для построения сечений фазового пространства мы использовали дважды осредненный гамильтониан ограниченной ($m_p = 0$) задачи трех тел, выведенный в работах [7, 8]. Гамильтониан задачи $H(\omega, J, \Omega, J_z)$ выражен в канонических переменных: $\omega = \omega_p - \Omega_p$ и $\Omega \equiv \Omega_p$ – координаты, а $J = (1 - e_p^2)^{1/2}$ и $J_z = (1 - e_p^2)^{1/2} \cos i$ – сопряженные им импульсы (см. также рис. 1); здесь ω_p, Ω_p – аргумент перицентра и долгота восходящего узла орбиты планеты, соответственно, i – угол между плоскостями звездной и планетной систем. Выражение для H приведено в [8] и содержит члены разложения гравитационного потенциала до третьей степени малости по a/a_p включительно, где a и a_p – большие полуоси орбит звездной и планетной систем.

На рис. 3 представлены сечения фазового пространства на плоскостях $\omega - J$ ($\Omega = 0$) и $\Omega - J_z$ ($\omega = 0$), построенные нами для одной из возможных моделей планетной орбиты в системе 16 Суг (для $i_p = 45^\circ$). Для построения сечений были выбраны те же самые плоскости в фазовом пространстве, что и в работе [7]. На плоскости $\omega - J$ присутствуют циркулирующие траектории вокруг резонансных областей $\omega = \pi/2$ и $\omega = 3\pi/2$, соответствующих резонансу ЛК. Либрационные траектории резонанса ЛК при этом не видны, т.к. они не существуют для принятых параметров системы. На плоскости $\Omega - J_z$ присутствует одна резонансная ячейка с центром $\Omega = \pi, J_z = 0$. Допустимые начальные значения Ω и J_z для системы 16 Суг на плоскости $\Omega - J_z$ расположены вдали от сепаратрисы резонанса, кроме того, хаотический слой, существующий в окрестности сепаратрисы, весьма узкий. Аналогичные выводы были сделаны из анализа сечений фазового пространства для всех остальных рассмотренных нами моделей системы 16 Суг. Поэтому мы считаем, что хаотическая орбитальная динамика планеты 16 Суг Bb маловероятна.

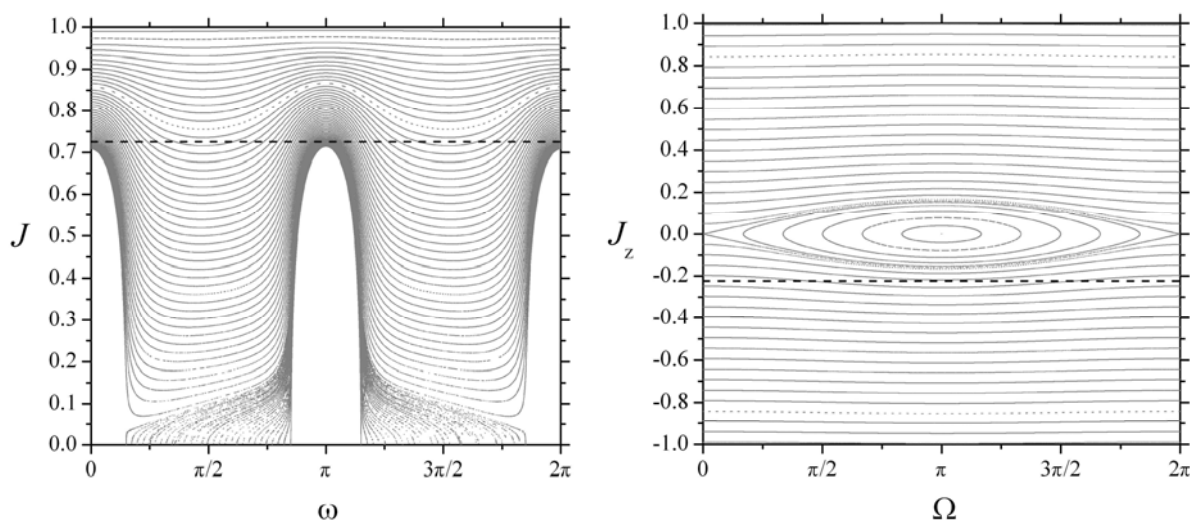


Рис. 3. Сечения фазового пространства системы 16 Суг. Штриховой горизонтальной линией отмечено местоположение [3, 9] системы 16 Суг.

Выводы

Итак, проведено исследование вековой орбитальной динамики единственной известной планеты в кратной звездной системе 16 Cyg. На множестве допустимых значений орбитальных параметров планеты вычислены характеристические показатели Ляпунова. Анализ значений показателей Ляпунова показал, что динамика системы 16 Cyg является регулярной, по крайней мере, на временах в 10^6 лет, а величина ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) составляет более 30 000 лет. Для нескольких моделей планетной орбиты в системе 16 Cyg построены сечения фазового пространства динамики системы в окрестности резонанса Лидова-Козаи. Анализ сечений показал, что система 16 Cyg расположена в фазовом пространстве вдали от сепаратрисы резонанса Лидова-Козаи, причем хаотический слой в окрестности сепаратрисы весьма узок. Поэтому хаотическое поведение в орбитальном движении планеты в системе 16 Cyg маловероятно.

Литература

1. *M. Holman, J. Touma, S. Tremaine*, Nature **386**, 254 (1997).
2. *H.M. Hauser and G.W. Marcy*, Publ. Astron. Soc. Pacific **111**, 321 (1999).
3. *W.D. Cochran, A.P. Hatzes, R.P. Butler, G.W. Marcy*, Astroph. J. **483**, 457 (1997).
4. *М.Л. Лидов*, Искусственные спутники Земли. **8**, 5 (1961).
5. *Y. Kozai*, Astron. J. **67**, 591 (1962).
6. *А.В. Мельников, В.В. Орлов, И.И. Шевченко*, Астрон. журн. **91**, 735 (2014).
7. *G. Li, S. Naoz, M. Holman, A. Loeb*, Astroph. J. **791**, id.86 (2014).
8. *G. Li, S. Naoz, M. Holman, A. Loeb*, Astroph. J. **802**, id.71 (2015).
9. *E. Plávalová and N.A. Solovaya*, Astron. J. **146**, id.108 (2013).

SECULAR DYNAMICS OF THE PLANET IN SYSTEM 16 Cyg

Melnikov A.V.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The secular orbital dynamics of the planet in the multiple star system 16 Cyg was consider. The single planet in this system has a significant eccentricity $e = 0.69$. Previously, Holman et al. [1] suggested the possibility of chaos in the orbital dynamics of the planet due to the proximity the system 16 Cyg to the separatrix Lidov-Kozai (LK) resonance. We conducted a massive computation of the Lyapunov exponents on the set of possible values of the orbital parameters of the planet. In all cases, the dynamics of the system 16 Cyg is a regular with the Lyapunov time more than 30 000 years. Plotting the phase space sections in the vicinity of the LK resonance, we found that the system 16 Cyg in the phase space is far from the separatrix LK resonance and chaotic layer near the separatrix is very narrow. Therefore, the chaotic behavior in the secular orbital motion of the planet in the system 16 Cyg improbable.

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ И ЛИБРАЦИИ ЛУНЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ DE430

Павлов Д.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

В рамках работы над эфемеридами EPM реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, основанная на уравнениях движения, принятых в эфемеридах JPL DE430. Луна рассматривается как эластичное тело с вращающимся жидким ядром. В модель включены: возмущения орбиты Луны от неоднородного гравитационного потенциала Земли; вращательный момент, возникающий от гравитационного потенциала Луны; возмущения орбиты Луны из-за лунных и солнечных приливов на Земле; деформация Луны в результате её вращения и гравитационного влияния Земли; вращательный момент от жидкого ядра с лунной корой.

Была использована модель гравитационного потенциала на основе решения EGM2008 (для Земли) и GL660B (для Луны). Использовались общепринятые модели вращения Земли, смещений пунктов наблюдений и задержек сигнала в тропосфере, рекомендованные IERS2010.

Уточнение параметров модели осуществлялось на основе данных наблюдений лунной лазерной локации (LLR). Были обработаны наблюдения со станций: Haleakala, McDonald/MLRS1/MLRS2, CERGA, Apache, Matera. Получена эфемерида Луны, сопоставимая с международными аналогами. Есть предпосылки для дальнейших исследований в области приливных эффектов и внутреннего строения Луны.

1. Введение

Лазерная локация Луны (Lunar Laser Ranging, LLR) является на сегодняшний день наиболее точным средством определения параметров орбиты и физической либрации Луны. Точность наблюдений в последние годы достигла уровня, при котором заметно несовершенство известных моделей физической либрации Луны. Использование при обработке LLR-наблюдений моделей, полученных другими средствами, позволяет устранить случайные и систематические погрешности и сконцентрироваться на изучении физической либрации, что позволит получить новую информацию о внутреннем строении Луны. Целью данной работы является реализация модели орбитально-вращательного движения Луны DE430, предложенной в NASA JPL [1,2] и обработка LLR-наблюдений с использованием этой модели, а также рекомендуемыми на сегодняшний день геофизическими и геодинамическими моделями.

Реализация модели DE430 велась на базе планетных эфемерид EPM [3] в качестве дополнения к модели физической либрации Луны, предложенной Г.А. Красинским [4,5]. На данный момент известна ещё одна реализация модели DE430 в эфемеридах INPOP [6], которая, однако, не содержит уравнений жидкого ядра.

Точные LLR-наблюдения начались в 1969 г. благодаря размещению на поверхности Луны массива уголкового отражателя (ретрорефлекторов) в ходе экспедиции Apollo 11. На данный момент существует пять таких массивов, из которых три размещены участниками экспедиций Apollo 11, 14 и 15, и два закреплены на советских аппаратах Луноход-1 и Луноход-2.

Данные LLR-наблюдений распространяются в виде нормальных точек, каждая из которых содержит: дату и время испускания фотона, время прохождения фотона от опорной точки оптической системы до ретрорефлектора и обратно, а также формальную ошибку этой величины. В данной работе использовалось 20480 наблюдений, публично доступных на сайтах Парижской обсерватории [7] и обсерватории Apache Point, США [8]. Формальные ошибки наблюдений составляли около 4 м в 1970 г; в результате непрерывного совершенствования аппаратной базы обсерваторий формальные ошибки

самых точных современных наблюдений составляют около 2 мм (приведена формальная ошибка длины траектории фотона в одну сторону).

2. Модель орбитального движения Луны

В настоящей работе моделирование орбитального и вращательного движения Луны происходит совместно с моделированием движения Солнца и планет, включая Землю, в инерциальной системе отсчёта BCRS и с использованием динамической шкалы времени TDB. Численное интегрирование орбиты учитывает следующие ускорения, действующие на Луну и Землю как на точечные массы:

- Ньютоновские и релятивистские ускорения, определяемые уравнениями Эйнштейна-Инфельда-Хофмана для системы N точечных масс, среди которых: Луна, Земля, Солнце, планеты и крупнейшие астероиды.
- Релятивистские возмущения от сжатия Солнца.
- Возмущения орбиты Луны в неоднородном гравитационном потенциале Земли. Используются коэффициенты разложения гравитационного потенциала Земли по присоединённым многочленам Лежандра из модели EGM2008 [9] с вековыми поправками к коэффициентам C_{20} , C_{30} и C_{40} по рекомендациям IERS2010 [10]. Используются коэффициенты до 6-го порядка, т.к. неоднородности более высоких порядков не оказывают значимого влияния на орбиту Луны.
- Возмущения орбиты Луны от твердотельных и океанических приливов, возникающих на Земле под действием Луны и Солнца. Задаются в виде динамических поправок к коэффициентам гравитационного потенциала Земли в соответствии с моделями, рекомендованными IERS2010. Следует отметить, что в эфемеридах DE430 [1] используется собственная упрощённая модель с двумя уточняемыми параметрами. Порядок сферических гармоник, включающих динамические приливные поправки, ограничен 2, как в DE430, так и в настоящей работе. Влияние приливов на гармоники более высоких порядков не оказывает значимого влияния на орбиту Луны.
- Возмущения орбиты Земли в неоднородном гравитационном потенциале Луны; возмущения орбиты Луны из-за взаимодействия точечных масс Земли, Солнца, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера с гравитационным потенциалом Луны. Используются коэффициенты разложения из модели GL660B [11] с динамическими значениями коэффициентов до 2-го порядка, рекомендуемыми в модели DE430 (см. следующий раздел). Коэффициенты C_{32} , S_{32} и C_{33} не берутся из GL660B, а уточняются из наблюдений, как и в DE430.

3. Модель вращательного движения Луны

Поворот Луны вокруг центра масс в небесной системе координат задаётся тремя углами Эйлера: φ , θ , ψ . Эти углы (и производные от них по времени) являются основными значениями, характеризующими либрацию Луны, и участвуют в численном интегрировании наравне с положением центра Луны. Все прочие показатели поворота Луны вычисляются из углов Эйлера и их производных. Матрица поворота Луны вычисляется следующим образом:

$$R = R_z(\varphi)R_x(\theta)R_z(\psi).$$

Производные от углов Эйлера по времени связаны с угловой скоростью Луны (ω), отнесённой к лунной системе координат, следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= (\omega_x \sin \psi + \omega_y \cos \psi) / \sin \theta & \omega_x &= \dot{\varphi} \sin \theta \sin \psi + \dot{\theta} \cos \psi \\ \dot{\theta} &= (\omega_x \cos \psi - \omega_y \sin \psi) & \omega_y &= \dot{\varphi} \sin \theta \cos \psi - \dot{\theta} \sin \psi \\ \dot{\psi} &= \omega_z - \dot{\varphi} \cos \theta & \omega_z &= \dot{\psi} + \dot{\varphi} \cos \theta\end{aligned}$$

Производная угловой скорости рассчитывается по следующей формуле:

$$\dot{\omega} = I^{-1} \{N - \dot{I}\omega - \omega \times I\omega\},$$

где \mathbf{N} – суммарный крутящий момент, действующий на лунную кору, а I – её матрица инерции. \mathbf{N} и I отнесены к лунной системе координат, т.е. к системе координат, связанной с лунной корой; оси этой системы координат направлены по главным осям инерции лунной коры.

Крутящий момент \mathbf{N} складывается из следующих слагаемых:

- возмущения от Земли, Солнца, Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера, обусловленные неоднородностью гравитационного потенциала Луны;
- возмущение от взаимодействия неоднородных гравитационных потенциалов Луны и Земли (см. например [2], ур-е 44);
- возмущение от взаимодействия лунной коры с жидким ядром: $\mathbf{N}_{cmb} = k_v(\boldsymbol{\omega}_c - \boldsymbol{\omega}) + (C_c - A_c)(\mathbf{z} \cdot \boldsymbol{\omega}_c)(\mathbf{z} \times \boldsymbol{\omega}_c)$,

где $\mathbf{z} = (0, 0, 1)^T$, $\boldsymbol{\omega}_c$ – угловая скорость вращения жидкого ядра в лунной системе координат, k_v – коэффициент трения между ядром и корой, а A_c и C_c – диагональные члены матрицы инерции ядра:

$$I_c = \begin{pmatrix} A_c & 0 & 0 \\ 0 & B_c & 0 \\ 0 & 0 & C_c \end{pmatrix} = \alpha_c C \begin{pmatrix} 1 - f_c & 0 & 0 \\ 0 & 1 - f_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где f_c – коэффициент сжатия ядра, α_c – отношение главных моментов инерции ядра и коры, принятое равным 0.0007, а C – главный момент инерции Луны. Величины главных моментов вычисляются из массы Луны m_M , радиуса R_M , коэффициента сжатия J_2 и безразмерных уточняемых параметров β и γ :

$$A = \frac{2(1 - \beta \gamma)}{(2\beta - \gamma + \beta \gamma)} m_M R_M^2 J_2$$

$$B = \frac{2(1 + \gamma)}{(2\beta - \gamma + \beta \gamma)} m_M R_M^2 J_2$$

$$C = \frac{2(1 + \beta)}{(2\beta - \gamma + \beta \gamma)} m_M R_M^2 J_2$$

Кроме того, учитывая, что A , B и C – главные моменты Луны (т.е. коры и ядра в сопокупности), в выражение для матрицы инерции лунной коры I входит матрица I_c с отрицательным знаком. Кроме того, матрица I содержит динамические поправки; обусловленные упругостью фигуры Луны и приливной диссипацией энергии. Динамические поправки зависят от положения Земли относительно Луны и от угловой скорости Луны в момент времени $(t - \tau)$, где τ – уточняемая величина приливной задержки. Полное выражение для вычисления $I(t)$ можно найти в [2], ур-е 41.

Производная угловой скорости жидкого ядра, отнесённой к лунной системе координат, рассчитывается по следующей формуле:

$$\dot{\omega}_c = I_c^{-1} \{N_{cmb} - \omega \times I\omega_c\}$$

Используются следующие уравнения для вычисления динамических коэффициентов гравитационного потенциала Луны:

$$C_{20}(t) = \frac{1/2(I_{11}(t) + I_{22}(t)) - I_{33}(t)}{m_M R_M^2}$$

$$C_{22}(t) = \frac{I_{22}(t) - I_{11}(t)}{4m_M R_M^2}$$

$$C_{21}(t) = C_{21}^{(0)} - I_{13}(t)/m_M R_M^2$$

$$S_{21}(t) = S_{21}^{(0)} - I_{32}(t)/m_M R_M^2$$

$$S_{22}(t) = S_{22}^{(0)} - I_{21}(t)/2m_M R_M^2$$

Базовые значения $C_{21}^{(0)}$, $S_{21}^{(0)}$ и $S_{22}^{(0)}$ приняты нулевыми в реализации JPL DE430 [2]; однако, в настоящей работе приняты значения из решения GL660B.

4. Редукции наблюдений

Вычисление модельной величины времени прохождения фотона сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} t_2 - t_1 = \frac{|\bar{L}_{BCRS}(t_2) - \bar{S}_{BCRS}(t_1)|}{c} + \Delta_{grav}(t_1, t_2) + \Delta_{atm}(t_1, t_2) \\ t_3 - t_2 = \frac{|\bar{S}_{BCRS}(t_3) - \bar{L}_{BCRS}(t_2)|}{c} + \Delta_{grav}(t_2, t_3) + \Delta_{atm}(t_2, t_3) \end{cases}$$

В случае, если известно время передачи сигнала (t_1), то система решается относительно t_2 (время отражения сигнала от отражателя) и t_3 (время приёма сигнала). В случае, если известно t_3 , то система решается относительно t_1 и t_2 . $L(t_2)$ – положение лунного отражателя в момент t_2 . $S(t)$ – положение станции в момент времени t . Подразумевается время в шкале TDB. Δ_{atm} – задержка сигнала в тропосфере, Δ_{grav} – задержка сигнала из-за искривления пространства-времени массивными объектами. При расчёте указанных величин используются следующие модели:

- модель релятивистской задержки сигнала [12] от Солнца, Земли, Луны, Юпитера и Сатурна;
- модель задержки сигнала в тропосфере [13];
- модель вращения Земли IAU 2000/2006 с использованием поправок к параметрам вращения Земли из публикуемого ряда IERS C04 [14]. В ходе обработки наблюдений выяснилось, что ряд C04 недостаточно хорошо представляет ПВЗ до 1982 г, в связи с чем для этого периода был использован ряд JPL KEOF [15];
- релятивистское преобразование положений станции и отражателя в BCRS;
- модели твердотельных [16] и океанических [17] приливных смещений станций;
- простейшая модель смещений лунных отражателей из-за земных и солнечных твердотельных приливов;
- дополнительное немоделируемое вращение Луны для компенсации неучтённых диссипационных эффектов, с тремя уточняемыми амплитудами (см. [18], ур-е 1);
- немоделируемые сдвиги наблюдаемых величин для компенсации изменений, возникающих в результате документированных изменений в оптике и измерительной аппаратуре обсерватории; а также в результате изменений невыясненной природы, обнаруживаемых по «скачкам» в остаточных разностях. Уточняются 28 сдвигов: Apache(5), Serga(7), Haleakala(8), McDonald(6), MLRS(1), Matera(1).

Результатом расчёта является величина ($t_3 - t_1$), преобразованная из шкалы времени TDB в шкалу TT, с релятивистской поправкой на собственное время станции.

5. Детали реализации

Результаты данной работы получены с использованием программного комплекса ЭРА-8 [19], который является переработкой предыдущей версии комплекса [20]. Чис-

ленное интегрирование динамических уравнений Солнечной системы реализовано методом Гаусса-Эверхарта с модификациями Авдюшева [21]. Частные производные от начальных и динамических параметров системы интегрировались совместно с основными уравнениями. Уточнение параметров осуществлялось с помощью взвешенного метода наименьших квадратов.

6. Результаты

Были уточнены следующие параметры:

- начальное положение и скорость Луны, начальные углы либрации и скорости их изменения, начальная угловая скорость вращения ядра Луны;
- сумма масс Земли и Луны (отношение масс было определено в EPM из других наблюдений и зафиксировано);
- динамические параметры β , γ , τ , параметры C_{32} , S_{32} , C_{33} потенциала Луны;
- коэффициент сжатия ядра f_c , коэффициент трения ядра о кору K_v/C , H_2 Луны;
- положения пяти лунных отражателей;
- положения станций, скорость станций McDonald и Apache (одна скорость на две станции), скорость станции Cerga. Скорости станций Haleakala и Matera были взяты из ГНСС-решения;
- три дополнительных диссипационных приливных члена для Луны; 28 сдвигов.

Статистика результатов обработки наблюдений приведена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты обработки LLR-наблюдений.

Станция	период наблюдений	нормальных точек	использовано	отброшено	wtms в одну сторону, см
McDonald	1969–1985	3604	3545	59	21.7
MLRS1	1983–1988	631	579	52	6.6
MLRS2	1988–2013	3653	3199	454	3.5
Haleakala	1984–1990	770	750	20	5.8
Cerga (Ruby)	1984–1986	1188	1109	79	17.5
Cerga (YAG)	1987–2005	8324	8269	55	2.8
Cerga (MeO)	2009–2013	654	645	9	4.0
Matera	2003–2013	83	66	17	5.4
Apache	2006–2012	1573	1562	11	1.9

4. Заключение

Получена независимая реализация полной модели орбитально-вращательного движения Луны JPL DE430 и подтверждено её соответствие наблюдательным данным. Подтверждена применимость моделей EGM2008, GL660B (с 3-ей степени) и модели приливных вариаций геопотенциала, рекомендованной IERS2010, для обработки LLR-наблюдений. Требуется исследование расхождений решения, полученного в данной работе, с GL660B в коэффициентах до 2-й степени. Представление лучших из доступных наблюдений (Apache) хуже, чем точность самих наблюдений, что говорит о возможности уточнения модели вращательного движения Луны по имеющимся данным.

Литература

1. Williams J.G., Boggs H.D., Yoder C.F., Ratcliff J.T., Dickey J.O. Lunar rotational dissipation in solid body and molten core // J. Geophys. Res., 2001, V. 106, No. E11, 27933–27968.
2. Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kychynka P. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 // IPN Progress Report 42-196, 2014.
3. Pitjeva E.V. Updated IAA RAS planetary ephemerides-EPM2011 and their use in scientific research. Sol. Syst. Res., 2013, V. 47(5), 386–402.

4. *Krasinsky G.A.* Selenodynamical parameters from analysis of LLR observations of 1970–2001 // Communications of the IAA RAS, 2002, No. 148.
5. *Vasiliev M.V., Yagudina E.I.* Russian lunar ephemeris EPM-ERA 2012 // Sol. Syst. Res., 2014, Vol. 48(2), 158–165.
6. *Fienga A., Manche H., Laskar J., Gastineau M., Verma A.* INPOP new release: INPOP13c. <http://www.imcce.fr/fr/presentation/equip/es/ASD/inpop/inpop13c.pdf>
7. <http://polac.obspm.fr/lrdatae.html>
8. http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/norm_pts.html
9. *Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K.* An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008 // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2008, V. 8.
10. *Petit G., Luzum B.* (eds). IERS Conventions (2010). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010, 179 pp.
11. *Konopliv A.S. et al.* The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission // J. of Geophys. Res.: Planets, 2013, V. 117(7), 1415–1434.
12. *Kopeikin, S.M.* Theory of Relativity in Observational Radio Astronomy. Sov. Astron., 1990, V. 34, 5–9.
13. *Mendes V.B., Pavlis E.C.* High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths // Geophys. Res. Lett., 2004, V. 31(14).
14. <http://datacenter.iers.org/eop/-/somos/5Rgv/latest/214>
15. ftp://keof.jpl.nasa.gov/keof/combinations/latest/comb2013_midnight.eop
16. *Mathews, P.M., Dehant, V., Gipson, J.M.* Tidal station displacements // J. Geophys. Res., 1997, Vol. 102(B9), 20469–20477.
17. *Lyard, F. et al.* Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004 // Ocean Dynamics, 2006, V. 56(5), 394–415.
18. *Williams J.G., Boggs H.D., Folkner W.M.* DE430 Lunar Orbit, Physical Librations, and Surface Coordinates. JPL Interoffice memorandum IOM-335-JW, 2013.
19. *Павлов Д.А., Скрипниченко В.И.* Первые результаты опытной эксплуатации кроссплатформенной версии системы ЭРА // Труды ИПА РАН, 2014, вып. 30, 32–41.
20. *Krasinsky G.A., Vasilyev M.V.* ERA: Knowledge Base for Ephemeris and Dynamical Astronomy. Proceedings of IAU Colloquium 165 Poznań, Poland July 1–5, 1996, 239–244.
21. *Авдюшев В.А.* Интегратор Гаусса-Эверхарта. Новый фортран-код. – ТомГУ, 2006.

REFINEMENT OF PARAMETERS OF LUNAR ORBIT AND LIBRATION BASING ON THE DE430 MODEL

Pavlov D.A.

Institute of Applied Astronomy RAS, St. Petersburg, Russia

In the course the work on the EPM ephemeris a model of lunar orbital and rotational motion was implemented, based on the equations used in JPL DE 430 ephemeris. The Moon is considered an elastic body having a rotating liquid core. The following equations are included in the model: perturbations of the orbit of the Moon in the gravitational potential of the Earth; torque due to the gravitational potential of the Moon; perturbations of the orbit of the Moon due to lunar and solar tides on the Earth; distortion of the Moon's figure as a result of its rotation and Earth's gravity; torque due to the interaction between the lunar crust and the liquid core.

EGM2008 was taken for the gravitational model of the Earth, while GL660B was used for the Moon. Common models recommended by IERS Conventions 2010 were used for the rotation of the Earth, displacement of stations and tropospheric signal delay.

Refinement of parameters was conveyed basing on the lunar laser ranging (LLR) observational data. Observations from the following stations were processed: Haleakala, McDonald/MLRS1/MLRS2, CERGA, Apache, Matera. The lunar ephemeris obtained as a result is comparable to similar ephemeris worldwide. Further research is to be done regarding the tidal effects in the Moon and its internal structure.

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ВРАЩЕНИЕ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, ДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННОЕ С ЭФЕМЕРИДОЙ DE422/LE422

Пашкевич В.В.

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

Данное исследование является продолжением изучения геодезического (релятивистского) вращения Луны, Солнца и больших планет Солнечной системы [1, 2]. На 2000-летнем (1000 г. – 3000 г.) интервале времени с шагом в 1 сутки для каждого из исследуемых тел были образованы массивы значений компонент вектора угловой скорости геодезического вращения относительно их собственных систем координат [3]. При этом положения и скорости тел задавались фундаментальной эфемеридой DE422/LE422 [4]. Исследование проводилось методами наименьших квадратов и спектрального анализа. В результате впервые в возмущающих членах физической либрации для Луны и в углах Эйлера для Солнца, больших планет Солнечной системы и Плутона определены новые наиболее существенные вековые и периодические члены компонент векторов геодезического вращения исследуемых тел Солнечной системы.

1. Введение

Основными целями данного исследования являются:

- а) разработка нового метода для вычисления значений величин геодезического вращения для любого тела Солнечной системы;
- б) впервые в возмущающих членах физической либрации для Луны и углах Эйлера для других тел Солнечной системы определение новых высокоточных значений величин их геодезического вращения, динамически согласованных с JPL эфемеридой DE422/LE422 [4].

2. Метод решения задачи

Задача о геодезическом (релятивистском) вращении тел Солнечной системы (больших планет, Плутона, Луны и Солнца) изучается относительно собственной координатной системы исследуемых тел [3]. Положения и скорости тел задаются фундаментальной эфемеридой DE422/LE422.

Известно, что наибольшим из релятивистских составляющих вектора угловой скорости вращения небесного тела относительно собственного центра масс является вектор угловой скорости геодезического вращения. Вид этого вектора для любых тел солнечной системы определяется следующей формулой:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{Gm_j}{|\bar{R}_i - \bar{R}_j|^3} (\bar{R}_i - \bar{R}_j) \times \left(\frac{3}{2} \dot{\bar{R}}_i - 2\dot{\bar{R}}_j \right). \quad (1)$$

Здесь G – гравитационная постоянная; c – скорость света в вакууме; индексы i и j соответствуют Солнцу, Плутону, большим планетам и Луне; $\bar{R}_i, \dot{\bar{R}}_i, \bar{R}_j, \dot{\bar{R}}_j$ – векторы барицентрического положения и скорости i -го и j -го тела; m_j – масса j -го тела; символ \times означает векторное произведение. Релятивистский вектор угловой скорости для любого тела Солнечной системы вычисляется следующим образом:

$$\bar{\omega}_{ri} = \bar{\omega}_i + \bar{\sigma}_i, \quad (2)$$

где $\bar{\omega}_i$ – ньютоновский вектор угловой скорости для любого тела Солнечной системы.

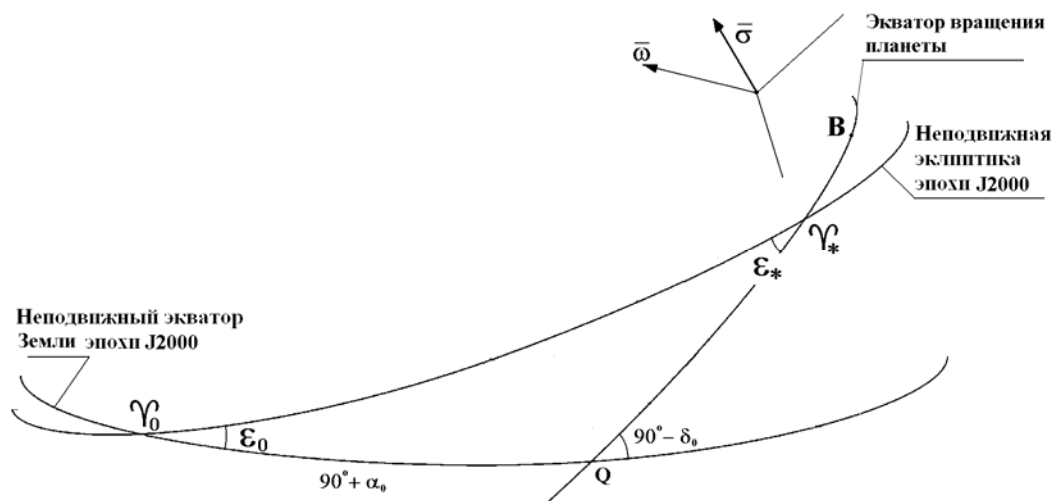


Рис. 1.

Матричные преобразования компонент вектора угловой скорости геодезического вращения данного исследования от геоцентрической системы координат к планетоцентрической координатной системе имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = r(\gamma_* B) p(-\varepsilon_*) r(\gamma_0 \gamma_*) p(\varepsilon_0) r(\Delta) \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix}, \text{ где } \Delta = -0''.05294, \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 = 23^\circ 26' 21''.40928, \quad r(a) = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad p(a) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a \\ 0 & -\sin a & \cos a \end{pmatrix}$$

Величины необходимые для этого преобразования вычисляются путём решения сферического треугольника изображённого на рис. 1, определяющего ориентацию вектора угловой скорости геодезического вращения для любого тела Солнечной системы. Редукционные формулы этих величин имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon_* &= \sin \delta_0 \cos \varepsilon_0 - \cos \delta_0 \sin \varepsilon_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \gamma_0 \gamma_* &= \frac{\cos \delta_0 \cos \alpha_0}{\sin \varepsilon_*}, \quad \sin Q \gamma_* = \frac{\sin \varepsilon_0 \cos \alpha_0}{\sin \varepsilon_*} \\ \varphi &= W - Q \gamma_* + 180^\circ, \quad \theta = -\varepsilon_*, \quad \gamma_* B = W - Q \gamma_* \end{aligned} \quad (4)$$

где α_0 – прямое восхождение северного полюса вращения тела; δ_0 – склонение северного полюса вращения тела; $W = QB$ – угловое расстояние нулевого меридиана тела, отсчитываемое по экватору тела от неподвижного экватора Земли эпохи J2000. Значения этих величин опубликованы в работе [3]. Выражения для скоростей геодезического вращения определяются в возмущающих членах физической либрации для Луны и в углах Эйлера для других тел Солнечной системы следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta \Delta \dot{\psi} &= -\sigma_1 \sin \varphi - \sigma_2 \cos \varphi = \Delta(I\dot{\sigma}) \\ \Delta \dot{\theta} &= -\sigma_1 \cos \varphi + \sigma_2 \sin \varphi = \Delta \dot{\rho} \\ \Delta \dot{\psi} + \Delta \dot{\phi} &= \sigma_3 - (\sigma_1 \sin \varphi + \sigma_2 \cos \varphi) \tan \frac{\theta}{2} = \Delta \dot{\tau} \end{aligned} \right\}, \left. \begin{aligned} \Delta \dot{\psi} &= -\frac{\sigma_1 \sin \varphi + \sigma_2 \cos \varphi}{\sin \theta} \\ \Delta \dot{\theta} &= -\sigma_1 \cos \varphi + \sigma_2 \sin \varphi \\ \Delta \dot{\phi} &= \sigma_3 - \Delta \dot{\psi} \cos \theta \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Здесь ψ, θ, φ – углы Эйлера, τ, ρ и σ – возмущающие члены физической либрации Луны, $I \sim 1^\circ 32'$ – постоянный угол наклона лунного экватора к неподвижной эклиптике эпохи J2000, $\Delta \dot{\psi} = \dot{\psi}_r - \dot{\psi}$; $\Delta \dot{\theta} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}$; $\Delta \dot{\phi} = \dot{\phi}_r - \dot{\phi}$; $\Delta \dot{\sigma} = \dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}$; $\Delta \dot{\rho} = \dot{\rho}_r - \dot{\rho}$; $\Delta \dot{\tau} = \dot{\tau}_r - \dot{\tau}$, точка означает дифференцирование по времени. Эти выражения (5) были получены в результате элементарных преобразований из разности релятивистского (2) и ньютонового вектора угловой скорости тела Солнечной системы, кинематических уравнений Эйлера [5], определяющих проекции вектора угловой скорости на главные оси инерции тела Солнечной системы, и выражений для возмущающих членов физической либрации Луны для неподвижной эклиптики эпохи J2000 [6].

Для каждого тела (за исключением Луны) в углах Эйлера (для Луны в возмущающих членах её физической либрации) с шагом в 1 сутки на 2000 летнем интервале времени (от AD1000 до AD3000) получены файлы скоростей их геодезического вращения. Наиболее существенные члены скорости геодезического вращения исследуемого тела находятся методами наименьших квадратов и спектрального анализа. Аналитически интегрируя систематические и периодические члены скорости геодезического вращения, получаем систематические и периодические члены геодезического вращения.

3. Результаты

Вычисленные новым методом систематические и периодические члены геодезического вращения тел Солнечной системы приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Таблица 1. Систематические члены геодезического вращения.

	Меркурий	Венера	Земля [7]	Земля
	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)
T	426451871.1763	156031996.8457	191988273.44	19198873.9203
T ²	42516.8587	686532.2861	-50386.32	-50431.9734
T ³	-31016.9539	-78618.0389	-754.09	656.9733
	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)
T	-36012.9217	740859.4714	9.55	12.7208
T ²	2955.7609	-60227.9511	1954.11	1951.1507
T ³	185.2315	-628.8788	-4721.80	4125.3775
	$\Delta\phi$ (μas)	$\Delta\phi$ (μas)	$\Delta\phi$ (μas)	$\Delta\phi$ (μas)
T	-214756714.5660	-113010584.0490	2.99	8.7591
T ²	-3822.7979	-687071.9738	54771.03	54775.0582
T ³	21374.8691	78797.6763	802.06	-1244.9150
	Луна	Марс	Юпитер	Сатурн
	$\Delta\tau$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)
T	19494124.5437	7114256.1713	213015.3078	67188.6365
T ²	12.3515	-10336.0320	-3541.1286	54.6002
T ³	-565.0947	-9163.2412	-15.0136	-17.0358
	$\Delta\rho$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)
T	300.5067	-119872.4123	5967.0475	2897.7159
T ²	1780.4437	1073.5488	-144.1639	27.8318
T ³	3126.0421	186.5419	5.7500	-4.7791

T	$\Delta(I\sigma)$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)
T ²	-6544.4452	-405155.9058	98655.1845	1444.1122
T ³	36212.8892	11510.0074	3561.4952	-137.5508
	-27286.6251	728.0654	189.2404	-3.7812
	Уран	Нептун	Плутон	Солнце
T	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)	$\Delta\psi$ (μas)
T ²	11924.5614	3903.9461	2091.7329	870.0239
T ³	21.3021	-4.9188	28.5113	-1.3770
	24.8305	-0.9936	63.8836	0.2568
	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)	$\Delta\theta$ (μas)
T	160.6285	118.7263	532.3802	1.8890
T ²	-1.4159	-0.0724	6.9555	-0.0809
T ³	0.4365	-0.0356	16.2397	0.0080
	$\Delta\varphi$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)	$\Delta\varphi$ (μas)
T	-10.3257	-33.0498	-314.2461	-179.5716
T ²	1.0611	-0.1043	-4.7359	1.3915
T ³	-0.0074	0.0312	-9.6817	-0.0433

Таблица 2. Периодические члены геодезического вращения.

Меркурий	$\Delta\psi$	$((2155''.599 - 266''.735T + \dots)\sin\lambda_1 + (- 9688''.162 - 70''.814T + \dots)\cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-0''.182 + 0''.053T + \dots)\sin\lambda_1 + (0''.819 - 0''.128T + \dots)\cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-1085''.536 + 134''.503T + \dots)\sin\lambda_1 + (4878''.862 + 34''.862T + \dots)\cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Венера	$\Delta\psi$	$((-205''.908 + 12''.505T + \dots)\sin\lambda_2 + (- 232''.214 + 14''.500T + \dots)\cos\lambda_2 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-0''.978 + 0''.227T + \dots)\sin\lambda_2 + (-1''.103 + 0''.258T + \dots)\cos\lambda_2 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((149''.135 - 8''.556T + \dots)\sin\lambda_2 + (168''.187 - 9''.937T + \dots)\cos\lambda_2 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Земля [7]	$\Delta\psi$	$((-34''.28 - 7''.36T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 149''.22 + 6''.47T + \dots)\cos\lambda_3 + (3''.01 + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (0''.73T + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-0''.03 T + \dots)\cos\lambda_3 + (0''.32T + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (- 1''.30 + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-0''.20T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 0''.85T + \dots)\cos\lambda_3 + (- 3''.28 + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (- 0''.8T + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
Земля	$\Delta\psi$	$((-34''.284 - 7''.360T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 149''.222 + 6''.464T + \dots)\cos\lambda_3 + (3''.020 - 0''.015T + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (0''.015 - 0''.747T + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((3'' \cdot 10^{-5} - 0''.007T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 2'' \cdot 10^{-5} - 0''.030 T + \dots)\cos\lambda_3 + (5'' \cdot 10^{-4} - 0''.317T + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (- 1''.301 - 7'' \cdot 10^{-4}T + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((1'' \cdot 10^{-4} - 0''.196T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 1'' \cdot 10^{-4} - 0''.851T + \dots)\cos\lambda_3 + (- 3''.273 - 0''.004T + \dots)\sin(\lambda_3 + D - F) + (0''.001 + 0''.808T + \dots)\cos(\lambda_3 + D - F) + \dots) \cdot 10^{-6}$
Луна	$\Delta\tau$	$((-34''.279 - 7''.559T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 149''.201 + 5''.683T + \dots)\cos\lambda_3 + (30''.212 - 0''.001T + \dots)\sin D + (0''.001 + 0''.001T + \dots)\cos D + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\rho$	$((-9'' \cdot 10^{-4} - 0''.008T + \dots)\sin\lambda_3 + (- 3'' \cdot 10^{-4} - 0''.025 T + \dots)\cos\lambda_3 + (- 0''.004 + 0''.010T + \dots)\sin D + (0''.005 + 0''.007T + \dots)\cos D + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta(I\sigma)$	$((0''.013 - 0''.111T + \dots)\sin\lambda_3 + (0''.052 - 0''.496T + \dots)\cos\lambda_3 + (- 0''.016 + 0''.093T + \dots)\sin D + (- 0''.006 + 0''.004T + \dots)\cos D + \dots) \cdot 10^{-6}$
Марс	$\Delta\psi$	$((543''.435 + 22''.457T + \dots)\sin\lambda_4 + (241''.415 - 40''.426T + \dots)\cos\lambda_4 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-9''.157 - 0''.241T + \dots)\sin\lambda_4 + (- 4''.068 + 0''.742T + \dots)\cos\lambda_4 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-30''.949 + 0''.392T + \dots)\sin\lambda_4 + (- 13''.748 + 3''.044T + \dots)\cos\lambda_4 + \dots) \cdot 10^{-6}$

Юпитер	$\Delta\psi$	$((56''.618 - 0''.526T + \dots) \sin\lambda_5 + (-14''.560 - 2''.255T + \dots) \cos\lambda_5 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((1''.587 - 0''.039T + \dots) \sin\lambda_5 + (-0''.408 - 0''.057T + \dots) \cos\lambda_5 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((26''.227 + 2''.506T + \dots) \sin\lambda_5 + (-6''.739 - 1''.722T + \dots) \cos\lambda_5 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Сатурн	$\Delta\psi$	$((-2''.688 - 5''.015T + \dots) \sin\lambda_6 + (-52''.010 + 3''.313T + \dots) \cos\lambda_6 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-0''.115 - 0''.219T + \dots) \sin\lambda_6 + (-2''.242 + 0''.102T + \dots) \cos\lambda_6 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-0''.061 - 0''.097T + \dots) \sin\lambda_6 + (-1''.119 + 0''.291T + \dots) \cos\lambda_6 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Уран	$\Delta\psi$	$((-22''.392 - 1''.432T + \dots) \sin\lambda_7 + (-3''.418 + 0''.773T + \dots) \cos\lambda_7 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((-0''.302 - 0''.012T + \dots) \sin\lambda_7 + (-0''.046 + 0''.012T + \dots) \cos\lambda_7 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((0''.019 - 0''.002T + \dots) \sin\lambda_7 + (0''.003 - 0''.002T + \dots) \cos\lambda_7 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Нептун	$\Delta\psi$	$((1''.879 + 0''.301T + \dots) \sin\lambda_8 + (-1''.829 - 0''.066T + \dots) \cos\lambda_8 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((0''.057 + 0''.010T + \dots) \sin\lambda_8 + (-0''.056 - 0''.002T + \dots) \cos\lambda_8 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-0''.017 - 0''.002T + \dots) \cos\lambda_8 + (0''.015 + 0''.001T + \dots) \cos\lambda_8 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Плутон	$\Delta\psi$	$((62''.592 - 1''.868T + \dots) \sin\lambda_9 + (0''.307 + 15''.195T + \dots) \cos\lambda_9 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((15''.930 - 0''.489T + \dots) \sin\lambda_9 + (0''.080 + 3''.864T + \dots) \cos\lambda_9 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-9''.404 + 0''.256T + \dots) \sin\lambda_9 + (-0''.047 - 2''.286T + \dots) \cos\lambda_9 + \dots) \cdot 10^{-6}$
Солнце	$\Delta\psi$	$((0''.123 + 0''.003T + \dots) \sin\lambda_5 + (-0''.032 - 0''.006T + \dots) \cos\lambda_5 + (4'' \cdot 10^{-4} - 1'' \cdot 10^{-4}T + \dots) \sin\lambda_1 + (-0''.002 + 4'' \cdot 10^{-6}T + \dots) \cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\theta$	$((0''.001 + 1'' \cdot 10^{-4}T + \dots) \sin\lambda_5 + (-3'' \cdot 10^{-4} - 1'' \cdot 10^{-4}T + \dots) \cos\lambda_5 + (-1'' \cdot 10^{-5} + 1'' \cdot 10^{-6}T + \dots) \sin\lambda_1 + (1'' \cdot 10^{-4} + 2'' \cdot 10^{-6}T + \dots) \cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$
	$\Delta\varphi$	$((-0''.017 + 1'' \cdot 10^{-4}T + \dots) \sin\lambda_5 + (0''.004 + 0''.001T + \dots) \cos\lambda_5 + (-2'' \cdot 10^{-4} + 3'' \cdot 10^{-5}T + \dots) \sin\lambda_1 + (0''.001 - 1'' \cdot 10^{-5}T + \dots) \cos\lambda_1 + \dots) \cdot 10^{-6}$

В табл. 1 и 2: $D = \lambda_{10} - \lambda_3 + 180^\circ$, λ_j ($j=1, \dots, 9$) – средние долготы планет и Плутона; λ_{10} – средняя геоцентрическая долгота Луны; T – Динамическое Барицентрическое Время (Dynamical Barycentric Time) (TDB) измеряется в Юлианских тысячелетиях (tjy) (365250 дней) от эпохи J2000. Средние долготы планет и Луны взяты из работы [7]. Средняя долгота Плутона взята из предыдущего исследования [1].

Существует полуаналитическое описание геодезического вращения Земли [7], построенное с использованием полуаналитических теорий гелиоцентрического движения больших планет VSOP87 [8] и полуаналитической теории вращения Земли SMART97 [9]. Из табл. 1 и 2 видно, что систематические и периодические члены геодезического вращения Земли данного исследования хорошо совпадают с аналогичными членами в работе [7]. (Отличие в кубическом члене по знаку в табл. 1, по всей видимости, связано с использованием разных эфемерид в работе [7] и данном исследовании.) Это свидетельствует об эффективности и надежности предложенного нового метода для вычисления значений величин геодезического вращения для любого тела Солнечной системы.

4. Заключение

В данном исследовании разработан новый метод для вычисления величин геодезического вращения любых тел Солнечной системы. Результаты, полученные с помощью этого метода, имеют хорошее подтверждение для геодезического вращения Земли.

Впервые в углах Эйлера получены новые высокоточные значения геодезического вращения больших планет, Плутона и Солнца, динамически согласованные с эфемеридой DE422/LE422. Впервые для возмущающих членов физической либрации получены новые высокоточные значения геодезического вращения Луны, динамически согласованные с эфемеридой DE422/LE422. Полученные аналитические значения для геодезического вращения Луны будут использованы для численного исследования вращения Луны в релятивистском приближении. Из результатов данного исследования следует, что для Солнца, планет гигантов и Плутона геодезическое вращение является несущественным. Однако для планет земной группы и Луны геодезическое вращение является

существенным и должно учитываться при построении высокоточных теорий вращательного движения этих тел Солнечной системы. Геодезическое вращение должно также учитываться, если влияние динамической фигуры тел на их орбитально-вращательное движение исследуется в пост-ньютоновом приближении. В частности, при обработке результатов лазерной локации Луны должна использоваться релятивистская теория вращения Луны, так же как релятивистская теория вращения Земли.

Благодарности

Исследования проводились в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (РАН) и в Центре космических исследований Польской академии наук (ПАН).

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках сотрудничества между Польской и Российской академиями наук: тема № 34 и персонального гранта Александра Бжезиньского.

Литература

1. *Eroshkin G.I., Pashkevich V.V.* Geodetic rotation of the Solar system bodies, Artificial Satellites, 2007, Vol. 42, No. 1, 59–70.
2. *Eroshkin G.I., Pashkevich V.V.* On the geodetic rotation of the major planets, the Moon and the Sun, Artificial Satellites, 2009, Vol. 44, No. 2, 43–52.
3. *Seidelmann P.K., Archinal B.A., A'Hearn M.F., Cruikshank D.P., Hil-ton J.L., Keller H.U., Oberst J., Simon J.L., Stooke P., Tholen D.J., and Thomas P.C.* Report of the IAU/IAG Working Group on Carto-graphic Coordinates and Rotational Elements: 2003 // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2005, 91, 203–215.
4. *Folkner W.F.* (2011) JPL Planetary and Lunar Ephemerides: Export Information <http://iaucomm4.jpl.nasa.gov/README.html>
5. *Вуллард Э.* Теория вращения Земли вокруг центра масс. – М.: Физматгиз, 1963. – 142 с.
6. *Пашкевич В.В., Ерошкин Г.И.* Построение полуаналитического и численного решений задачи о вращении Луны // *Астрономический Вестник*, 2013, 47, 1, 70–73.
7. *Brumberg V.A., Bretagnon P.* Kinematical Relativistic Corrections for Earth's Rotation Parameters. in Proc. of IAU Colloquium 180, eds. K. Johnston, D. McCarthy, B. Luzum and G. Kaplan, U.S. Naval Observatory, 2000, 293–302.
8. *Bretagnon P. and Francou G.* Planetary theories in rectangular and spherical variables // *Astronomy and Astrophysics*, 1988, 202, 309–315.
9. *Bretagnon P., Francou G., Rocher P., Simon J.L.* SMART97: A new solution for the rotation of the rigid Earth // *Astron. Astrophys.*, 1998, 329, 1, 329–338.

GEODETIC ROTATION OF THE SOLAR SYSTEM BODIES DYNAMICALLY ADJUSTED TO THE DE422/LE422 EPHEMERIS

Pashkevich V.V.

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

This investigation is continuation of our studies of the geodetic (relativistic) rotation of the Solar system bodies [1, 2]. For each body (the Moon, the Sun, the major planets and Pluto) the files of the values of the components of the angular velocity of the geodetic rotation are constructed over the time span from AD1000 to AD3000 with one day spacing, by using DE422/LE422 ephemeris [4], with respect to the proper coordinate systems of the bodies [3]. In the first time in the perturbing terms of the physical librations for the Moon and in Euler angles for other bodies of the Solar system the most essential terms of the geodetic rotation are found by means of the least squares method and spectral analysis methods.

ПОСТРОЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ ХОРИ-ДЕПРИ

Перминов А.С., Кузнецов Э.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

В работе представлена аналитическая схема построения уравнений движения планетной задачи в осредненных элементах методом Хори-Депри. Данный метод основан на использовании скобок Пуассона и отличается эффективностью и крайней простотой реализации. Неосредненный гамильтониан задачи строится в виде ряда Пуассона по степеням малого параметра и элементов орбит. В качестве переменных используются элементы второй системы Пуанкаре. После применения процедуры осреднения вычисляются правые части уравнений движения и функции замены переменных. Аналитические преобразования проводятся с использованием системы компьютерной алгебры “Piranha” для случая четырехпланетной задачи.

1. Введение

Использование уравнений движения в осредненных элементах позволяет построить вековую теорию движения планет и исследовать орбитальную эволюцию на космогонических интервалах времени. В качестве метода осреднения используется метод Хори-Депри, основанный на применении формализма скобок Пуассона. Рассматривается построение осредненных уравнений движения для четырехпланетной системы.

Исходный неосредненный гамильтониан задачи записывается в системе координат Якоби, использование которой наиболее удобно при рассмотрении динамической эволюции в рамках планетной задачи. Разложение гамильтониана в ряд Пуассона проводится по степеням малого параметра и по элементам второй системы Пуанкаре. В качестве малого параметра задачи выбрано отношение суммы масс планет к массе звезды (Солнца). Для Солнечной системы это отношение может быть выбрано равным 0.001. Выбор в качестве переменных второй системы Пуанкаре обусловлен тем, что в этой системе содержится только одна угловая переменная – средняя долгота, что существенно упрощает угловую часть разложения.

С помощью метода Хори-Депри проводится осреднение гамильтониана задачи и построение производящей функции преобразования. На их основе вычисляются функции замены переменных и правые части уравнений движения.

Аналитические преобразования проводятся с помощью системы компьютерной алгебры “Piranha” [1] (автор Франческо Бискани, Институт астрономии Общества Макса Планка, Гейдельберг, Германия). “Piranha” представляет собой эшелонированный пуассоновский процессор, реализованный на языке программирования C++.

2. Разложение гамильтониана

При разложении гамильтониана в ряд Пуассона используется алгоритм, подробно описанный авторами в работе [2]. Запишем гамильтониан в координатах Якоби

$$h = -\sum_{i=1}^N \frac{M_i \kappa_i^2}{2a_i} + \mu \times f m_0 \left\{ \sum_{i=2}^N \frac{m_i (2\mathbf{r}_i \mathbf{R}_i + \mu R_i^2)}{r_i \tilde{R}_i (r_i + \tilde{R}_i)} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{m_i m_j}{|\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho}_j|} \right\}, \quad (1)$$

где μ – малый параметр, μm_i – масса i -той планеты в массах звезды (m_0), M_i – ее приведенная масса, κ_i^2 – гравитационный параметр, a_i – большая полуось, \mathbf{r}_i – радиус-вектор планеты в системе координат Якоби, $\boldsymbol{\rho}_i$ – радиус-вектор в барицентрических координатах, $N = 4$ – число планет в системе. Величины \mathbf{R}_i , \tilde{R}_i и $|\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho}_j|$ определяются как

$$\mathbf{R}_i = \sum_{k=1}^i \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k, \quad \tilde{R}_i = \sqrt{r_i^2 + 2\mu \mathbf{r}_i \mathbf{R}_i + \mu^2 R_i^2}, \quad |\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho}_j| = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j + \mu \sum_{k=j}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k, \quad (2)$$

где $\bar{m}_k = 1 + \mu t_1 + \dots + \mu t_k$. Суммирование по i, j удовлетворяет условию $1 \leq j < i \leq N$.

В выражении (1) первая сумма представляет собой невозмущенный гамильтониан задачи. Выражение в фигурных скобках – возмущающая функция. Двойная сумма представляет главную часть возмущающей функции, описывающую взаимодействие между планетами. Однократную сумму назовем второй частью возмущающей функции.

Согласно [3] гамильтониан задачи можно представить в виде ряда Пуассона

$$h = h_0 + \mu h_1 = h_0 + \sum_{k,n} A_{kn} x^k \cos n\lambda, \quad (3)$$

где h_0 – невозмущенный гамильтониан задачи, μh_1 – возмущающая функция, A_{kn} – числовые коэффициенты (которые при проведении аналитических преобразований представляются в дробно-рациональном виде, что позволяет исключить ошибки округления), x^k – произведение элементов орбит в соответствующих степенях, n – вектор средних движений, а λ – вектор средних долгот. Запишем разложение величины h_1 .

Слагаемые разложения главной части возмущающей функции

$$\frac{1}{|\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho}_j|} = \frac{1}{\Delta_{ij}} - \mu \frac{A_{ij}}{\Delta_{ij}^3} + \mu^2 \left(-\frac{1}{2} \frac{B_{ij}}{\Delta_{ij}^3} + \frac{3}{2} \frac{A_{ij}^2}{\Delta_{ij}^5} \right) + \dots \quad (4)$$

Слагаемые разложения второй части возмущающей функции

$$\frac{2\mathbf{r}_i \mathbf{R}_i + \mu R_i^2}{r_i \tilde{R}_i (r_i + \tilde{R}_i)} = \frac{C_i}{r_i^3} + \mu \left(\frac{1}{2} \frac{D_i}{r_i^3} - \frac{3}{2} \frac{C_i^2}{r_i^5} \right) + \mu^2 \left(-\frac{3}{2} \frac{C_i D_i}{r_i^5} + \frac{5}{2} \frac{C_i^3}{r_i^7} \right) + \dots \quad (5)$$

Величины A_{ij}, B_{ij}, C_i, D_i вводятся для удобства и определяются следующим образом

$$A_{ij} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \sum_{k=j}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k, \quad B_{ij} = \left(\sum_{k=j}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k \right)^2, \quad C_i = \mathbf{r}_i \sum_{k=j}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k, \quad D_i = \left(\sum_{k=1}^{i-1} \frac{m_k}{\bar{m}_k} \mathbf{r}_k \right)^2. \quad (6)$$

Величину $1/\Delta_{ij}$ можно разложить в ряд по полиномам Лежандра

$$\frac{1}{\Delta_{ij}} = \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} = \frac{1}{r_j} (1 + \rho_{ij}^2 - 2\rho_{ij} \cos H_{ij})^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{r_j} \sum_{k=0}^{\infty} \rho_{ij}^k P_k(\cos H_{ij}), \quad (7)$$

где $\rho_{ij} = r_i / r_j$, H_{ij} – угол между радиус-векторами \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j , P_k – полином Лежандра степени k . Разложение абсолютно сходится, если отношение $\rho_{ij} < 1$.

Далее все скалярные произведения и степени модулей радиус-векторов могут быть разложены в ряды Пуассона по элементам второй системы Пуанкаре с использованием выражений данных в [2, 3]. Таким образом, будет построено разложение гамильтониана в форме (3).

Основное отличие от разложений, представленных авторами в работе [2] состоит в том, что в формуле (7) полиномы Лежандра теперь выражаются через величины косинусов углов $\cos H_{ij}$ между радиус-векторами \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j . Это сделано для сокращения числа переменных используемых в разложениях. Во всех рядах косинусы углов сохраняются в виде символьных переменных.

Другое важное отличие заключается в том, что в настоящей работе используется новая версия системы “Piranha”. Она отличается более высокой скоростью выполнения вычислений и более эффективным использованием оперативной памяти. Также в новой версии реализована поддержка эшелонированных рядов Пуассона, использование которых необходимо для реализации алгоритмов метода Хори-Депри.

Построено два разложения гамильтониана задачи в ряд Пуассона по элементам орбит – до второй и третьей степеней малого параметра соответственно. Свойства обоих разложений представлены в табл. 1 и 2. Для слагаемых возмущающей функции и гамильтониана в целом приведены: максимальные степени эксцентрических и облических элементов Пуанкаре (n_1, n_2, n_3), максимальные степени косинусов углов (p_1, p_2, p_3) и число слагаемых при различных степенях малого параметра (N_1, N_2, N_3). В последнем столбце приведено общее число слагаемых в каждой группе (для гамильтониана также учитываются 4 слагаемых из невозмущенной части).

Таблица 1. Некоторые свойства разложения гамильтониана до μ^2

индексы слагаемых	слагаемые при μ^1		слагаемые при μ^2		число слагаемых
	n_1, p_1	N_1	n_2, p_2	N_2	
i, j	главная часть возмущающей функции				
2, 1	5, 25	79688	3, 10	20347	100035
3, 2	5, 25	79688	3, 10	20347	100035
4, 3	5, 25	79688	3, 10	20347	100035
3, 1	5, 20	52787	2, 10	30112	82899
4, 2	5, 20	52787	2, 10	30112	82899
4, 1	5, 15	31178	2, 5	14782	45960
k	вторая часть возмущающей функции				
2, 3, 4	5, –	2646	3, –	2436	5082
сумма величин	гамильтониан задачи в целом				
	5, 25	375816	3, 10	141129	516949

Таблица 2. Некоторые свойства разложения гамильтониана до μ^3

индексы слагаемых	слагаемые при μ^1		слагаемые при μ^2		слагаемые при μ^3		число слагаемых
	n_1, p_1	N_1	n_2, p_2	N_2	n_3, p_3	N_3	
i, j	главная часть возмущающей функции						
2, 1	8, 32	947908	4, 20	197168	3, 10	55279	1200355
3, 2	8, 32	947908	4, 20	197168	3, 10	55279	1200355
4, 3	8, 32	947908	4, 20	197168	3, 10	55279	1200355
3, 1	6, 20	111949	3, 10	121488	2, 5	51320	284757
4, 2	6, 20	111949	3, 10	121488	2, 5	51320	284757
4, 1	6, 10	32474	3, 5	61046	1, 5	22141	115661
k	вторая часть возмущающей функции						
2, 3, 4	8, –	19542	4, –	8076	3, –	7140	34758
сумма величин	гамильтониан задачи в целом						
	8, 32	3119638	4, 20	903602	3, 10	297758	4321002

В табл. 3 для планет-гигантов Солнечной системы представлены оценки значений слагаемых и точность аппроксимации гамильтониана двумя построенными разложениями. Элементы орбит взяты относительно средней эклиптики на эпоху равноденствия J2000.0. Массы планет соответствуют эфемериде DE430. В табл. 4 приведены значения точности аппроксимации гамильтониана до второй степени малого параметра для двух внесолнечных планетных систем: 47UMa и HD69830. Элементы орбит и массы планет взяты из [4]. Точность дается как относительная разность значений аналитической формулы и оценки ее разложения в ряд. Приведены оценки наихудших значений точности аппроксимации, определяемые варьированием средних долгот планет.

Таблица 3. Оценка точности разложения гамильтониана (Солнечная система)

индексы	разложение до μ^2	точность	разложение до μ^3	точность
i, j	главная часть возмущающей функции			
2, 1	$-7.00587 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$-7.00588747 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-9}$
3, 2	$-6.6832878 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$-6.68328783 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-12}$
4, 3	$-1.876166 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-1.87616949 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-8}$
3, 1	$-2.31483506 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$-2.31483505 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-10}$
4, 2	$-4.92903269 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$-4.92903269 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-13}$
4, 1	$-1.65422172 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$-1.65422172 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-10}$
k	вторая часть возмущающей функции			
2, 3, 4	$1.7504193 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1.75041953 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11}$
	возмущающая функция			
	$-7.53591 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$-7.53592769 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-9}$
	гамильтониан задачи			
	$-4.56917912 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$-4.56917913 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-12}$

Таблица 4 – Оценка точности разложения гамильтониана (47UMa и HD69830)

индексы	47UMa	точность	HD69830	точность
i, j	главная часть возмущающей функции			
2, 1	-0.283533	$7 \cdot 10^{-7}$	$-1.3349 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$
3, 2	-0.076334	$3 \cdot 10^{-6}$	$-4.68597 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-7}$
3, 1	-0.344733	$7 \cdot 10^{-6}$	$-4.409101 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-8}$
k	вторая часть возмущающей функции			
2, 3	$1.30203 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1.3412 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$
	возмущающая функция			
	-0.704469	$4 \cdot 10^{-6}$	$-2.24430 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-6}$
	гамильтониан задачи			
	$-1.67845 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$-1.65819 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-9}$

3. Метод Хори-Депри

Метод Хори-Депри [5] задает осредняющую замену переменных, позволяющую перейти от оскулирующих элементов орбит к их средним значениям. Обозначим средние значения медленных x и быстрых λ (средние долготы) переменных через X и Λ соответственно. Осредненный по средним долготам гамильтониан записывается в виде ряда по степеням малого параметра

$$H(X) = H_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \mu^m H_m(X), \quad (8)$$

где величины $H_m(X)$ определяются из главного уравнения метода

$$H_m(X) = h_m + \sum_{r!} \frac{1}{r!} \left\{ T_{j_r}, \left\{ \dots, \left\{ T_{j_1}, h_{j_0} \right\} \right\} \right\}. \quad (9)$$

Суммирование идет по области $0 \leq j_0 \leq m-1$; $j_1, j_2, \dots, j_r \geq 1$; $\sum_{s=0}^k j_s = m$; $1 \leq r \leq m$. Фигурными скобками здесь обозначены скобки Пуассона по элементам Пуанкаре. Величины h_m – компоненты неосредненного гамильтониана, а производящая функция преобразования от оскулирующих элементов к средним определяется как

$$T(X, \Lambda) = \sum_{m=1}^{\infty} \mu^m T_m(X, \Lambda). \quad (10)$$

На каждом шаге метода уравнение (9) может быть записано в форме

$$H_m(X) = \{T_m, h_0\} + \Phi_m \text{ или, что равносильно, } \Phi_m = H_m + \sum_{k=1}^N \nu_k \frac{\partial T_m}{\partial \Lambda_m}, \quad (11)$$

где величина Φ_m определяется на предыдущем шаге метода и в общем случае представляет собой эшелонированный ряд Пуассона следующего вида

$$\Phi_m(X, \Lambda) = \sum B_{pn} X^p \cos n\Lambda, \quad (12)$$

где B_{pn} – коэффициенты, включающие знаменатели в виде произведений линейных комбинаций частот ν быстрых переменных.

Положим, что $H_m(X) = \sum B_{pn} X^p$, $n \in \{n_1 = \dots = n_N = 0\}$, тогда решение (11) можно представить в следующем виде $T_m(X, \Lambda) = \sum \frac{B_{pn}}{n\nu} X^p \sin n\Lambda$, $n \in \{n_1^2 + \dots + n_N^2 \neq 0\}$.

Уравнения движения в средних элементах

$$\frac{dX}{dt} = \{H, X\}, \quad \frac{d\Lambda}{dt} = \{H, \Lambda\}. \quad (13)$$

Преобразование между средним элементами дается с помощью функций замены переменных u_m, w_m , которые можно легко получить из выражения (9)

$$\begin{aligned} X &= x + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \mu^m u_m(x, \lambda), \quad u_m = \sum \frac{1}{r!} \{T_{j_r}, \{ \dots, \{T_{j_1}, X\} \} \}, \\ \Lambda &= \lambda + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \mu^m w_m(x, \lambda), \quad w_m = \sum \frac{1}{r!} \{T_{j_r}, \{ \dots, \{T_{j_1}, \Lambda\} \} \}, \end{aligned} \quad (14)$$

где область суммирования $j_1, j_2, \dots, j_r \geq 1$; $\sum_{s=0}^k j_s = m$; $1 \leq r \leq m$.

Построены осредненный гамильтониан задачи и производящая функция преобразования с учетом слагаемых до первой степени малого параметра. Получены уравнения движения и функции замены переменных на первом шаге метода Хори–Депри. Данные о количестве слагаемых в построенных рядах представлены в табл. 5, 6 и 7.

В табл. 6 и 7 дано количество слагаемых в уравнениях движения и функциях замены переменных для каждого из элементов Пуанкаре всех четырех планетных орбит. Элемент $L \sim \sqrt{a}$, ξ_1, η_1 – эксцентрисические элементы Пуанкаре, ξ_2, η_2 – облические.

Таблица 5. Число слагаемых осредненного гамильтониана и производящей функции

	H_0	H_1	T_1
первое разложение	4	29747	487198
второе разложение	4	207258	6607811

Таблица 6. Число слагаемых в рядах (на основе первого разложения гамильтониана)

уравнения движения				функции замены переменных			
L_1	0	ξ_{11}, η_{11}	13830	L_1	470706	ξ_{11}, η_{11}	433005
L_2	0	ξ_{12}, η_{12}	14380	L_2	509704	ξ_{12}, η_{12}	460868
L_3	0	ξ_{13}, η_{13}	14380	L_3	509762	ξ_{13}, η_{13}	460901
L_4	0	ξ_{14}, η_{14}	13830	L_4	470880	ξ_{14}, η_{14}	433104
λ_1	17562	ξ_{21}, η_{21}	11955	λ_1	497400	ξ_{21}, η_{21}	338478
λ_2	19219	ξ_{22}, η_{22}	11955	λ_2	544402	ξ_{22}, η_{22}	338478
λ_3	19226	ξ_{23}, η_{23}	11955	λ_3	544544	ξ_{23}, η_{23}	338478
λ_4	17583	ξ_{24}, η_{24}	11955	λ_4	497826	ξ_{24}, η_{24}	338478

Таблица 7. Число слагаемых в рядах (на основе второго разложения гамильтониана)

уравнения движения				функции замены переменных			
L_1	0	ζ_{11}, η_{11}	126588	L_1	6629954	ζ_{11}, η_{11}	6254429
L_2	0	ζ_{12}, η_{12}	140799	L_2	7801278	ζ_{12}, η_{12}	7171783
L_3	0	ζ_{13}, η_{13}	140835	L_3	7801342	ζ_{13}, η_{13}	7171812
L_4	0	ζ_{14}, η_{14}	126696	L_4	6630146	ζ_{14}, η_{14}	6254516
λ_1	147362	ζ_{21}, η_{21}	105814	λ_1	6824308	ζ_{21}, η_{21}	4896428
λ_2	175749	ζ_{22}, η_{22}	105814	λ_2	8131632	ζ_{22}, η_{22}	4896428
λ_3	175786	ζ_{23}, η_{23}	105814	λ_3	8133236	ζ_{23}, η_{23}	4896428
λ_4	147473	ζ_{24}, η_{24}	105814	λ_4	6829120	ζ_{24}, η_{24}	4896428

4. Заключение

Построено два варианта разложения гамильтониана четырехпланетной задачи в ряд Пуассона по малому параметру и по элементам орбит. Определена точность построения полученных разложений для следующих систем: Солнечная система, 47UMa, HD69830. Для Солнечной системы гамильтониан аппроксимируется первым разложением с точностью 10^{-9} , и вторым – 10^{-12} . Для обеих внесолнечных планетных систем точность аппроксимации гамильтониана его первым разложением в ряд составляет 10^{-9} .

На основе первого разложения гамильтониана построены осредненный гамильтониан и производящая функция преобразования от оскулирующих элементов к средним. Получены уравнения движения и функции замены переменных на первом шаге метода Хори–Депри. Приведены оценки количества слагаемых, входящих в полученные ряды.

Дальнейшее уточнение полученных уравнений движения на втором шаге метода Хори–Депри позволит построить вековую теорию движения применимую к исследованию орбитальной эволюции большинства известных внесолнечных планетных систем.

Литература

1. *Biscani F.* The Piranha computer algebra system. <https://github.com/bluescarni/piranha>. 2015
2. *Перминов А.С., Кузнецов Э.Д.* Разложение гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона по элементам второй системы Пуанкаре // *Астрон. вестн.*, 2015. Т. 49, №6. С. 469–480. (*Perminov A.S., Kuznetsov E.D.* Expansion of the Hamiltonian of the Planetary Problem into the Poisson Series in Elements of the Second Poincare System // *Solar System Research*. 2015 V. 49, №6, 430–441.)
3. *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
4. *Schneider J.* The extrasolar planets encyclopedia. <http://exoplanet.eu>. 2015
5. *Холшевников К.В.* Асимптотические методы небесной механики. – Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1985. – 208 с.

CONSTRUCTION OF AVERAGED MOTION EQUATIONS OF PLANETARY SYSTEM PROBLEM BY HORI–DEPRIT METHOD

Perminov A.S., Kuznetsov E.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Analytical scheme for construction of motion equations in averaged elements by Hori-Deprit method is presented in this work. This method is based on using of Poisson brackets and is an efficient and simple implementation. The Hamiltonian of the problem is constructed as Poisson series in degrees of small parameter and orbital elements. We use the second system of Poincare elements. After applying of the averaging procedure right hands of motion equations and functions for the change of variables are calculated. Analytical transformations performed using computer algebra system Piranha for the case of four planets.

О ПОЛОЖЕНИЯХ ОБЛАСТЕЙ, ВЕДУЩИХ К СОУДАРЕНИЯМ АСТЕРОИДА АПОФИС С ЗЕМЛЕЙ

Петров Н.А., Соколов Л.Л., Васильев А.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет,
Санкт-Петербург, Россия*

Исследуются области начальных данных, ведущие к соударениям астероида Апофис с Землей в текущем столетии, и эволюция этих областей со временем. Их знание необходимо при планировании предотвращения соударений. Несмотря на уточнение орбиты Апофиса из наблюдений в 2013 году, имеется много (более 100) возможных соударений и Апофис по-прежнему остается опасным астероидом. Приводятся положения и размеры щелей, ведущих к соударениям, в разные моменты времени. На веб-сайте [9] приводятся характеристики 9 возможных соударений Апофиса с Землей в текущем столетии из числа наиболее опасных. Сравнение их с нашими результатами демонстрирует удовлетворительное согласие. Обсуждается методика нахождения траекторий с соударениями и устойчивость основных характеристик этих траекторий при малых изменениях модели движения (альтернативные модели движения планет, методы интегрирования и т.п.). Аналогичная структура фрактального типа для начальных данных, ведущих к соударениям, должна иметь место и для других опасных астероидов из-за резонансных возвратов.

Введение

Заблаговременное обнаружение и исследование возможных соударений и сближений астероидов с Землей необходимо для обеспечения астероидно-кометной безопасности. Только на основе этих данных можно проектировать мероприятия по предотвращению соударений. Трудность прогнозирования сближений и соударений, связанных с резонансными возвратами после сближений с Землей, обусловлена потерей точности при этих сближениях. Главный объект исследования – астероид Апофис. Нас интересует вопрос устойчивости (надежности) результатов, т.е. как меняются основные характеристики опасных траекторий при изменении номинальной орбиты и модели движения планет и как выглядят опасные (и безопасные) области начальных данных в разные моменты времени?

Для астероида Апофис найдено очень много возможных орбит соударений, связанных с резонансными возвратами. Астероид остается опасным, несмотря на существенное уточнение его орбиты из наблюдений в 2012–2013 годах [8]. Точность его орбиты весьма высока по сравнению с другими опасными астероидами. Всего нами было получено порядка пятисот соударений Апофиса с Землей, большинство из них сегодня уже невозможны. Результаты исследований представлены в различных публикациях [1–7]. На рис. 1 приведена самая широкая область, в которой проводились исследования.

На сайте НАСА [9] в разделе Impact Risk для астероида Апофис представлено 12 орбит соударений на интервале времени 2060–2105 годы, из которых 9 орбит соударений предполагаются в текущем столетии в окрестности номинальной орбиты. Из 9 орбит 2 в стороне с малыми вероятностями, 7 вблизи номинальной орбиты с вероятностями больше 10^{-6} – 10^{-8} . Сравнение орбит соударений, полученных нами, с орбитами на сайте НАСА показывает хорошее совпадение. В табл. 1 представлены данные об орбитах соударений с сайта НАСА.

На сайте NEODyS [10] в разделе Risk Page для астероида Апофис представлено 10 орбит соударений на интервале времени 2068–2105 годы, из которых 7 орбит соударений (интервал времени 2068–2078 годы) предполагаются в текущем столетии на разных иногда на значительных удалениях от номинальной орбиты: в апреле и октябре 2068

года, в апреле и октябре (2 соударения) 2069 года, в апреле 2077 и 2078 года. Сравнение орбит соударений на сайте NEODyS показывает заметные отличия от результатов НАСА и наших результатов.

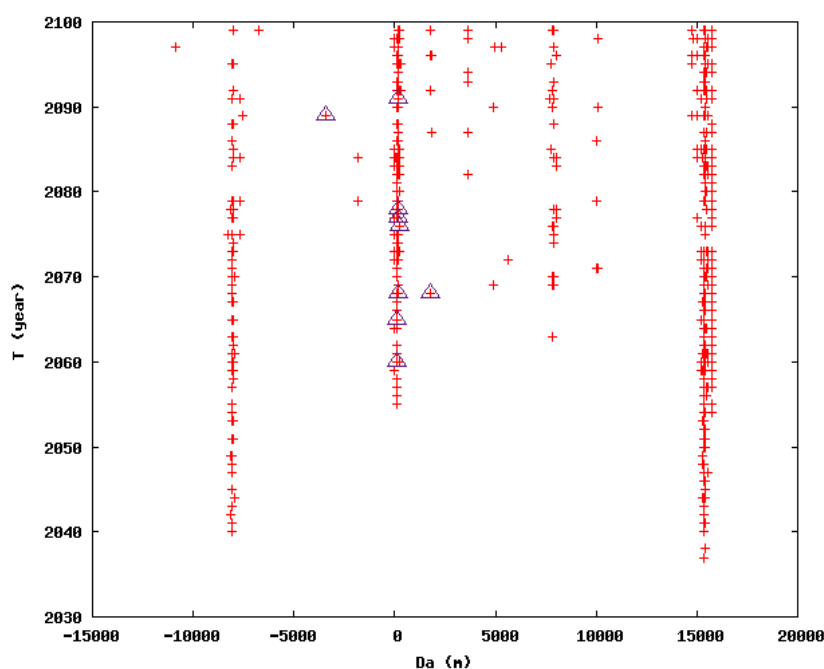


Рис. 1. Полная область начальных значений большой полуоси орбиты астероида Апофис, в которой проводились поиски орбит соударения с Землей.

Таблица 1. Данные об орбитах соударений на сайте НАСА

These results were computed on Oct 08, 2014

99942 Apophis (2004 MN4)									
Earth Impact Table									
Date	Distance	Width	Sigma Impact	Sigma LOV	Stretch LOV	Impact Probability	Impact Energy	Palermo Scale	Torino Scale
YYYY-MM-DD.DD	(rEarth)	(rEarth)			(rEarth)		(MT)		
2060-04-12.55	0.64	< 1.e-04	0.000	0.872	6.60e+06	1.0e-07	1.15e+03	-4.68	0
2065-04-11.77	0.17	< 1.e-04	0.000	0.923	4.15e+06	2.6e-07	1.15e+03	-4.32	0
2068-04-12.64	0.02	< 1.e-04	0.000	1.007	1.31e+05	6.7e-06	1.15e+03	-2.93	0
2068-10-15.40	0.51	< 1.e-04	0.000	4.773	1.88e+06	7.9e-12	1.15e+03	-8.86	0
2076-04-13.02	0.11	< 1.e-04	0.000	1.075	1.73e+06	5.4e-07	1.15e+03	-4.09	0
2077-04-13.45	0.40	< 1.e-04	0.000	1.004	4.56e+06	1.8e-07	1.15e+03	-4.57	0
2078-04-13.76	0.06	< 1.e-04	0.000	0.925	5.02e+06	2.2e-07	1.15e+03	-4.48	0
2089-10-15.56	0.17	< 1.e-04	0.000	-3.856	8.81e+06	1.0e-10	1.15e+03	-7.89	0
2091-04-13.38	0.83	< 1.e-04	0.000	0.927	2.23e+06	2.2e-07	1.15e+03	-4.56	0
2103-04-14.44	0.60	< 1.e-04	0.000	1.002	1.33e+06	5.4e-07	1.15e+03	-4.24	0
2105-04-13.77	0.92	< 1.e-04	0.000	1.005	3.33e+06	9.0e-08	1.15e+03	-5.03	0
2105-10-16.32	0.14	< 1.e-04	0.000	4.773	8.71e+05	2.2e-11	1.15e+03	-8.65	0

Метод поиска соударений основывается на варьировании начальных данных; мы ограничиваемся одномерным многообразием. Использовались интегратор Эверхарта и модели Солнечной системы – DE 405 и DE 430. Использовались и старая номинальная

орбита Апофиса 2006 года, и новая, 2014 года, НАСА, а также новая, NEODyS (2015). Отличия малы. Для преодоления потери точности использовалось дополнительное варьирование начальных данных в промежуточной точке после 2029 года, мы использовали момент времени 01.05.2035.

Характеристики траекторий соударений различных групп исследователей

Основные характеристики траекторий соударений:

1. Дата и момент соударения.
2. Относительное положение ведущей к соударению щели (большая полуось или минимальное геоцентрическое расстояние в 2051 году).
3. Размер щели (диапазон ведущих к соударению значений большой полуоси в некоторый момент или диапазон ведущих к соударению минимальных геоцентрических расстояний в 2051 году).
4. Минимальное геоцентрическое расстояние в момент соударения.

Отличия начальных координат, ведущих к "основному" соударению в 2068 году, полученных по старой и новой номинальной орбите НАСА – около 50 км. Те же отличия, полученные по номинальной орбите NEODyS и НАСА – около 100 км.

Неустойчивость. Изменение начальных (2006 г.) координат на $10 \text{ см} = 10^{-4} \text{ км}$ ведет к изменению минимального геоцентрического расстояния в 2029 г. на 20 м, в 2051 г. на 2 тыс. км, в 2068 г. на $3 \cdot 10^5 \text{ км}$. В табл. 2 представлены данные об основных орбитах соударений с сайта НАСА и результаты наших исследований в окрестности номинальных орбит, приведенных на сайтах НАСА и NEODyS. Положения отсчитываются от основной орбиты соударения 2068 года.

Таблица 2. Основные орбиты соударения астероида Апофис, их устойчивость (номиналы НАСА и NEODyS)

N	Date	Da 10^3 (km)	d _{1a} (m)	d _{2a} (m)	d _{3a} (m)	r _{min} (km)
1	2075	43.1	33	30	30	153.46 (153.92)
2	2064	42.4	15	12	15	4564.02 (4546.52)
3	2056	15.8	60	60	60	4192.69 (4175.61)
4*	2060	15.0	21	21	21	4391.90 (4373.69)
5	2055	14.4	12	12	12	5908.04 (5888.45)
6	2074	10.3	21	21	21	44.93 (57.76)
7	2066	9.49	18	18	18	5224.05 (5201.29)
8*	2065	9.23	45	45	39	2888.77 (2922.66)
9*	2078	9.06	45	45	48	360.78 (345.63)
10*	2091	8.88	6.0	9.0		(5454.01)
11*	2077	0.28	42	42	39	2471.99 (2454.11)
12*	2068	0.00	1500	1500	1800	139.49 (145.88)
13*	2076	-7.51	150	150	150	707.08 (714.73)

Da – относительное начальное положение большой полуоси щели в начальный момент (на сайте НАСА по начальным данным до улучшения орбиты в 2013, DE 405, по начальным данным после улучшения орбиты в 2013, DE 430 и на сайте NEODyS по начальным данным числа совпадают); da – размер щели в 2035 г. – диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели): d_{1a} – по начальным данным до улучшения орбиты в 2013, DE 405, d_{2a} – по начальным данным после улучшения орбиты в 2013, DE 430 и d_{3a} – по начальным данным

NEODyS; r_{\min} – расстояние до Земли. Звездочкой отмечены соударения, указанные на сайте НАСА.

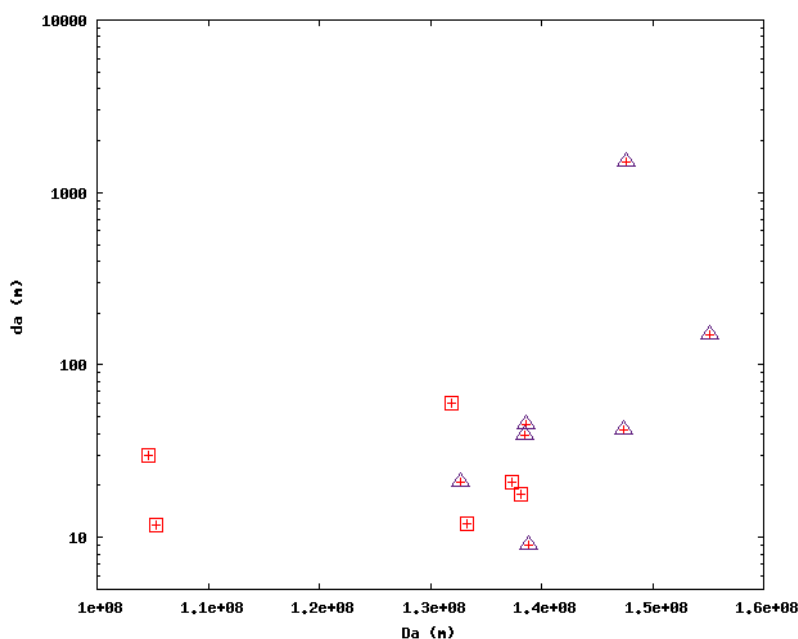


Рис. 2. Положение и размеры щелей, ведущие к соударениям, в 2035 г. (из 2006 г.).

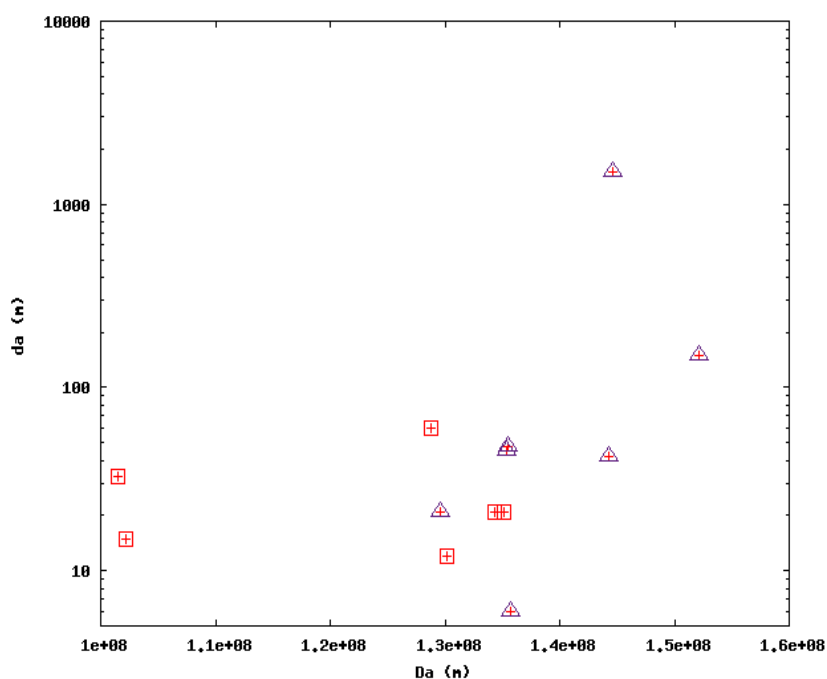


Рис. 3. Положение и размеры щелей, ведущие к соударениям, в 2035 г. (из 2026 г.).

На рис. 2 показано распределение орбит соударений вдоль большой полуоси (D_a , m) и размер щелей этих орбит (d_a , m) на момент времени 01.05.2035. Интегрирование велось от момента 03.06.2006. Треугольниками отмечены данные с сайта НАСА, квадратами отмечены наши данные.

На рис. 3 показано распределение орбит соударений вдоль большой полуоси (D_a , m) и размер щелей этих орбит (d_a , m) на момент времени 01.05.2035. Интегрирование

велось от момента 01.05.2026. Треугольниками отмечены данные с сайта НАСА, квадратами отмечены наши данные.

В табл. 3 показана эволюция положений и размеров щелей, ведущих к орбитам соударений, со временем (разности больших полуосей, метры)

Таблица 3. Эволюция положений и размеров щелей, ведущих к орбитам соударений, со временем (разности больших полуосей, метры)

N	Даты	06.03.2006	08.03.2016	01.05.2026	08.03.2029
1	2075	-194	-304	-1020	-44000
2	2064	-191	-300	-1010	43300
3	2056	-71.3	-112	-376	-16100
4*	2060	-67.4	-106	-357	-15300
5	2055	-64.5	-102	-342	-14700
6	2074	-46.3	-72.7	-245	-10500
7	2066	-42.7	-67.0	-226	-9700
8*	2065	-41.6	-65.3	-220	-9440
9*	2078	-40.8	-64.1	-216	-9260
10*	2091	-40.0	-62.8	-212	-9080
11*	2077	-1.27	-2.00	-6.72	-288
12*	2068	0.0	0.0	0.0	0.0
13*	2076	33.9	53.1	179	7670

Выводы

Основные характеристики траекторий, ведущих к соударениям, устойчивы при малых изменениях модели движения, в частности – при переходе к новой номинальной орбите после ее уточнения в 2013 г. и использовании DE430 вместо DE405.

Расстояния между щелями и их размеры растут со временем. При переходе от 2006 к 2016 все величины умножаются на 1.6, к 2026 – на 5.3, к 08.03.2029 – на 230. После сближения в 2029 размеры увеличиваются на 5 порядков. Эти закономерности следует использовать при проектировании мероприятий по предотвращению соударений.

Вычисления в данной работе проводились на компьютерном кластере Ресурсного Центра Вычислительный Центр Научного Парка СПбГУ, за что им выражается большая благодарность.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным исследованиям (грант 6.37.341.2015) и РФФИ (гранты № 14-12-00804а и 15-02-04340).

Литература

1. *Петров Н.А., Васильев А.А.* Нахождение и исследование свойств траекторий возможных столкновений астероида Апофис с Землей // Известия ГАО РАН, № 220, Труды Всерос. астр.-ром. конф. "Пулково-2012", СПб, 2013, с. 287–292.
2. *Соколов Л.Л. и др.* Траектории соударений астероидов с Землей и резонансные возвраты // Экологический вестник научных центров ЧЭС, 2013, №4, Т. 2, с. 149–153.
3. *Соколов Л.Л. и др.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // Астрономический вестник, М. 2013. Т. 47, № 5, с. 441–447.

4. Sokolov L.L., Kuteeva G.A. On the consequences of resonant returns of near-earth asteroids. IEEE Xplore Digital Library. 2015. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/POLYAKHOV.2015.7106780
5. Соколов Л.Л., Кутеева Г.А. Возможные соударения астероида Апофис после уточнения его орбиты // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2015. Сер. 1. Том 2 (60). Вып. 1. С. 148–166.
6. Соколов Л.Л., Шайдулин В.Ш. Прогнозирование возможных соударений астероидов с Землей и резонансные возвраты // Физика космоса. Труды 44-й Международной студенческой научной конференции 2–6 февраля 2015 г.
7. Соколов Л.Л., Эскин Б.Б. Возможные соударения астероидов с Землей и резонансные возвраты // Труды II Всероссийской научной конференции "Экология и космос" имени академика К.Я. Кондратьева. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Санкт-Петербург. 2015. С. 352–357.
8. Farnocchia D. et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // arXiv:1301.1607v2[astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
9. <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>
10. <http://newton.dm.unipi.it/neodys/>

ABOUT REGIONS LOCATIONS LEADING TO COLLISIONS OF ASTEROID “APOPHIS” WITH THE EARTH

Petrov N.A., Sokolov L.L., Vasiliev A.A.

*St. Petersburg State University, the Faculty of Mathematics and Mechanics,
St. Petersburg, Russia*

Initial data regions leading to collisions of asteroid “Apophis” with the Earth in XXI century are investigated. Their detection and their properties research are necessary to be the most important task in order to predict dangerous collisions and to ward off them. Asteroid “Apophis” orbit was precised accurately in 2013 after its observations. Nevertheless many (more then 100) possible collisions exist in future, the asteroid can be regarded as a dangerous object as before. Locations and sizes of gaps leading to collisions are calculated and presented for different time instants. For example on Web site [9] characteristics of 9 possible impact collisions are presented in time scale of XXI century: they seem to be the more dangerous from the total collisions number. They were compared with our result, the comparison shows the satisfactionily to our predictions. The method of collisions trajectories discovery is discussed. The characteristics stability is estimated at small variation of motion theory, such as alternate models of planetary motions, numerical integration methods and so on. Similar structure of fractal kind can be predicted for initial data leading to collisions with other dangerous asteroids as the result of resonances orbital returns of their trajectories.

КАРЛИКОВЫЕ ПЛАНЕТЫ И РЕЗОНАНСНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Смирнов С.С.

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

Полвека назад А.М. Молчанов выдвинул гипотезу резонансной структуры Солнечной системы. Изменение астрономического статуса Плутона и введение понятия карликовой планеты, обнаружение многочисленных мультirezонансов в поясе астероидов привлекает дополнительный интерес к этой проблеме. Средние движения Цереры, Эриды, как и Плутона, с высокой точностью находятся не только в парных, но и групповых соотношениях со средними движениями больших планет. Многие семейства астероидов дополняют и подчеркивают роль этой закономерности. Планеты земной группы демонстрируют к тому же и спино-орбитальные резонансы. Выявлено определяющее значение нескольких циклов повторения конфигураций планет Солнечной системы. Для земной группы это Пентастра (32 года) = 5 Квинтам. Для планет-гигантов – РОСС (4448 лет) = 5 периодов Большого неравенства движения Юпитера и Сатурна (890 лет) = 25 Беросов (178 лет). Успешный поиск экзопланет и обнаружение планетных систем у других звезд выдвинуло задачу анализа полноты текущей информации о составе этих систем. Одним из способов уточнения статуса кандидатов в экзопланеты и прогноза открытия новых экзопланет является анализ соотносимостей движения уже обнаруженных членов экзопланетных систем.

В середине 1960-х годов Альберт Макарьевич Молчанов (1927–2011) выдвинул оригинальную гипотезу полностью резонансной структуры Солнечной системы [2], которая вызвала оживленную дискуссию и неоднократно цитировалась [3, 4, 9]. Молчанов построил систему почти резонансных соотношений частот обращения ω'_i (средних движений) девяти планет, сведя их в матричную форму. Частота обращения Юпитера принята за 1 (табл. 1). Эти «теоретические» частоты были подобраны таким образом, чтобы в линейной комбинации с небольшими целыми числами n_i по строке каждой планеты получилось точное равенство нулю резонансного соотношения

$$\sum n_i \omega'_i = 0$$

Чтобы яснее показать резонансные комбинации, мы опускаем в приводимых таблицах нулевые члены n_i . Во втором столбце приведены полученные из наблюдений частоты обращения планет ω_i , а в четвертом – их нормированные отклонения от резонансных значений

$$\Delta\omega_i / \omega_i = (\omega_i - \omega'_i) / \omega_i$$

Таблица 1. Матрица резонансов Солнечной системы по А.М. Молчанову

Планета	ω_i	ω'_i	$\Delta\omega_i/\omega_i$	♃	♀	♁	♄	♅	♆	♁	♃	♅	♁
МЕРКУРИЙ	49.25	49.20	0.0010	1	-1	-2	-1						
ВЕНЕРА	19.29	19.26	0.0013		1		-3		-1				
ЗЕМЛЯ	11.862	11.828	0.0028			1	-2	1	-1	1			
МАРС	6.306	6.286	0.0033				1	-6		-2			
ЮПИТЕР	1.000	1.000	0.0000					2	-5				
САТУРН	0.4027	0.400	0.0068					1		-7			
УРАН	0.14119	0.14286	0.0118							1	-2		
НЕПТУН	0.07197	0.07143	0.0075							1		-3	
Плутон	0.04750	0.04762	0.0025						1		-5	-1	

Отклонения не превысили 0.3% для земной группы и 1.2% для планет-гигантов. С тех пор были уточнены астрономические постоянные, изменился астрономический статус Плутона, открыто множество транснептуновых объектов и ранее неизвестных спутников планет, сотни тысяч астероидов. Обнаружены многочисленные двухтельные и трехтельные резонансы в движении астероидов и их семейств [11]. Дополнительный интерес к проблеме резонансности Солнечной системы привлекает то, что средние движения Цереры, Паллады, Эриды, Плутона, ряда комет с высокой точностью находятся не только в парных, но и групповых соизмеримостях со средними движениями больших планет. Многие семейства астероидов дополняют и подчеркивают роль этой закономерности [10]. Планеты земной группы демонстрируют к тому же и спин-орбитальные резонансы. Выявлено определяющее значение нескольких циклов повторения конфигураций планет Солнечной системы.

Очевидно, что пришло время дополнить Матрицу Молчанова новыми объектами и попытаться найти возможно более точные резонансные соотношения. Ранее нами исследовались циклы продолжительностью от нескольких десятков до тысяч лет в конфигурациях планет и жизни Земли. Обнаружилась важнейшая роль гармоник 32-летнего цикла, связанного с движением планет земной группы, в ритмике индивидуальной человеческой жизни и в синхронизации глобальных социальных, климатических и геологических процессов. Об этом цикле хорошо знали наши предки, положив его в основу славянской, авестийской и других календарных систем.

Главный период повторения конфигураций планет во внутренней части Солнечной системы, названный нами Пентастрой, с высокой точностью содержит целое число планетных обращений вокруг Солнца [5].

ПЕНТАСТРА = 32 года = 52 обращения Венеры = 17 обращений Марса

Но и это не все! Далее оказалось, что Пентастра содержит 7 орбитальных обращений Цереры и Паллады, ровно 100 солнечных суток Венеры, 48 звездных суток Венеры, 33 лунных года, 27 периодов Чандлера, около 3 циклов активности Солнца. За Пентастру происходят 20 соединений Земли и Венеры, 15 соединений Земли и Марса, 10 соединений Марса и Цереры, что образует резонансный ряд **4 : 3 : 2** (табл. 2). Таким образом, этот цикл был бы удобен для календарных целей и гипотетической цивилизации марсиан и для будущих преобразователей природы Венеры! Пентастрой – т.е. пятиконечной звездой он назван потому, что делится на 5 коротких периодов (квинт), через которые повторяются соединения планет.

КВИНТА = 6,4 года = 1/5 Пентастры

Таблица 2. Число обращений и парных соединений планет, солнечных и звездных суток Венеры за Пентастру = 32 годам

Планета	МЕРКУРИЙ	ВЕНЕРА ☼	ВЕНЕРА	ВЕНЕРА ♀	ЗЕМЛЯ	МАРС	Церера
МЕРКУРИЙ	133		81		101	116	126
ВЕНЕРА ☼		100					
ВЕНЕРА			52		20	35	45
ВЕНЕРА ♀				48			
ЗЕМЛЯ					32	15	25
МАРС						17	10
Церера							7

В современную эпоху середины соответствующих критических периодов приходятся на *15 января, 27 марта, 15 июня, 23 августа и 5 ноября* (плюс-минус две недели). Эти даты и циклы хорошо знакомы специалистам по расчету траекторий межпланет-

ных перелетов, поскольку определяют повторяемость оптимальных условий для космических стартов [9].

Существует ли подобная закономерность для более протяженных периодов, характерных для обращения вокруг Солнца планет-гигантов? Древние звездочеты выделяли несколько циклов разной длительности, например, 60-летний цикл использован в календарях стран Восточной Азии, 1461-летний цикл применялся в календаре Древнего Египта. Более двух тысяч лет известен планетный цикл, который мы в честь халдейского астронома называем **БЕРОС = 178 лет**.

В наше время активно изучается связь биосферных, геофизических и геологических циклов с положением центра масс Солнечной системы. Так И. Харватова [6] показала особую значимость 2403-летнего цикла движения центра масс. G. Beutler проинтегрировал уравнения движения планет за 500000 и 1000000 лет и построил таблицу периодов их парных соединений [8]. Он особо выделяет роль резонансов Юпитер – Сатурн (890 лет) и Уран – Нептун (4300 лет).

С этими работами перекликается вывод о существовании важнейшего цикла в 4448 лет, через который примерно повторяется конфигурация планет-гигантов. Этот период был назван РОСС (Резонанс Орбит Солнечной Системы) [10].

РОСС = 25 БЕРОСов = 375 обращений Юпитера = 151 обращение Сатурна = 53 обращения Урана = 27 обращений Нептуна = 18 обращений Плутона

Интересно, что через половину РОССа конфигурация планет тоже примерно повторяется, но с диаметральной стороны по долготе. Это происходит потому, что все числа обращений гигантов РОСС – нечетные! Периоды обращения многих транснептуновых объектов, например, Варуны и Хаумеи (278 лет) и Эриды (556 лет) тоже укладываются в указанный ряд целочисленных соотношений:

РОСС = 16 обращений Варуны = 16 Хаумеи = 8 обращений Эриды

Обратим внимание, что РОСС составляет ровно 400 циклов Солнечной активности. Правда, если считать по 11,12 года, что оправдывало себя в XIX веке, но не соответствует среднему периоду активности Солнца за XX век.

Напомним также некоторые наиболее тесные гелиоцентрические группировки планет-гигантов, особенно заметно смещающие центр масс Солнечной системы [10]:

**14979, 10352, 7949, 5367, 3322, 3143, 919 годы до н.э.
1306, 3530, 5614, 5754, 5934, 10561 годы н.э.**

Очевидно, что именно «Парад планет» 1306 года удобно использовать, как хронометрический репер для сравнения и уточнения различных природных шкал времени, привязки и проверки археологических датировок и сравнения летописных и других исторических сведений. Не исключено, что и тесная конфигурация планет около 3143 года до н.э. каким-то образом связана с Нуль-пунктом долгой шкалы Календаря майя 13 августа 3113 года до н.э.

Учитывая, что движение дальних и ближних к Солнцу планет тоже синхронизировано, поскольку **РОСС = 129 ПЕНТАСТР**, составим, используя методику А.М. Молчанова и современные данные, сводную матрицу резонансных соотношений для двенадцати больших и карликовых планет. Так как для устойчивости планетной системы в целом особенно важно именно Большое *неравенство* движения Юпитера и Сатурна [4], мы не включили в табл. 3 соответствующий неточный резонанс 2 : 5. Зато не стали избегать относительно больших чисел n_i (8 : 13 и 7 : 18). Статус Цереры, как карликовой планеты, позволил усилить «пролеты резонансного моста» от гигантов к планетам земной группы. В частности, для построения взаимосогласованных резонансных комбинаций была использована цепочка соотношений, упомянутая в работе [11].

УРАН - ЮПИТЕР – ХЕЛЬГА – ПАЛЛАДА – МАРС – ЗЕМЛЯ – ВЕНЕРА
1 7 12 18 44 83 135

Заметим, что Хельга и Паллада находятся в реальном динамическом резонансе с Юпитером, а Церера лишь в соизмеримости. В предлагаемой матрице (табл. 3) использовано лишь одно уравнение Молчанова (строка Меркурия). Относительные отклонения $\Delta\omega_i/\omega_i$ не превысили 0.3% для всех планет. Но понятно, что элементы орбит ТНО будут уточняться, а список карликовых планет пополняться. Удивительно точную комбинацию частот обращений планет-гигантов (3 -8 -2 7) нашел Д. Кирквуд [1] уже вскоре после открытия Нептуна. Сообщение об этом было зачитано на заседании Американского философского общества 15 марта 1872 г. по просьбе Кирквуда в его отсутствие (рис. 1). Вместо уравнения Кирквуда мы поместили в строку Сатурна связанное с ним четырехтельное соотношение (1 -3 3 -3), но с меньшими числами.

Таблица 3. Матрица резонансов средних движений больших и карликовых планет

Планета	ω_1	ω_2	$\Delta\omega_i/\omega_i$	♃	♄	♅	♆	♁	♂	♁	♂	♁	♂	♁	♂	♁
МЕРКУРИЙ	49.251	49.286	0.0007	1	-1	-2	-1									
ВЕНЕРА	19.282	19.286	0.0002		8	-13										
ЗЕМЛЯ	11.862	11.857	0.0004		3	-7	4									
МАРС	6.3067	6.2857	0.0033		2	-4	1	1								
Церера	2.5796	2.5714	0.0030				1	-4	4							
ЮПИТЕР	1.000	1.000	0.0000					7	-18							
САТУРН	0.40269	0.40267	0.00005					1	-3	3	-3					
УРАН	0.14121	0.14133	0.0008						1	-2	-1	-1				
НЕПТУН	0.07199	0.07200	0.0001							1	-1	-1				-1
Плутон	0.04785	0.04800	0.0030								2	-3				
Макемаке	0.03835	0.03840	0.0013									4	-5			
Эрида	0.02128	0.02133	0.0023										5	-9		

ON SOME REMARKABLE RELATIONS BETWEEN THE MEAN MOTIONS OF JUPITER, SATURN, URANUS, AND NEPTUNE.

BY PROF. DANIEL KIRKWOOD.

(Read before the American Philosophical Society, March 15th, 1872.)

It was noticed by the writer several years since, that 85 periods of Jupiter are nearly equal to 12 of Uranus,* and that 149 periods of Uranus are approximately equal to 76 of Neptune. If, therefore, n^v , n^{vi} , n^{vii} and n^{viii} denote the respective mean motions of Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune, these relations are expressed as follows :

$$12n^v - 85n^{vii} = 76n^{viii} - 149n^{viii}, \text{ nearly ;}$$

$$\text{or, } 12n^v - 161n^{vii} + 149n^{viii} = -\gamma \quad . \quad . \quad . \quad (1).$$

With Newcomb's value of n^{viii} and the values of n^v and n^{vii} adopted in the *American Ephemeris*, we find $\gamma = 390''$. The equation,

$$32n^{vi} - 153n^{vii} + 121n^{viii} = -\gamma \quad . \quad . \quad . \quad (2),$$

was obtained by a process somewhat similar. Subtracting (2) from (1), and dividing by 4, we have

$$3n^v - 8n^{vi} - 2n^{vii} + 7n^{viii} = 0, \quad . \quad . \quad . \quad (3). \dagger$$

This equation, like that which exists between the mean motions of Jupiter's first three satellites, is doubtless exact. The mean motion of

Рис. 1. Начало статьи Кирквуда с преобразованиями частот обращения планет-гигантов.

Успешный поиск экзопланет и обнаружение планетных систем у других звезд выдвинуло задачу анализа полноты текущей информации о составе этих систем. Одним из способов уточнения статуса кандидатов в экзопланеты и прогноза открытия новых экзопланет является анализ соизмеримостей движения уже обнаруженных членов экзопланетных систем. Например, в экзопланетной системе HR 8799 обнаружен резонанс частот трех планет, подобный Пентастре. Логично предположить, что существует и четвертая планета – «Экзовенера», дополняющая пропорцию частот обращения

$$\mathbf{b : c : d : (e) = 7 : 17 : 32 : (52) = \text{Церера : Марс : Земля : (Венера)}.$$

Литература

1. *Kirkwood D.* On some Remarkable Relations between the Mean Motions of Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune // *Fvtrican Philosophical Society*, 1872.
2. *Molchanov A.M.* The Resonant Structure of the Solar System. The law of planetary distances // *ICARUS*, v. 8., N 1, 1968.
3. *Демин В.Г.* Судьба Солнечной системы. – М.: Наука, 1975, 237–245.
4. *Гребеников Е.А., Рябов Ю.А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. – М.: Наука, 1978, 49.
5. *Смирнов С.С.* Планетные конфигурации и их проявления в историометрии и социологии // *Вопросы истории и теории*. Выпуск XIV. СПб филиал ИИЕТ РАН, 1998, с. 46.
6. *Charvatova I.* Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion? // *Ann. Geophysicae*, 2000, 18, 399–405.
7. *Астро-геологи и планетологи СССР. Энциклопедия.* // Ред. *Г.Н. Камтерфельд*. СПб: Изд-во «Правда», 2003, с. 14–17, 109.
8. *Beutler G.* *Methods of Celestial Mechanics*. – Springer-Verlag Berlin, 2005.
9. *Белецкий В.В.* Очерки о движении космических тел. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. Изд. 3-е.
10. *Смирнов С.С.* Роль астрономических циклов в геокультурном пространстве-времени // *Материалы семинара «Этнокультурная география и семиотика географического пространства»*. Вып. 1. СПб: Астерион, 2010, с. 103.
11. *Смирнов С.С.* Новые семейства астероидов (522) HELGA и (1390) ABASTUMANI // *Известия ГАО в Пулкове № 220*. СПб, 2013, с. 323.

DWARF PLANETS AND RESONANT STRUCTURE OF THE SOLAR SYSTEM

Smirnov S.S.

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

The Molchanov classical Resonant model of planet system (1968) is considered in new reality. Dwarf planets and new Orbital elements are added for the modeling of the matrix of Mean motion resonances (MMR). The big role of multiple MMR between planets and asteroids is shown. There are also the strong spin-orbital resonances for Terrestrial planets. Quasi-resonant cycles of repetitions for same planet configurations are represented. This is **Pentastra** = 32 years for Inner Solar System. For long periods there exists cycle **ROSS** (*Resonance Orbital Solar System*) = 4448 years = 5 *Great inequality* = 25 **Berosus**. The Resonant model may be useful for investigation of exoplanet systems, for example for system HR 8799 the fourth companion is predicted.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЕЙ И ПОСТРОЕНИЯ СЦЕНАРИЕВ ВЫЗВАННЫХ ИМИ КАТАСТРОФ

**Шор В.А.¹, Вавилов Д.Е.¹, Железнов Н.Б.¹, Зайцев А.В.²,
Кочетова О.М.¹, Чернетенко Ю.А.¹**

¹*Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия*

²*НП Центр планетарной защиты, Московская обл., Химки, Россия*

С целью заблаговременной подготовки к активному или пассивному противодействию угрозе столкновения небесных тел с Землей создан вычислительно-аналитический комплекс (ВАК). ВАК обрабатывает уже имеющиеся в базе данных сведения о потенциально опасных телах и поступающую по каналам связи информацию об открытии новых опасных тел и их наблюдениях. На основе совокупности данных прогнозируются возможные сближения и столкновения с Землей и Луной на ближайших оборотах тела вокруг Солнца и их вероятность. В случае проникновения тела на номинальной траектории в атмосферу Земли, движение в ней определяется с учетом ее сопротивления. При определении района поражения учитывается неопределенность траектории и рассеяние траекторий в атмосфере. Рассматривается возможность взрыва в атмосфере или выделения энергии при ударе о поверхность Земли. Сценарий разрушений, количество жертв катастрофы определяется в зависимости от обстоятельств взрыва и особенностей района падения.

Важной составляющей ВАК является то, что, помимо рабочего режима, в нем предусмотрен режим обучения и тренировки, при использовании которого обучающийся может самостоятельно задать место и время падения, его энергию, а также другие обстоятельства катастрофы, в соответствии с которыми определяется гелиоцентрическая орбита тела. При столкновении движущегося по ней тела с Землей воспроизводятся все детали возможной катастрофы.

1. Введение

Выполняемые во всем мире наблюдения малых тел собираются и каталогизируются в Международном Центре малых планет и комет (Minor Planet and Comet Centre (MPC), США, Кембридж). Если собранных наблюдений достаточно для вычисления надежной предварительной орбиты тела (обычно порядка десяти или более наблюдений на интервале двух–трех суток), Центр определяет элементы орбиты и, если вычисленное значение минимального межорбитального расстояния объекта и Земли (параметр MOID – аббревиатура английского выражения “minimum orbit intersection distance) меньше 0.05 а.е., объект классифицируется как потенциально опасный. В этом случае Центр публикует электронный циркуляр с наблюдениями объекта, элементами его орбиты и эфемеридой для продолжения наблюдений. Основанием для подобной классификации является то, что столкновения могут иметь место только в малой окрестности значений MOID = 0, а неточность определения MOID по элементам предварительной орбиты и из-за возмущений орбиты в будущем может составлять до ± 0.05 а.е.

Прогнозирование столкновений с Землей потенциально опасных тел на интервалах времени в 80–100 лет и более регулярно выполняется в Лаборатории реактивного движения (НАСА, США) и в Пизанском университете (Европейская программа осведомленности о ситуации в космосе, сайт НЕОДиС, Италия). Результаты прогнозирования представляются на сайтах этих центров в виде таблиц, содержащих сведения о прошлых и предстоящих сближениях с Землей каждого потенциально опасного тела, вероятности его столкновения с Землей в этих сближениях с учетом неопределенности исходной орбиты и другие полезные сведения. Хотя прогнозирующие комплексы (Sentry в ЛРД и CLOMONII в Пизе) создавались при тесном информационном взаимодей-

ствии разработчиков, все же модели определения орбиты и прогноза движения в них несколько разнятся. Поэтому не удивительно, что результаты прогноза, в особенности для плохо определяемых орбит на длительных интервалах времени, сильно расходятся.

В данной работе решается несколько отличная задача: прогноз, как правило, осуществляется на интервале от эпохи оскуляции до текущей даты выполнения прогноза плюс еще два дополнительных оборота потенциально опасного тела вокруг Солнца. В случае если тело на номинальной орбите сталкивается с Землей, подсчитывается не только вероятность столкновения, которая с учетом неопределенности орбиты может быть отличной от единицы, но и рассчитывается весь сценарий возможной катастрофы. Такая задача представляет значительный интерес для планирования мер противодействия грядущей катастрофе. Отметим, что ВАК может использоваться (и фактически используется) для выполнения прогнозов и на длительные интервалы времени. При создании ВАК в основном использованы алгоритмы и программы, которые создавались в различных лабораториях ИПА РАН и в ряде отечественных организаций.

В работе ВАК можно выделить несколько задач: 1) определение номинальной орбиты и прогнозирование движения; 2) прогнозирование движения тел в атмосфере Земли; 3) построение сценариев катастроф; 4) режим обучения и тренировки; 5) столкновения космических тел с Луной. В настоящей работе мы подробно изложим наш подход к решению задачи 1) и перенесем описание остальных задач на будущие публикации.

2. Определение номинальной орбиты и прогнозирование движения

Основу для работы ВАК представляет каталог известных потенциально опасных тел, отсортированный по дате их очередного сближения с Землей. При получении дополнительных наблюдений любого объекта его орбита уточняется и вновь выполняется сортировка элементов каталога по времени очередного сближения. Но, кроме этих изменений, каталог время от времени пополняется новыми элементами в результате открытия новых потенциально опасных объектов. Поскольку Центр малых планет является основным источником сведений об открытии таких тел, то работа ВАК в первую очередь ориентирована на получение сведений о них из Центра. ВАК с периодичностью примерно в шесть минут проверяет обновление информации на сайте Центра, где появляются Циркуляры с сообщениями об открытии новых потенциально опасных тел и/или их наблюдениях. В случае обновления информации начинается ее обработка в автоматическом режиме. По методу МНК улучшается орбита тела на эпоху, близкую к средней дате имеющихся наблюдений. Число их для новых объектов редко превышает три – четыре десятка. Отбрасывание условных уравнений выполняется по критерию «три сигма». Вычисляется матрица ковариаций найденных координат и скоростей и оценки вероятных ошибок компонент в начальную эпоху. При необходимости она переносится с учетом возмущений на другую эпоху. На основе фотометрических данных подсчитывается диаметр и масса тела, причем для вновь открытых тел, для которых кроме данных фотометрии ничего неизвестно, принимается значение альбеда, равное 0.14 и плотность 2.5 г/см^3 . С момента оскуляции осуществляется прогноз движения тела на протяжении двух ближайших его оборотов вокруг Солнца.

Прогноз движения выполняется методом численного интегрирования Эверхарта 15-го порядка. Учитываются возмущения от всех больших планет, а также Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Возмущения от Земли и Луны рассматриваются отдельно. Учитываются также возмущения от сжатия Солнца и Земли. Совместно с интегрированием уравнений движения выполняется интегрирование уравнений в вариациях, определяющих изохронные производные текущих значений координат и скоростей по их начальным значениям. В ходе прогнозирования очередного сближения тела с Землей определяются моменты, в которые тело занимает особые положения по отношению к Земле, и координаты и скорости тела в эти моменты (особые точки). Это необходимо

для того, чтобы учесть вероятное отличие движения виртуальных (возможных) астероидов по орбитам, отличным от номинальной. Особые точки – это 1) точка орбиты на минимальном расстоянии от центра Земли, 2) точка входа в сферу действия Земли (ее может не быть), 3) точка входа в атмосферу Земли до определенной высоты h над уровнем земного сфероида.

Реальное тело, орбита которого никогда точно неизвестна, может двигаться по орбите, более или менее отличной от орбиты номинального решения. Все возможные, виртуальные, орбиты имеют начало в эллипсоиде рассеяния начальных условий движения. Для учета возможных отличий реального движения от номинального и оценки вероятности столкновения во всех трех упомянутых случаях прохождения особых точек выполняется переход к системе прямоугольных координат ξ, η, ζ , связанной с плоскостью цели, и нормалью к ней, направленной вдоль вектора относительной скорости тела [1, 2].

Номинальная траектория тела пересекает плоскость цели в некоторой точке, являющейся центром эллипса рассеяния точек пересечения с этой плоскостью траекторий виртуальных тел. На плоскости цели в системе координат ξ, ζ с началом в центре Земли расстояние центра эллипса рассеяния от центра Земли равно $\sqrt{\xi^2 + \zeta^2}$, а большая и малая полуоси эллипса рассеяния, параллельные соответственно осям ζ и ξ , равны средним ошибкам координат ζ и ξ . В линейном приближении задача нахождения средних ошибок координат ξ, η, ζ и матрицы ковариаций этих величин решается при наличии изохронных производных текущих координат и скоростей (x, y, z, x', y', z') по их начальным значениям, что обеспечивается интегрированием уравнений в вариациях совместно с уравнениями движения [3]. Зная координаты центра эллипса рассеяния на плоскости цели и его полуоси, можно оценить вероятность столкновения, вычисляя двойной интеграл от гауссовой плотности вероятности по части плоскости, ограниченной контуром Земли. Если тело входит в сферу действия, то в этот момент оценивается кратчайшее расстояние вектора относительной скорости от центра Земли (так называемый параметр сближения) и радиус захвата Земли, зависящий от величины относительной скорости тела. Если параметр сближения превышает радиус захвата, то тело на номинальной орбите пройдет мимо Земли, если нет, то произойдет столкновение.

Рассмотрим теперь внушающий наибольшую тревогу случай, когда тело на номинальной траектории проникает в земную атмосферу. Этот момент фиксируется, когда геоцентрическое расстояние тела оказывается равным радиусу земного сфероида на широте входа плюс h км над уровнем сфероида (h обычно принимается равным 100 км).

В момент входа вычисляется матрица ковариаций текущих координат и скоростей тела по их начальным значениям. Как уже отмечалось, вычисляются координаты точки входа на плоскости цели, определяется корреляционная матрица координат ξ, η, ζ и вычисляется вероятность столкновения. Далее осуществляется переход от системы гелиоцентрических координат к геоцентрическим координатам и от фиксированной системы координат J2000.0 к системе экваториальных координат, связанной с подвижным экватором Земли и подвижной точкой Весны. От этой системы прямоугольных координат X, Y, Z выполняется переход к системе прямоугольных координат X_1, Y_1, Z_1 , ось Z_1 которой направлена по нормали к касательной плоскости к земному сфероиду в точке входа, ось X_1 направлена по меридиану к югу и ось Y_1 направлена по параллели к востоку. Строго говоря, геоцентрический радиус-вектор точки входа не совпадает по направлению с нормалью к поверхности в точке входа, но угол между ними в разных точках сфероида не превышает нескольких секунд дуги, и мы этим различием будем пренебрегать.

Переход от системы X, Y, Z к системе X_1, Y_1, Z_1 можно описать как два последовательных вращения системы X, Y, Z сначала на угол $S+\lambda$ вокруг оси Z против часовой

стрелки, а затем на угол $90^\circ - \varphi$ вокруг оси Y также против часовой стрелки, где угол S – звездное время в Гринвиче, λ – восточная долгота точки входа, а φ – геоцентрическая широта точки входа. Величины λ и φ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \sin(S + \lambda) &= y / \sqrt{x^2 + y^2}, & \sin(\varphi) &= z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \cos(S + \lambda) &= x / \sqrt{x^2 + y^2}, & \cos(\varphi) &= \sqrt{x^2 + y^2} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку звездное время в Гринвиче есть известная функция времени, эти формулы определяют долготу и широту точки входа. Случаи, когда падение происходит в окрестности Северного или Южного полюса и долгота с достаточной точностью определена быть не может, требуют отдельного рассмотрения.

Для определения средних ошибок λ и φ как функций средних ошибок координат и скоростей тела $x_0, y_0, z_0, v_0^x, v_0^y, v_0^z$ в начальную эпоху сначала определяется матрица ковариации координат и скоростей в момент входа в атмосферу $\mathbf{D}(x, y, z, v^x, v^y, v^z)$. В линейном приближении она определяется формулой

$$\mathbf{D}(x, y, z, v^x, v^y, v^z) = \sigma^2 \left(\frac{\partial(x, y, z, v^x, v^y, v^z)}{\partial(x_0, y_0, z_0, v_0^x, v_0^y, v_0^z)} \right) \mathbf{Q}^{-1} \left(\frac{\partial(x, y, z, v^x, v^y, v^z)}{\partial(x_0, y_0, z_0, v_0^x, v_0^y, v_0^z)} \right)^T,$$

где \mathbf{Q}^{-1} – обратная матрица нормальной системы, из которой были найдены параметры орбиты; σ – средняя ошибка представления наблюдений на основе значений переменных $x_0, y_0, z_0, v_0^x, v_0^y, v_0^z$; T – символ транспонирования матрицы. Если обозначить элементы матрицы \mathbf{D} как d_{ij} , а частные производные некоторой функции $F(x, y, z)$ по этим переменным как F_x, F_y, F_z , то в линейном приближении средняя ошибка функции F может быть найдена как

$$\sigma F = \sigma \sqrt{F_x^2 d_{11} + F_y^2 d_{22} + F_z^2 d_{33} + 2F_x F_y d_{12} + 2F_x F_z d_{13} + 2F_y F_z d_{23}}. \quad (2)$$

Из формул (1) следует:

$$\begin{aligned} \partial\lambda/\partial x &= -y/(x^2 + y^2), & \partial\varphi/\partial x &= -xz/((x^2 + y^2 + z^2)\sqrt{x^2 + y^2}), \\ \partial\lambda/\partial y &= x/(x^2 + y^2), & \partial\varphi/\partial y &= -yz/((x^2 + y^2 + z^2)\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}), \\ \partial\lambda/\partial z &= 0, & \partial\varphi/\partial z &= \sqrt{x^2 + y^2}/(x^2 + y^2 + z^2). \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в (2), находим оценки средних ошибок долготы и широты. Отдельно рассматриваются случаи падения в районах полюсов.

Азимут, угол наклона траектории к горизонту и компоненты относительной скорости проще выражаются в системе координат X_1, Y_1, Z_1 , но для получения оценок средних ошибок указанных величин предварительно должна быть найдена матрица ковариации переменных $x_1, y_1, z_1, v_1^x, v_1^y, v_1^z$. Согласно общему правилу, для этого надо матрицу \mathbf{D} домножить слева на матрицу частных производных $\partial(x_1, y_1, z_1, v_1^x, v_1^y, v_1^z)/\partial(x, y, z, v^x, v^y, v^z)$, а справа – на транспонированную матрицу. Величины азимута Az и наклона траектории к плоскости горизонта θ находятся из соотношений:

$$\begin{aligned} \sin Az &= v_1^y / \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2}, & \sin \theta &= v_1^z / \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2 + (v_1^z)^2}, \\ \cos Az &= -v_1^x / \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2}, & \cos \theta &= \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2} / \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2 + (v_1^z)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Опять-таки отдельного рассмотрения требуют случаи падения почти по нормали к поверхности, когда азимут плохо определяется.

В общем случае частные производные θ по компонентам скорости имеют вид

$$\begin{aligned} \partial\theta/\partial v_1^x &= -v_1^x v_1^z / ((V_1)^2 V_1^{xy}), \\ \partial\theta/\partial v_1^y &= -v_1^y v_1^z / ((V_1)^2 V_1^{xy}), \text{ где } V_1 = \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2 + (v_1^z)^2}, V_1^{xy} = \sqrt{(v_1^x)^2 + (v_1^y)^2}. \\ \partial\theta/\partial v_1^z &= V_1^{xy} / (V_1)^2, \end{aligned}$$

Подставим эти выражения в формулу, аналогичную (2), и получим:

$$\sigma\theta = \sigma \sqrt{F_{v_1^x}^2 d_{44}^1 + F_{v_1^y}^2 d_{55}^1 + F_{v_1^z}^2 d_{66}^1 + 2F_{v_1^x} F_{v_1^y} d_{45}^1 + 2F_{v_1^x} F_{v_1^z} d_{46}^1 + 2F_{v_1^y} F_{v_1^z} d_{56}^1}. \quad (4)$$

В этой формуле d_{ij}^1 – элементы матрицы ковариации переменных $x_1, y_1, z_1, v_1^x, v_1^y, v_1^z$. Подобным же образом оцениваются средние ошибки азимута и скорости.

Величина V_1 есть геоцентрическую скорость в точке входа, в то время как для дальнейшего интерес представляет топоцентрическая скорость или даже скорость тела относительно атмосферы в точке входа. Атмосфера как целое вращается вокруг земной оси, совершая один оборот за 23 часа 38 минут, т.е. ее угловая скорость равна $1.01551 \cdot 2\pi$ радиан в сутки. Для вычисления скорости падения V_1 относительно атмосферы надо из геоцентрической скорости V вычесть скорость данной точки атмосферы относительно геоцентра V_2 . Добавка, вызванная вращением атмосферы, имеет компоненты $v_2^x = 0, v_2^z = 0$, и компоненту $v_2^y = 1.01551 \cdot 2\pi \sqrt{x^2 + y^2}$. Из-за вращения атмосферы Az и θ отличаются от этих величин для геоцентрической скорости. В формулах (3) для определения Az и θ следует использовать значение компоненты v_1^y , алгебраически уменьшенное на величину v_2^y . Исправленное значение компоненты скорости по оси Y_1 следует использовать и при подсчете величины топоцентрической скорости. Из-за введения поправок за вращение атмосферы должны измениться и оценки точности величин Az, θ и V_1 . Эти поправки малы и не могут существенно изменить оценки указанных величин, полученные без учета вращения атмосферы. Поэтому мы будем считать оценки точности этих параметров, найденные без учета вращения атмосферы, относящимися к величинам, которые получены с учетом.

Приведем результаты работы ВАК на примере Челябинского метеороида. Во 2-ом столбце табл. 1 приводятся данные, полученные чешскими астрономами [4] и взятые нами в качестве начальных. В результате работы ВАК найдена гелиоцентрическая орбита тела: $T = 2456338.639866, M = 12.16049^\circ, \omega = 109.40676^\circ, \Omega = 326.43288^\circ, i = 10.43350^\circ, e = 0.68340518, n = 0.287336025^\circ/\text{сут}$. Далее вычислены значения параметров на входе в атмосферу (3-ий столбец табл. 1) и при падении на Землю (4-ый столбец табл. 1).

Таблица 1. Результаты работы комплекса на примере Челябинского метеороида

	Начальные данные	Значения параметров на входе в атмосферу	Значения параметров при падении на Землю
T	2013 02 15, 7ч 20м 22с., Московское время	2456338.63970	2456338.63992
$L,^\circ$	61° 27' 18"	65.22682 ± 0.03028	60.20123 ± 0.04689
$\varphi,^\circ$	54° 50' 9.6"	54.41748 ± 0.08711	54.94841 ± 0.08813
$Az,^\circ$	279.5°	282.52862 ± 0.01039	278.48965 ± 0.02839
$\theta,^\circ$	-16.5	-18.28365 ± 0.00734	-15.91496 ± 0.00601
V, км/с	18.3	18.259 ± 0.006	18.312 ± 0.007

3. Заключение

Создан вычислительно-аналитический комплекс, обрабатывающий уже имеющиеся в базе данных сведения о потенциально опасных телах и поступающую по каналам связи информацию об открытии новых опасных тел и их наблюдениях, прогнозирую-

ший возможные сближения и столкновения с Землей и Луной на ближайших оборотах тела вокруг Солнца, их вероятность и последствия возможного столкновения.

Задача предвычисления падения тел на Луну мало отличается от аналогичной задачи для Земли. Вместо сферы действия Земли используется сфера действия Луны, а вместо радиуса захвата Земли – радиус захвата Луны. Высота входа в атмосферу h полагается равной нулю над уровнем лунной поверхности. Определяются селенографические координаты точки падения на лунную поверхность и момент этого события. Все вычисления для Луны выполняются после вычислений для Земли, естественно, в том случае, если столкновение с центральным телом не зафиксировано. Моделирование столкновений с Луной может быть организовано по образцу моделирования столкновений с Землей.

Кроме этого, в комплексе предусмотрен режим обучения и тренировки, при работе с которым возможно задание места и времени падения, его энергии, а также других параметров, в соответствии с которыми определяется гелиоцентрическая орбита тела и другие сопутствующие параметры.

Литература

1. *Milani A., Chesley S.R., Sansaturio M.E., Tommei G., Valsecchi G.V.* Nonlinear impact monitoring: line of variation searches for impactors // *Icarus*. 2005. V. 173. P. 362–384.
2. *Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрономический вестник*. 2012. Том 46. № 2. С. 131–142.
3. *Шор В.А., Дерюгин В.А., Зайцев А.В., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А.* Имитация орбиты столкновения небесного тела с Землей и вычисление сопутствующих обстоятельств падения // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. 2013. № 4. Том 3. С. 158–163.
4. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение метеорита Челябинск](http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск)

PROGRAM SYSTEM FOR PREDICTION OF COLLISIONS OF ASTEROIDS AND COMETS WITH THE EARTH AND FORECASTING SCENARIOS OF CATASTROPHES PRODUCED BY THEIR FALLS

Shor V.A.¹, Vavilov D.E.¹, Zheleznov N.B.¹, Zaitsev A.V.², Kochetova O.M.¹, Chernetenko Yu.A.¹

¹*IAA RAS, Saint Petersburg, Russia*

²*Planetary Defense Center, Moscow region, Himki, Russia*

The program system which can be used to predict collisions of asteroids and comets with the Earth and the Moon and to quantitatively describe their consequences for territories and population was created. System can use as the existing data as current information about discoveries of new potentially dangerous bodies. Possible approaches and collisions with the Earth and the Moon are picked out and their probabilities are estimated. In case of penetrating the body on the nominal orbit into the Earth atmosphere, the air resistance is taken into account. Computation of the region of fall on the surface is conducted with account for orbit errors and dispersion of orbits in the Earth atmosphere. Computation of the energy delivered to the Earth, analyzing consequences of collision as a result of explosion in atmosphere or when falling on land or in ocean, determination of zones of probable distractions within different distances from place of fall or air explosion, estimating consequences for surface infrastructure, population and the Earth biosphere from striking factors are evaluated.

The program system presents special possibilities for computer assisted training of personal in work with it and in use of modeling calculations for actions in different application scenarios. With this aim someone has possibility to specify place and time of future event, its energy, the leading time (the time remaining before collision) and other its characteristics. Correspondingly the heliocentric orbit of a body is calculated and then the body motion is followed in the past at the time interval, remaining before collision. At this moment the uncertainties of the orbit elements are modeling. All subsequent calculations for found imitative orbit are fulfilled as for real one determined from available observations.

Секция 4

**ЗВЕЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ,
КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА
ГАЛАКТИКИ**

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОПЛЕНИЯ NGC 6800 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА НОРМАЛЬНОМ АСТРОГРАФЕ И ТЕЛЕСКОПЕ МТМ-500М ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Ананьевская Ю.К., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В.

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

Представлены результаты детального астрометрического и фотометрического исследования площадки размером $80' \times 80'$ в созвездии Лисички. Главная цель работы – подтверждение существования в пределах площадки галактического звездного скопления NGC 6800 и уточнение его физических параметров. Для решения этой задачи использовались хранящиеся в стеклотекке Пулковской обсерватории астронегативы, снятые в период с 1930 по 1987 гг. Относительные собственные движения с точностью 3.0 мсек. дуги/год были получены для звезд до $V \sim 16.5^m$, что позволило выделить возможные члены скопления.

Фотометрические наблюдения звёзд были выполнены в июле 2013 г. на телескопе МТМ-500М, расположенном на Горной астрономической станции Пулковской обсерватории. Всего было снято 33 кадра в полосе В и 28 кадров в полосе V. ПЗС фотометрия 6000 звёзд до $V \sim 18^m$ использовалась для построения двухцветных диаграмм скопления.

Рассеянное звездное скопление в созвездии Лисичка (Vulpecula) было открыто 10 сентября 1784 г., описано Дж. Гершелем и включено в его General Catalogue of Nebulae and Star Clusters под номером 4407. В дальнейшем, в каталоге NGC (New General Catalogue of Nebulae and Star Clusters), опубликованном в 1888 г. Дж. Дрейером, скопление получило новый номер – NGC 6800, под которым оно известно и сейчас. Карта части неба из Паломарского атласа со скоплением в центре представлена на рис. 1. Крестиком здесь помечена звезда, которая в большинстве современных каталогов считается условным центром скопления ($\alpha = 19^h 27^m 07^s$, $\delta = +25^\circ 08' 23''$, 2000.0).

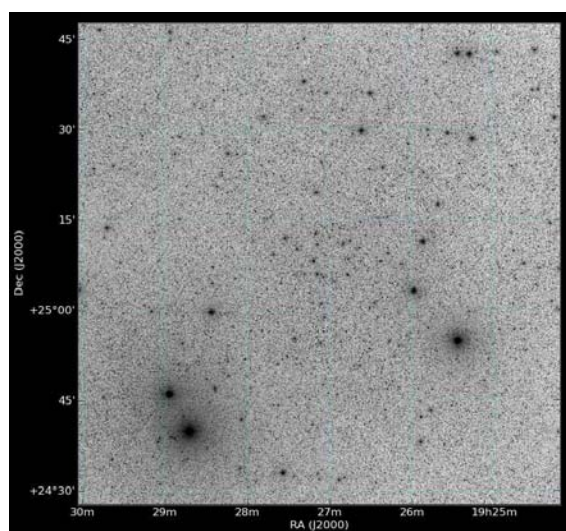


Рис. 1. Область неба со скоплением NGC 6800.

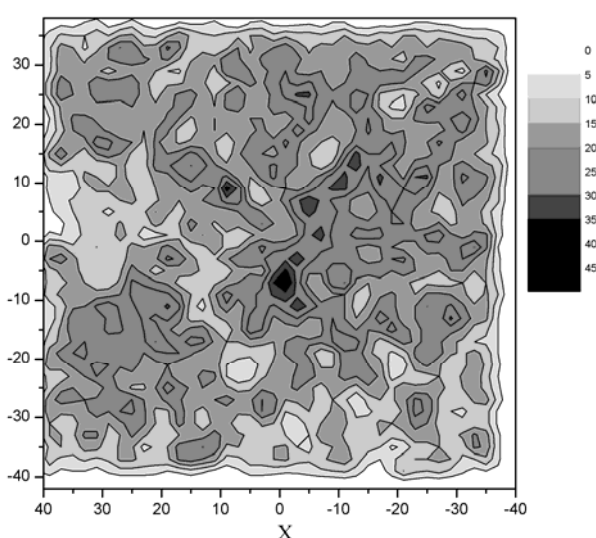


Рис. 2. Распределение звездной плотности в области скопления.

Основной астрометрический материал составили пластинки, снятые на Пулковском Нормальном астрографе в период с 1930 по 1987 год. В качестве дополнительных данных были использованы положения звезд из каталога 2MASS (эпоха 1998.9).

Для того чтобы убедиться в наличии в центральной части указанной площадки реального сгущения звезд (рассеянного скопления) мы подсчитали распределение звездообразных объектов в ее пределах. Результаты в виде линий равной плотности представлены на рис. 2, где максимальная плотность попадает на возможное ядро скопления.

Положения звезд до предельной величины $B \sim 16^m.5$ в площадке размером $80' \times 80'$ со скоплением в центре были измерены на автоматическом измерительном комплексе ГАО РАН «Фантазия». Удалось получить относительные собственные движения звезд со среднеквадратической ошибкой 3.0 мсек. дуги/год.

Вероятность принадлежности звезды скоплению определяется её положением на векторной диаграмме и рассчитывается по следующей формуле:

$$P(\mu_x, \mu_y) = \frac{N_c \Phi_c(\mu_x, \mu_y)}{N_c \Phi_c(\mu_x, \mu_y) + N_f \Phi_f(\mu_x, \mu_y)},$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(\mu_x, \mu_y) &= \Phi_f(\mu_x, \mu_y) + \Phi_c(\mu_x, \mu_y) = \frac{N_f}{2\pi \Sigma_x \Sigma_y \sqrt{1-r^2}} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\left(\frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_{0f}}}{\Sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_{0f}}}{\Sigma_y} \right)^2 - 2r \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{x_{0f}})(\mu_{y_i} - \mu_{y_{0f}})}{\Sigma_x \Sigma_y} \right] \right\} + \\ &\frac{N_c}{2\pi \sigma^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_{0c}}}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_{0c}}}{\sigma} \right)^2 \right] \right\}. \end{aligned}$$

N_c – нормированное число членов скопления, N_f – нормированное число звезд фона, μ_{x_0}, μ_{y_0} – координаты центров распределения на ВД, σ – стандартное отклонение для звезд скопления, Σ_x, Σ_y – стандартные отклонения для звезд фона, r – коэффициент корреляции, относящийся к ориентации эллипса, описывающего распределение звезд фона.

Первым критерием отбора служила индивидуальная вероятность принадлежности звезды к скоплению $P \geq 60\%$, вторым – её положение на фотометрических диаграммах. Для построения диаграмм скопления цвет \sim звездная величина ($V \sim B-V$) использовались доступные данные AAVSO. Полученные результаты изложены в статье Ананьевской и др., 2015 [1].

Каталог относительных собственных движений звезд площадки доступен только в электронном виде: <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J/PAZh/41/367>

Фотометрические наблюдения звёзд скопления NGC 6800 были выполнены в июле 2013 г. на телескопе МТМ-500М ($D = 0.5$ м, $F = 4.1$ м), расположенном на Горной астрономической станции Пулковской обсерватории (северный Кавказ, близ г. Кисловодска, 2070 м над уровнем моря) (Кулиш и др., 2009) [2]. Наблюдения выполнялись с широкополосными светофильтрами В и V международной фотометрической системы (Джонсона). Поле зрения инструмента, оборудованного ПЗС-камерой SBIG STL-1001E, составляет около $21' \times 21'$. Чтобы покрыть центральную часть скопления примерно вдвое большего углового размера, кадры снимались со сдвигом по обеим

координатам, но так, чтобы соседние поля перекрывались примерно на 10 угловых минут. Всего было снято 33 кадра в полосе В и 28 кадров в полосе V.

В качестве стандартов использовались данные каталога Тихо и AAVSO.

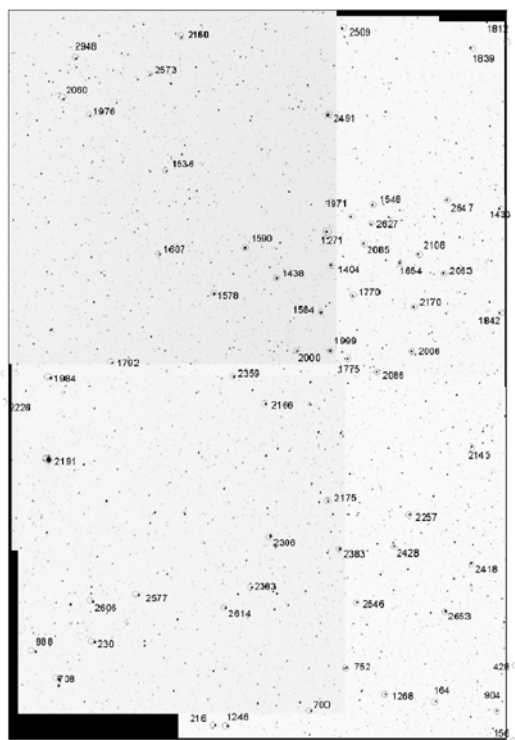


Рис. 3. Мозаика из кадров, полученных на MTM-500. Кружками обозначены звёзды из каталога Тихо.

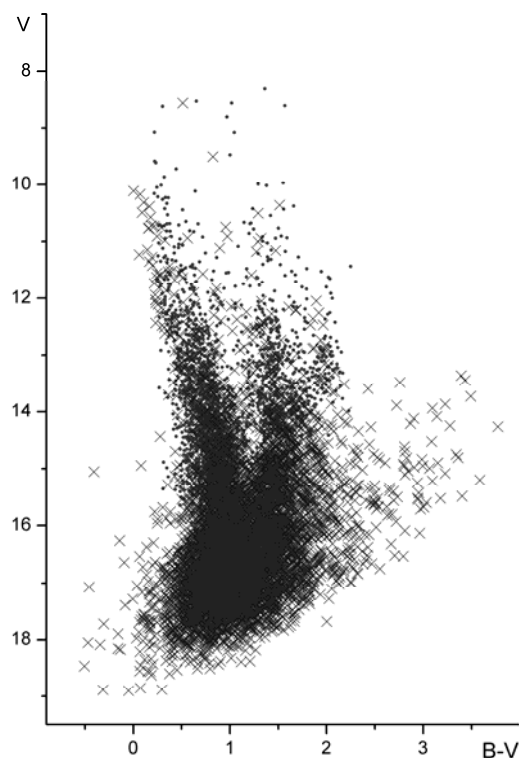


Рис. 4. Диаграмма цвет-звездная величина для звёзд в области NGC 6800.
• — данные AAVSO, × — данные наших наблюдений.

Астрометрическая и фотометрическая обработка наблюдений выполнялась с помощью программного пакета «Апекс-II», разработанного в Пулковской обсерватории (Девяткин и др., 2009) [3].

Всего удалось получить BV величины для 6300 звезд до $B \sim 19^m$ (рис. 4).

Литература

1. Ананьевская Ю.К., Фролов В.Н., Поляков Е.В. Исследование рассеянного звездного скопления NGC 6800 // Письма в Астрономический журнал, 2015, том 41, № 7, с. 367–376.
2. Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б., Ибрагимов Ф.М., Курьянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В. Автоматизация комплекса телескопа MTM-500M // Известия ГАО РАН, 2009, № 219, вып. 1, с. 192–218.
3. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Курьянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрономический вестник, 2009, т. 43, № 6.

INVESTIGATION OF THE OPEN STAR CLUSTER NGC 6800

Ananjevskaja Yu.K., Gorshanov D.L. and Kouprianov V.V.

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

The results of a comprehensive study of the 80'×80' field in Vulpecula are presented. The main purpose is to make sure that there is a real crowding of stars (Galactic cluster NGC6800) in the central part of this field and to refine its physical parameters.

The plates taken with the Pulkovo normal astrograph from 1930 to 1987 along with the correspondent area from the 2MASS catalogue (epoch 1998.9) constitute the main astrometric material. The relative proper motions of stars to a limiting magnitude $B \sim 16^m.5$ were obtained with a root-mean-square error of 3.0 mas yr^{-1} . The astrometric selection of cluster members was made by the maximum likelihood method.

B and V magnitudes of stars in the central part of the investigated area were obtained with MTM-500M telescope at Mountain Astronomical Station (Kislovodsk) of the Pulkovo Observatory in June, 2013. Total amount of 33 frames in B and 28 frames in V bands were made. CCD photometry of 6300 stars up to $B \sim 18^m$ enabled to plot color–magnitude diagrams.

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПУЛЬСАРОВ В ГАЛАКТИКЕ

Андреасян А.Р., Андреасян Р.Р., Паронян Г.М.

Бюраканская астрофизическая обсерватория, Бюракан, Армения

Было показано, что нормальные радио пульсары распределены не симметрично относительно плоскости Галактики. Причем, в направлениях к центру Галактики плоскость симметрии пульсаров расположена в среднем на 50 пс выше плоскости Галактики, а в направлениях к антицентру – в среднем на 100 пс ниже этой плоскости.

Распределение всех пульсаров относительно плоскости Галактики можно представить экспоненциальной функцией. Причем, характеристическое расстояние увеличивается в пределах 130–420 пс в зависимости от возраста пульсаров.

В распределении поверхностной плотности пульсаров наблюдается максимум на расстояниях примерно 3–4 кпс от центра Галактики. Плотность пульсаров в центральной области Галактики примерно такое же, как вокруг Солнца.

Введение

Изучение распределения пульсаров в Галактике имеет очень важное значение для понимания многих аспектов их рождения и эволюции, таких как: оценка темпа рождения пульсаров, распределение скорости полученного пульсаром при его рождении в процессе ассиметричной вспышки сверхновой звезды и т.д., а также для построения модели Галактики. В настоящее время найдены более 2400 пульсаров, которые в основном сконцентрированы около плоскости нашей Галактики, а небольшая часть находится в некоторых Галактических шаровых скоплениях и в близких внегалактических объектах. Данные пульсаров приведены в каталоге пульсаров ATNF (ATNF Pulsar Catalogue). Для изучения Галактического распределения пульсаров используются данные о расстояниях пульсаров от Солнца и Галактические координаты (l, b). Поскольку мы будем изучать Галактическое распределение пульсаров, то из рассмотрения были исключены все пульсары, находящиеся вне нашей Галактики, а также пульсары, находящиеся в шаровых скоплениях. После этих исключений остаются так называемые миллисекундные пульсары и обычные радио пульсары. Распределение миллисекундных пульсаров в Галактике и их механизм излучения сильно отличаются от распределения и механизма излучения обычных пульсаров (см., например [1, 2]), поэтому будем исключать также миллисекундные пульсары. После всех этих исключений остались 1955 так называемых нормальных пульсаров, галактическому распределению которых и посвящена настоящая работа.

Распределение пульсаров относительно плоскости Галактики

Изучение распределения пульсаров относительно плоскости Галактики очень важно во многих аспектах: а) для выяснения какому населению относятся пульсары, б) какие звезды являются родительскими для пульсаров, в) какие пространственные скорости получают пульсары при рождении вследствие взрыва сверхновой звезды и т.д.

Есть предположение, что пульсары хорошо коррелируют со спиральными рукавами Галактики [4] и рождаются вследствие эволюции O-B звезд, Галактическое распределение которых хорошо известно [5]. Эти звезды сильно сконцентрированы у плоскости Галактики, а в частности близкие O-B звезды распределены ассиметрично относительно плоскости Галактики, которое известно под названием пояса Гульда (см. например [6]). Ассиметричное распределение имеет также газопылевая составляющая

Галактики [7]. Сказанное выше наводит на мысль изучения симметричности распределения пульсаров относительно плоскости Галактики. Для выяснения этого вопроса исследуем зависимость асимметрии распределения пульсаров относительно плоскости Галактики в зависимости от Галактической долготы l . В таблице 1 приведены результаты этого исследования.

Таблица 1.

$l \setminus R$ кпс	$0 \div 8$	$4 \div 8$	$0 \div 4$	$2 \div 4$	$0 \div 2$
$-60^\circ \div 60^\circ$	32.1	10.6	62.2	79.4	36.9
$60^\circ \div 300^\circ$	-98.9	-113.8	-91.1	-77.9	-103.3

В первой строке таблицы приведено разделение пульсаров в группы в зависимости от их расстояния от Солнца в килопарсеках. Во второй и третьей строке приведены значения среднего расстояния пульсаров от плоскости Галактики $\langle z \rangle$ (в парсеках) для Галактических направлений, соответственно, к центру и к антицентру Галактики. Из таблицы видно, что действительно плоскость распределения пульсаров наклонена относительно плоскости Галактики. Причем в направлениях к центру Галактики плоскость распределения пульсаров находится выше плоскости Галактики в среднем на 50 парсек, а в направлениях к антицентру Галактики плоскость распределения пульсаров находится ниже плоскости Галактики примерно на 100 парсек.

Распределение всех пульсаров с $|z| \leq 1.5$ кпс, если не рассматривать их зависимость от Галактической долготы l , симметрично относительно плоскости Галактики. Рассмотрим распределение абсолютных расстояний пульсаров $|h|$, которое приведено на рис. 1.

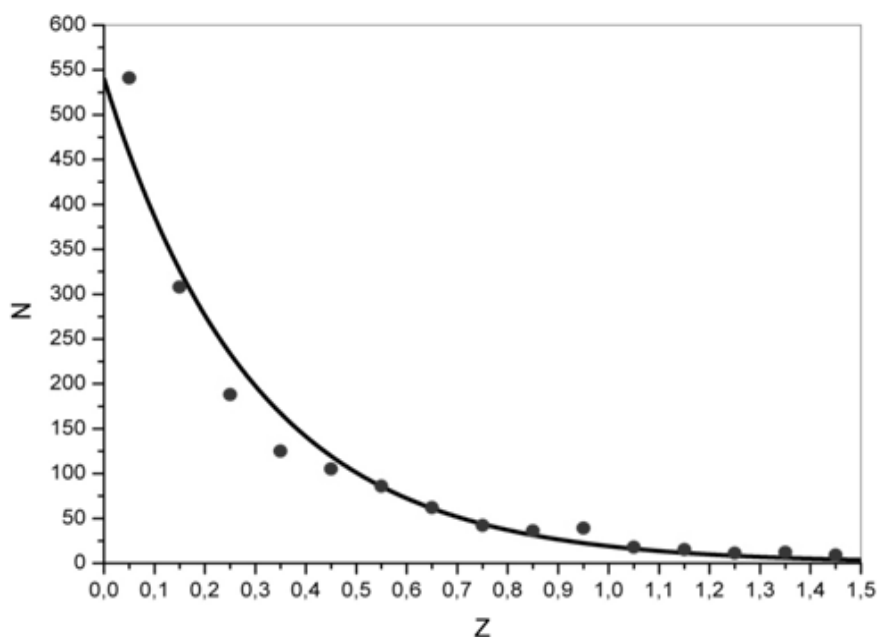


Рис. 1. Распределение абсолютных значений расстояния пульсаров от плоскости Галактики.

На рис. 1 вместе с распределением абсолютных значений расстояния пульсаров от плоскости Галактики приведена также аппроксимация с экспоненциальной функцией. Нормированная функция распределения $\varphi(|z|)$ имеет вид

$$\varphi(|z|) = (1/H) e^{-|z|/H}, \quad (1)$$

из которого следует, что характеристическое расстояние H можно определять как среднее значение абсолютных значений расстояний пульсаров $\langle |z| \rangle$ от плоскости Галактики.

Поскольку принято, что пульсары рождаются у плоскости Галактики и удаляются от нее из-за скорости, полученной в результате вспышки сверхновой звезды, то характеристическое расстояние от плоскости Галактики должно увеличиться по мере увеличения возраста пульсара. В таблице 2 приводятся значения характеристических расстояний H (в парсеках) от плоскости Галактики для разных возрастных групп пульсаров (в годах). В третьей строке таблицы – число пульсаров (N) в соответствующей группе.

Таблица 2.

	$\tau < 10^6$	$10^6 < \tau < 10^7$	$10^7 < \tau < 10^8$
H	131	302	423
N	338	620	395

Из таблицы хорошо видно, что характеристические расстояния H увеличиваются с возрастом пульсаров.

Распределение пульсаров в плоскости Галактики

Во многих работах (см., например [3]) было показано, что в центральной части Галактики плотность пульсаров намного меньше, чем в кольце с диаметром $R \approx 3-4$ кпс от центра Галактики, где плотность достигает максимума. На Галактоцентрических расстояниях больше 4 кпс плотность пульсаров уменьшается и на расстояниях Солнца $R_0 = 8.5$ кпс, она примерно равняется центральной плотности. Надо отметить, что на расстояниях $R \approx 3-4$ кпс от центра Галактики, максимума достигает также электронная концентрация n_e в модели, использованной Тейлором и Кордесом при определении расстояний пульсаров [2]. В настоящем параграфе будет изучено распределение пульсаров относительно центра Галактики с использованием более многочисленных данных и отличающегося методом обработки, в сравнении с предыдущими работами.

Будем изучать зависимость плотности пульсаров от Галактоцентрического расстояния в направлении центра Галактики. В плоскости Галактики были выделены области, в которых пульсары имеют примерно одинаковые расстояния от центра Галактики. Потом из каждой области выбирались те пульсары, которые примерно одинаково удалены от Солнца. Это делается следующим образом. Сначала в плоскости Галактики проводятся Галактоцентрические окружности с расстоянием R , отличающиеся друг от друга на 1 кпс. Таким образом получают кольца с шириной 1 кпс. Потом проводятся такие же окружности, но с центром Солнце. В результате сечения этих окружностей Галактическая плоскость разделяется на участки, в которых пульсары имеют примерно одинаковые расстояния R от центра Галактики и одинаковые расстояния d от Солнца. Для нашей работы мы выбрали выделенные таким образом те области, которые находятся на направлении центра Галактики.

На рис. 2 приведены полученные таким образом области и пульсары, находящиеся в них. Центр Галактики находится в точке с координатами (0 кпс.; 0 кпс.), а Солнце – в точке координатами (0 кпс; 8.5 кпс).

Было вычислено число пульсаров в этих областях, площадь области и плотность пульсаров в каждой области. Данные об этих областях приведены в таблице 3, в которой в первой строке расстояния области от центра Галактики, во второй – число пульсаров в области, в третьей строке – площадь области S в кпс², а в четвертой строке средняя плотность Q пульсаров.

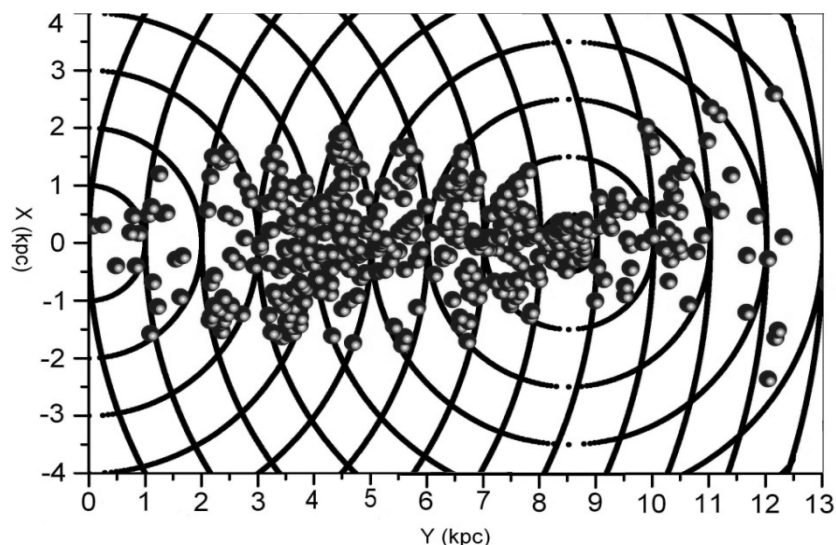


Рис. 2. Наблюдаемое распределение пульсаров в направлении центра Галактики.

Таблица 3.

R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	28	42	92	96	71	48	35	29	43	16	12	25	7
S	1.53	2.25	2.63	2.82	2.86	2.74	2.47	1.95	3.14	2.17	3.10	3.91	4.68
Q	18.28	18.69	34.99	34.06	24.86	17.49	14.17	14.87	13.69	7.37	3.87	6.39	1.49

Из таблицы видно, что в центральной области Галактики есть большой дефицит пульсаров. Такой дефицит частично или полностью можно объяснить тем, что чем дальше пульсар от солнца, тем труднее его найти. Это связано со многими факторами. Самое главное из этих факторов конечно является то, что из-за ограниченной чувствительности приемника пульсары малой радиосветимости находящиеся дальше некоторого расстояния от Солнца невозможно наблюдать. Однако есть ряд немаловажных факторов затрудняющих обнаружение далеких пульсаров. Такими факторами являются рассеивание и мерцание излучения пульсара в межзвездной среде, расширение импульса, внутренняя вариация излучения пульсара и др. Учет влияния отдельных факторов, тем более всех этих факторов совместно на обнаружение пульсара очень сложная задача. Поэтому до сих пор не получена более или менее приемлемая функция светимости пульсаров. Например, в работах [2, 9] для распределения светимости пульсаров применяется нормальная функция от логарифма светимости. Параметры распределения определяются из наблюдательных данных используя разные модели пульсаров и Галактического распределения межзвездной среды, делая при этом разные теоретические предположения.

В настоящей работе для построения истинного распределения плотности пульсаров в плоскости Галактики мы воспользовались более простым методом, не используя никаких моделей и предположений. Суть метода состоит в том, что из наблюдений мы приблизительно имеем нижний предел светимости пульсаров, начиная с которого пульсары обнаруживаются в упомянутых выше областях. Используя функцию светимости пульсаров можно оценить сколько процентов пульсаров не обнаружено в каждой области из за всех мешающих факторов и восстановить примерное число пульсаров в этих областях. На рисунке 3 приведено истинное распределение плотности пульсаров в зависимости от расстояния по направлению центра Галактики. Для построения этого распределения была использована функция светимости пульсаров полученная с ис-

пользованием только близких пульсаров. Для построения истинного распределения плотности пульсаров была использована также функция светимости из [2, 9]. Надо отметить, что все распределения полученные с использованием разных функций светимости имеют примерно одинаковый вид, поэтому на рисунке 3 приводится распределение, в котором для построения функции светимости были использованы пульсары находящиеся ближе 1.5 кпс.

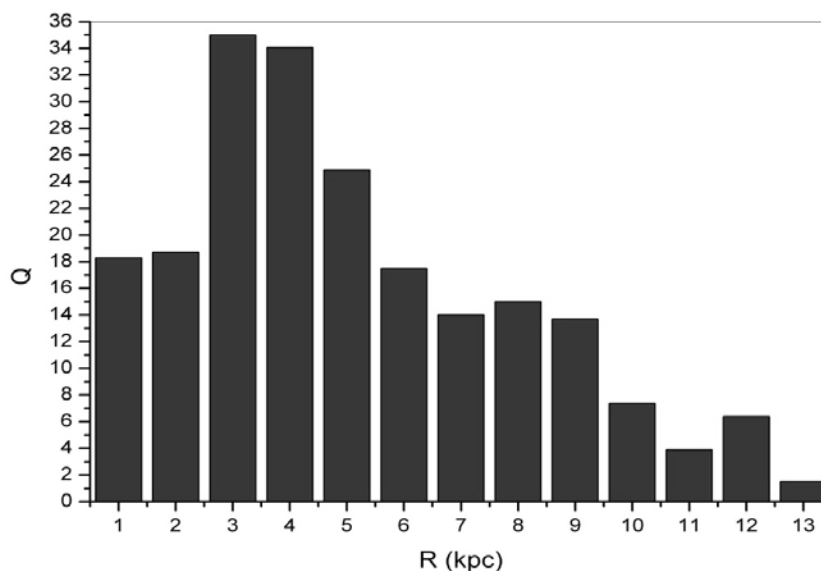


Рис. 3. Истинное распределение плотности пульсаров в зависимости от расстояния.

Из рисунка видно, что плотность нормальных пульсаров достигает максимума на расстояниях 3–4 кпс от центра Галактики. В центральной области есть некоторый дефицит пульсаров.

Заключение

Было показано, что нормальные радио пульсары распределены не симметрично относительно плоскости Галактики. Причем в направлениях к центру Галактики пульсары расположены в среднем на 50 пс выше плоскости Галактики, а в направлениях к антицентру пульсары расположены в среднем на 100 пс ниже плоскости Галактики.

Распределение всех пульсаров относительно плоскости Галактики хорошо представляется экспоненциальной функцией с характеристическим расстоянием от плоскости Галактики примерно 300 пс. Причем характеристическое расстояние от плоскости Галактики увеличивается от значений примерно 130 пс к 420 пс в зависимости от возраста пульсаров.

В распределении поверхностной плотности пульсаров наблюдается максимум на галактоцентрических расстояниях примерно 3–4 кпс. Причем плотность пульсаров в центральной области Галактики примерно такая же, как вокруг Солнца. Этот результат может сильно зависеть от модели Галактического распределения электронной концентрации использованной при вычислении расстояний пульсаров [1, 8], приведенной в каталоге пульсаров ATNF (ATNF Pulsar Catalogue). Для исследования вопроса такой зависимости будет посвящена другая работа.

Литература

1. Taylor, J.H. and Cordes, J.M. Pulsar Distances and the Galactic distribution of free electrons // *Ap.J.* 411, 674, 1993.
2. Faucher-Giguere, F.C. and Kaspi, V.M. *Ap.J.*, 643, 332, 2006.

3. *Yusifov, and I. Küçük.* Revisiting the radial distribution of pulsars in the Galaxy // *A&A*, 422, 545–553, 2004.
4. *Kramer, M., et al.* // *MNRAS*, 342, 1299, 2003.
5. *Bronfman, L., Casassus, S., May, J., Nyman, L.-A.* // *As&Ap*, 358, 521, 2000.
6. *Biazzo, K.; Alcalá, J.M.; Covino, E.; Sterzik, M.F.; Guillout, P.; Chavarría-K., C.; Frasca, A.; Raddi, R.* Crossing the Gould Belt in the Orion vicinity // *A&A*, 542, A.115B, 2012.
7. Куликовский, П.Г. Звездная астрономия. – М.: Наука, 1985, с.16.
8. *Cordes, J.M.* A New Model for the Galactic Electron Density and its Fluctuations // *ASPC*, 317, 211C, 2004.
9. *Chennamangalam, Jayanth; Lorimer, D.R.; Mandel, Ilya; Bagchi, Manjari.* // *MNRAS*, 431, 874, 2013.

ON THE DISTRIBUTION OF PULSARS IN THE GALAXY

Andreasyan H.A., Andreasyan R.R., Paronyin G.M.

Byurakan Astrophysical Observatory, Byurakan, Armenia

It has been shown that normal radio pulsars are not distributed symmetrically relative to the plane of the Galaxy. Moreover, in the directions to the Galactic center the plane of symmetry of pulsars is higher than galactic plane on average of 50 ps, and towards anticentre – on average of 100 ps below of this plane.

Distribution of all pulsars relative to the plane of the Galaxy can be represented by an exponential function. The characteristic distance increases within 130 ps–420 ps, depending on the age of the pulsar.

In the distribution of the surface density of pulsars is observed a maximum at the distances from the Galaxy centre of about 3–4 kps. The density of pulsars in the central region of the galaxy is about the same as in the vicinity of the sun.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗДЫ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ДВОЙНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Жуйко С.В.¹, Орлов В.В.^{2,3}, Широкова К.С.^{2,3}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Выполняется численное моделирование движения звезды в гравитационном поле двойной черной дыры с различными отношениями масс компонентов. Рассмотрены две модели: 1) задача двух неподвижных центров; 2) общая задача трех тел. Первая модель применима только на коротких временах $\Delta t \ll T$, где T – период двойной системы. Вторая модель применима на любых временах, за исключением тесных сближений звезды с одним из компонентов двойной $r \leq 0.002$ пк, где r – расстояние от звезды до ближайшей к ней черной дыры. При более близких проходах следует учитывать релятивистские поправки. Получены оценки вероятностей формирования гиперскоростных звезд в результате таких взаимодействий. Рассмотрено применение результатов к гипотетической двойной черной дыре в ядре нашей Галактики.

Введение

В некоторых работах предполагается, что в ядре нашей Галактики может располагаться двойная система, состоящая из двух сверхмассивных компактных объектов (см., например, [1]). Один из них – это сверхмассивная черная дыра (СМЧД) Стрелец А* с массой $(4,31 \pm 0,06) \cdot 10^6$ масс Солнца – компактный радиоисточник, находящийся в центре Галактики, второй – черная дыра промежуточной массы (ЧДПМ), скажем, 10^4 масс Солнца. Звезды, пролетающие сквозь такую "двойную", будут получать высокие скорости. За короткое время пролета ее компоненты допустимо считать неподвижными.

Вопрос, который, по мнению авторов, можно попытаться решить в рамках задачи двух неподвижных центров: до какой степени и при каких условиях можно разогнать звезды с помощью такого "ускорителя". В задаче есть ряд параметров – масса второй черной дыры, расстояние между черными дырами, прицельное расстояние, скорость подлета и угол подлета звезды. Сближение с двойной черной дырой может быть одним из механизмов образования быстро летящих звезд в Галактике. В задаче двух неподвижных центров решение будет приближенным. Более точное решение можно получить в рамках задачи трех тел: СМЧД-ЧДПМ-звезда. Мы будем рассматривать оба варианта.

Постановка задачи двух неподвижных центров

Рассмотрим постановку нашей задачи в рамках задачи двух неподвижных центров. Предположим, что в пространстве находятся две неподвижные материальные точки (две черные дыры справедливо считать материальными точками при определенной шкале расстояний) P_1 и P_2 с массами m_1 и m_2 , под действием ньютоновского притяжения которых свободно движется материальная точка P (звезда) массой m_p . Длину отрезка $[P_1, P_2]$ возьмем равной a – большой полуоси орбиты двойной и для определенности положим, что $m_1 \geq m_2$. Начало координат выберем в центре масс двойной системы.

Дифференциальные уравнения движения точки P , притягиваемой центрами P_1 и P_2 с силами, обратно пропорциональными квадратам расстояний, имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= -Gm_1 \frac{x-c_1}{r_1^3} - Gm_2 \frac{x-c_2}{r_2^3}, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -Gm_1 \frac{y}{r_1^3} - Gm_2 \frac{y}{r_2^3}, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -Gm_1 \frac{z}{r_1^3} - Gm_2 \frac{z}{r_2^3},\end{aligned}\tag{1}$$

где r_1 и r_2 – расстояния от притягивающих центров до звезды, c_1 и c_2 – абсциссы притягивающих центров, G – гравитационная постоянная. Эти уравнения и следует численно интегрировать.

Рассмотрим задачу Коши – находим координаты (x, y, z) точки P как функции времени, удовлетворяющие уравнениям движения (1) с заданными начальными условиями:

$$\begin{aligned}x(t_0) &= x_0, & \dot{x}(t_0) &= \dot{x}_0, \\ y(t_0) &= y_0, & \dot{y}(t_0) &= \dot{y}_0, \\ z(t_0) &= z_0, & \dot{z}(t_0) &= \dot{z}_0.\end{aligned}\tag{2}$$

Условия, необходимые для возможности применения задачи двух неподвижных центров

Рассмотрим два тела P_1 и P_2 с массами m_1 и m_2 , удаленные друг от друга на такое расстояние, что при взаимодействии по закону всемирного тяготения Ньютона их можно считать материальными точками. Положим, что период их взаимного обращения равен T . Допустим, мы хотим изучить поведение третьего тела P с массой m_p в рамках задачи двух неподвижных центров.

Тогда необходимо обеспечить выполнение следующих условий.

1. Тело P не должно оказывать заметного гравитационного влияния на тела P_1 и P_2 , т. е. должно выполняться условие

$$m_1 \geq m_2 \gg m_p.\tag{3}$$

Это условие в нашем случае выполняется, если масса звезды много меньше масс обеих черных дыр. Для черной дыры промежуточной массы $m_2 \sim 10^4$ масс Солнца условие выполняется.

2. Интервал времени Δt , на котором исследуется движение тела P под действием двух центров, должен удовлетворять неравенству

$$\Delta t \ll T.\tag{4}$$

Это условие необходимо проверять.

Предположим, что в ядре Галактики находится двойная система, состоящая из двух черных дыр: СМЧД (источник Sgr A*) массой $m_1 = 4 \cdot 10^6$ масс Солнца и ЧДПМ массой $m_2 = 10^4$ масс Солнца. Пусть орбитальный период двойной равен T . С двойной черной дырой будут взаимодействовать звезды центрального скопления. Предположим, что характерные скорости этих звезд в окрестности двойной системы равны v .

Большая полуось орбиты двойной связана с ее периодом третьим законом Кеплера

$$a = \sqrt[3]{\frac{T^2}{4\pi^2} G(m_1 + m_2)}.\tag{5}$$

Время, которое звезда пребывает внутри сферы радиусом a с центром в СМЧД оценим по порядку величины. Для такой оценки нам нужны характерные скорости звезд центрального скопления в окрестности двойной системы. Их можно взять,

например, из статьи Оха и др. [2]. Звезда, влетающая в эту сферу со скоростью v , движется, главным образом, под влиянием СМЧД (тело m_1). Тогда мы можем использовать уравнения для задачи двух тел (СМЧД – звезда). На границе сферы справедлив интеграл энергии

$$h = v^2 - \frac{2Gm_1}{a}, \quad (6)$$

где h – полная энергия. Предположим, что перицентрическое расстояние для звезды равно r . Тогда в пределах сферы звезда будет пребывать в течение времени

$$\Delta t = 2 \int_r^a \frac{dx}{\sqrt{\frac{2Gm_1}{x} + \left(v^2 - \frac{2Gm_1}{a}\right)}}. \quad (7)$$

Если на границе сферы действия звезда имеет параболическую орбиту (примем для грубой оценки), то

$$v^2 = \frac{2Gm_1}{a}, \quad (8)$$

и

$$\Delta t = 2 \int_r^a \frac{dx}{\sqrt{\frac{2Gm_1}{x}}} = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{Gm_1}} (a^{3/2} - r^{3/2}). \quad (9)$$

В предельном случае, когда $r = 0$ (столкновение с СМЧД), мы получим верхнюю оценку времени

$$\Delta t = 2 \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{\frac{2Gm_1}{x}}} = \frac{2\sqrt{2}a^{3/2}}{3\sqrt{Gm_1}}. \quad (10)$$

Сопоставим оценку (10) и период двойной $T \cong \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{Gm_1}}$. Финальное неравенство имеет

вид:

$$\frac{T}{\Delta t} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \approx 0.9428... \ll 2\pi \approx 6.2831... \quad (11)$$

Эти величины различаются в 6.66... раз, что, по-видимому, недостаточно. Однако, если скорость звезды значительно (в несколько раз) превышает параболическую или перицентрическое расстояние существенно больше и сравнимо с величиной a (звезда скопления не залетает глубоко внутрь сферы), то неравенство (4) может быть выполнено и задачу двух неподвижных центров можно использовать.

Алгоритм вычислений

Будем проводить моделирование двумя способами:

- 1) в рамках задачи двух неподвижных центров;
- 2) в рамках общей задачи трех тел.

В первом случае численно интегрируется система уравнений (1), во втором случае – система уравнений для общей задачи трех тел.

Зададим начальные условия и выберем систему единиц так, чтобы можно было сравнивать результаты вычислений первым и вторым способами. Рассмотрим следующие варианты задачи. Массы черных дыр равны $m_1 = 4 \cdot 10^6$ масс Солнца,

$m_2 = 1 \cdot 10^4, 1 \cdot 10^5, 1 \cdot 10^6$ масс Солнца; расстояние между ними равно a – параметр задачи. Рассмотрим следующие варианты: $a = 0.01, 0.03, 0.1$ пк. В первом случае тела неподвижны, а во втором случае нужно задать элементы орбиты двойной, в частности эксцентриситет орбиты. Рассмотрим два варианта: $e = 0, e = 0.7$. Первое значение соответствует круговой орбите, а эксцентриситет $e = 0.7$ упоминается в работе [1]. Массу звезды возьмем равной $m_p = 10$ масс Солнца (звезды спектрального класса В, которые, главным образом, обращаются вокруг СМЧД в центре Галактики).

Систему единиц выберем следующим образом:

1. единица массы – $\mu = 10^6$ масс Солнца;
2. единица длины – $d = 0.01$ пк;
3. единица времени – $\tau = 10^4$ лет.

Гравитационная постоянная в этой системе единиц равна $G = 0.4499 \cdot 10^6$. Единица скорости $v = d/\tau = 0.9778$ км/с.

Зададим начальные условия для звезды центрального скопления, влетающей в сферу действия, заданную нами. Для этого воспользуемся результатами работ [3] и [4], в которых моделировались сближения трех одиночных звезд. Будем рассматривать прицельное движение звезды относительно центра масс черных дыр. Для моделирования начальных условий будем использовать метод Монте-Карло (см. [3] и [4]).

Для каждого набора параметров рассмотрим $N = 10000$ вариантов начальных условий. Для каждого варианта будем фиксировать момент вылета звезды за пределы сферы радиусом 1 пк (100 единиц расстояния, принятых нами). Также вводим ограничение по времени счета $t > 1000a/v$, исключаем из рассмотрения варианты, в которых произошли тесные сближения звезды с одной из черных дыр до расстояния $r \leq 0.002$ пк. Так как в таких случаях необходимо учитывать релятивистские поправки.

При пересечении звездой сферы радиусом 100 принятых единиц расстояния будем фиксировать модуль скорости звезды. Если он превышает критическое значение, равное 1200 км/с, то звезда приобретает статус гиперскоростной – она покидает Галактику по гиперболической орбите.

Результаты

Численные эксперименты показали, что в рамках задачи двух неподвижных центров звезда ни разу не вышла за пределы сферы радиусом 1 пк. Это связано с консервативностью данной системы и ограничениями, следующими из интеграла энергии. В то время как для задачи трех тел такие события происходили. Примеры траекторий для одних и тех же начальных условий приведены на рис. 1.

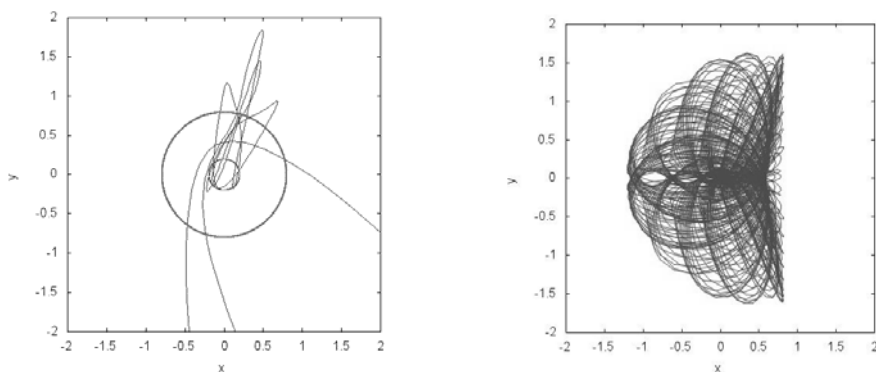


Рис. 1. Примеры траекторий для одних и тех же начальных условий в задаче трех тел (слева) и в задаче двух неподвижных центров (справа) в проекции на плоскость XY.

В табл. 1 приведено число событий ухода из 10000 вариантов в зависимости от начальных условий – массы ЧДПМ и большой полуоси a орбиты двойной при эксцентриситете ее орбиты $e = 0$. Через косую черту приведено число вариантов, в которых скорость звезды превысила критическую, равную 1200 км/с. Эти звезды должны покинуть Галактику на расстояниях примерно 50 кпк от центра. Как видно из таблицы, с ростом m_2 увеличивается число вариантов, в которых звезда достигает критическое расстояние, равное 1 пк. Также возрастает число образовавшихся гиперскоростных звезд. С увеличением полуоси a двойной увеличивается число выбросов звезды за расстояние, равное 1 пк. С другой стороны, количество гиперскоростных звезд сильно уменьшается, а при $a = 0.1$ пк такие звезды отсутствуют вовсе. Таким образом, для формирования гиперскоростных звезд с помощью такого механизма необходимо выполнение двух условий: 1) двойная система должна быть довольно тесной; 2) отношение масс компонентов двойной системы должно быть не слишком малым.

Таблица 1. Число уходов за расстояние, равное 1 пк, и число образованных гиперскоростных звезд в зависимости от параметров задачи при $e = 0$.

$a \backslash m_2$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
0.01 пк	28/1	1948/288	9131/2649
0.03 пк	40/0	2952/32	9850/337
0.1 пк	90/0	4674/0	9963/0

Таблица 2. Число уходов за расстояние, равное 1 пк, и число образованных гиперскоростных звезд в зависимости от параметров задачи при $e = 0.7$.

$a \backslash m_2$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
0.01 пк	13/3	1628/375	8480/3028
0.03 пк	33/2	2694/112	9593/1001
0.1 пк	72/0	4313/19	9932/167

В табл. 2 представлены результаты для начального эксцентриситета двойной $e = 0.7$. Структура таблицы аналогична структуре табл. 1. В этом случае выбросов звезды на расстояние 1 пк в среднем меньше, чем при $e = 0$. С другой стороны, число формирований гиперскоростных звезд несколько больше.

Выводы

- 1) В рамках задачи двух неподвижных центров не удастся сгенерировать гиперскоростные звезды из-за ограничений, связанных с консервативностью этой системы.
- 2) В рамках общей задачи трех тел возможно образование гиперскоростных звезд; частота их появления сильно возрастает с увеличением массы второй черной дыры.
- 3) В рамках общей задачи трех тел доля звезд, достигающих пограничного значения расстояния в 1 пк, уменьшается с ростом тесноты системы, доля гиперскоростных звезд при этом увеличивается.

Литература

1. Merritt D., Gualandris A., Mikkola S. Explaining the orbits of the Galactic Center S-stars // *Astrophys. J.*, 693, L35 (2009).
2. Oh S., Kim S. S., Figer D.F. Mass distribution in the central few parsecs of our Galaxy // *J. Korean Astron. Soc.*, 42, 17 (2009).

3. Агекян Т.А., Аносова Ж.П. Вероятность формирования двойных систем при тройных сближениях // Астрон. журн., 48, 524 (1971).
4. Aarseth S.J., Heggie D.C. The probability of binary formation by three-body encounters // Astron. Astrophys., 53, 259 (1976).

SIMULATIONS OF STAR MOTION IN THE GRAVITATIONAL FIELD OF BINARY BLACK HOLE

Zhuiko S.V.¹, Orlov V.V.^{2,3}, Shirokova K.S.^{2,3}

¹*Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

We perform numerical simulations of star motion in the gravitational field of a binary black hole with different mass ratios of components. We consider two models: 1) the problem of two fixed centers; 2) the general three-body problem. The first model is applicable only for short times $\Delta t \ll T$, where T is the orbital period of the binary system. The second model is applicable to all times except the close encounters of a star with one of the components of the binary $r \leq 0.002 pc$, where r is the distance from the star to the nearest black hole to her. At the closer passages one should take into account the relativistic corrections. We have found the estimations of the probability of formation of high-velocity stars as a result of such interactions. We consider the application of the results to a hypothetical double black hole in the nucleus of our Galaxy.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТНЫХ ЗВЕЗД ПУЛКОВСКОЙ ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ

Княева О.В.¹, Орлов В.В.^{1,2}, Жучков Р.Я.^{1,3}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Предложен алгоритм анализа динамики кратных звезд любой иерархии с целью оценки вероятности их гравитационной связи. Мы рассматриваем движения в картинной плоскости, пренебрегая различием в значениях параллакса и полагая относительные лучевые скорости $V_r = 0$ для всех компонентов в системе. При этом мы получаем максимальное значение отношения модуля потенциальной энергии к кинетической $\kappa = |U/T|$ в кратной системе. При $\kappa \ll 1$ в системе имеются оптические компоненты, при $\kappa \geq 1$ для уверенных выводов необходимы данные о лучевых скоростях звезд. Три звезды с уже определенными орбитами – ADS 48, 9626 и 10288 – рассматривались в качестве контрольных объектов. Методом Монте-Карло вычислены вероятности гравитационной связи компонентов в кратных системах и выявлены оптические компоненты, входящие в системы.

Среди визуально-кратных звезд, входящих в программу наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове, есть мало изученные звезды, физическая связь которых не очевидна, так как собственные движения довольно близки, но малы, а тригонометрический параллакс или не определен, или определен только для одного компонента. Содержание данной работы – разработка алгоритма исследования, проверка его на примерах хорошо изученных звезд и определение в первом приближении, какие компоненты в избранных кратных системах являются оптическими, а какие могут быть физически связанными, а потому заслуживают внимания астрономов.

Кратко изложим алгоритм исследования.

Так как все рассматриваемые звезды имеют наблюдательную историю, мы имеем возможность получить с хорошей точностью положения всех компонентов относительно первого (главного), соответствующие двум моментам времени: t_k , $\rho_{i,k}$, $\theta_{i,k}$, где $k = 1, 2$; $i = 2, \dots, n$; n – число компонентов в кратной системе.

Координаты центра масс системы вычисляются по формулам:

$$x_{c,k} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{i,k} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad y_{c,k} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{i,k} M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (1)$$

Здесь $x_{i,k} = \rho_{i,k} \sin \theta_{i,k} / p$, $y_{i,k} = \rho_{i,k} \cos \theta_{i,k} / p$, p – параллакс, M_i – масса i -го компонента, выраженная в массах Солнца.

Полная энергия системы $E=U+T$, где U – потенциальная энергия, T – кинетическая.

$$U = -G \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{M_i M_j}{r_{i,j}}, \quad T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i v_i^2. \quad (2)$$

Здесь $r_{i,j}$ – расстояние между компонентами i и j , выраженное в АЕ, v_i – скорость i -го компонента относительно центра масс, выраженная в АЕ/год. Вычисляется отношение модуля потенциальной энергии к кинетической $\kappa = |U/T|$.

Отметим следующие важные моменты.

1) Мы считаем, что система не имеет еще не открытых компонентов, которые могут оказать существенное влияние на результат. Если имеются известные визуально невидимые спутники, то мы учитываем массы этих спутников, но считаем, что фотоцентр подсистемы совпадает с ее центром масс.

2) Мы считаем, что центр масс системы остается неподвижным, изменение конфигурации зависит только от скорости прямолинейного движения компонентов относительно центра масс, и эта скорость постоянна в течение интервала времени $|t_1 - t_2|$.

3) Для большинства звезд лучевые скорости неизвестны, а тригонометрические параллаксы или неизвестны, или определены только для одного компонента. Поэтому мы рассматриваем только движение в картинной плоскости и получаем максимальное значение κ . Если $\kappa \ll 1$, то мы можем уверенно утверждать, что в системе имеются оптические компоненты. Для выявления этих компонентов вычисления повторяются для визуально-двойных подсистем. Если $\kappa \geq 1$, то для уверенных выводов необходимы данные о лучевых скоростях звезд.

4) Мы использовали параллаксы из модифицированного каталога Гиппаркос [1]; если параллакс неизвестен, то мы сами определяли фотометрический параллакс. Массы компонентов оценивались нами по эволюционным трекам [2], а также по спектральными классам согласно справочнику Аллена [3]. Данные о спектральных классах и звездных величинах были взяты из опубликованной литературы. Иногда эти данные были противоречивы, тогда рассматривалось несколько вариантов. Подробно эта часть исследования описана в работе [4].

5) Для вычисления относительных положений на первую эпоху t_1 использовались данные из каталога WDS [5], на вторую эпоху t_2 – наблюдения на 26-дюймовом рефракторе [6]. Возможности разрешения двойной звезды для 26-дюймового рефрактора ограничены ($\rho > 2''$). Для всех неразрешенных внутренних подсистем мы пренебрегаем различием положений фотоцентра и центра масс, полагая, что оно существенно не влияет на усредненные положения для двух эпох и средние скорости.

Методом Монте-Карло были оценены вероятности того, что $\kappa > 1$. Все исходные параметры варьировались случайным образом по нормальному закону с дисперсией, равной квадрату средней ошибки данного параметра, и математическим ожиданием, равным его исходному значению. Параметры считались независимыми. Всего для каждой системы проводилось по 10000 испытаний.

В двойных подсистемах отношение энергий легко преобразуется в следующие формулы:

$$\kappa = 8\pi^2 p (M_1 + M_2) / \rho (\Delta v)^2, \quad \Delta v^2 = (\mu/p)^2 + (\Delta V_r / 4.74)^2. \quad (3)$$

Здесь параллакс p , относительное движение в картинной плоскости μ и расстояние между компонентами ρ измеряются в миллисекундах дуги, а относительная лучевая скорость ΔV_r – в км/с.

В тех случаях, когда относительное движение двойной системы получается с высокой точностью, вычисление по формуле (3) предпочтительнее, т.к. использует мгновенную скорость и не требует предположения о прямолинейном равномерном движении.

В табл. 1 представлены следующие данные о компонентах систем:

- 1 – номера по каталогам WDS и ADS;
- 2 – компонент;
- 3 – звездная величина;
- 4 – спектральный класс;
- 5–6 – собственные движения по x и y по данным WDS, мсд/год;
- 7 и 10 – первая и вторая эпохи, годы;

8 и 11 – расстояния относительно компонента А и ошибка на эпохи t_1 и t_2 , мсд;
 9 и 12 – позиционные углы относительно компонента А на эпохи t_1 и t_2 , градусы.
 Эти параметры характеризуют точность исходных данных, физические свойства и конфигурацию кратной системы.

Таблица 1. Данные о компонентах систем.

WDS/ADS	K	m_V	Sp	μ_x	μ_y	t_1	$\rho_1 \pm \sigma$	$\theta_1 \pm \sigma$	t_2	$\rho_2 \pm \sigma$	$\theta_2 \pm \sigma$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
00057+4549 48	A	8.83	K6-M0V	+879	-164	19	-	-	19	-	-
	B	9.00	M0V	+837	-163	66	5767±4	167.212±.034	95	6066±6	179.708±.019
	F	9.97	M2e	+870	-151		327591±10	253.780±.015		328074±7	253.768±.005
01393+5257 1289	A	9.86	A5-9	+2	-7	19	-	-	19	-	-
	B	11.0	A5-9	-3	-5	00	10059±122	223.018±.234	78	9.509±8	220.602±.016
	C	10.65	K3III	+5	-1		107130±78	88.294±.102		107.933±12	88.260±.009
02122+4440 1693* ¹	Aa	10.83	*	-15	-1	19	-	-	19	-	-
	B	11.1	G5V	-12	0	20	8548±19	33.000±.253	90	8640±5	33.934±.028
	C	11.91	G5V	-5	-3		13597±22	196.921±.365		13.465±5	194.706±.30
02322+5415 1918	A	10.09	B9-A7	+2	-5	19	-	-	19	-	-
	B	11.2	A-F3	+6	+2	10	7942±35	308.667±.673	85	8048±4	310.887±.052
	C	10.5	A-F0	-	-		8287±59	355.310±.472		8545±4	351.649±.045
04009+2312 2926	A	6.92	B9V	+15	-35	18	-	-	19	-	-
	B	7.76	B8-A3V	+15	-35	50	7336±46	128.702±.157	90	7444±27	127.245±.033
	C	9.61		+13	-35		58034±166	241.475±.112		57943±11	241.896±.022
06034+2738 4629* ²	A	8.81	F2-G7 ?	+2	-33	19	-	-	19	-	-
	B	9.68	A7-F2	+7	-20	20	12082±26	256.994±.182	90	11601±3	261.492±.017
	C	11.10	G5	-2	-36		25192±58	188.853±.087		25341±9	188.847±.016
09343+6648 7425	A	8.26	F4-6III?	-23	-28	18	-	-	19	-	-
	B	8.20	F5-6III?	-23	-28	80	10513±33	247.920±.157	90	10276±5	248.925±.022
	C	9.11	F6-GIII	-40	-28		130717±129	214.647±.115		130846±18	215.500±.012
09354+3958 7438* ³	A	6.77	A3m ?	-1	+14	19	-	-	19	-	-
	B	8.03	G-F?	-3	+12	22	24824±32	148.581±.090	95	25011±8	149.209±.026
	C	8.40	F5V	-33	-20		117573±82	324.363±.055		116775±23	322.774±.010
11551+4629 8347* ⁴	AB	6.54	A3V	+10	+3	18	-	-	19	-	-
	C	8.32	-	+10	+3	50	3837±26	35.305±.271	90	3737±19	41.692±.080
	Dd	6.99	A1+F	+12	0		63017±55	112.290±.113		63004±8	113.805±.005
14375+4743 9327* ⁵	A	10.15	G5	-5	-7	19	-	-	20	-	-
	B	11.90	-	-	-	10	4569±111	13.198±.707	00	4791±35	14.587±.248
	Cc	10.10	K0	-13	-7		79387±199	116.940±.120		78719±19	117.447±.014
15245+3723 9626* ⁶	Aa	4.31	F0-F4	-147	+86	19	-	-	19	-	-
	B	7.09	F9-G0	-151	+87	00	108317±42	171.017±.070	96	108916±17	170.989±.011
	C	7.63	G0-G1	-151	+87		108212±65	170.509±.105		106914±37	170.614±.009
15589+2147 9865* ⁷	A	8.45	G, KIII ?	-16	+29	18	-	-	19	-	-
	B	9.25	A2-7 V	-17	-13	50	56294±100	58.445±.249	96	56196±47	61.511±.067
	C	9.7	K?,A?	+3	+30		60050±205	56.438±.136		59026±47	59.521±.058
16579+4722 10288	A	7.82	K0V	-147	+272	19	-	-	20	-	-
	B	11.19	-	-147	+272	20	3387±88	52.841±.419	00	4889±16	61.999±132
	C	7.88	K0-3V	-143	+245		113498±58	261.905±.072		112502±14	261.669±.008

Примечания к таблице 1:

*¹ADS 1693: А – затменно-двойная, спектры компонентов G5V и M3-5.

*²ADS 4629: данные о спектральном классе компонента А противоречивы, поэтому вычисляются 2 варианта с разными массами.

*³ADS 7438: А – тесная тройная система, В – двойная. Данные о спектральных классах противоречивы, массы компонентов взяты из MSC [7].

*⁴ADS 8347: А – сложная система (тройная [8] или двойная [7]), АВ – тесная двойная ($\rho \approx 0.3''$). В 2009 году был открыт тесный компонент звезды D [9].

*⁵ADS 9327: по наблюдениям на спутнике Гиппаркос [1] был открыт спутник у компонента С ($\rho = 0.046''$, $\Delta m = 0.23^m$), поэтому масса С удвоена. Считаем, что все звезды принадлежат главной последовательности.

*⁶ADS 9626: положения на первую эпоху получены пересчетом на основании исследования, выполненного в работе [10].

*⁷ADS 9865: спектры А и С противоречивы. Массу С оцениваем по разности звездных величин, полагая в одном случае, что близкие компоненты В и С ($\rho = 3.5''$) одного спектрального класса А, а в другом – что А и С одного спектрального класса К.

Таблица 2. Результаты исследования для каждой системы.

WDS/ADS [ссылки]	Комп.	$p \pm \sigma$		$M_1 \pm \sigma$	$M_2 \pm \sigma$	$M_3 \pm \sigma$	κ	$\kappa' \pm \sigma$	P	p_{cr}	Опт. комп.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
00057+4549 48 [11]	ABF	88.7 ± 1.6	t	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1	5.0	5.0 ± 0.7	100	51.7	-
01393+5257 1289	ABC	1.8 ± 0.6	p	1.8 ± 0.1	1.6 ± 0.1	1.4 ± 0.1	0.0015	0.0015 ± 0.0005	0	15.7	A,B,C
02122+4440 1693	ABC	6.2 ± 0.8	t	1.2 ± 0.1	1.85 ± 0.10	1.75 ± 0.10	0.14	0.15 ± 0.08	0	11.8	C
02322+5415 1918	ABC	2.4 ± 0.3	p	1.8 ± 0.1	1.4 ± 0.1	1.65 ± 0.10	0.13	0.13 ± 0.03	0	10.3	A,B,C
04009+2312 2926 [12]	ABC	3.0 ± 1.4	t	3.7 ± 0.5	2.7 ± 0.5	2.0 ± 0.3	0.2	0.2 ± 0.2	0.5	5.3	C?
		6.2 ± 0.8	p				1.6	1.8 ± 1.4	75.2	5.3	-
06034+2738 4629	ABC	5.8 ± 0.7	p	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.020	0.020 ± 0.002	0	21.3	B, (AC)?
		11.3 ± 5.2		0.9 ± 0.1	1.6 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.11	0.11 ± 0.01	0	23.5	
09343+6648 7425 [12-15]	ABC	4.4 ± 1.9	t	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.005	0.005 ± 0.001	0	25.2	C (AB)?
09354+3958 7438 [7,12]	ABC	11.7 ± 0.9	t	4.0 ± 0.2	1.65 ± 0.15	1.3 ± 0.2	0.02	0.02 ± 0.03	0	43.6	C
11551+4629 8347[7-9]	(AB)C (Dd)	4.0 ± 0.4	t	8.2 ± 1.8	2.0 ± 0.5	4.5 ± 0.5	0.06	0.06 ± 0.02	0	10.3	D?
				5.2 ± 1.0	2.0 ± 0.5	4.5 ± 0.5	0.04	0.04 ± 0.01	0	11.4	
14375+4743 9327 [13]	AB(Cc)	12.0 ± 2.0	p	0.9 ± 0.1	0.6 ± 0.1	1.6 ± 0.1	0.18	0.19 ± 0.08	0	21.1	C?
15245+3723 9626 [10]	(Aa)BC	28.0 ± 0.7	t	3.1 ± 0.3	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.1	6.8	6.7 ± 0.7	100	14.8	A?
15589+2147 9865[12]	ABC	3.0 ± 1.0	t	1.0 ± 0.1	2.1 ± 0.3	1.9 ± 0.3	0.005	0.005 ± 0.001	0	17.1	A, (BC)? A,B,C
				1.0 ± 0.1	2.1 ± 0.3	0.7 ± 0.1	0.0025	0.0024 ± 0.0005	0	22.0	
16579+4722 10288 [16]	ABC	56.0 ± 0.5	t	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.7 ± 0.1	8.6	8.5 ± 1.8	100	26.9	-

В табл. 2 представлены результаты данного исследования для каждой системы:

1 – номера по каталогам WDS и ADS, а также дополнительные ссылки, кроме [2, 3, 5] и данных CDS, которые используются во всех случаях;

2 – компоненты системы;

3 – принятое при вычислениях значение параллакса p и его ошибки, мсд;

4 – признак определения параллакса: t – тригонометрический, p – фотометрический;

5–7 – массы компонентов и их ошибки в единицах массы Солнца;

8 – значение κ , соответствующее исходным значениям параметров;

9 – среднее значение κ' , полученное при варьировании исходных параметров с учетом их ошибок;

10 – вероятность физической связанности системы, выраженная в %;

11 – критическое (минимальное) значение параллакса p_{cr} , при котором система может быть физически связанной;

12 – выявленные оптические компоненты, при этом мы учитываем не только вероятность физической связи в двойных подсистемах, но и разность между принятым и критическим значениями параллакса. Если $p_{cr} < 2p$, то мы считаем, что причина может быть в принятом значении параллакса, это отмечено в таблице знаком (?). Подробно об этом см. в работе [4]. Следует также отметить, что в случае двойных подсистем термин «оптический» обозначает то, что невозможна эллиптическая орбита, пролет по гиперболической орбите возможен.

Три звезды – ADS 48, 9626 и 10288 – подробно исследованы в работах соответственно [11], [10] и [16]. Для них определены орбиты внутренних и внешних подсистем, и мы можем проверить, как изменятся результаты табл.2 ($V_r=0$), если добавить данные о лучевых скоростях. Кроме того, все три системы являются иерархическими, поэтому мы можем воспользоваться формулами (3) для внешней подсистемы, образующей пару, и сравнить, насколько сильно различаются результаты. Результаты представлены в табл. 3. Массы компонентов и параллаксы – такие же, как в табл. 2. Представлены следующие параметры:

1 – номер по ADS;

2-4 – лучевые скорости компонентов, км/с.

5 – компоненты кратной звезды, формирующие внешнюю пару;

6-8 – относительное угловое расстояние (мсд), модуль относительного движения в картинной плоскости (мсд/год) и относительная лучевая скорость (км/с) компонентов внешней пары, вычисленные нами с учетом принятых масс компонентов;

9-12 – то же, что и в табл. 2, индекс 1 соответствует вычислениям по формулам (2), индекс 2 – вычислениям по формулам (3).

Таблица 3. Данные и результаты для контрольных систем.

ADS	V_{r1} $\pm\sigma$	V_{r2} $\pm\sigma$	V_{r3} $\pm\sigma$	Па- ра	$\rho\pm\sigma$	$\mu\pm\sigma$	ΔV_r $\pm\sigma$	κ_1 κ_2	$\kappa_1 \pm \sigma$ $\kappa_2 \pm \sigma$	P_1 P_2	p_{cr1} p_{cr2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
48	+0.8 ± 0.2	-2.2 ± 0.2	-1.0 ± 0.3	AB- F	327379 ± 5	3.5 ± 1.1	-0.4 ± 0.4	2.0 3.2	2.0 ± 0.3 6.3 ± 10.8	100 89.5	70.5 60.5
9626	-11.6 ± 1.5	-7.4 ± 0.4	-9.3 ± 0.1	Aa- BC	107969 ± 8	2.9 ± 0.4	+3.2 ± 1.6	1.3 0.2	1.5 ± 0.8 0.7 ± 1.6	66.7 12.9	25.6 45.5
10288	-7.1 ± 0.2	-8.0 ± 0.2	-7.6 ± 0.3	AB- C	114178 ± 15	2.7 ± 1.7	-0.2 ± 0.3	6.2 17.0	5.9 ± 1.4 28 ± 78	100 100	30.2 21.8

Расхождение в κ_2 и κ_2' вызвано большими ошибками относительных движений, расхождение в κ_1 и κ_2 вызвано тем, что в иерархических системах период внутренней пары сравним с интервалом (t_2-t_1) , и предположение о равномерном прямолинейном движении неправомерно. Отношение $(t_2-t_1)/P_{in}$ для ADS 48 равно 0.06, для ADS 9626 – 0.37, для ADS 10288 – 0.24. Отсюда следует, что для ADS 48 из-за больших относительных ошибок μ и ΔV_r более надежный результат, полученный по формулам (2), а для ADS 9626 – по формулам (3). Таким образом, для ADS 48 уверенно подтверждается эллиптическое решение для внешней орбиты [11], а для ADS 9626 гиперболическая орбита [10] возможна с вероятностью 87%. ADS 10288 является, безусловно, гравитационно связанной тройной системой.

На основании табл. 2 мы пришли к выводу, что большинство исследуемых далеких звезд имеют оптические компоненты. В системах ADS 1289, 1918, 4629 и 9865 все звезды не связаны друг с другом гравитационно, но данные результаты следует считать предварительными, т.к. у этих звезд нет тригонометрических параллаксов или он определен с большой ошибкой (ADS 9865). Возможна физическая связь трех компонентов в системах ADS 2926, 8347 и 9327.

Есть надежда, что в ближайшем будущем по данным космического эксперимента GAIA для рассмотренных кратных звезд будут определены лучевые скорости и высокоточные тригонометрические параллаксы, которые можно будет сравнить с критическими значениями, вычисленными в данной работе, и подтвердить или опровергнуть наши выводы о физической связи компонентов в этих системах.

Авторы благодарны авторам архивного каталога WDS и всем наблюдателям 26-дюймового рефрактора.

Литература

1. *F. van Leeuwen* // *Astron. Astrophys.*, **474**, 653 (2007).
2. *L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi* // *Astron. Astrophys. Suppl.*, **141**, 371 (2000).
3. *A.N. Cox*, *Allen's Astrophysical Quantities*. – Berlin: Springer, 2000.
4. *O.V. Kiyeva, V.V. Orlov* // *Astrophys. Bulletin*, **70**, N3, 379 (2015).
5. *B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, G.G. Douglass and C.E. Worley* // *Astron. J.*, **122**, 3466 (2001). Электронная версия (2014).
6. *А.А. Киселев, О.В. Кияева, И.С. Измайлов, Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко, О.О. Василькова, Т.А. Васильева, Н.А. Шахт, Д.Л. Горшанов, Е.А. Рощина* // *Астрон. журн.*, **91**, 130 (2014).
7. *А.А. Tokovinin* // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **124**, 75 (1997). Электронная версия (2010).
8. *P. Zasche, R. Uhlar, M. Slechta, M. Wolf, P. Harmanec, J.A. Nemravova and D. Korcakova* // *Astron. Astrophys.*, **542A**, 78 (2012).
9. *Балега Ю.Ю., Дьяченко В.В., Максимов А.Ф., Малоголовец Е.А., Растегаев Д.А., Романюк И.И.* // *Астрофиз. Бюлл.*, **67**, 48 (2012).
10. *О.В. Кияева, Р.Я. Жучков, Е.В. Малоголовец, В.В. Орлов, А.В. Глухова, Ю.Ю. Балега, И.Ф. Бикмаев* // *Астрон. журн.*, **91**, 943 (2014).
11. *О.В. Кияева, А.А. Киселев, Е.В. Поляков, В.Б. Рафальский* // *Письма в Астрон. журн.*, **27**, 456 (2001).
12. *Ж.П. Аносова, Е.В. Бердник, Л.Г. Романенко* // *Астрон. Циркуляр*, №1517, 1 (1987).
13. *А.А. Tokovinin and M.G. Smekhov* // *Astron. Astrophys.*, **382**, 118 (2002).
14. *J.H.J. de Bruijne and A.-C. Eilers* // *Astron. Astrophys.*, **546**, 61 (2012).
15. *H.A. Abt* // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **45**, 437 (1981).
16. *А.А. Киселев, Л.Г. Романенко, Н.А. Горыня* // *Астрон. журн.*, **86**, 1216 (2009).

INVESTIGATION OF MULTIPLE STARS FROM THE OBSERVATIONAL PROGRAMME WITH 26-INCH REFRACTOR AT PULKOVO

Kiyeva O.V.¹, Orlov V.V.², Zhuchkov R.Ya.³

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

²*St. Petersburg state university, St. Petersburg, Russia*

³*Kazan (Volga region) federal university, Kazan, Russia*

The algorithm for estimation of possibility of gravitational bounding of multiple stars system of any hierarchy is suggested. The movements in the sky plane are considered: we assume the same value of parallax for all components, and all radial velocities $V_r = 0$. Thus we receive the maximum value of the relation of the module of potential energy to kinetic one ($\kappa = |U|/T$). If $\kappa \ll 1$ then there are optical components in the system, if $\kappa \geq 1$ then the radial velocities have to be taken into account to validate the result. Three stars with known orbits – ADS 48, 9626 and 10288 – are considered as control objects. The probabilities of gravitational bounding of components are calculated by the Monte-Carlo method. Optical components in the systems are revealed.

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ЧЕТВЕРНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 17 ЛЕБЕДЯ ГРАВИТАЦИОННО СВЯЗАННОЙ?

Романенко Л.Г.

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

Проведено динамическое исследование относительных движений компонент внутренних пар АВ и FG четверной иерархической системы 17 Cygni, а также внешней пары АВ-FG. Основу исследования составляют ПЗС-наблюдения на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории. Получены орбиты пар АВ и FG (с периодами 6200 и 238 лет соответственно), а также семейство возможных орбит внешней пары, близких к параболической, с периодами 3.7 млн. лет и больше. Оказалось, что все орбиты (как внутренних, так и внешней пары) круто наклонены к плоскости Галактики. Методом Монте-Карло вычислена вероятность гравитационной связи внешней пары, равная 47%. Сходство собственных движений и лучевых скоростей всех компонент может свидетельствовать о принадлежности одному звездному потоку. По данным каталога CNS3 составлен список возможных кандидатов в члены этого потока.

Наблюдения визуально-двойных звезд продолжают традиционные для обсерватории в Пулкове исследования в области звездной астрономии. В настоящее время Пулковская программа исследований двойных и кратных звезд [1] включает 420 объектов, для 50 из них получены орбиты, причем для 40 звезд – впервые, исследования продолжаются [2]. Многие двойные звезды нашей программы имеют наблюдения В.Я. Струве – первого директора Пулковской обсерватории. Полученные В.Я. Струве результаты для обеих пар (ADS 12913, ADS 12889) используются в настоящей работе наряду с данными современных наблюдений.

Исследуемый объект 17 Лебеда (WDS 19464+3344 [3]) состоит из двух визуально-двойных звезд: широкой пары АВ = ADS 12913 ($\rho \sim 26''$) и тесной слабой пары FG = ADS 12889 ($\rho \sim 2.8''$). Обе пары открыты В.Я. Струве, входят в «Каталог близких звезд» Глизе. Обозначение FG для тесной пары появилось недавно в «Вашингтонском каталоге двойных звезд» (WDS [3]). Этим обозначением мы и воспользуемся в данной работе. Остальные компоненты С, D и E в каталоге WDS комментируются, как оптические. Угловое расстояние между парами АВ и FG около 800" (иерархическая система?). Общие данные приведены в табл. 1, параллаксы компонент: $\pi_{\text{Hip A}} = 0.0471 \pm 0.0003''$, $\pi_{\text{Hip F}} = 0.0473 \pm 0.0008''$ [4]. Можно отметить, что собственные движения всех компонент (как и лучевые скорости) близки между собой, но разности их величин довольно существенны для пар АВ и FG. Таким образом, гравитационная связь между этими парами остается под сомнением.

Таблица 1. Общие данные о компонентах исследуемой кратной звезды 17 Лебеда.

Компонента	m_v [5]	Sp[5]	Масса[5]	V_T [6,7]	μ_x [8]	μ_y [8]	ADS
	1^m			км/с	мсд/год	мсд/год	(GL)
A	4.99	F7V	1.21	$+4.2 \pm 0.1$ [6]	$+023 \pm 002$	-449 ± 002	12913 A
B	8.56	K6V	0.65	$+4.8 \pm 0.2$ [6]	$+019 \pm 008$	-447 ± 008	(767.1)B
F	8.35	K3V	0.73	$+4.1 \pm 0.2$ [7]	$+013 \pm 003$	-441 ± 003	12889 A
G	8.54	K3V	0.73	$+4.7 \pm 0.2$ [7]	$+042 \pm 001$	-465 ± 001	(765.4)B

Исследуемый объект, а именно – яркая компонента А (5^m) плюс тесная пара FG ($8^m - 8^m$), очень труден для фотографических наблюдений. Попытки получить нормаль-

ные изображения всех четырех компонент на одну пластинку 26-дюймового рефрактора в Пулково оказались не очень удачными (получено только два нормальных места 1995 и 2005 гг.). Однако обе пары оставались в нашей Пулковской программе, и к настоящему времени нам переданы И.С. Измайловым результаты ПЗС-наблюдений обеих пар за 2003–2013 гг. [9, 10]. Кроме того, И.С. Измайлов передал нам ПЗС-кадры за 2007–2013 гг. и предложил их измерить и обработать относительно опорных звезд с целью определения относительных положений широкой пары АF, что и было сделано [11]. Полученные результаты ПЗС-наблюдений и стали основой нашего исследования.

Вся видимая дуга орбиты пары АВ за весь период наблюдений (1822–2010 гг.) составляет 4° . В условиях такой короткой дуги классические методы определения орбит не работают. Поэтому мы воспользовались методом А.А. Киселева – методом параметров видимого движения (ПВД) [12].

В каталоге WDS [3] представлены 136 позиционных наблюдений яркой пары АВ, 456 наблюдений тесной пары FG и 11 наблюдений широкой пары АF за последние 200 лет. Для получения параметров видимого движения пары FG (см. табл. 2) оказались достаточными результаты пулковских ПЗС-наблюдений [9, 10]. Для пары АВ мы к результатам [9, 10] добавили только самые надежные наблюдения XIX в. – наблюдения В.Я. Струве [3]. Для пары АF пришлось использовать все данные каталога WDS [3] плюс результаты пулковских ПЗС-наблюдений [11] (получение параметров видимого движения внешней пары АВ-FG мы рассмотрим позднее). Т.о. для внутренних пар АВ и FG ошибки указанных параметров оказались на хорошем уровне. Параметр $\Delta\theta$, представленный в предпоследнем столбце табл. 2, характеризует величину видимой дуги орбиты и составляет от 0.1 до 4.7° .

Таблица 2. Параметры видимого (относительного) движения в исследуемых парах.

Пара	T_0	ρ''	θ°	$\mu''/\text{год}$	ψ°	$\Delta\theta^\circ$	Серия
	n	$\pm\sigma\rho$	$\pm\sigma\theta$	$\pm\sigma\mu$	$\pm\sigma\psi$		
АВ	1992	26.067	68.780	0.0096	349.8	4.1	SCCD
	24	± 0.002	± 0.008	± 0.0001	± 0.4		
FG	2008	2.893	160.033	0.0325	112.3	4.7	CCD
	76	± 0.002	± 0.013	± 0.0004	± 0.8		
АВ-FG	1992	801.211	235.251	0.0051	285.4	0.1	WCCD
	18	± 0.079	± 0.014	± 0.0038	± 37.8		

Получение ПВД-орбит внутренних пар

Обозначим через β угол наклона вектора АВ к картинной плоскости на средний момент T_0 , β_{mdl} – среднее значение угла β при условии, что он лежит в интервале от 0 до β_{max} (максимально возможное значение для эллиптической орбиты). Методом ПВД мы получили семейство орбит для пары АВ, удовлетворяющее всем имеющимся наблюдениям. Опираясь на самые далекие по времени, но самые надежные наблюдения XIX века – наблюдения В.Я. Струве – мы считаем наиболее вероятными две орбиты при $\beta_{\text{mdl}} = \pm 29^\circ$.

Как известно, существует несколько определений орбиты тесной пары FG (например, [13] и [14]). Мы применили к этой паре метод ПВД, используя короткую дугу современных наблюдений [9, 10], и получили два равновероятных решения, соответствующие $\beta = +16^\circ$ и $\beta = -16^\circ$. Хорошо описывает все наблюдения только орбита при $\beta = +16^\circ$, которую мы и считаем окончательной.

В табл. 3 мы приводим элементы орбит исследуемых пар и их ошибки: две равновероятные ПВД-орбиты для пары АВ с периодом 6200 лет и однозначно определенную ПВД-орбиту для пары FG с периодом 238 лет, хорошо согласующуюся с результатами

других авторов. В предпоследнем столбце таблицы даны l_{Π} и b_{Π} – галактические долготы и широта направления на полюс орбиты. Величины, полученные нами по данным других авторов, мы приводим в скобках. Как видно из таблицы, орбиты как пары АВ, так и пары FG круто наклонены к плоскости Галактики ($|b_{\Pi}| < 40^{\circ}$).

Таблица 3. Сравнение орбит исследуемых пар.

a	P, лет	e	ω	i	Ω	T_{Π} , год	Полюс (l_{Π}, b_{Π})	Ссылка
Пара АВ		(Масса = 1.86)						
19.55"	6202	0.62	252°	144°	119°	-241	$l=33, b=+03$	
± 1.44	± 696	± 0.05	± 8	± 6	± 17	± 65		
19.55"	6202	0.53	127	139	29	4869	$l=69, b=-37$	
± 1.44	± 696	± 0.09	± 5	± 6	± 12	± 4040		
Пара FG		(Масса = 1.46)						
2.05	238	0.75	316	162	276	1945	$l=85, b=+11$	
± 0.10	± 19	± 0.02	± 17	± 8	± 18	± 5		
2.09	239	0.77	(307)	158	(270)	1945	$(l=89, b=+15)$	[13]
2.00	232	0.77	(308)	(156)	(271)	1945	$(l=90, b=+15)$	[14]

Исследование динамики внешней пары АВ-FG

Обозначим через O_1 центр масс внутренней пары АВ, а через O_2 – центр масс пары FG. В каталоге WDS приведено 11 положений пары AF за 1893-2002гг. [3]. Кроме того, мы получили еще 7 среднегодовых положений по пулковским ПЗС-кадрам за 2007–2013 гг. [11]. На эти моменты времени мы вычислили эфемериды положений для пар АВ и FG с использованием их ПВД-орбит. Зная массы компонент (см. табл. 1), мы можем получить координаты как центра тяжести O_1 относительно компоненты А, так и центра тяжести O_2 относительно компоненты F. Несложные вычисления дают положения центра тяжести O_2 относительно центра тяжести O_1 .

Прямоугольные координаты пары O_1O_2 вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{O_1O_2} = x_{AF} - x_{AO_1} + x_{FO_2} \\ y_{O_1O_2} = y_{AF} - y_{AO_1} + y_{FO_2} \end{cases}, \quad (1)$$

где:

$$x_{AO_1} = x_{AB} \cdot \frac{M_B}{M_A + M_B}, \quad y_{AO_1} = y_{AB} \cdot \frac{M_B}{M_A + M_B}, \quad (2)$$

$$x_{FO_2} = x_{FG} \cdot \frac{M_G}{M_F + M_G}, \quad y_{FO_2} = y_{FG} \cdot \frac{M_G}{M_F + M_G}, \quad (3)$$

M – масса компоненты. Затем можно перейти к полярным координатам (ρ, θ). В табл. 4 мы приводим данные из каталога WDS для пары AF, приведенные к эпохе 2000.0, результаты наших измерений для этой пары, а также результаты вычислений для пары $O_1O_2 = AB-FG$.

Таблица 4. Позиционные ряды широких пар AF и АВ-FG.

N	T	ρ_{AF}	θ_{AF}	ρ_{AB-FG}	θ_{AB-FG}
1	1893.520	791.923	235.061	800.625	235.239
2	1914.400	791.905	234.986	800.637	235.160
3	1933.830	791.911	235.102	800.679	235.271
4	1933.830	792.678	235.102	801.445	235.271
5	1940.680	792.232	235.044	801.008	235.211
6	1940.680	792.999	235.144	801.779	235.310
7	1991.250	792.206	235.147	801.566	235.222
8	1991.620	792.220	235.150	801.578	235.224
9	1998.330	791.770	235.090	801.087	235.154

N	T	ρ_{AF}	θ_{AF}	ρ_{AB-FG}	θ_{AB-FG}
10	2000.000	791.400	235.100	800.707	235.162
11	2002.590	791.964	235.116	801.254	235.173
12	2007.670	791.995	235.245	801.250	235.295
13	2008.687	791.940	235.248	801.187	235.297
14	2009.676	792.030	235.246	801.270	235.294
15	2010.566	792.048	235.247	801.281	235.293
16	2011.637	791.999	235.252	801.224	235.296
17	2012.607	792.038	235.244	801.255	235.287
18	2013.661	791.980	235.255	801.189	235.298

Примечание: позиционные углы приведены к эпохе 2000.0.

Используя все имеющиеся 18 наблюдений, мы получили параметры видимого движения внешней пары АВ–FG (см. табл. 2) и семейство возможных ПВД-орбит внешней пары при $\beta = \beta_{\min}, \pm \beta_{\text{mdl}} \text{ и } \pm \beta_{\max}$ (см. табл. 5) с периодами от 3.7 млн. лет, сильно вытянутых (эксцентриситеты от 0.76). Отметим, что все орбиты семейства круто наклонены к плоскости Галактики ($|b_{\text{П}}| < 20^\circ$).

Таблица 5. Семейство ПВД-орбит внешней пары АВ-FG.

β	a"	P, лет	e	ω	i	Ω	$T_{\text{П}}$, год	Полюс ($l_{\text{П}}, b_{\text{П}}$)
	Пара	АВ-FG	(Масса =			1.86	+ 1.46 =	3.32)
+40°	∞	∞	1.00	68°	49°	103°	-10357	$l=297^\circ, b=-16^\circ$
+19	2200"	5500000	0.77	48	26	99	-158763	$l=274, b=-13$
0	1700	3700000	0.76	83	4	55	-151294	$l=251, b=-8$
-19	2200	5500000	0.79	209	22	294	-159131	$l=227, b=-2$
-40	∞	∞	1.00	234	47	289	-13725	$l=203, b=+5$

Для исследования вероятности гравитационной связи в исследуемой внешней паре мы применили метод Монте-Карло в реализации, предложенной в работе [15], по программе О.В. Кияевой. Исходные данные ($\rho, \mu, \pi_{\text{т}}, M$ и $\Delta V_{\text{т}}$) варьировались в пределах их ошибок. Распределение энергии относительного движения АВ-FG получено по 10000 испытаний. Оказалось, что вероятность связи пар АВ и FG составляет 47%. Даже если исходную сумму масс увеличить вдвое, то эта вероятность составит только 73%.

Сопоставление собственных движений и лучевых скоростей нескольких звезд является одним из методов выявления принадлежности к некоторому звездному потоку. Их сходство может свидетельствовать о движении в одной звездной группе. Другим способом выявления движущихся групп, как известно [16], является сопоставление пространственных скоростей U, V, W исследуемых звезд. В табл. 6 мы приводим выборку данных из каталога Глизе (CNS3) [17] для звезд, у которых скорости U, V, W отличаются от скоростей компонентов 17 Лебеда не более, чем на 10 км/с. Назовем их кандидатами в члены возможного звездного потока.

Таблица 6. Выборка данных из каталога CNS3 [15].

NN	N	Name	$\alpha_{1950.0}$			$\delta_{1950.0}$		m_V	$\pi_{\text{т}}$	s_{π}	U	V	W
1	178	Gl42.1	00 ^h	52 ^m	19 ^s	+23°	49.9'	7.38 ^m	0494	188	+35	-4	-15
2	559	Gl125	03	06	09	+45	32.9	10.15	0767	114	+32	-8	-22
3	1060	NN	06	36	56	+28	38.2	11.93	046	22	+45	-15	-15
4	1134	Gl266	07	04	32	+03	31.8	9.84	0423	103	+38	-14	-21
5	1488	Gl343.1	09	24	20	+39	43.5	9.84	044	06	+45	-12	-22
6	1587	Gl379A	10	06	24	+75	23.0	10.18	0542	075	+45	-2	-28
7	1624	Gl389A	10	20	37	-59	55.1	10.72	0550	071	+50	-11	-17

NN	N	Name	$\alpha_{1950.0}$			$\delta_{1950.0}$		m_V	$\pi_{\text{г}}$	$s_{\text{д}}$	U	V	W
8	2198	Gl532	13	50	01	+50	11.9	8.90	0686	070	+31	-3	-35
9	2367	Gl570A	14	54	32	-21	11.5	5.75	1742	060	+50	-22	-31
10	2368	Gl570B	14	54	31	-21	11.3	8.00	1742	060	+43	-20	-29
11	2622	Gl632.1	16	34	52	+31	12.2	9.49	0605	107	+36	0	-22
12	2786	Gl684A	17	34	28	+61	54.8	5.34	0679	058	+36	-5	-22
13	3003	Wo9643	19	03	49	-27	44.7	3.32	0431	102	+46	-20	-17
*14	3098	Gl765.4A	19	43	39	+33	29.1	8.35	0439	039	+39	-8	-24
*15	3105	Gl767.1A	19	44	32	+33	36.6	4.99	0444	025	+40	-9	-24
*16	3106	Gl767.1B	19	44	34	+33	36.8	8.56	0444	025	+39	-8	-25
17	3744	Wo9835	23	39	38	-02	50.9	10.32	043	08	+44	-11	-32

Примечание: * – приведены данные для компонент исследуемой звезды 17 Лебеда.

Заключение

1. Методом ПВД получены орбиты двух визуально-двойных звезд: ADS 12913 (GL 767.1) и ADS 12889 (GL 765.4) с периодами обращения 6200 и 238 лет соответственно. Проведено сравнение новой орбиты ADS 12889 (пары FG) с орбитами других авторов, орбиты ADS 12913 АВ получены впервые.
2. Весь комплекс данных для внешней пары АВ-FG 17 Суг (ПВД, сумма масс компонент, относительная лучевая скорость и параллакс) приводит к семейству возможных орбит, близких к параболической, и периодами 3.7 млн. лет и больше.
3. Приведена ориентация полюсов полученных орбит в галактической системе координат: все орбиты круто наклонены к плоскости Галактики.
4. Методом Монте-Карло вычислена вероятность гравитационной связи внешней пары, равная 47%. Таким образом, связь между парами АВ и FG остается под сомнением.
5. Сходство собственных движений и лучевых скоростей, а также пространственных скоростей всех компонент 17 Лебеда может свидетельствовать о принадлежности одному звездному потоку.
6. Требуется дальнейшие наблюдения и исследования.

Автор выражает благодарности: авторам Вашингтонского каталога двойных звезд (WDS), И.С. Измайлову за предоставленные ПЗС-кадры, В.В. Орлову и О.В. Кияевой за ценные консультации.

Литература

1. А.А. Киселев, О.В. Кияева, И.С. Измайлов, Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко, О.О. Василькова, Т.А. Васильева, Н.А. Шахт, Е.А. Рощина, Д.Л. Горшанов, *Астрон. журн.* **91**, №2, 130 (2014).
2. Л.Г. Романенко, А.А. Киселев, *Астрон. журн.* **91**, №1, 47 (2014).
3. B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, *Washington Double Star Catalog USNO Double Star CD 2006.5*.
4. F. van Leeuwen, *Astron. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
5. А.А. Токовинин, *Multiple Star Catalog, Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 75, (1997).
6. А.А. Токовинин, *Каталог измерений лучевых скоростей звезд. Каталог собственных движений*, М.: Изд. МГУ, 23 (1990).
7. А.А. Токовинин, M.G. Smekhov, *Astron. and Astrophys.* **382**, 118 (2002).
8. N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, and M.I. Zacharias, *The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4)*, *Astron. J.* **145**, 44 (2013), <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?-source=I/322>
9. И.С. Измайлов, М.Л. Ховричева, М.Ю. Ховричев, О.В. Кияева, Е.В. Хруцкая, Л.Г. Романенко, Е.А. Грошева, К.Л. Масленников и О.А. Калиниченко, *Письма в Астрон. журн.* **36**, 365 (2010).

10. *И.С. Измайлов, Е.А. Рощина*, *Astrophys. Bull.*, (2015); <http://izmccd.puldb.ru/vds.htm>.
11. *Л.Г. Романенко, О.А. Калиниченко*, *Изв. ГАО – настоящее издание* (2015).
12. *А.А. Киселев, О.В. Кияева*, *Астрон. журн.* **57**, 1227 (1980).
13. *M. Scardia*, *Astrophys. Nachr.* **302**, 291 (1981).
14. *S. Soderhjelm*, *Astron. and Astrophys.* **341**, 121 (1999).
15. *O.V. Kiyayeva, V.V. Orlov*, *Astrophys. Bull.* **70**, N3, 379 (2015).
16. *А.А. Мюльери, К. Флинн, В.В. Орлов*, *Астрон. журн.* **80**, №3, 195 (2003).
17. *Gliese Catalog of Nearby Stars*, 3d edition (Gliese+, 1991), <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-2/Cat?-source=V/20A>.

IS THE QUADRUPLE HIERARCHICAL 17 CYGNI SYSTEM A GRAVITATIONALLY BOUND ONE?

Romanenko L.G.

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

The results of dynamical studying the relative motion of components of inner and outer pairs of quadruple system 17 Cygni are presented. The research is based on the 26-inch refractor CCD observations. The orbits for pairs AB and FG, with periods 6200 and 238 years, and a family of possible, near-parabolic orbits, with periods 3.7 billion year and more, for outer pair AB-FG are computed. It turned out that all these orbits (both the outer and inner) are steeply inclined to the Galaxy plane. Probability that the outer pair is a gravitationally bound is 47% by Monte Carlo simulations. The similarity in proper motions and radial velocities of all components might be the evidence that they belong to the one stellar stream. The possible candidates of this stellar stream from data of the catalog CNS3 are listed.

ПОЛУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ШИРОКОЙ ПАРЫ АF И СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТ ЧЕТВЕРНОЙ ЗВЕЗДЫ 17 CyG

Романенко Л.Г., Калининченко О.А.

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

В рамках динамического исследования четверной иерархической звезды 17 Cygni = WDS 19464+3344 проведены измерения ПЗС-кадров наблюдений на 26-дюймовом рефракторе ГАО РАН за 2007–2013 гг. Получены среднегодовые относительные положения широкой пары АF (разделение ~ 800"). Получены также собственные движения для всех четырех компонент, согласующиеся с данными каталога UCAC4.

Исследуемый в данной работе объект 17 Cygni (WDS 19464+3344 [1]) состоит из двух визуально-двойных звезд: яркой широкой пары АВ = ADS 12913 = GL767.1 ($\rho \sim 26.0''$) и тесной слабой пары FG = ADS 12889 = GL765.4 ($\rho \sim 2.6''$), расстояние между которыми около 800" (иерархическая система), параллаксы компонент равны: $\pi_{\text{Hir A}} = 0.0471 \pm 0.0003''$, $\pi_{\text{Hir F}} = 0.0473 \pm 0.0008''$ [2].

В рамках динамического исследования этой звезды были измерены ПЗС-кадры наблюдений на 26-дюймовом рефракторе ГАО РАН за 2007–2013 гг. (30 серий пары АВ и 42 серии пары FG). Цель этих измерений – получение относительных положений широкой пары АF. В связи с тем, что размер матрицы не позволяет наблюдать всю четверную систему целиком, были проведены измерения компонент относительно опорных звезд. Использована программа обработки изображений **izmccd**, разработанная И.С. Измайловым (2010) [3].

В табл. 1 мы приводим индивидуальные положения (α, δ) компонент 17 Cygni А и В в системе опорного каталога UCAC4 [4]. Даны следующие величины: dT_0 – уклонение от среднего момента $T_0 = 2010.736$, прямое восхождение – часы и минуты (совпадают для А и В), секунды $I^s A$ и $I^s B$, $d^s A$ и $d^s B$ – невязки в виде (О-С); склонение – градусы, минуты, секунды $I'' A$ и $I'' B$, невязки $d'' A$ и $d'' B$. В последней строке таблицы приведены также соответствующие средние величины и их ошибки. В табл. 2 даны аналогичные величины для компонент F и G (здесь $T_0 = 2010.732$).

Средние положения всех компонент системы и их собственные движения на момент 2010.734 вычислены методом наименьших квадратов по формулам:

$$\alpha_T = \alpha_{T_0} + dT_0 \cdot \mu_\alpha \quad (1)$$

$$\delta_T = \delta_{T_0} + dT_0 \cdot \mu_\delta \quad (2)$$

В табл. 3 приведены среднегодовые положения (α, δ) компонент 17 Cygni А и F в системе опорного каталога UCAC4 [4], их средние ошибки и количество наблюдений. В табл. 4 – прямоугольные и полярные координаты компоненты F относительно главной звезды А, в том числе – позиционный угол θ на 2000.0 и на момент наблюдения T_n .

В заключение отметим, что в каталоге WDS [1] имеются данные только по 11 наблюдениям широкой пары АF исследуемой звезды 17 Лебеда с 1893 по 2002 гг. Таким образом, наши результаты (табл. 4) почти удвоили имеющийся ряд общемировых наблюдений. В нашей следующей работе [7] мы воспользовались этим рядом для динамического исследования четверной системы, в том числе для исследования возможности вычисления орбиты пары FG относительно пары АВ и вероятности гравитационной связи этих пар.

Таблица 1. Индивидуальные положения компонент 17 Сугні А и В по ПЗС-наблюдениям (2007–2013 гг.) на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.

N	$dT_0, \text{год}$	I^h	I^m	I^sA	I^sB	d^sA	d^sB	I^0	I'	$I''A$	$I''B$	$d''A$	$d''B$
1	-3.178	19	46	25.612	27.557	-.002	-.002	+33	43	36.06	45.63	.02	-.01
2	-3.044	19	46	25.614	27.561	.000	.002	+33	43	35.96	45.58	-.02	.00
3	-2.929	19	46	25.611	27.555	-.003	-.004	+33	43	35.89	45.48	-.04	-.05
4	-2.090	19	46	25.615	27.561	.001	.001	+33	43	35.58	45.17	.02	.01
5	-2.038	19	46	25.611	27.558	-.003	-.002	+33	43	35.52	45.20	-.01	.06
6	-2.005	19	46	25.611	27.558	-.003	-.002	+33	43	35.52	45.14	.00	.01
7	-1.975	19	46	25.605	27.551	-.009	-.009	+33	43	35.51	45.11	.01	.00
8	-1.970	19	46	25.614	27.558	.000	-.002	+33	43	35.46	45.08	-.04	-.03
9	-1.096	19	46	25.615	27.560	.000	-.001	+33	43	35.14	44.74	.03	.01
10	-1.063	19	46	25.619	27.569	.004	.008	+33	43	35.14	44.76	.04	.04
11	-1.014	19	46	25.616	27.561	.001	.000	+33	43	35.06	44.69	-.01	.00
12	-.964	19	46	25.615	27.559	.000	-.002	+33	43	34.94	44.57	-.11	-.10
13	-.199	19	46	25.613	27.560	-.003	-.002	+33	43	34.77	44.39	.06	.05
14	-.188	19	46	25.622	27.567	.006	.005	+33	43	34.69	44.29	-.02	-.04
15	-.186	19	46	25.628	27.575	.012	.013	+33	43	34.74	44.35	.04	.02
16	-.183	19	46	25.623	27.570	.007	.008	+33	43	34.71	44.33	.01	.00
17	-.180	19	46	25.619	27.562	.003	.000	+33	43	34.78	44.38	.08	.05
18	.795	19	46	25.620	27.569	.004	.006	+33	43	34.37	44.01	.10	.10
19	.809	19	46	25.625	27.571	.009	.008	+33	43	34.27	43.89	.01	-.01
20	.812	19	46	25.619	27.565	.003	.002	+33	43	34.30	43.91	.04	.01
21	.817	19	46	25.624	27.569	.008	.006	+33	43	34.25	43.87	-.01	-.03
22	.948	19	46	25.614	27.560	-.003	-.003	+33	43	34.17	43.81	-.03	-.03
23	1.063	19	46	25.615	27.560	-.002	-.004	+33	43	34.17	43.81	.02	.02
24	1.126	19	46	25.621	27.566	.004	.002	+33	43	34.05	43.68	-.07	-.08
25	1.771	19	46	25.575	27.529	-.042	-.035	+33	43	33.50	43.20	-.33	-.28
26	1.781	19	46	25.622	27.575	.005	.011	+33	43	34.00	43.76	.17	.28
27	1.795	19	46	25.615	27.563	-.002	-.001	+33	43	33.85	43.48	.03	.01
28	1.850	19	46	25.618	27.563	.001	-.002	+33	43	33.85	43.48	.05	.03
29	2.768	19	46	25.620	27.567	.002	.001	+33	43	33.36	43.02	-.03	-.03
30	3.178	19	46	25.621	27.567	.003	.001	+33	43	33.19	42.84	-.01	-.03
2010.736		19	46	25.616	27.562	± 0.017	± 0.017	+33	43	34.62	44.25	± 0.20	± 0.20

Таблица 2. Индивидуальные положения компонент 17 Сугні F и G по ПЗС-наблюдениям (2007–2013 гг.) на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.

N	$dT_0, \text{год}$	I^h	I^m	I^sF	I^sG	d^sF	d^sG	I^0	I'	$I''F$	$I''G$	$d''F$	$d''G$
1	-3.173	19	45	33.531	33.608	.000	.000	+33	35	63.92	61.21	.05	.07
2	-3.040	19	45	33.532	33.609	.001	.000	+33	35	63.81	61.07	.00	-.01
3	-2.982	19	45	33.529	33.606	-.002	-.003	+33	35	63.78	61.05	.00	-.01
4	-2.925	19	45	33.530	33.608	-.001	-.001	+33	35	63.76	61.03	.00	.00
5	-2.165	19	45	33.533	33.614	.002	.003	+33	35	63.44	60.72	.01	.03
6	-2.130	19	45	33.533	33.613	.002	.002	+33	35	63.44	60.71	.03	.03
7	-2.086	19	45	33.532	33.612	.001	.001	+33	35	63.39	60.66	.00	.00
8	-2.034	19	45	33.528	33.609	-.003	-.002	+33	35	63.37	60.64	.00	.01
9	-2.001	19	45	33.528	33.612	-.003	.001	+33	35	63.37	60.63	.02	.01
10	-1.193	19	45	33.534	33.616	.002	.002	+33	35	62.96	60.21	-.04	-.05
11	-1.187	19	45	33.535	33.617	.003	.003	+33	35	63.00	60.26	.00	.01
12	-1.184	19	45	33.533	33.614	.001	.000	+33	35	63.00	60.25	.00	.00
13	-1.165	19	45	33.532	33.614	.000	.000	+33	35	62.99	60.25	.00	.01
14	-1.157	19	45	33.532	33.615	.000	.001	+33	35	62.99	60.26	.00	.02

<i>N</i>	<i>dT₀</i> , год	<i>I^h</i>	<i>I^m</i>	<i>I^{sF}</i>	<i>I^{sG}</i>	<i>d^{sF}</i>	<i>d^{sG}</i>	<i>I⁰</i>	<i>I¹</i>	<i>I^{1F}</i>	<i>I^{1G}</i>	<i>d^{1F}</i>	<i>d^{1G}</i>
15	-1.056	19	45	33.531	33.612	-.001	-.002	+33	35	63.00	60.24	.06	.05
16	-1.045	19	45	33.531	33.613	-.001	-.001	+33	35	62.91	60.15	-.03	-.04
17	-1.040	19	45	33.535	33.617	.003	.003	+33	35	62.86	60.15	-.07	-.04
18	-1.023	19	45	33.529	33.611	-.003	-.003	+33	35	62.93	60.18	.00	.00
19	-1.010	19	45	33.530	33.611	-.002	-.003	+33	35	62.92	60.16	.00	-.01
20	-.996	19	45	33.529	33.612	-.003	-.002	+33	35	62.84	60.10	-.07	-.07
21	-.966	19	45	33.531	33.614	-.001	.000	+33	35	62.85	60.10	-.05	-.05
22	-.952	19	45	33.531	33.612	-.001	-.002	+33	35	62.90	60.14	.00	-.01
23	-.884	19	45	33.530	33.612	-.002	-.003	+33	35	62.81	60.05	-.06	-.07
24	-.195	19	45	33.535	33.618	.003	.002	+33	35	62.60	59.85	.03	.04
25	-.184	19	45	33.532	33.616	.000	.000	+33	35	62.58	59.83	.02	.03
26	-.182	19	45	33.536	33.618	.003	.002	+33	35	62.56	59.78	.00	-.02
27	-.176	19	45	33.534	33.617	.001	.001	+33	35	62.59	59.85	.03	.05
28	-.173	19	45	33.535	33.620	.002	.004	+33	35	62.55	59.80	-.01	.00
29	.031	19	45	33.532	33.616	-.001	-.001	+33	35	62.46	59.69	-.01	-.02
30	.799	19	45	33.534	33.621	.001	.002	+33	35	62.12	59.36	-.01	.00
31	.813	19	45	33.539	33.621	.006	.002	+33	35	62.13	59.33	.01	-.02
32	.816	19	45	33.535	33.621	.002	.002	+33	35	62.14	59.36	.02	.01
33	.821	19	45	33.532	33.618	-.001	-.001	+33	35	62.16	59.41	.04	.06
34	.824	19	45	33.537	33.624	.004	.005	+33	35	62.12	59.36	.00	.01
35	.952	19	45	33.532	33.619	-.001	-.001	+33	35	62.06	59.28	.00	-.01
36	1.010	19	45	33.529	33.617	-.004	-.003	+33	35	62.02	59.24	-.02	-.03
37	1.010	19	45	33.529	33.617	-.004	-.003	+33	35	62.02	59.24	-.02	-.03
38	1.848	19	45	33.534	33.623	.000	.001	+33	35	61.70	58.93	.03	.04
39	1.939	19	45	33.532	33.621	-.002	-.001	+33	35	61.63	58.85	.00	.00
40	2.772	19	45	33.535	33.627	.001	.002	+33	35	61.25	58.47	-.02	-.01
41	2.837	19	45	33.533	33.624	-.001	-.001	+33	35	61.27	58.48	.03	.03
42	3.174	19	45	33.534	33.622	-.001	-.004	+33	35	61.10	58.28	.01	-.02
2010.732		19	45	33.533	33.617	±.014	±.014	+33	35	62.48	59.72	±.17	±.17

Таблица 3. Среднегодовые экваториальные положения компонент 17 Cyg A и F по ПЗС-наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.

<i>N</i>	<i>T_n</i> , год	<i>I^h</i>	<i>I^m</i>	<i>I^{sA}</i>	<i>I^{sF}</i>	<i>erI^s</i>	<i>I⁰</i>	<i>I¹</i>	<i>I^{1A}</i>	<i>I^{1F}</i>	<i>erI¹</i>	<i>nA</i>	<i>nF</i>
1	2007.670	19	45	85.612	33.530	.001	+33	36	456.00	3.82	.06	3	4
2	2008.687	19	45	85.611	33.531	.002	+33	36	455.51	3.40	.02	5	5
3	2009.676	19	45	85.616	33.531	.001	+33	36	455.11	2.92	.03	4	14
4	2010.566	19	45	85.621	33.534	.002	+33	36	454.74	2.56	.03	5	6
5	2011.637	19	45	85.620	33.534	.002	+33	36	454.20	2.11	.05	7	7
6	2012.607	19	45	85.616	33.532	.004	+33	36	453.85	1.64	.06	4	2
7	2013.661	19	45	85.621	33.533	.001	+33	36	453.28	1.23	.09	2	4

Таблица 4. Относительные положения компонент 17 Cyg AF по ПЗС-наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове.

<i>N</i>	<i>T_n</i> , год	<i>x^{''}</i>	<i>er x^{''}</i>	<i>y^{''}</i>	<i>er y^{''}</i>	<i>ρ^{''}</i>	<i>er ρ^{''}</i>	<i>θ[°]_{2000.0}</i>	<i>θ[°]_{obs}</i>	<i>er θ[°]</i>
1	2007.670	-650.699	.216	-451.495	.057	791.995	.180	235.245	235.199	.010
2	2008.687	-650.677	.097	-451.429	.025	791.940	.081	235.248	235.196	.004
3	2009.676	-650.734	.118	-451.504	.031	792.030	.098	235.246	235.188	.005
4	2010.566	-650.759	.106	-451.501	.027	792.048	.088	235.247	235.183	.005
5	2011.637	-650.757	.174	-451.417	.045	791.999	.145	235.252	235.182	.008
6	2012.607	-650.727	.221	-451.530	.057	792.038	.184	235.244	235.168	.010
7	2013.661	-650.767	.356	-451.369	.094	791.980	.298	235.255	235.173	.016

Таблица 5. Собственные движения компонент 17 Cyg на момент $T = 2010.734$ по ПЗС-наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове и данные из литературы.

Компо- нента	$m_V[1]$ 1^m	μ_x мсд/год	μ_y мсд/год	$\mu_x [4]$ мсд/год	$\mu_y [4]$ мсд/год	$V_T[5,6]$ км/с	ADS (GL)
A	5.06	+009±012	-447±009	+023±002	-449±002	+4.2±0.1 [5]	12913 A
B	9.25	+014±011	-436±009	+019±008	-447±008	+4.8±0.2 [5]	(767.1)B
F	8.47	+008±003	-437±003	+013±003	-441±003	+4.1±0.2 [6]	12889 A
G	8.58	+034±003	-449±003	+042±001	-465±001	+4.7±0.2 [6]	(765.4)B

Полученные нами по формулам (1) и (2) собственные движения (см. табл. 5) согласуются с данными каталога UCAC4 [4]. В табл.5 приведены также звездные величины компонент по данным каталога WDS [1] и лучевые скорости по данным литературы [5,6]. Собственные движения компонент в совокупности с данными о лучевых скоростях могут подтвердить наше предположение о принадлежности всех компонент одному звездному потоку (подробнее см. [7]).

Авторы выносят благодарность И.С. Измайлову за предоставленные ПЗС-кадры, а также Е.А. Рошиной и О.В. Кияевой за ценные замечания.

Литература

1. WDS – *B.D. Mason, G.L. Wycoff, and W.I. Hartkopf*, Washington Double Star Catalog 2006.5 (USNO Double Star CD, 2006.5).
2. Hip – *F. van Leeuwen*, *Astron. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
3. *И.С. Измайлов, М.Л. Ховричева, М.Ю. Ховричев, О.В. Кияева, Е.В. Хруцкая, Л.Г. Романенко, Е.А. Грошева, К.Л. Масленников и О.А. Калиниченко*, Письма в Астрон. журн. **36**, 365 (2010).
4. UCAC4 – *N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, and M.I. Zacharias*, The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4), *Astron. J.* **145**, 44 (2013), <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?-source=1/322>
5. *А.А. Токовинин*, Каталог измерений лучевых скоростей звезд. Каталог собственных движений. – М.: Изд. МГУ, 23 (1990).
6. *А.А. Токовинин, М.Г. Smekhov*, *Astron. and Astrophys.* **382**, 118 (2002).
7. *Л.Г. Романенко*, Изв. ГАО – настоящее издание (2015).

DETERMINATION OF RELATIVE POSITIONS OF WIDE AF PAIR AND PROPER MOTIONS OF THE COMPONENTS OF QUADRUPLE SYSTEM 17 CYGNI

Romanenko L.G., Kalinichenko O.A.

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

The 17 Cygni (WDS 19464+3344, ADS 12913) system of two visual double stars: bright wide (separation $\rho \sim 26.0''$) pair AB (ADS 12913, GL767.1) and weak close ($\rho \sim 2.6''$) pair FG (ADS 12889, GL765.4) is considered. In spite of a great separation ($\sim 800''$) between pairs of AB and FG, they have the similar proper motions. The measurements of CCD positions obtained with the 26-inch refractor during 2007–2013 years are made using the **izmccd** program by Izmailov. The yearly mean relative positions for wide AF pair are calculated. Also for each component of 17 Cygni its position and proper motions with respect to the reference stars are determined separately with the least square method. The proper motions obtained for all of the components are in accordance with the UCAC4 data.

Секция 5

**НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА
АСТРОМЕТРИИ И ГЕОДИНАМИКИ**

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ «САТУРН». ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**Биколова Д.А., Ершова А.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Рощина Е.А.,
Оськина К.И., Баляев И.А., Шумилов А.А., Петюр В.В., Максимова Л.А.,
Апетян А.А., Куликова А.М.**

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

В работе представлены первые результаты, полученные на зеркальном телескопе «Сатурн» ($D = 1$ м, $F = 4$ м). Бывший стратосферный солнечный телескоп адаптированном к наземным астрометрическим наблюдениям в конце 2014 г. в Пулковской обсерватории. Телескоп был оснащен ПЗС-камерой S2C, установленной в прямом фокусе ($FOV 14 \times 14$ угл. мин., 824 mas/pix). С января 2015 г. на телескопе были начаты астрометрические наблюдения далеких спутников Юпитера в тестовом режиме. При настоящем состоянии зеркала и оборудования при экспозициях 30 секунд возможно уверенно получать изображения звезд и объектов до 19^m . Интерес к далеким спутникам Юпитера обусловлен тем, что в настоящее время сохраняется дефицит качественных астрометрических наблюдений, необходимых для улучшения эфемерид и динамических исследований. В работе использованы серии ПЗС-кадров, полученные в течение 6 ночей. Астрометрическая редуциция выполнялась методом шести постоянных в системах HCRF/UCAC4 и HCRF/URAT1. Внутренняя точность определения координат спутников составила 20–100 mas. О-С в большинстве случаев не превосходят 100 mas по абсолютной величине. Независимый тест осуществлен путем прямого сравнения с результатами наблюдений спутника Юпитера Гималии, выполненными параллельно на Нормальном астрографе (самое большое расхождение составило 113 mas). Результаты размещены в астрометрической базе данных www.puldb.ru. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-02-000675-а и Программы Президиума РАН №9.

Введение

В конце 2014 г. в Лаборатории астрометрии и звездной астрономии Пулковской обсерватории восстановлен и адаптирован к астрометрическим наблюдениям метровый телескоп «Сатурн». Этот инструмент был построен на Казанском оптико-механическом заводе в начале 1970-х гг. для 4-го полета стратосферной солнечной станции «Сатурн», поднимавшейся для наблюдений на высоту 20 км с помощью аэростата [1]. Первоначально телескоп имел эквивалентное фокусное расстояние 120 м. Во время полета станции в 1973 г. с его помощью были получены снимки солнечной грануляции и пятен с разрешением $0''.12$.

После выполнения стратосферной солнечной станцией своих научных задач и завершения проекта телескоп был законсервирован на заводе-изготовителе. Позднее, в 1988–1996 гг. телескоп был установлен в Пулкове и под руководством Л.Д. Парфиненко модернизирован в наземный солнечный инструмент [2]. Опытные наблюдения Солнца проводились в течение 2-х лет и показали, что в условиях местного астроклимата снимков Солнца с дифракционным качеством получить нельзя. Было предложено модернизировать инструмент для ночных астрометрических наблюдений. До 2013 г. телескоп был законсервирован.

После завершения первого этапа модернизации инструмента, в январе 2015 г. начались наблюдения в тестовом режиме. В программу наблюдений вошли «быстрые» звезды низкой светимости, далекие спутники Юпитера и калибровочные звездные поля. Эти первые пробные наблюдения позволили не только полноценно протестировать телескоп, но и получить значимые научные данные. В настоящей работе обсуждаются первые результаты астрометрических наблюдений далеких спутников Юпитера (Гима-

лии, Элары, Пасифе и Карме), проведенные в Пулковской обсерватории в первые месяцы 2015 года.

Оборудование и методика наблюдений

Объективом телескопа служит параболическое зеркало диаметром 1 м с фокусным расстоянием 4 м. Вторичное зеркало было демонтировано, и ПЗС-камера S2C была установлена на фермах в прямом фокусе главного зеркала. В настоящее время наблюдения пока ведутся без фильтров. Характеристики камеры: рабочее поле – 14×14 угловых минут, масштаб – 824 mas/pix , размер сенсора – 1046 на 1146 пикселей, размер пиксела – 16 мкм. Телескоп установлен на альт-азимутальной монтировке и приводится в движение с помощью шаговых двигателей. Для наведения и гидирования используется камера Canon с большим полем зрения и длиннофокусный объектив ($F = 300 \text{ мм}$). Снимки автоматически распознаются с помощью специально разработанного программного обеспечения. Это дает возможность работать в режиме автогида. Наблюдения осуществлялись вблизи меридиана сериями (10–20 кадров) со временем накопления одного кадра 10 с, 20 с и 30 с.

Обработка ПЗС-кадров и редукция

Для повышения отношения сигнал/шум для слабых спутников применялось сложение ПЗС-кадров группами по 4–6 кадров в зависимости от качества изображений. Для этого по ярким опорным звездам вычислялись параметры линейной модели перехода от текущего кадра к опорному. Для определения параметров изображений спутников и опорных звезд на каждом кадре использовалось shapelet-разложение [3]. В результате определялись пиксельные координаты объектов. Для иллюстрации работы метода на рис. 1 представлена диаграмма, показывающая структуру изображения спутника Пасифе и результат вычитания модельного изображения, построенного на основе коэффициентов shapelet-разложения.

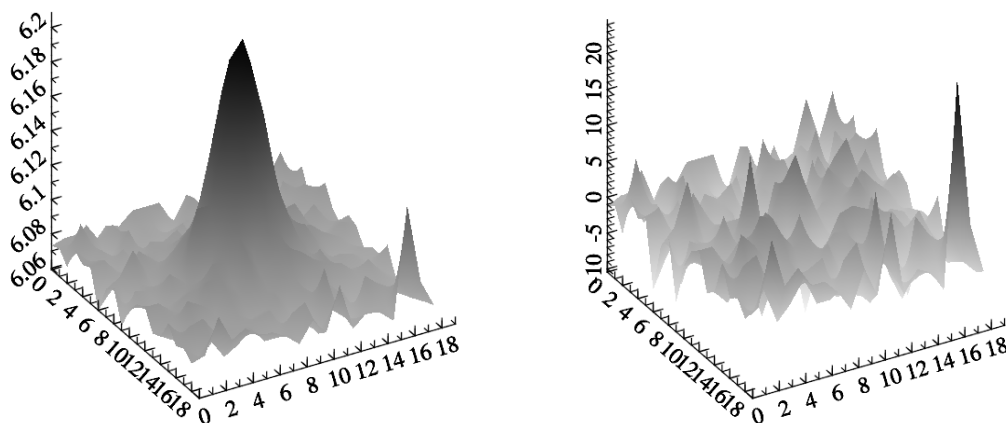


Рис. 1. Слева – исходное изображение Пасифе (отсчет по вертикали приведен в логарифмической шкале), справа – результат вычитания модельного изображения.

Для изучения систематических ошибок и астрометрической редукции использовался каталог URAT1 [4], содержащий звезды до 19^m на эпоху 2013 года. Это дало возможность корректно учесть ошибки координат слабых опорных звезд и избавило от зависимости итоговых данных от качества собственных движений. Рис. 2 показывает зависимость остаточных разностей пиксельных координат опорных звезд от блеска. Из рис. 2 следует, что наиболее точно измеряются объекты до 16^m (разности находятся в пределах $\pm 0.25 \text{ pix}$). Для более слабых объектов точность измерения существенно ниже,

есть зависимость разностей от блеска, наиболее заметная по оси Y, что обосновывает необходимость более аккуратного выявления и учета систематических ошибок координат звезд.

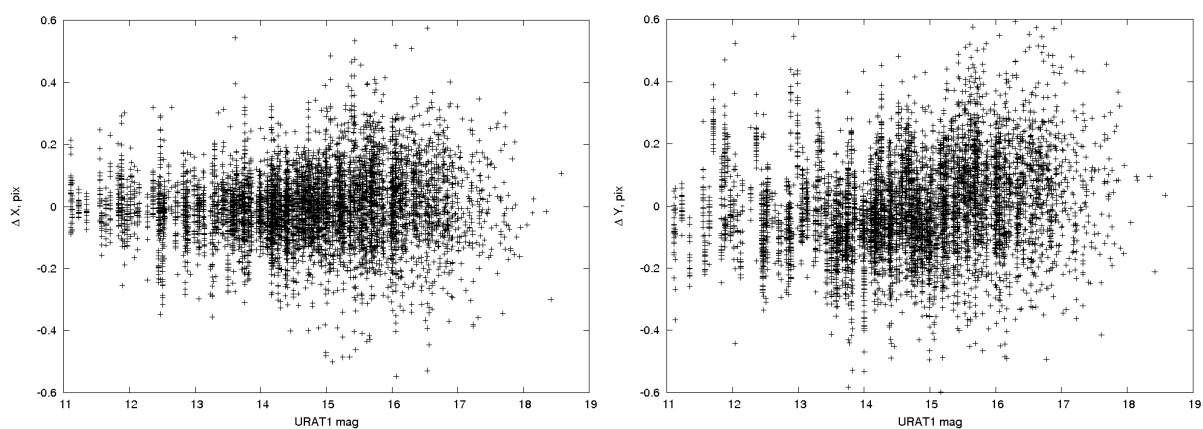


Рис. 2. Зависимость остаточных разностей пиксельных координат для опорных звезд из каталога URAT1 от звездной величины. Заметен тренд в разностях по оси Y.

Для трех диапазонов звездных величин (от 12^m до 18^m с шагом 2^m) и для всего рабочего поля были построены векторные поля остаточных разностей пиксельных координат опорных звезд. Усреднение выполнялось в квадратных областях (сторона 128 pix), в каждую из которых попадало от 20 до 60-ти разностей. Всего использовалось более 9200 разностей. Рис. 3 демонстрирует состоятельность подобного подхода к учету систематических ошибок.

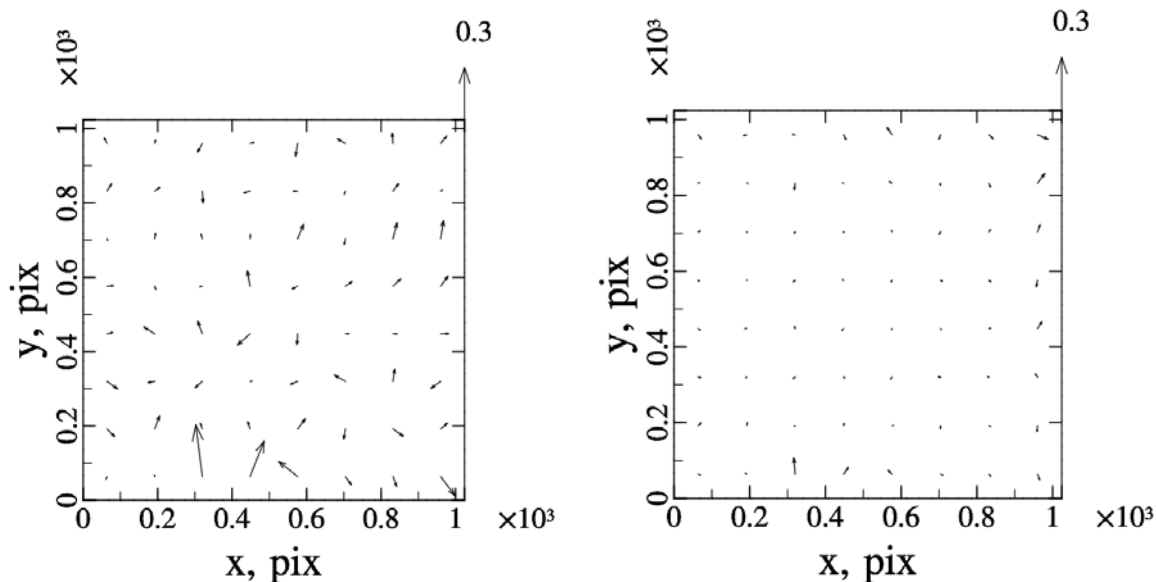


Рис. 3. Векторные поля остаточных разностей для опорных звезд из каталога URAT1 в диапазоне $14^m - 18^m$ до (слева) и после коррекции (справа).

При осуществлении окончательной редукции в пиксельные координаты опорных звезд и спутников вносились соответствующие поправки, зависящие от положения в кадре и блеска звезды, редукция производилась методом 6-ти постоянных. Количество опорных звезд менялось от серии к серии в пределах от 10 до 60. Ошибки единицы веса составили 40–200 mas.

Результаты наблюдений

Положения избранных далеких спутников Юпитера, вошедших в программу первых наблюдений, их разности с эфемеридами (O-C) и их ошибки представлены в табл. 1. В качестве планетной теории использовалась EPM-2011. Эфемериды спутников были обеспечены сервисом MULTI-SAT [5]. Оценки внутренней сходимости были выполнены по дисперсиям разностей O-C. Внутренняя точность средних положений Гималии оказалась лучше 50 mas. Для более слабых спутников точность несколько ниже, но почти во всех случаях лучше 100 mas. Значения (O-C) также не превосходят 100 mas в большинстве случаев.

Таблица 1. Экваториальные координаты спутников Юпитера Гималии, Элара, Пасифе и Карме, разности наблюдаемых положений и эфемеридных, ошибки средних положений.

дата год мес день	момент, UTC	RA h m s	Dec ° ' "	(O-C) $_{\alpha}$ [mas]	(O-C) $_{\delta}$ [mas]	ϵ_{α} [mas]	ϵ_{δ} [mas]
J6 Himalia, 15 ^m .1							
2015 02 10	22 25 44.4	09 18 12.760	17 09 59.62	-172	164	13	9
2015 02 15	23 27 03.2	09 16 10.086	17 20 38.70	13	93	29	41
2015 02 17	22 04 50.9	09 15 23.921	17 24 27.56	-16	7	20	34
2015 03 12	20 56 42.5	09 07 46.992	17 55 11.97	-10	139	16	20
2015 03 16	20 54 04.4	09 06 50.558	17 57 39.57	-4	88	18	13
J7 Elara, 16 ^m .9							
2015 02 15	22 25 22.2	09 13 58.359	16 37 09.13	6	217	43	23
2015 02 17	23 12 53.6	09 12 42.491	16 42 05.66	-68	79	173	95
2015 03 12	21 12 57.8	09 01 07.329	17 30 13.79	125	97	81	57
2015 03 17	21 08 41.2	08 59 27.190	17 37 59.84	54	-84	70	51
J8 Pasiphae, 17 ^m .3							
2015 02 15	23 14 28.7	09 07 43.027	17 13 18.38	1	-53	52	87
2015 03 12	20 42 42.2	08 57 09.326	18 10 35.44	23	13	64	57
2015 03 16	20 08 42.5	08 56 01.986	18 16 57.73	228	97	65	78
J11 Carme, 18 ^m .2							
2015 03 16	21 16 23.8	09 00 03.200	17 51 18.19	-293	63	79	153

Для сравнительной оценки наблюдений на телескопе «Сатурн» были выполнены наблюдения Гималии на Нормальном астрографе. Наблюдения на Нормальном астрографе выполняются при помощи ПЗС-камеры SBIG ST-L-11K (FOV 35×23 угл. мин., 533 mas/pix). Методика обработки данных аналогична. Редукция проводилась методом шести постоянных в системе каталога URAT1. Ошибки единицы веса составили 50–100 mas, результаты наблюдений на Нормальном астрографе приведены в табл. 2. Для двух

Таблица 2. Экваториальные координаты J6 Himalia, полученные в ходе наблюдений на Нормальном астрографе.

дата год мес день	момент, UTC	RA h m s	Dec ° ' "	(O-C) $_{\alpha}$ [mas]	(O-C) $_{\delta}$ [mas]	ϵ_{α} [mas]	ϵ_{δ} [mas]
2015 01 21	23 59 18.0	09 26 22.964	16 20 04.46	292	22	105	48
2015 02 15	22 46 12.0	09 16 10.777	17 20 35.18	1	-30	28	73
2015 02 17	22 09 37.0	09 15 23.842	17 24 28.02	-4	81	79	41
2015 03 09	22 53 40.0	09 08 33.238	17 52 50.62	7	-37	117	186

ночей 15 и 17 февраля 2015 г. наблюдения велись на обоих инструментах в близкие моменты времени. Для обоих случаев по наблюдениям на телескопе «Сатурн» были вычислены компоненты скорости движения спутника по небесной сфере. Это позволи-

ло интерполировать положение Гималии для средних моментов наблюдений на Нормальном астрографе. Такой подход дал возможность выполнить сравнение без использования теории движения спутника. Соответствующие разности координат «Сатурн – Нормальный астрограф» приведены в табл. 3.

Таблица 3. Разности экваториальных координат J6 Himalia, полученных на телескопе «Сатурн» и Нормальном астрографе.

дата год мес день	момент, UTC	$\Delta\alpha\cos\delta$ [mas]	$\Delta\delta$ [mas]
2015 02 15	22 46 12.0	46	113

Заключение

В наблюдательном сезоне 2014–2015 гг. в Пулковской обсерватории впервые как астрометрический инструмент начал работу зеркальный метровый телескоп «Сатурн». Первые наблюдения в тестовом режиме включали в себя наблюдения избранных далеких спутников Юпитера (Гималии, Эллары, Пасифе и Карме). Был выполнен анализ полученного материала, что позволило выявить и в значительной мере уменьшить влияние систематических ошибок координат звезд. Изначально эти систематические ошибки были невелики, что характеризует телескоп «Сатурн» как инструмент, позволяющий уверенно получать качественные в астрометрическом смысле данные для объектов 12^m – 18^m . В дальнейшем, проникающая сила телескопа может быть увеличена за счет переалюминирования зеркала и усовершенствования оборудования, а также есть перспективы для улучшения точности наблюдений.

Было получено пять положений Гималии, четыре для Эллары, три для Пасифе и одно для Карме. Сходимость О-С в большинстве случаев лежит в пределах 20–100 mas. Сами разности О-С находятся в пределах ± 100 mas, что вполне соответствует характерным значениям, получаемым в ходе подобных наблюдений на разных телескопах мира [6].

Параллельные наблюдения Гималии, выполненные на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории, подтверждают высокое качество астрометрических результатов, которые получаются с помощью метрового телескопа «Сатурн».

Благодарности

Авторы благодарят за содействие и поддержку д.ф.-м.н. Наговицына Ю.А., д.ф.-м.н. Парфиненко Л.Д. и сотрудников опытного производства ГАО РАН Ларионова С.В., Сухареву Г.Н., Ильина А.А.

Работа выполнена в рамках проектов наблюдений спутников больших планет и частично поддержана грантом РФФИ 12-02-00675-а и Программой №9 Президиума РАН.

Литература

1. *Krat V.A., Karpinsky, V.N., Pravdjuk, L.M.* // Solar Phys., 1972, 26, p. 305.
2. *Парфиненко Л.Д.* Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, 2011, СПб, с. 46–55.
3. *Massey, R.; Refregier, A.* // MNRAS, 2005, Vol. 363, Issue 1, pp. 197-210;
4. *Zacharias, N.; F. Charlie; T. Subasavage; et al.* // American Astronomical Society, 2015, AAS Meeting № 225, № 433.01.
5. *Emel'yanov N.V., Arlot J.-E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // Astronomy and Astrophysics, 2008. V. 487. P. 759–765 ;
6. *Gomes-Júnior, A.R.; Assafin, M.; Vieira-Martins, R.; et al.* Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations // 2015, eprint arXiv:1506.00045;

**ASTROMETRIC OBSERVATIONS WITH TELESCOPE “SATURN”.
THE FIRST RESULTS**

**Bikulova D.A., Ershova A.P., Izmailov I.S., Khovrichev M.Yu., Roshchina E.A.,
Oskina K.I., Balyaev I.A., Shumilov A.A., Petjur V.V., Maksimova L.A.,
Apetyan A.A., Kulikova A.M.**

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

We present the first results of astrometric observations obtained with telescope-reflector “Saturn” ($D = 1$ m, $F = 4$ m). Ex-stratospheric solar telescope was adapted for ground-based astrometric observations in Pulkovo at the end of 2014. The telescope was equipped by CCD camera S2C placed in prime focus (FOV 14×14 arc, 824 mas per pix scale). Since January 2015 the observations of outer jovian satellites was performed in test mode. The exposition time 30 seconds allows to obtain images of stars to magnitude 19^m at the present state of the mirror and the equipment. The outer jovian satellites are interesting objects because there are not enough of their astrometric observations needed to improve the motion theories. Positions of the satellites were derived from CCD series obtained for 6 nights. Astrometric reduction is performed by Turner method using HCRF/UCAC4 и HCRF/URAT1. Internal accuracy of satellites positions was estimated as 20–100 mas. The absolute values of residuals O-C do not exceed 100 mas in most cases. The independent tests were carried out by comparison with the results of observations of Himalia with Normal astrograph (the largest difference was 113 mas). Results are available at the astrometric data base www.pulldb.ru.

ОЦИФРОВКА, ИЗМЕРЕНИЯ И КАЛИБРОВКА АСТРОНЕГАТИВОВ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ

Измайлов И.С., Рощина Е.А.

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

Стеклянный архив обсерватории насчитывает около 50000 астронегативов, 5000 из них никогда не были измерены. В 2012 г. был разработан метод оцифровки, измерения и калибровки фотопластинок с помощью цифровой камеры Canon. Метод был протестирован на серии параллактических наблюдений, исследованы систематические ошибки и стабильность. Внутренняя точность измерений составила около 1 микрона, что эквивалентно 20 мас для пластинок, полученных на 26-дюймовом рефракторе. Новый метод был применен для обработки наблюдений визуально-двойных звезд. Около девяти тысяч фотопластинок, полученных в 1960-2007 гг. на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории, были оцифрованы и измерены. Применение новой методики оцифровки, измерений и калибровки позволило увеличить точность по сравнению с прошлыми измерениями. Точность измерения одной экспозиции находится в пределах от 2 до 70 мсд, в среднем 28 мсд по обеим координатам.

Введение

Измерения астронегативов в Пулковской обсерватории производились на координатно-измерительной машине «Аскорекорд» с визуальным наведением, на автоматическом измерительном комплексе «Фантазия» [1, 2]. Разрабатывались методы оцифровки и измерений с использованием планшетных сканеров [3, 5].

В 2000–2009 гг. на сканере UMAX PowerLook II (600 ppi) были оцифрованы небольшие поля с визуально-двойными звездами на более чем 4000 пластинках [3]. В 2010 г. разработана методика оцифровки, измерения и калибровки широких полей на сканере Microtec ScanMaker i900 (3200 ppi) и были получены положения избранных астероидов по 2000 фотопластинкам, снятым на Нормальном астрографе [4–6]. В 2008 году 64 пластинки с наблюдениям Плутона были оцифрованы в Королевской обсерватории Бельгии на высокоточном сканере ROB Digitizer [7].

Вышеупомянутые способы измерений астронегативов имели некоторые недостатки: измерения на машине «Аскорекорд» крайне малопродуктивны, и их точность невысока, использование комплекса «Фантазия» недоступно из-за технических проблем, сканеры обладают нерегулярными систематическими ошибками и тоже малопродуктивны. В 2012 г. был предложен метод оцифровки, измерения и калибровки фотопластинок с помощью цифровой камеры Canon EOS 5D Mark II и длиннофокусного объектива Юпитер 21М. Проект получил название Mobil Digitizing Device [8], и в дальнейшем аббревиатура MDD будет использоваться для обозначения метода. Метод был протестирован на серии параллактических наблюдений визуально-двойной звезды ADS 8002, полученных на 26-дюймовом рефракторе. Калибровка измерений производилась при помощи шаблона, предварительно оцифрованного на ROB Digitizer в 2008 г. [9] Для учета aberrаций объектива использовалась модель редукции, включающая кроме линейных членов полином 3-й степени. Внутренняя точность измерений составила около 1 мкм, что составляет 20 мсд для пластинок, полученных на 26-дюймовом рефракторе. Подробно методика изложена в работе [10].

В работе представлены результаты применения новой методики обработки астронегативов, анализ точности полученных результатов. С помощью новой методики было оцифровано около 9000 фотопластинок с наблюдениями двойных звезд и около 150 – с наблюдениями спутников Сатурна в 1972–1974 гг. Точность положений спут-

ников улучшена почти в 3 раза за счет уменьшения ошибок измерений и использования более точных опорных каталогов [11].

Методика оцифровки и измерения

Устройство для оцифровки состоит из стеклянного предметного столика, на котором размещается фотопластинка эмульсией вверх (к объективу), объектива, цифровой камеры и подсветки. Для обеспечения равномерного освещения фотопластинки используется плоский монитор с выведенным на него белым фоном, находящийся под предметным столиком вне зоны резкости объектива.

Сенсор цифровой камеры Canon EOS 5D Mark II представляет собой КМОП-матрицу размером 3744×5616 пикселей (36×24 мм) с эффективным разрешением 21,1 млн пикселей. Диапазон чувствительности ISO – 100–6400 (50–25600), глубина цвета – 42. Объектив «Юпитер 21М» – длиннофокусный четырехлинзовый анастигмат (F = 200 мм), характеризующийся исправлением аберраций астигматизма и кривизны поля изображения в пределах всего поля изображения, с просветлённой оптикой и ирисовой диафрагмой.

В процессе разработки методики и ее тестировании на параллактической серии наблюдений был выбран оптимальный режим съемки.

Оцифрованные изображения конвертировались из 16-битного формата RAW в 16-битный формат TIFF при помощи программного обеспечения, поставляемого с камерой Canon. Затем изображения переводились в черно-белые 16-битные путем суммирования значений RGB-каналов для каждого пикселя. Измерение изображений звезд выполнялось при помощи пакета IZMCCD [12, 13]. Центры изображений определялись при помощи профиля Моффата:

$$k_i = \frac{C_i}{1 + A_i r_i^a},$$

$$r^2 = (x - x_0 - \rho_i \sin \theta_i)^2 + (1 + B_j)(y - y_0 - \rho_i \cos \theta_i)^2 + E(x - x_0 - \rho_i \sin \theta_i)(y - y_0 - \rho_i \cos \theta_i)$$

$$I(x_j, y_j) = D + \sum_{i=0}^N k_i.$$

Здесь: $I(x_j, y_j)$ – яркость пикселя с координатами x_j, y_j , j – номер пикселя, принадлежащего апертуре; i – номер звезды в сложном изображении в случае взаимодействия изображений нескольких близких звезд $i = 1..N$; N – число звезд в сложном изображении, для одиночных изображений $N = 0$; x_0, y_0 – координаты звезды с нулевым индексом; ρ_i – расстояние между нулевой и i -той звездой в пикселях, θ_i – угол между осью Y и направлением отрезка между нулевой и i -той звездой; A, B, C, D, E, – определяемые при измерениях параметры, которые имеют следующий смысл: A – задает размер изображения; B – вытянутость изображения по оси Y; C – яркость изображения в центре; D – свободный член; E – вытянутость изображения в произвольном направлении.

Для изучения систематических и случайных ошибок, учета аберраций, изучения масштаба и осей системы измеренных координат производилась калибровка камеры. Для калибровки использовались измерения шаблона, оцифрованного на бельгийском высокоточном сканере ROB Digitizer [9]. Шаблон представляет собой фотографическую пластинку, на которой фотографическим методом нанесено около 200 круглых меток размером 250–300 микрон. Ввиду наличия систематических ошибок, обусловленных в основном аберрациями объектива, для редукции недостаточна модель шести постоянных. Было установлено, что наилучшим образом учитывает систематические ошибки модель, включающая члены до третьей степени. Рис. 1 показывает векторные поля искажений, вносимых системой «объектив + приемник излучения» в оцифрован-

ный фрагмент шаблона, учитываемые моделью редукции. Максимальные искажения оказались на краях поля.

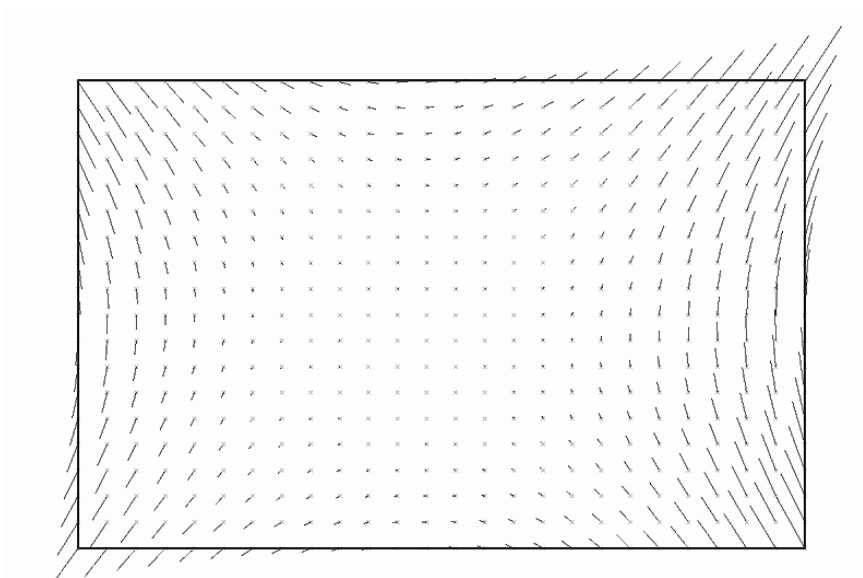


Рис. 1. Векторное поле систематических ошибок. Размеры изображения составляют 3744×5616 пикселей, что соответствует области шаблона 80×110 мм. Для наглядности размеры смещений увеличены в 1000 раз.

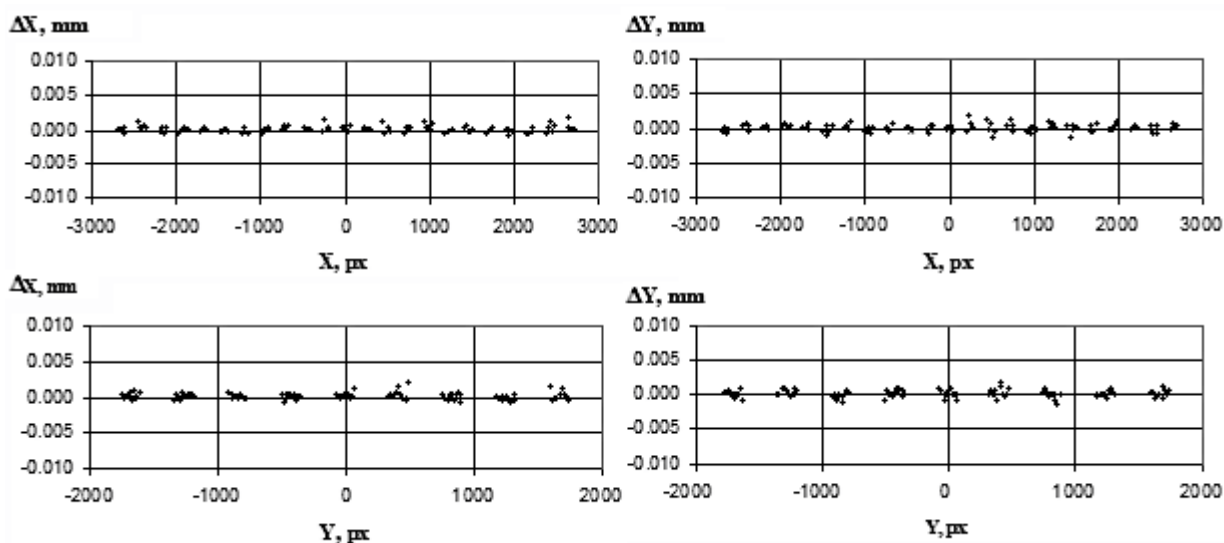


Рис. 2. Остаточные ошибки положений меток шаблона после учета систематических ошибок.

После учета систематических ошибок ошибки единицы веса составили 0.56 мкм по X и 0.63 мкм по Y по результатам усреднения 30 измерений шаблона. Остаточные невязки показаны на рис. 2. Распределение остаточных невязок носит случайный характер, и таким образом, результат редукции (координаты центров изображений звезд в мм) свободен от систематических ошибок. Также с помощью шаблона исследовалась, в первом приближении, стабильность измерений.

Тестирование метода

Для тестирования нового метода была выбрана параллактическая серия наблюдений визуально-двойной звезды ADS 8002 (55 пластинок, полученных на 26-дюймовом

рефракторе). Для редуки использовалось 5 опорных звезд, расположенных в поле 75 на 90 мм. В процессе оцифровки пластинка помещалась на таком расстоянии от камеры, что 1 рх итогового изображения соответствовало расстояние 21 мкм на пластинке.

Эта серия ранее была оцифрована и измерена на полуавтоматический измерительной машине с визуальным наведением «Аскорекорд», автоматической измерительной машине «Фантазия», сканере Microtek Scan Maker i900 в двух вариантах: по методике (1) И.С. Измайлова и по методике (2), разработанной С.И. Калининым [6]. Сравнение точностей разных способов измерений параллактической серии ADS 8002 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение точности разных методов. Ошибки единицы веса одной пластинки по X и по Y для компонентов A и B двойной звезды ADS 8002. N – число пластинок. Измерения на «Фантазии» были приняты в качестве стандартных.

метод	N	σ среднее	ADS 8002 A		ADS 8002 B	
			σ _X [мкм]	σ _Y [мкм]	σ _X [мкм]	σ _Y [мкм]
«Фантазия»	25	0.81	0.77	0.83	0.97	0.66
«Аскорекорд»	25	1.57	1.34	1.72	1.29	1.95
«Фантазия»	36	0.84	0.81	0.82	1.06	0.68
Сканер (2)	36	2.95	1.88	3.72	2.57	3.65
«Фантазия»	30	0.77	0.67	0.75	1.00	0.64
Сканер (1)	30	1.80	1.51	1.56	2.61	1.49
«Фантазия»	40	1.03	1.00	1.11	1.19	0.83
MDD	40	1.02	1.03	0.95	1.07	1.01

Таким образом, астронегативы, оцифрованные с помощью цифровой камеры Canon EOS 5D Mark II, оснащенной объективом Юпитер 21М, пригодны для измерений с целью последующей астрометрической редуки. Предложенный способ оцифровки имеет очевидные преимущества: скорость оцифровки 2–3 фотопластинки в минуту; отсутствие искажений связанных с неоднородностью движения линейки сканера; отсутствие искажений связанных с мозаичностью получаемого изображения; искажения, вносимые при оцифровке, легко поддаются изучению и учету.

Обработка наблюдений визуально-двойных звезд

Фотографические наблюдения визуально-двойных звезд были выполнены на 26-дюймовом рефракторе ($D = 650$ мм, $F = 10413$ мм, $M = 19.80''/\text{мм}$) в соответствии с классической методикой Герцшпрунга [14]. Всего было оцифровано около девяти тысяч фотопластинок, снятых с 1961 по 2007 гг. В процессе измерений было отобрано 6488 астронегативов хорошего качества. После процедуры калибровки измерений были исследованы: поведение масштаба; зависимости остаточных ошибок от спектрального класса звезд, положения на пластинке; влияние хроматической рефракции и дисторсия. Выявлены значимые изменения масштаба со временем и его зависимость от температуры, поэтому при вычислении относительных координат компонент двойных звезд были введены соответствующие поправки. Значение масштаба M на момент T при температуре t° определяется формулой:

$$M(t^\circ, T) = M_0 + h_t(t^\circ - t_0^\circ) + h_T(T - T_0)$$

где $M_0 = 19.816378 \pm 0.000084''/\text{мм}$ – значение масштаба в среднюю эпоху $T_0 = 1982.211$ при средней температуре $t_0^\circ = 1.76^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{\partial M(t^\circ, T)}{\partial t^\circ} = 0.0000797 \pm 0.0000084 [''/\text{мм}/\text{Гр.}],$$

$$h_T = \frac{\partial M(t^\circ, T)}{\partial T} = 0.000086 \pm 0.000010 \text{ ["/мм/год]}.$$

Корреляций невязок опорных звезд с показателями цвета В-V и блеском обнаружено не было. Также на данном уровне точности не был обнаружен эффект хроматической рефракции. Невязки опорных звезд также были исследованы на выявление систематических ошибок в зависимости от положения на фотопластинке. Эффектов дисторсии и каких-либо зависимостей невязок от координат, расстояния от центра кадра и других параметров обнаружено не было.

В итоге было получено 7248 относительных положений компонент пар звезд по пластинкам, из них выведено 2129 среднегодовых положения. Стандартное отклонение одного положения (одной экспозиции) находится в пределах от 2 до 70 мсд, в среднем 28 мсд в радиальном и трансверсальном направлениях. Погрешности определения среднего по пластинке углового расстояния и позиционного угла составляют, в среднем, 10 мсд и 0.07 градуса соответственно. Для среднегодовых положений погрешность углового расстояния ρ в среднем составляет 8.7 мсд, для позиционного угла θ – 0.05 градуса.

Ряды наблюдений для ADS 48, ADS 7251, ADS 11632 и ADS 14710 были измерены ранее на измерительном комплексе «Фантазия». Для сравнения эти пластинки были оцифрованы камерой Canon и измерены согласно приведенной выше методике. Систематические разности результатов измерений с подобными измерениями на «Фантазии» оказались незначительны. Аналогичные сравнения с измерениями на «Аскорекорде» (882 общие пластинки, 14 пар звезд) показали в среднем улучшение точности в 1.9 раза. Также было проведено сравнение с измерениями на планшетном сканере UMAX (530 пластинок с наблюдениями 14 пар звезд). В среднем, новая методика дает улучшение точности измерений в 1.5 раза.

Каталог полученных относительных положений доступен на сервере лаборатории астрометрии ГАО РАН (<http://izmcdd.puldb.ru/mdd>). Все позиционные углы даны в системе координат, соответствующей экватору и равноденствию эпохи наблюдения.

Заключение

Новый метод оцифровки, измерений и калибровки позволил за короткое время и с минимальными расходами обработать около 9 тысяч астронегативов с наблюдениями визуально-двойных звезд. Наблюдаемый диапазон ошибок измерения обусловлен разным качеством фотопластинок. По мнению авторов, достигнутая точность измерений является практически предельной для подобных астронегативов, о чем свидетельствует сравнение с результатами измерений высокоточного комплекса «Фантазия», имеющего более высокую разрешающую способность (оптимальное разрешение 4 мкм/пиксел).

Литература

1. *Gerasimov, A.G.; Polyakov, V. B. et al // Wiss. Z. Tech. Univ. Dresden, 1989, 38, 28.*
2. *Shakht, N.A.; Polyakov, E.V.; Rafalsky, V.B. Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks (ed. J.A. Docobo, A. Elipe, and H. McAlister, Dordrecht, Kluwer Academic, 1997), p. 99.*
3. *Измайлов И.С. // Изв. ГАО, 2000, 214, 533.*
4. *Бережной А.А. // Астрон. Вестн., 2013, том 47, вып. 2, с. 1–10.*
5. *Хруцкая Е.В., С.И. Калинин и др. // Изв. КБНЦ РАН, 2012, № 5 с. 85–101.*
6. *Khrutskaya, E.V.; Khovritchev, M.Yu.; Berezchnoy, A.A. et al. Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO workshop proceedings ed by P. Tanga, W. Thuillot, p. 131–135 (2011).*
7. *E.V. Khrutskaya, J.-P. De Cuypere et al. <http://arxiv.org/abs/1310.7502> (2013)*

8. *Grosheva E.A., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V.* Proceedings of NAROO-GAIA Workshop: A new reduction of old observations in the Gaia era, (Paris, 2013), ISBN 2-910015-66-1, p. 121.
9. *De Cuypere, J.-P.; Winter, L.* ADASS XV ASP Conf. Series, Vol. 351 (ed. Carlos Gabriel, Christophe Arviset, Daniel Ponz, and Enrique Solano, San Francisco, 2006, 587).
10. *И.С. Измаилов, Е.А. Рощина и др.* // Письма в АЖ, 2015, том 41, № 12, с. 1–14.
11. *Киселева Т.П., Т.А. Васильева и др.* // Астрон. вестн., 2015, т. 49, № 1, с. 75–78.
12. *Измаилов, И.С.* IZMCCD, СПб, <http://izmccd.puldb.ru/izmccdrus> (2005).
13. *Измаилов И.С., Ховричева М.Л., Ховричев М.Ю. и др.* // ПАЖ, 2010, 36, 365.
14. *Киселев А.А., Калиниченко О.А. и др.* Каталог относительных положений и движений 200 визуально-двойных звезд по наблюдениям в Пулкове на 26"-рефракторе в 1960–1986 гг. – СПб: Наука, 1988, с. 3.

DIGITIZATION, MEASUREMENT AND CALIBRATION OF ASTRONEGATIVES USING A DIGITAL CAMERA

Izmailov I.S., Roshchina E.A.

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

The glass plate archive of Pulkovo Observatory contains more than 50 000 astronegatives, 5000 of them have never been measured. The method of digitization, measuring and calibration using the digital camera Canon was developed at 2012. This method was tested by means of the parallactic set of observations. The accuracies, systematic errors and stability were investigated. Accuracy of measurements is about 1 micron that correspond to 20 mas for scale of 26-inch refractor. New method was applied for processing of visual-double stars observations obtained during 1960–2007 with 26-inch refractor of Pulkovo Observatory. About of 9000 photographic plates were digitized and measured. Using of new method allowed to improve the accuracy of star relative positions. Errors of one exposure measurement are within a range of 2–70 mas and about of 28 mas on average for both coordinates.

РАЗЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПУНКТОВ ПО СФЕРИЧЕСКИМ ФУНКЦИЯМ

Мохнаткин А.В.^{1,2}, Петров С.Д.², Горшков В.Л.^{1,2}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В классической теории литосферной тектоники литосфера включает в себя около двадцати плит, которые считаются абсолютно твердыми. Однако современные астрономические наблюдения выявляют отклонения от классической теории. В связи с вновь открывшимися фактами, используемый математический аппарат литосферной тектоники более не удовлетворяет современным наблюдениям. В настоящей работе рассмотрен новый подход к теории литосферной тектоники, а именно представление скоростей геодезических пунктов (станций) в виде ряда по сферическим функциям.

В качестве исходных данных в работе используются скорости более, чем двух тысяч пунктов глобальной геодезической сети, определенных в ITRF2008 сотрудниками Лаборатории реактивного движения (JPL). При разложении поля скоростей пунктов в ряд по сферическим функциям были приняты соглашения, в которых векторное поле разделяется на тороидальную и полоидальную компоненты. Получены коэффициенты сферических гармоник для соответствующих компонент вплоть до степени четыре. Предпринята предварительная попытка их геофизической интерпретации.

1. Введение

Современные модели движения литосферных плит, которые в т. ч. используются для построения земной системы отсчета, основаны на нахождении соответствия с реальными скоростями станций [1]. Существует несколько техник, позволяющих с высокой точностью оценивать координаты пункта и, соответственно, его скорости, среди них: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерные дальномерные наблюдения ИСЗ и Луны. Однако, самыми распространенными и массовыми из них являются ГНСС-наблюдения. Для сопоставления моделей движения с наблюдаемым скоростями принято делать упрощение, что плиты представляют собой абсолютно твердые тела, движущиеся по поверхности сферической Земли. Тем не менее, плиты имеют внутренние деформации, на что указывает значимое отличие скоростей разных станций после вычета их модельного движения. Также для скоростей станций остается проблема выбора системы отсчета, в настоящее время для глобальных моделей литосфера в целом считается неподвижной. Вопреки принятому представлению о границах плит, как о достаточно компактных областях, что вытекает из представления литосферных плит как абсолютно твердых объектов, результаты наблюдений свидетельствуют о протяженных межплитовых границах, подверженных деформациям. Вышеизложенные проблемы движения литосферных плит являются следствием допущений, сделанных для построения современных сугубо кинематических моделей. Для улучшения имеющихся эмпирических моделей в интерпретацию скоростей станций следует добавить учет внутренних деформаций с помощью метода совместного нахождения деформаций и вращения геотектонических блоков. Рассмотрение данной задачи в декартовой системе геоцентрических координат выглядит наиболее естественно. Тем не менее, вопрос о наличии общих закономерностей в литосферном движении остается открытым. Однако, благодаря обширной сети ГНСС-станций стало возможно использовать сферические функции для поиска особенностей в движении блоков земной коры.

2. Исходные координаты ГНСС-станций

В качестве исходных данных были использованы горизонтальные скорости, полученные в Лаборатории реактивного движения (JPL)¹ США. Положения и скорости находятся в автоматическом режиме для всех ГНСС-станций, результаты наблюдений которых являются общедоступными. Орбиты спутников GPS и поправки часов вычисляются в системе IGS08 с использованием около 80-ти опорных GPS-пунктов, постобработка наблюдений производится посредством пакета GIPSY. Скорости станций определялись после учета скачков в рядах положений по χ^2 -статистике. Всего данной службой представлены скорости для 2490 станций, из которых 4 были исключены из дальнейшего рассмотрения, как находящиеся на леднике и имеющие очень большие годовые скорости в горизонтальной проекции.

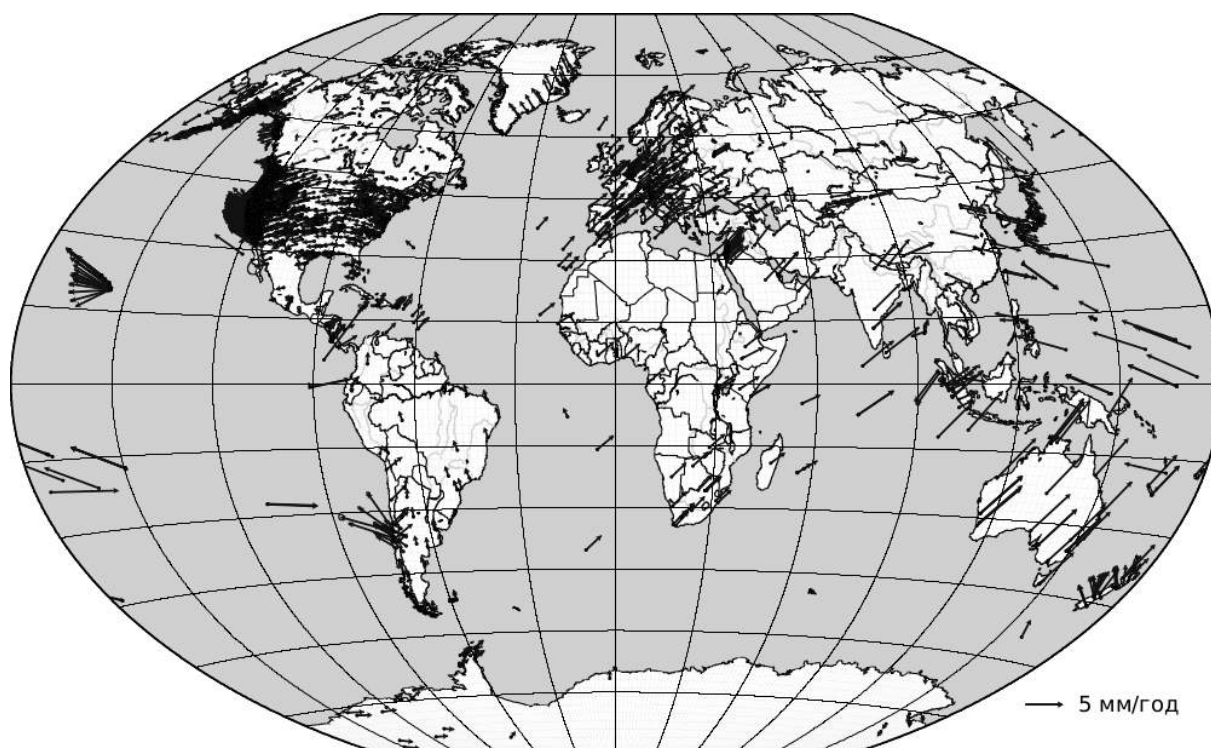


Рис. 1. Скорости 2490 пунктов.

3. Векторные сферические функции

Разложение вектора в ряд по сферическим функциям может быть выполнено на основе теоремы Гельмгольца: для безвихревой, полоидальной и тороидальной компонент. В предыдущих работах авторы [2] применяли гельмгольцево представление для горизонтальных скоростей относительно выбранных неподвижных точек литосферы.

Так, для зональных и меридиональных скоростей станций, считая поле горизонтальных скоростей станций соленоидальным, рассмотрим его представление на сфере в виде суммы тороидальной и полоидальной компонент. Эти компоненты представляются в виде рядов по скалярным сферическим функциям. Недостатком данного способа является то, что он накладывает ограничения на векторное поле, оно не обязано быть соленоидальным. Тем не менее, этот способ имеет наглядную физическую интерпретацию.

1 <http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>

В плоскости, касательной к сферической Земле, лежат два взаимно ортогональных орта: в направлении изменения широты – e_ϕ и долготы – e_λ , введем тороидальную $T_{nkp}(\phi, \lambda)$ и полоидальную $S_{nkp}(\phi, \lambda)$ сферические функции [3]:

$$T_{nkp} = \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{\partial K_{nkp}(\phi, \lambda)}{\partial \phi} e_\lambda - \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial K_{nkp}(\phi, \lambda)}{\partial \lambda} e_\phi \right), \quad (1)$$

$$S_{nkp} = \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(\frac{\partial K_{nkp}(\phi, \lambda)}{\partial \phi} e_\phi - \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial K_{nkp}(\phi, \lambda)}{\partial \lambda} e_\lambda \right), \quad (2)$$

$$K_{nkp}(\phi, \lambda) = R_{nk} \begin{cases} P_{nk}(\phi), k=0, p=1, \\ P_{nk}(\phi) \sin k\lambda, k \neq 0, p=0, \\ P_{nk}(\phi) \cos k\lambda, k \neq 0, p=1, \end{cases}$$

$$R_{nk} = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \begin{cases} \sqrt{\frac{2(n-k)!}{(n+k)!}}, k \neq 0, \\ 1, k=0. \end{cases}$$

Здесь $P_{nk}(\phi)$ – присоединенный полином Лежандра степени n и порядка k . Так, имея достаточно большую выборку в более, чем две тысячи станций, найдем коэффициенты t_{nkp} и s_{nkp} разложения поля горизонтальных скоростей по векторным сферическим функциям и их среднеквадратичные ошибки, решив соответствующие уравнения для меридиональной V_N и зональной V_E компонент скорости с помощью метода наименьших квадратов:

$$V_N = \sum_{nkp} t_{nkp} T_{nkp}^N(\phi, \lambda) + \sum_{nkp} s_{nkp} S_{nkp}^N(\phi, \lambda), \quad (3)$$

$$V_E = \sum_{nkp} t_{nkp} T_{nkp}^E(\phi, \lambda) + \sum_{nkp} s_{nkp} S_{nkp}^E(\phi, \lambda). \quad (4)$$

Далее, по известным сферическим функциям и коэффициентам при них можно синтезировать поле горизонтальных скоростей для любых сферических координат Земли.

4. Анализ и синтез для скоростей ГНСС-станций

Для 2486-ти станций из проекта JPL были найдены коэффициенты при сферических функциях вплоть до степени 4, для высших степеней результат теряет значимость. В табл. 1 и табл. 2 приведены коэффициенты до степени 3 и их ошибки при, соответственно, тороидальных и полоидальных функциях. На рис. 2 показаны меридиональная и зональная компонента скорости, синтезированные для сферических функций до степени четыре, меридиональная и зональная компонента скорости отдельно для степеней один, два и три показаны, соответственно, на рис. 3–5.

Для синтезированного поля горизонтальных скоростей можно заметить известные особенности литосферной тектоники, например, относительно высокую скорость движения Австралийской плиты. Для сферических функций степени один распределение зональной скорости имеет ярко выраженную дипольную структуру, а для сферических функций степеней два и три – распределение скоростей имеет более меридиональный характер, нежели зональный.

Таблица. 1. Коэффициенты тороидальных функций, мм/год.
Для ненулевых порядков приведены коэффициенты при $\cos k\lambda$ и $\sin k\lambda$, соответственно.

Степень	Порядок	Значение	Форм. ошибка
1	0	-2	2
1	1	-7 -8	2
2	0	-4	2
2	1	9 35	2
2	2	-6 -5	2
3	0	14	2
3	1	-10 17	2
3	2	-9 1	2
3	3	2 9	2

Таблица. 2. Коэффициенты полоидальных функций, мм/год.
Для ненулевых порядков приведены коэффициенты при $\cos k\lambda$ и $\sin k\lambda$, соответственно.

Степень	Порядок	Значение	Форм. ошибка
1	0	55	2
1	1	41 -51	2
2	0	-14	2
2	1	9 -27	2
2	2	-33 13	2
3	0	-13	2
3	1	-19 12	2
3	2	11 0	2
3	3	17 -14	2

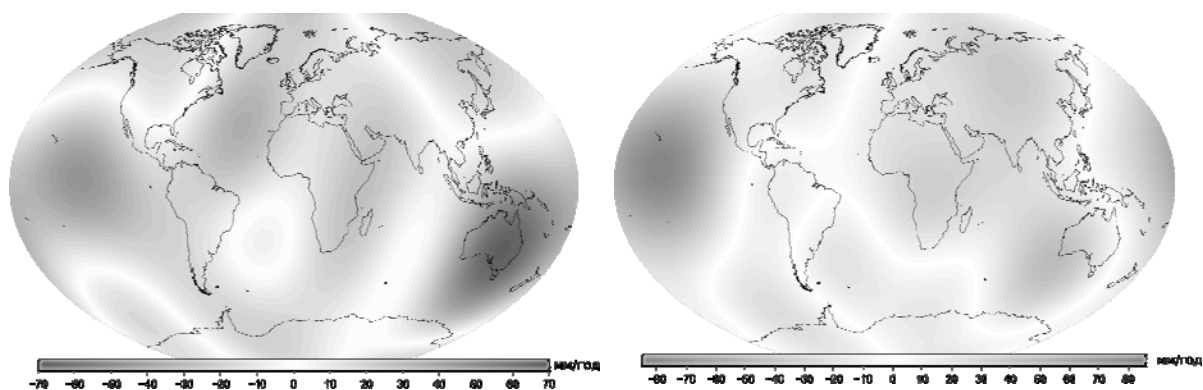


Рис. 2. Общие зональные и меридиональные компоненты скорости.

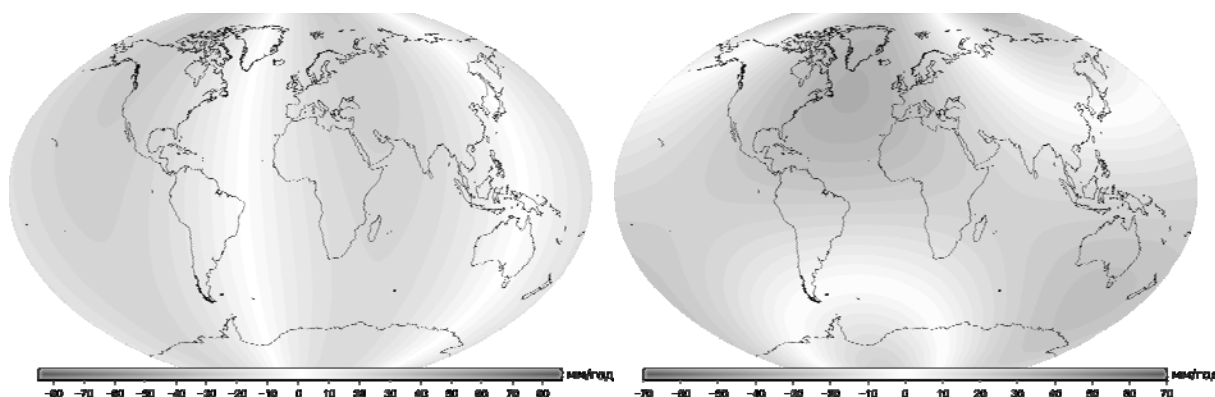


Рис. 3. Зональные и меридиональные компоненты скорости для членов разложения степени один.

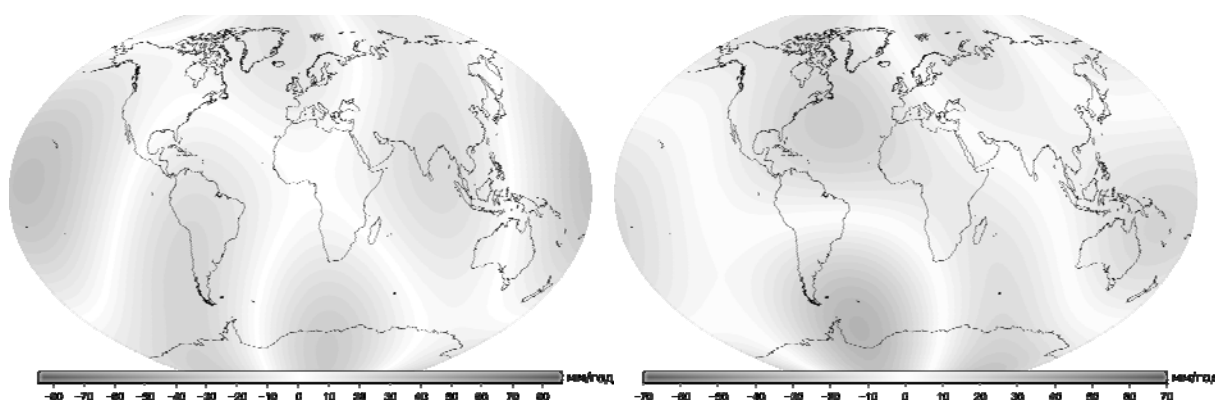


Рис. 4. Зональные и меридиональные компоненты скорости для членов разложения степени два.

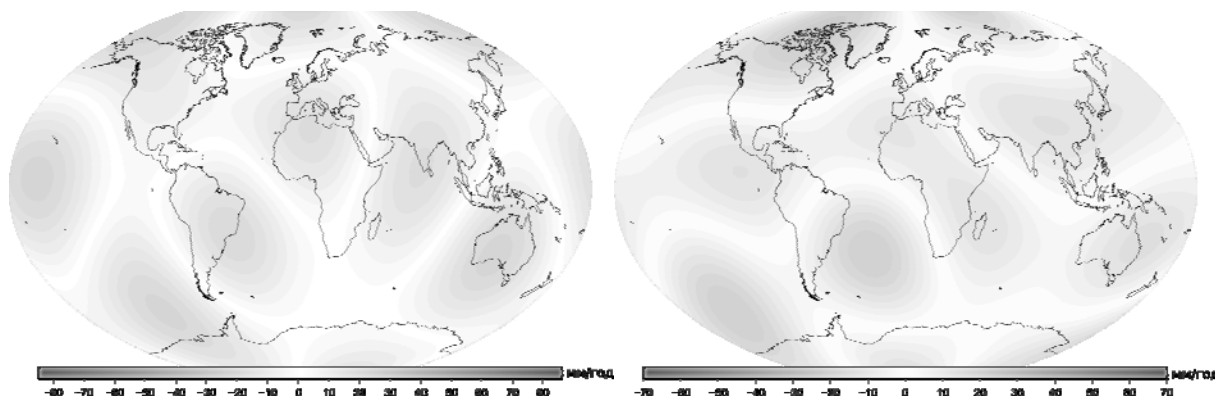


Рис. 5. Зональные и меридиональные компоненты скорости для членов разложения степени три.

4. Заключение

Выполнено разложение скоростей геодезических пунктов в ряд по сферическим функциям. Полученные результаты для полоидальной и тороидальной компонент скорости в целом согласуются с известными особенностями тектоники литосферы. Результаты работы позволили получить наглядное представление крупномасштабной литосферной тектоники. Целью дальнейшего исследования является тектонофизическая интерпретация результатов, выявление возможных связей крупномасштабных тектонических движений с вариациями геоида.

Литература

1. *Altamimi Z., Métivier L. and Collilieux X.* ITRF2008 plate motion model // *J. Geophys. Res.*, 2012. Vol. 117, Issue B7.
2. *Bercovici D., Wessel P.* A continuous kinematic model of plate-tectonic motions // *Geophys. J. Int.*, 1994, 119, 595–610.
3. *Витязев В.В., Цветков А.С.* Применение векторных сферических функций для кинематического анализа зонных каталогов // *Письма в АЖ*, 2011, т. 37, № 12, 940–954.

A STATIONS VELOCITY EXPANSION IN SPHERICAL HARMONICS

Mokhnatkin A.V.^{1,2}, Petrov S.D.², Gorshkov V.L.^{1,2}

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

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

According to the classical tectonics theory, lithosphere is divided into more than twenty plates that are considered absolutely rigid. However, modern astronomical observations reveal deviations from the standard theory. Used mathematical apparatus of lithospheric tectonics does not satisfy the present observations due to newly discovered facts. This work is aimed at expansion of velocities of the global geodetic network stations into vector spherical harmonics series as a new approach to the lithospheric tectonics theory.

Velocity data according to ITRF2008 for more than two thousands stations of the global geodetic network by the Jet Propulsion Laboratory were used. The expansion was made under the assumption, which postulates division of field into toroidal and poloidal components. Spherical harmonics coefficients up to fourth degree are obtained for corresponding components and a preliminary attempt of its geophysical interpretation is given.

Секция 6

**ОБРАБОТКА, ХРАНЕНИЕ
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ АРХИВ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Васильева Т.А., Рощина Е.А.

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

В фотографическом архиве Пулковской обсерватории находится на хранении около 48 тысяч фотопластинок с наблюдениями более 1400 объектов. Пластинки были получены с 1893 года по 2007 год. В архиве хранится около одной тысячи довоенных пластинок – это, главным образом, фотонегативы, полученные на Нормальном астрографе А.А. Белопольским, С.К. Костинским и А.Н. Дейчем. В их числе первые наблюдения Плутона в 1930 г., а так же наблюдения Марса, Юпитера, Нептуна, Урана, рассеянных звездных скоплений (М35, М38 и др.), шаровых звездных скоплений. Эти пластинки имеют не только научное, но и огромное историческое значение. Основная задача фотографического архива ГАО РАН – организация, хранение и систематизация астронегативов, способствующая получению научных результатов. Фотографические наблюдения не потеряли со временем свою актуальность, поскольку для многих научных задач необходим материал, полученный в течение длительного времени. Для уточнения теорий движения тел солнечной системы необходим как можно более длинный ряд наблюдений – с момента открытия тела и до наших дней, поэтому старые фотографические пластинки востребованы наряду с современными ПЗС-наблюдениями планет и их спутников, астероидов, комет (Khrutskaya, E.V. et al., 2011). Прогресс в области технических средств и программных методов, а также новейшие астрометрические каталоги, дают возможность получить новые более точные результаты по старым фотопластинкам.

Фотографические наблюдения в Пулкове

В 1893 г. в Пулкове при директоре Ф.А. Бредихине в западной башне главного здания был установлен Нормальный астрограф, который долгое время был основным инструментом фотографической астрометрии. С 1894 г. С.К. Костинский проводил на нём наблюдения, которые составили основу Пулковской стеклянной библиотеки.

Во время Великой отечественной войны наблюдения с Нормальным астрографом велись из Ташкента (1942–1945 гг.). После войны телескоп был восстановлен в Пулкове в 1948 году. В архиве хранятся наблюдения больших и малых планет, спутников планет, комет, шаровых и рассеянных скоплений, двойных звезд, параллаксов, новых звезд, площадок Каптейна, геодезических звезд, полей с галактическими и внегалактическими радиоисточниками. Последняя фотопластинка на Нормальном астрографе была снята в 2004 г., когда начались ПЗС-наблюдения.

В 1953 г. в Пулковской обсерватории был установлен Двойной короткофокусный астрограф – АКД (100/700 мм), на котором Л.А. Панайотов выполнил работу по определению лучевых скоростей звезд до 8 mag с помощью объективных призм прямого зрения на двух камерах телескопа АКД. В 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли и на АКД был получен первый в СССР (10 октября 1957 г.) снимок ракеты-носителя и определено ее точное положение. С 1960 по 1985 г. телескоп АКД использовался как инструмент для позиционных наблюдений больших планет Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, спутников планет и комет.

В 1954 г. в Пулкове был установлен 26-дюймовый рефрактор фирмы Цейсс взамен уничтоженного во время войны длиннофокусного 30-дюймового. С 1957 г. на этом телескопе были продолжены традиционные наблюдения двойных и кратных звезд, параллаксов и спутников планет.

В стеклянном архиве хранятся уникальные ряды наблюдений 61 Cygni – 443 фотопластинки, снятые на 26" рефракторе (1957–2005 гг.), и 813 фотопластинок, полученных на Нормальном астрографе (1897–2003 гг.). С 1995 г. 26-дюймовый рефрактор был

оснащен ПЗС-камерой, и фотографические наблюдения выполнялись параллельно с ПЗС до 2007 г. В 2007 г. фотографические наблюдения были завершены.

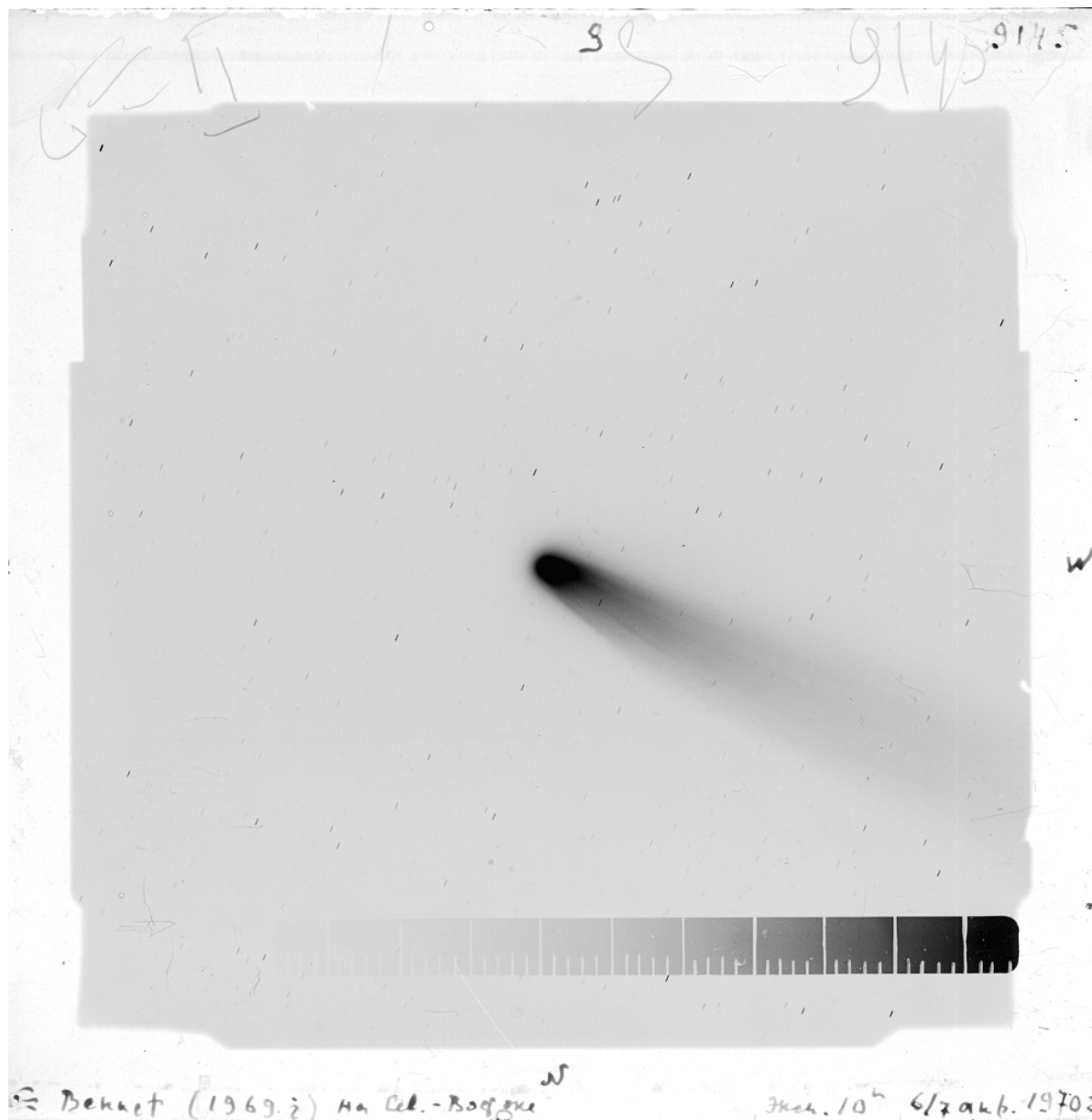


Рис. 1. Комета Беннета.
Нормальный астрограф, Пулково. 6/7 .04. 1970. Фатчихин Н.В.

Экспедиции

В 60–80-х годах отделом фотографической астрометрии были организованы экспедиции в южное полушарие – Чили, Боливия, а также Ордубадская экспедиция (вблизи пос. Агдара, Нахичеванская АССР). Более 7000 фотопластинок, хранящихся в архиве, получено с помощью Экспедиционного астрографа во время экспедиций. Большая часть фотопластинок получена в рамках программы Пулковского фотографического каталога южного неба ФОКАТ. Около 400 астронегативов были сняты на Лунно-планетном телескопе во время Ордубадской и Боливийской экспедиций.

Собрание астронегативов

На данный момент в Стеклотеке Пулковской обсерватории находится на хранении около 48 тысяч фотопластинок с наблюдениями более 1400 объектов:

- Юпитер и галилеевы спутники – 500 пл. (1976–2005)
- Сатурн – 800 пл. (1972–2007)
- Марс – 763 пл. (1960–1988)
- Уран – 250 пл. (1910–2004)
- Нептун – 237 пл. (1899–1955)
- Плутон – 272 пл. (1930–1994)
- Астероиды – 2655 пл. (1949–2004)
- Кометы
- Луна
- Звездные скопления
- Двойные и кратные звезды
- Поля с внегалактическими туманностями
- Избранные площадки Каптейна
- Поля с галактическими и внегалактическими радиоисточниками
- Области южного неба (по программе создания каталога ФОКАТ).



Рис 2. Фотопластинка, снятая на Лунно-планетном телескопе. 1971 г. Экспедиция в Азербайджан. Поттер Х.И.

Таблица 1. Инструменты, участвовавшие в фотографических наблюдениях.

Место наблюдений	Инструмент	D, мм	F, мм	Масштаб "/мм	Годы	Число пластинок
Пулково	26" рефрактор	650	10410	19.81	1956–2007	22222
Абастумани, Грузия	Астрограф Цейсса	400	3000	30.03	1965–1965	13
Пулково	AKD	100	700	300	1952–1996	1451
Уккель, Бельгия	Эксп. астрограф	200	2260	93	1977–1983	162
Санкт-Пёльтен, Австрия	Эксп. астрограф	200	2260	93	1982–1989	21
Пулково	Эксп. астрограф	200	2260	93	1988–1988	1
Ордубад, Азербайджан	Эксп. астрограф	200	2260	93	1974–1994	2255
Тариха, Боливия	Эксп. астрограф	200	2260	93	1982–1994	5486
Ордубад, Азербайджан	Лунно-планетный	700	10000	20.63	1955–1988	417
Эль-Робле, Чили	АЗТ	700	2076	99	1968–1968	5
Зеленчук	БТА, спектры	6050	24000	8.59	1982–1987	125
Пулково	Норм. астрограф	350	3460	59.56	1893–2004	16353
Ташкент	Норм. астрограф	350	3460	59.56	1942–1945	54

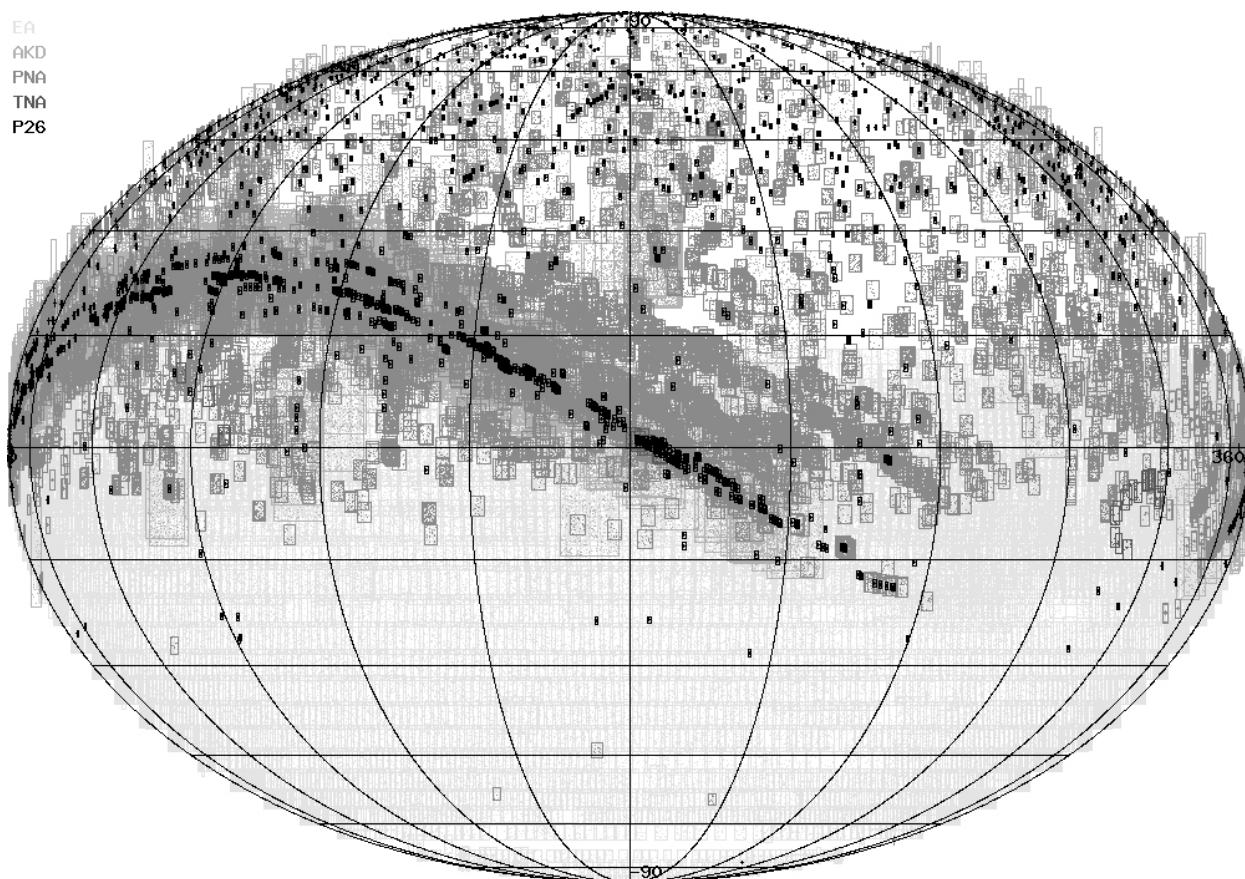


Рис. 3. Распределение наблюдений на фотонегативах по небесной сфере. Южное полушарие покрывают пластинки, снятые во время экспедиции в Боливию, показанные самым светлым серым цветом. Черным цветом показаны пластинки, снятые на 26-дюймовом рефракторе, темно-серым – пластинки Нормального астрографа.

Оцифровка и измерение астронегативов

С 2000 г. в Лаборатории астрометрии и звездной астрономии разрабатываются собственные методы оцифровки и измерения астронегативов, направленные на повышение точности, увеличение производительности и бережное отношение к ценным фотографическим материалам. В 2000–2009 гг. на сканере UMAX PowerLook II (600 ppi) были оцифрованы небольшие поля с визуально-двойными звездами на более чем 4000 пластинках [1, 3]. В 2010 г. разработана методика оцифровки, измерения и калибровки широких полей на сканере Microtec ScanMaker i900 (3200 ppi), и были получены положения избранных астероидов по 2000 фотопластинкам, снятым на Нормальном астрографе [4, 5, 7]. В 2008 году 64 пластинки с наблюдениями Плутона были оцифрованы в Королевской обсерватории Бельгии на высокоточном сканере ROB Digitizer [8].

В 2012 г. в Пулкове был предложен метод оцифровки, измерения и калибровки фотопластинок с помощью цифровой камеры Canon EOS 5D Mark II и длиннофокусного объектива Юпитер 21М [6]. С помощью новой методики было оцифровано около 9000 фотопластинок с наблюдениями двойных звезд [2]. В настоящее время ведутся работы по новой редукции наблюдений спутников планет. Применение новой техники оцифровки и измерений в сочетании с современными каталогами дает увеличение точности в 2–3 раза по сравнению с прошлыми определениями. [9].

Сотрудничество

В 2014 году Пулковская Стеклотека принимала участие в подготовке выставки «Астрономическая тетрадь», организованной Мультимедиа Арт Музеем в Москве. Выставка была посвящена выдающемуся астроному А.П. Ганскому, большим успехом пользовались представленные ГАО РАН оцифрованные фотопластинки.

Пулковский фотографический архив предоставляет данные по запросам из других научных организаций. В начале 2015 г. по просьбе итальянских ученых были оцифрованы области со звездой Romano на фотопластинках 1935–1938 гг. с наблюдениями туманности M33 для проведения фотометрических исследований [10].

Электронный каталог

Для работы с фотопластинками создан электронный каталог, который в настоящее время находится в процессе модернизации. Версия электронного каталога 2005 г., включающая в себя фотопластинки, снятые на Пулковском Нормальном астрографе и 26-дюймовом рефракторе, доступна по адресу <http://www.puldb.ru/db/plates/>

Литература

1. *Измайлов И.С.* Применение сканера общего назначения для позиционных измерений астрофотографий // 2000, Изв. ГАО, 214, 533.
2. *И.С. Измайлов, Е.А. Рощина, А.А. Киселев и др.* Фотографические наблюдения визуально-двойных звезд в Пулкове: оцифровка, измерения и калибровка // 2015, Письма в АЖ, том 41, № 12, с. 1–14
3. *А.А. Киселев, О.В. Кияева, И.С. Измайлов и др.* Пулковский каталог относительных положений и движений визуально-двойных и кратных звезд на основе фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в 1960–2007 гг. // Астрон. ж., 2014, том 91, № 2, с. 130–149.
4. *Е.В. Хруцкая С.И. Калинин и др.* Использование планшетных сканеров для оцифровки и новой редукции фотографических пластинок: метод калибровки, измерение координат, оценки точности // 2012, Изв. Кабардино-Балкарского научного центра РАН, № 5 с. 85–101.
5. *Бережной А.А.* Новая редукция оцифрованных фотографических пластинок с избранными астероидами, полученных на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории в период с 1948 по 1990 гг. // Астрон. Вест., 2013, том 47, вып. 2, с. 1–10.

6. *Grosheva E.A., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V.* Mobile Device to Digitize the photographic plates: first results // 2013, Proceedings of NAROO-GAIA Workshop: A new reduction of old observations in the Gaia era, Paris, France, June 20-22, 2012, ISBN 2-910015-66-1, pp. 121–125
7. *Khrutskaya, E.V.; Khovritchev, M.Yu.; Berezhnoy, A.A. et al* Astrometry of Asteroids with Normal Astrograph of Pulkovo Observatory: from Digitized Plates to Modern CCD-Observations // 2011, Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO workshop proceedings edit by P. Tanga, W. Thuillot, p. 131–135.
8. *E.V. Khrutskaya, J.-P. De Cuypere et al.* Positions of Pluto extracted from digitized Pulkovo photographic plates taken in 1930–1960 // 2013, <http://arxiv.org/abs/1310.7502>
9. *Kiseleva, T.P.; Vasil'eva, T.A.; Izmailov, I.S.; Roshchina, E.A.* New astrometric reduction of old photographic observations of Saturn's moons based on digitizing of astronegatives // *Solar System Research*, 2015, Volume 49, Issue 1, pp.72-74
10. *V.F. Polcaro, O. Maryeva, R. Nesci, M. Calabresi, A. Chieffi, S. Galleti, R. Gualandi, R. Haver, A. Pasquali, C. Rossi, T. Vasilyeva, R.F. Viotti.* GR 290 (M33/V532, Romano's Star): a very massive star in post-LBV phase // *Astronomical Journal*, 2015, in press.

THE PHOTOGRAPHIC PLATES ARCHIVE OF THE PULKOVO OBSERVATORY

Vasilyeva T.A., Roshchina E.A.

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

About 48 thousand photographic plates with observations of more than 1,400 objects are stored in the photographic archive at Pulkovo Observatory. The plates were obtained during 1893–2007 years. The archive contains about one thousand pre-war plates – mostly negatives obtained with the Normal Astrograph by A.A. Belopol'sky, S.K. Kostinsky and A.N. Deutsch. These include the first observations of Pluto in 1930, as well as observations of Mars, Jupiter, Neptune, Uranus, open clusters (M35, M38, and others.), Globular star clusters. These plates have not only a scientific but also a great historical importance. The aim of the Pulkovo's photographic archive – is the organization, storage and systematization of astronegatives in order to support the obtaining of scientific results. Photographic observations are relevant still, since many scientific tasks require the observations obtained during a long period. Progress of technical facilities and software techniques and modern astrometric catalogs gives a possibility to obtain new and more accurate results using old photographic plates. Pulkovo's photographic archive provides data on requests from other scientific organizations. The electronic catalog (version of 2005) contains the data of photographic plates obtained with Pulkovo's Normal astrograph and 26-inch refractor is available at the address <http://www.puldb.ru/db/plates/>

BAO PLATE ARCHIVE DIGITIZATION

**Mickaelian A.M.¹, Nikoghosyan E.H.¹, Gigoyan K.S.¹, Paronyan G.M.¹,
Abrahamyan H.V.¹, Andriasyan H.R.¹, Azatyan N.M.¹, Kostandyan G.R.¹,
Khachatryan K.G.¹, Vardanyan A.V.¹, Gyulzadyan M.V.¹, Mikayelyan G.A.²,
Farmanyan S.V.², Knyazyan A.V.³**

¹*Byurakan Astrophysical Observatory, Byurakan, Armenia,*

²*National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, Armenia*

³*Institute for Informatics and Automation Problems, Yerevan, Armenia*

Astronomical plate archives created on the basis of numerous observations at many observatories are important part of the astronomical heritage. Byurakan Astrophysical Observatory (BAO) plate archive consists of 37,000 photographic plates and films, obtained at 2.6m telescope, 1m and 0.5m Schmidt telescopes and other smaller ones during 1947–1991. In 2015, we have started a project on the whole BAO Plate Archive digitization, creation of electronic database and its scientific usage. A Science Program Board is created to evaluate the observing material, to investigate new possibilities and to propose new projects based on the combined usage of these observations together with other world databases. The Executing Team consists of 11 astronomers and 2 computer scientists and will use 2 EPSON Perfection V750 Pro scanners for the digitization. The project will run during 3 years in 2015–2017 and the final result will be an electronic database and online interactive sky map to be used for further research projects.

Introduction

A project on Digitization of Byurakan Astrophysical Observatory Plate Archive (shortly BAO PAP) has started in February 2015. It is aimed at preservation of BAO valuable observational material accumulated during 1947–1991, creation of full Database of all BAO observations, development of new research projects based on the existing observational material.

Project objectives are the preservation of BAO observational archive, preservation of scientific information contained in photographic plates and other carriers, creation of opportunity of dissemination and wide usage of observational data, putting in correspondence of observational material to modern standards and usage methods, proposing new science projects and creation of possibility of their further accomplishment, and making BAO activities visible.

BAO Plate Archive is one of the largest astronomical archives in the world and is considered to be BAO main observational treasure. Today BAO archive holds some 37,000 astronomical plates, films or other carriers of observational data. However, previous observational and informational registration methods currently do not make it available to wide range of scientists, and especially its usage for solution of new research problems.

BAO telescopes and observing programmes

BAO observers worked with a number of BAO telescopes during 1947–1991 and obtained several dozens of thousands plates, films and other products. The table gives general understanding on observations of 10 BAO telescopes that worked on photographic photometry, electrophotometry, slit and objective prism spectroscopy, and polarimetry of many thousands astronomical objects. We give in Table 1 an overview of BAO telescopes and produced observational material. Telescope "Sizes" are given for the mirror and focal length for classical telescopes and for the correcting lens, mirror and focal length for Schmidt type telescopes.

Table 1. Overview of BAO telescopes and produced observational material.

Telescope	Sizes [cm]	Years	Observing methods	Plates
5" double-astrograph	13	1947–1950	photometry	~3000
6"	15	1947–1950	photometry	~3000
8" Schmidt	20/20/31	1949–1968	photometry	~4500
20" Cassegrain	51/800	1952–1991	electrophotometry	
10" spectrograph	25	1953–19??	spectra	???
Nebular spectrograph		1954–19??	spectra	???
16" Cassegrain	41/400	1955–1991	electrophotometry	
21" Schmidt	53/53/183	1955–1991	photometry	~12000
40" Schmidt (AZT-10)	102/132/213	1960–1991	photometry, spectra	~7500
ZTA-2.6m	264/1016	1975–1991	photometry, spectra	~7000
All telescopes		1947–1991		>37000

Here we list main observational projects run at three most important BAO telescopes.

21" (0.5m) Schmidt telescope:

- Polarization of cometary nebula NGC 2261
- Nuclei of nearby Sa, Sb and Sc galaxies
- Search for flare stars in Pleiades, Orion, Praesepe, Cygnus, Taurus Dark Clouds
- Variability of Markarian galaxies

40" (1m) Schmidt telescope:

- First Byurakan Survey (FBS, Markarian survey; Markarian 1989)
- Search for flare stars in Pleiades, Orion, Cygnus, Praesepe, Taurus Dark Clouds
- Second Byurakan Survey (SBS; Stepanian 2005)
- Extension of the FBS in the Galactic Plane

ZTA-2.6m telescope:

- Morphological study of Markarian galaxies
- Investigation of star clusters, groups and clusters of galaxies
- Spectroscopy FBS blue stellar objects and FBS late-type stars
- Spectroscopy SBS galaxies and stellar objects (BAO/SAO)
- Direct images of the central regions of Markarian galaxies
- Spectroscopy of T Tauri and flare stars

BAO Plate Archive Project

The digitization of astronomical plates and films pursues not only the maintenance task, but also it will serve as a source for new scientific research and discoveries, if only the digitized material runs according to modern standards and, due to its accessibility, it will become an active archive. The project is aimed at compilation, accounting, digitization of BAO observational archive photographic plates and films, as well as their incorporation in databases with modern standards and methods, providing access for all observational material and development of new scientific programs based on this material.

Scientific Programs Board (SPB) is created to evaluate the existing observational material, to select sets of priorities to be scanned first and to propose new research projects. It consists of BAO Director and most experienced BAO observers, as well as researchers from NAS RA Institute of Informatics and Automation Problems (IIAP) are involved for their experience in computer science related to databases and computational methods.

The project consists of the following works:

- Creation of the Project Webpage, User Interface and Project Database
- Scanning of photographic plates and films
- Astrometric solution

- Wavelength calibration
- Density and flux calibration
- Making up template low-dispersion spectra



Fig. 1. BAO Plate Archive Project webpage.

BAO PAP webpage (<http://www.aras.am/PlateArchive/>) was recently open and contains a lot of information on BAO observations, previous digitization projects, present Project details, teams, follow-up research projects, deliverables and related links (many items will be filled in during the next months). "**BAO Observations**" contain data on BAO telescopes, observers, observing programs accomplished during 1947–1991, publications based on BAO observations, and presents BAO Plate Archive organized in 1986. "**Digitization Projects**" present previous digitization projects, including DFBS (digitized Markarian Survey), Second Byurakan Survey (SBS), FBS Blue Stellar Objects spectroscopy and Variability of ON 231. "**Project Description**" gives Project Tasks, Instruments and Methods, and Timeline. "**Project Teams**" presents SPB and PET with links to their personal webpages. "**Follow-Up Projects**" is the list of possible follow-up research projects that may be carried out based on the digitized data. "**Deliverables**" will be regularly updated publications and reports. "**Related Links**" give links to digitization projects observatories, related software, etc.

However, the main products will be "**Data Access**" and "**Interactive Sky Map**". The first one will contain BAO Observational Database, Search by any parameter, Data Visualization and Download of the digitized plates and films. "**Interactive Sky Map**" will visualize the observed by BAO telescopes sky and will give possibility to check observed areas. Main expected projects are supposed to be those on variability and proper motions of stars, as well as studies of the Solar System objects.

Previous digitization programmes at BAO and research projects

A number of digitization projects have been accomplished at BAO, including the most important one, Digitized First Byurakan Survey (DFBS) based on the digitization of the famous Markarian Survey (FBS). Its main features are:

- Pixel size is $15.875\mu\text{m}$ or $1.542''$

- Each plate is 9601 X 9601 pixels
- Each low-dispersion spectrum is 107 X 5 pixels (1700 μ m length)
- Astrometric solution has $\sim 1''$ rms
- Average dispersion is 33 \AA /pix (22-60 from blue to red part)
- Photometric accuracy is $\sim 0.3^m$
- In total there are 1874 digitized plates
- There are 40,000,000 spectra for 20,000,000 objects

In Figure 2 we give an example of extraction of an asteroid spectrum from DFBS using VO software SkyBote proving how useful the DFBS plates can be for follow-up studies.

The Second Byurakan Survey (SBS) plates are also subject for digitization, as they are hypersensitized and their emulsion is more sensitive for deterioration. 180 plates have been digitized so far. Due to SBS smaller photographic grains, 2400 dpi (10 μ m pixel size) is being used.

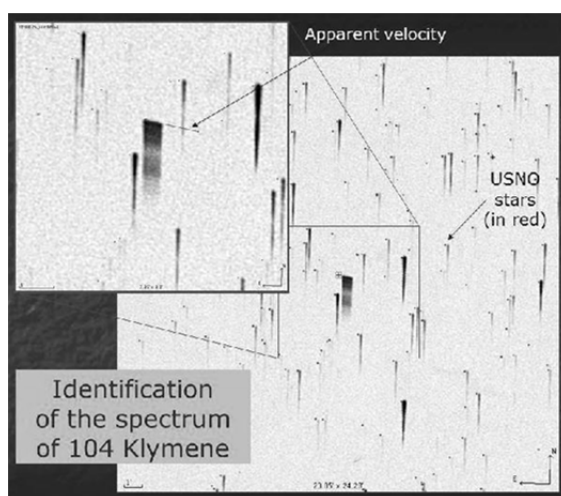


Fig. 2. Extraction of an asteroid spectrum from DFBS using VO software SkyBote.

Photographic spectra of the FBS blue stellar objects (BSOs) have been obtained using 2.6m telescope and UAGS spectrograph on photographic films. ~ 700 such spectra have been scanned with 1600 dpi, 16 bit and 650 \times 21 pix sizes images were obtained. All spectra were put in a standard format, so that automatic reduction was possible (Figure 3).



Fig. 3. Standard format of FBS spectra with 650 \times 21 pix sizes images for automatic reduction.

101 FBS blue stellar objects were published and a number of planetary nebulae, white dwarfs, hot subdwarfs and HBB stars have been revealed (Sinamyán & Mickaelian 2009).

Another project was the study of long-term variability of ON 231, which appeared in the Coma field, where photographic chains for discovery of flare stars were carried out. In total 189 plates with a total number of more than 1200 exposures in 1969–1976 with the By-

urakan 21" and 40" Schmidt telescopes were obtained. This was a valuable material for study of ON231 long-term variability (Figure 4; Erastova 2004).

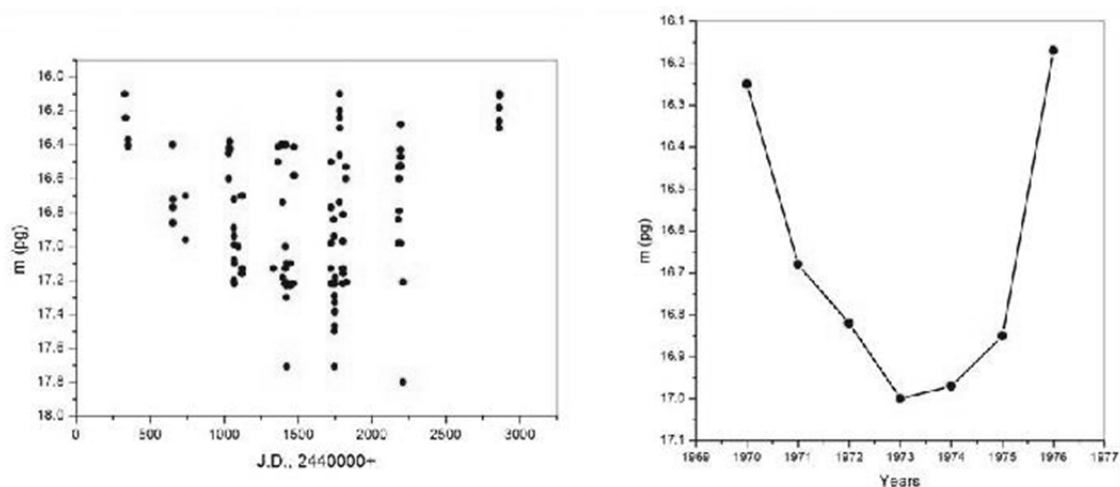


Fig. 4. Photometric measurements and variability study of the blazar ON 231 observed in the Coma field.

Summary

BAO Plate Archive Project will lead to preservation of BAO valuable observational material obtained during 1947-1991. However, our goal is not only to create a passive archive of scanned plates and films, but also to make use of especially those fields, where more studies are possible. Proper motion and variability studies are most important, as time domain material is contained in historical plates.

There are a number of further possible research projects that will be conducted having the plates digitized:

- Correction of ephemerides of known asteroids and search for new asteroids (Thuillot et al. 2007; Berthier et al. 2009).
- Discovery and study of variable stars (Mickaelian et al. 2011; Nesci et al. 2009).
- Revealing high proper motion stars (Mickaelian & Sinamyan 2010).
- Study of variability of known blazars and discovery of new blazars.
- Revealing Novae and Supernovae progenitors.
- Discovery of new QSOs.
- Discovery of new white dwarfs (Sinamyan & Mickaelian 2011).
- Discovery of new late-type stars (Gigoyan et al. 2010).
- Discovery of optical sources of gamma-ray bursts.
- Optical identifications of X-ray, IR and radio sources (Mickaelian & Sargsyan 2004; Mickaelian & Gigoyan 2006; Mickaelian et al. 2006; Hovhannisyan et al. 2009).

References

- Berthier J., Sarkissian A., Mickaelian A., et al. 2009, European Planetary Science Congress, 4, 526.
Erastova, L.K., 2004, A&AT, 23, 209.
Gigoyan K.S., Mickaelian A.M., 2012, MNRAS, 419, 3346.
Gigoyan K.S., Sinamyan P.K., Engels D., Mickaelian A.M., 2010, Astrophysics, 53, 123.
Hovhannisyan L.R., Weedman D.W., Mickaelian A.M., et al., 2009, AJ, 138, 251.
Knyazyan A., Mickaelian A., Astsatryan H., 2011, Information Theories and Applications, 18, 243.
Markarian, B.E.; Lipovetsky, V.A.; Stepanian, J.A.; et al., 1989, Comm. SAO, 62, 5.
Massaro E., Mickaelian A.M., Nesci R., Weedman D. (Eds.), 2008, The Digitized First Byurakan Survey, ARACNE Editrice, Rome, 78 p.

- Mickaelian A.M.*, 2008, *AJ*, 136, 946.
Mickaelian A.M., Gigoyan K.S., 2006, *A&A*, 455, 765.
Mickaelian A.M., Hagen H.-J., Sargsyan L.A. et al., 2005, Catalog No. VI/116 at CDS, Strasbourg.
Mickaelian A.M., Hovhannisyanyan L.R., Engels D., et al., 2006, *A&A*, 449, 425.
Mickaelian A.M., Mikayelyan G.A., Sinamyanyan P.K., 2011, *MNRAS*, 415, 1061.
Mickaelian A.M., Nesci R., Rossi C., et al., 2007, *A&A*, 464, 1177.
Mickaelian A.M., Sargsyan L.A., 2004, *Astrophysics*, 47, 213.
Mickaelian A.M., Sargsyan L.A., Mikayelyan G.A., 2010, *Proc. of Science*, 30.
Mickaelian A.M., Sargsyan L.A., Nesci R., et al., 2010, *ASP Conf. Ser.*, Vol. 434: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIX*, p. 325.
Mickaelian A., Sinamyanyan P., 2010, *MNRAS*, 407, 681.
Nesci R., Mickaelian A. M., Rossi C., 2009, *Astron. Tel.*, #2338.
Sinamyanyan P.K., Mickaelian A.M., 2009, *Astrophysics*, 52, 76.
Sinamyanyan P.K., Mickaelian A.M., 2011, *Astrophysics*, 54, 403.
Stepanian, J.A., 2005, *RMxAA*, 41, 155.
Thuillot W., Berthier J., Sarkissian A., et al., 2007, *Highlights of Astronomy*, 14, 616.

ПЕРЕОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ ЛУННЫХ ПОКРЫТИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В УЗБЕКИСТАНЕ ЗА ПЕРИОД 1882–1996 гг.

**Муминов М.М.¹, Казанцева Л.В.², Эгамбердиев Ш.А.¹,
Каххаров Б.Б.¹, Андрук В.Н.²**

¹*Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан*

²*Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина*

Представлена объединенная база данных ILOC и Киевской обсерватории по пунктам на территории Узбекистана. Была выполнена переобработка наблюдений с использованием полу-аналитической эфемериды движения Луны VSOP87A с учетом поправок за рельеф краевой зоны по картам Уоттса. В Узбекистане наблюдения лунных покрытий проводили сотрудники Ташкентской обсерватории с конца XIX века. Наблюдения предполагаются продолжить на 48 см телескопе Майданакской обсерватории. Отобранный массив данных (1145 результатов наблюдений) представляет собой длительный временной период (1882–1993 гг.), но имеет неравномерное распределение по времени. Четко выделяются 4 периода активности наблюдений 1882–1890, 1927–1938, 1948–1972 и 1993 гг.

Наблюдения параллактических явлений – покрытий небесных объектов (звезд, планет, астероидов) Луной – со времен Птолемея играют важную роль в изучении динамики системы «Земля – Луна». Эти наблюдения остаются актуальными и теперь, поскольку, обеспечивая простой и эффективный мониторинг движения Луны на фоне звезд, они выполняют роль своеобразных реперов в области согласования небесной и земной систем отсчета и шкал времени [1], улучшении теорий орбитального движения Луны и выявлении часовых особенностей этого движения [2], в создании карт краевой зоны Луны [3]. Наблюдения лунных покрытий используются также для определения угловых диаметров звезд [4] и при открытии и исследовании кратных звездных систем [5].

Относительная простота лунных наблюдений покрытий и необходимость выполнения их одновременно с разных точек земной поверхности сделали эти наблюдения массовыми. Для организации и поддержки наблюдений покрытий, их сбора и обработки решением МАСС в 1923 г. был создан Международный центр лунных покрытий (ILOC), который активно работал до 2008 года [6]. Его функции длительное время выполняла Королевская Гринвичская обсерватория (Великобритания), Гидрографический и океанографический департамент Японии в Токио. Из публикаций и отчетов обсерваторий создана и продолжает наполняться база данных результатов наблюдений покрытий, которая охватывает период с 1623 года. С 2009 года функцию сбора результатов наблюдений выполняет Международная ассоциация регистраторов покрытий IOTA, Австралия.

Кроме того, были созданы национальные координационные центры во многих странах мира. С 1963 г. организацией проведения и сбором лунных наблюдений покрытий на территории постсоветского пространства занималась Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, в которой создана База данных наблюдений покрытий за период 1952–2004 гг. [7].

Новые технические и информационные технологии в методах проведения астрономических наблюдений повышают точность и объективность их результатов [8], но в вопросах изучения вековых изменений параметров движения небесных объектов, визуальные наблюдения длительных периодов прошлых лет остаются незаменимым источником наблюдательных данных.

В Узбекистане публиковать результаты наблюдений лунных покрытий начали еще в XIX веке. В 1891 г. под влиянием и при содействии Бредихина для Ташкентской обсерватории был заказан нормальный 13-дюймовый астрограф и прибор для измерения фотографий. Фотографическая база данных, полученная на Китабском двойном астрографе, фирмы Carl Zeiss и на Нормальном астрографе, установленном в Ташкенте в 1895, и пополнявшаяся вплоть до середины 80-х годов прошлого столетия, является уникальной и одной из самых богатых в мире. Преимущественно наблюдения лунных покрытий выполняли сотрудники Ташкентской обсерватории. Объединив информацию баз данных ИЛОС и Киевской обсерватории по пунктам, на территории Узбекистана была выполнена переобработка наблюдений с использованием полуаналитической эфемериды движения Луны VSOP87A [9] с учетом поправок за рельеф краевой зоны по картам Уотса [10].

Отобранный массив данных (1145 результатов наблюдений) представляет собой длительный временной период (1882–1993 гг.), но имеет неравномерное распределение по времени. Четко выделяются 4 периода активности наблюдений: 1882–1890, 1927–1938, 1948–1972 и 1993 гг. При этом на протяжении года распределение наблюдений практически равномерно (рис. 1).

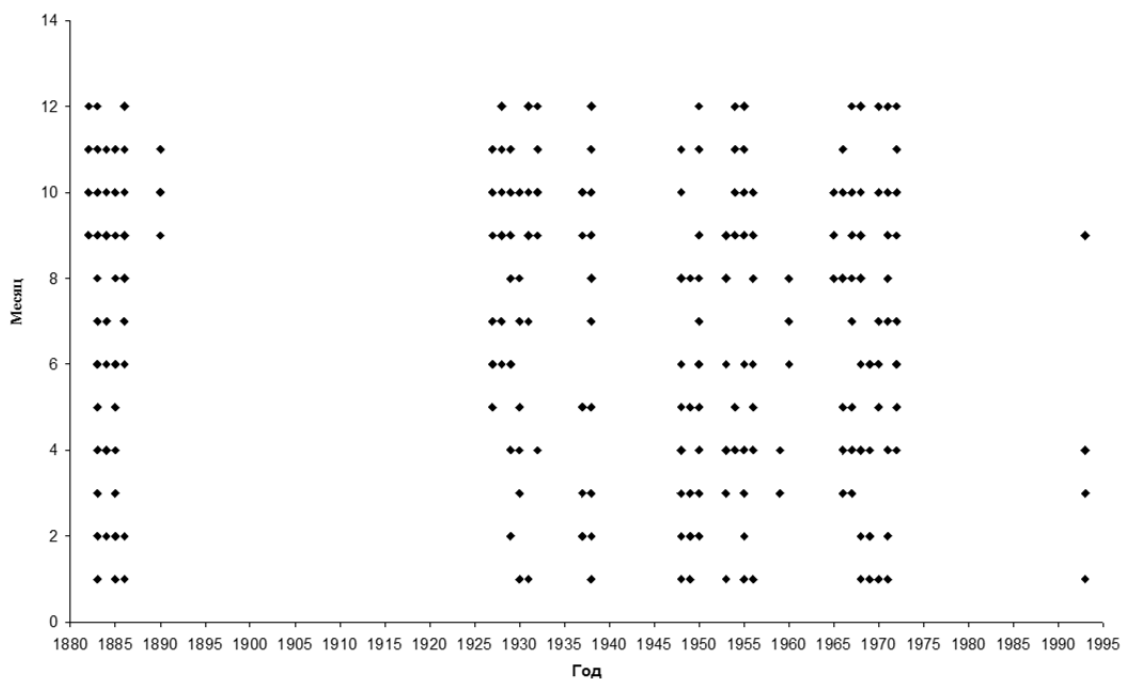


Рис. 1.

Более-менее равномерно распределены наблюдения по отношению к краевой зоне Луны (рис. 2).

При этом большая часть явлений наблюдалась на темном крае Луны, преимущественно во время покрытий звезды лунным диском (ПТ – покрытие темным краем, ОТ – открытие темным краем, ПС – покрытие светлым краем, ОС – открытие светлым краем) (рис. 3).

Величина (О-С) имеет нормальное распределение с центром в 0, но имеет удлиненное крыло в положительную сторону, которое можно объяснить личным уравнением наблюдателя (не нулевой скоростью реакции на регистрацию момента явления) (рис. 4).

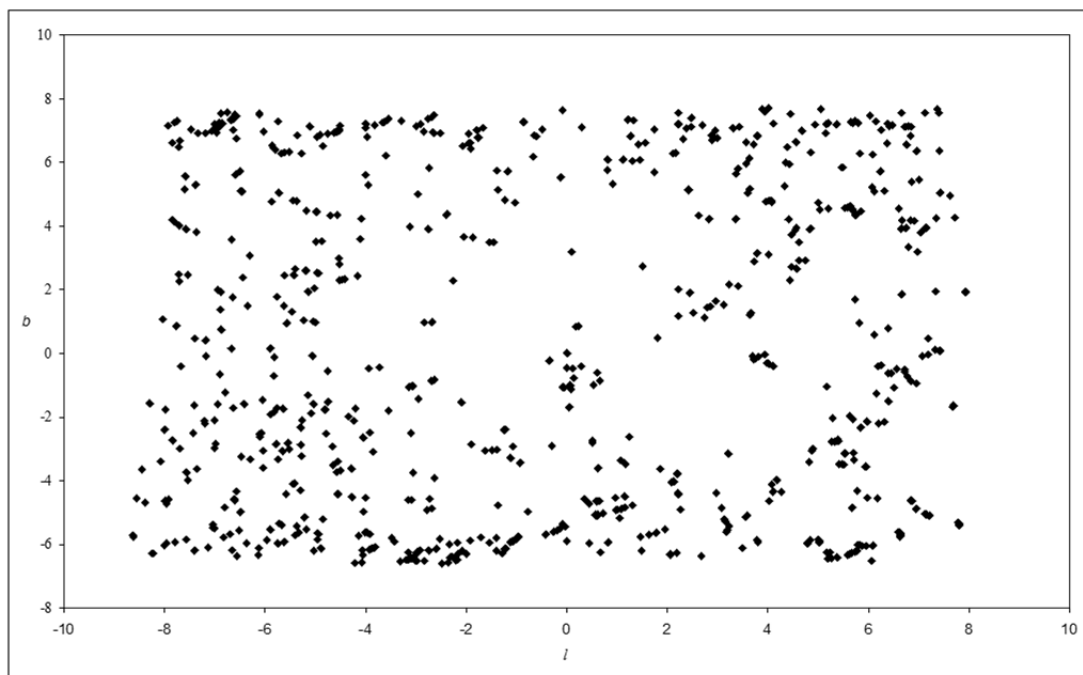


Рис. 2.

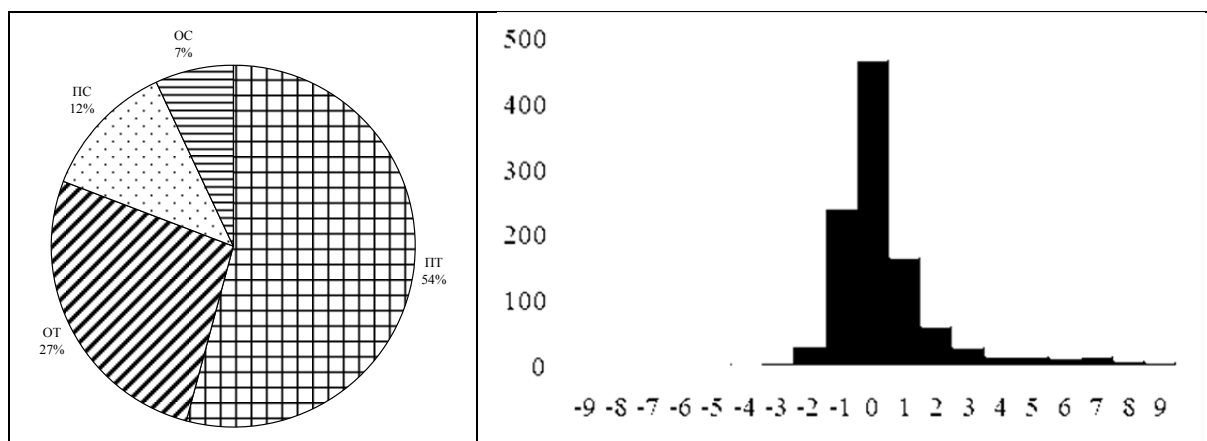


Рис. 3.

Рис. 4.

Распределение значений величин (О-С) показывает увеличение разброса для ближних дат и смещение среднего значения в сторону отрицательных значений, что может свидетельствовать о перевесе наблюдательных дат дальних дат в использовании самой эфемериды (рис. 5).

Высоты неровностей краевой зоны не показывают особого влияния на результаты наблюдений (рис. 6).

В целом наблюдательный материал, отобранный для анализа, демонстрирует достаточную точность и хорошее качество, что позволяет его использовать в дальнейшем при общей обработке лунных покрытий.

В базе данных ИЛОС сегодня собрано информация о наблюдениях, выполненных в 10905 пунктах земной поверхности по всему миру (рис. 7). Покрытие наблюдательными точками не равномерно и требует расширения в неохваченных областях, хотя бы на поверхности суши. Возобновление работы старых баз с новым модернизированным оборудованием и создание новых крайне желательно для продолжения работы.

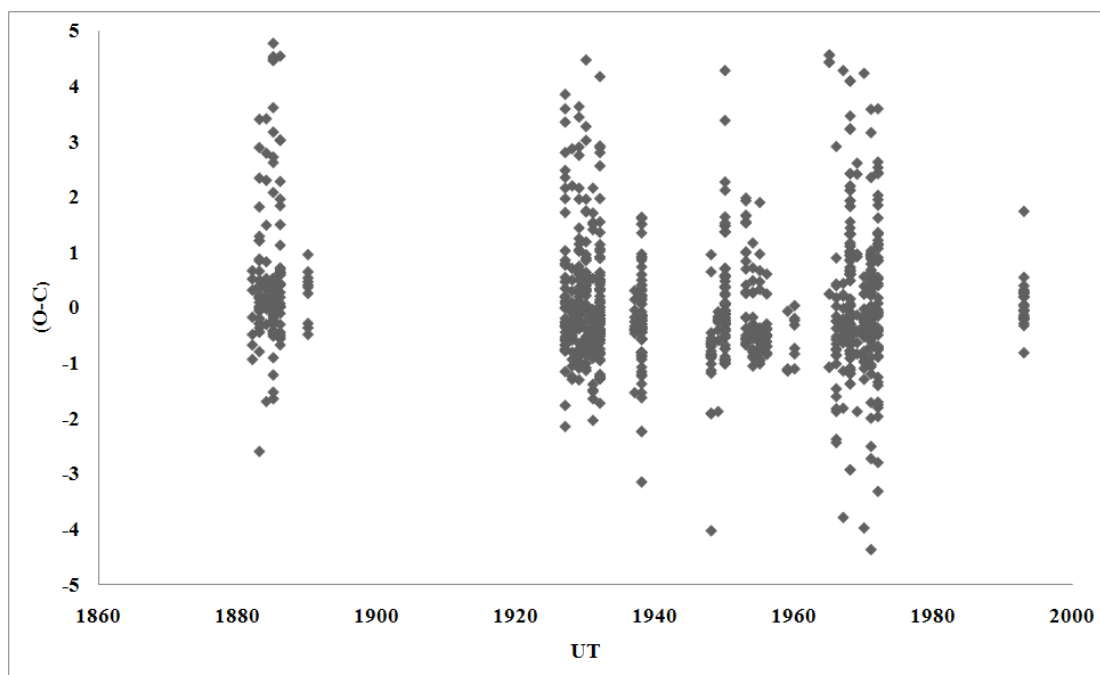


Рис. 5.

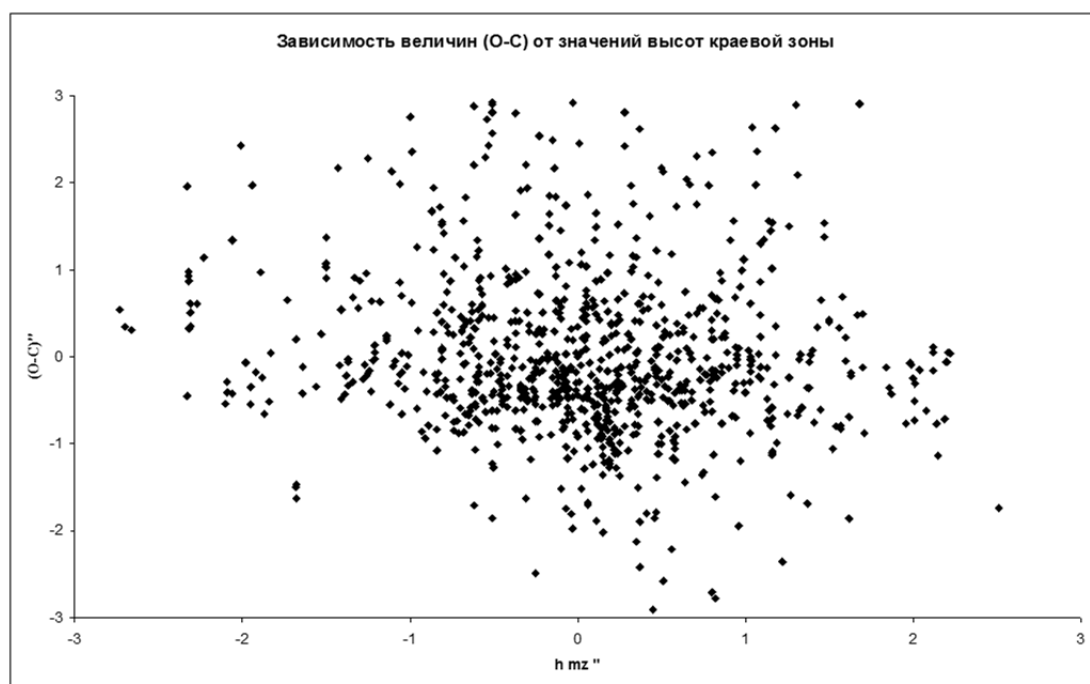
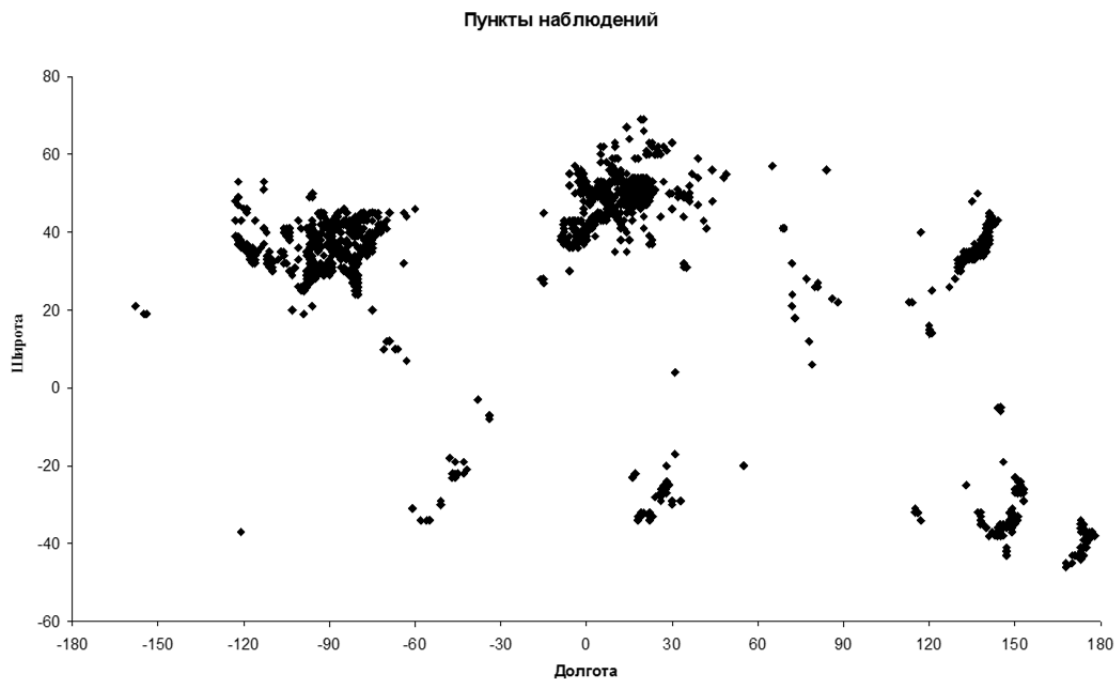


Рис. 6.

Расширение наблюдательных возможностей благодаря модернизации оборудования позволит значительно расширить поле применения результатов наблюдений [11]. Это – астероидные покрытия звезд, видимые в пределах узких полос на земной поверхности и позволяющие точно определять размеры и форму астероидов, открывать их спутники и уточнять орбиту [12, 13]. Наблюдения покрытия звезд планетами позволяют уточнять параметры их атмосферы, исследовать структуру планетных колец и т.д.



Малые наземные телескопы (до 1 м в апертуре) в эпоху космических миссий еще не потеряли своего значения и вполне могут использоваться для целого ряда астрономических задач.

Литература

1. *Barry M.A.* Verifying Timestamps of Occultation Observation Systems // Publications of the Astronomical Society of Australia, Volume 32, id.e014 – 8 p.
2. *Sōma M., Tanikawa K.* Determination of Delta T and Lunar Tidal Acceleration from Ancient Eclipses and Occultations // New Insights From Recent Studies in Historical Astronomy: Following in the Footsteps of F. Richard Stephenson, Astrophysics and Space Science Proceedings, Volume 43. – Springer International Publishing Switzerland, 2015, p. 11.
3. *Soma M., Kato Y.* Limb Profiles of the Moon from Grazing Occultation Observations Collected at RGO // Publications of the National Astronomical Observatory of Japan. 2002. Vol. 6. Pp.75–105.
4. *Tingay S. et al.* Lunar occultations of reference quasars // ATNF proposal P685, Semester – 2009 – p. 2239.
5. *Appleby G., Argyle R.* W Lunar Occultations // Observing and Measuring Visual Double Stars, Patrick Moore's Practical Astronomy Series – Springer Science+Business Media New York – 2012 – 311 p.
6. Report of Lunar Occultation Observations – No.26 – 2008.
7. *Казанцева Л.В., Осипов А.К.* База данных результатов наблюдений лунных покрытий, собранных за 1963–2001 года // Кинематика и физика небес. тел. 2002. 18, № 2. С. 179–187.
8. *Клещонок В.В., Буромский Н.И., Хатько И.В.* Киевская электронная база данных телевизионных наблюдений покрытий звезд Луной // Кинематика и физика небес. тел. 2008. 24, № 2. С. 158–163.
9. *Simon J. et al.* Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets // Astronomy & Astrophysics. 1994. N 282. P. 663–683.
10. *Watts C.B.* The Marginal Zone of the Moon // American Ephemeris and Nautical Almanac Astronomical Papers. No. 17 – U.S. Naval Observatory, Washington. – 1963.
11. Chasing the Shadow. The IOTA Occultation Observer's Manual. The Complete Guide to Observing Lunar, Grazing and Asteroid Occultations / Ed. R. Nugent. – 2007 – IOTA – 379 p.

12. *Venable R.* The Probable Detection of a Moon of Asteroid 98 Ianthe // Occultation Newsletter - International Occultation Timing Association (IOTA) – 2004. Vol. 11, N 2. – P. 8.
13. *Rossi G. et al.* The Use of Stellar Occultations to Study Trans-Neptunian Objects // American Astronomical Society, DPS meeting № 46, № 510.09

REPROCESSING OF LUNAR OCCULTATIONS OBSERVATIONS CARRIED OUT IN UZBEKISTAN DURING 1882–1996

**Muminov M.M.¹, Kazantseva L.V.², Ehgamberdiev Sh.A.¹,
Kahhorov B.B.¹, Andruk V.M.²**

¹*Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan*

²*Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

A unified database of ILOC and Kyiv Observatory by selected locations on the territory of Uzbekistan was presented. Reprocessing of observations using the semi-analytical ephemeris of lunar motion VSOP87A with obtained correction for the relief of the marginal zone according to Watts's map was carried out. Observation of occultations was carried out by the staff of Tashkent Observatory in Uzbekistan from the end of the XIX century. The observations are planned to be continued with 48 cm telescope of Maidanak Observatory. Selected database (1145 results of observations) was obtained during a long period (1882–1993 AD), but distribution of observation over that period is not uniform. 4 periods of an active observation 1882–1890, 1927–1938, 1948–1972 and 1993 can be noted.

КАТАЛОГ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ И В-ВЕЛИЧИН ЗВЕЗД ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРОГРАММЫ ФОН НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ОЦИФРОВАННЫХ АСТРОНЕГАТИВОВ КИТАБСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

**Муминов М.М.¹, Эгамбердиев Ш.А.¹, Латыпов А.А.¹, Каххаров Б.Б.¹,
Йулдошев К.Х.¹, Андрук В.Н.², Головня В.В.²**

¹*Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан*

²*Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина*

Для экваториальной зоны программы ФОН на основе обработки оцифрованных астронегативов, снятых в Китабской обсерватории республики Узбекистан, создан каталог экваториальных α, δ координат и V -величин звезд. Ширина зоны – 5 градусов, количество обработанных пластинок равно 90. Оцифровка астронегативов осуществлялась с помощью сканера Epson Expression 10000XL, режим сканирования – 1200 dpi, размер пластинок – 30×30 см или 13000×13000 px. Каталог содержит 1 795640 звезд и галактик до $V \leq 16.5^m$ на эпоху 1983.2 г. Координаты звезд и галактик получены в системе каталога Tycho-2, V -величины в системе фотоэлектрических стандартов. Внутренняя точность каталога для всех объектов составляет $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.20''$ и $\sigma_V = \pm 0.18^m$ (для звезд в интервале $V = 6^m-13^m$ ошибки равны $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.13''$ и $\sigma_V = \pm 0.11^m$) для экваториальных координат и звездных V -величин соответственно. Сходимость между нами вычисленными и опорными положениями составляет $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.066''$ (для 64 840 звезд каталога Tycho-2), а сходимость с фотоэлектрическими звездными V -величинами равна $\sigma_V = \pm 0.19^m$ (для 1 635 измерений звезд). Ошибки по отношению к каталогу UCAC-4 примерно равны $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.33''$.

Введение

Программа "Фотографический обзор северного неба" (ФОН) была предложена Главной астрономической обсерваторией Национальной Академии наук Украины (ГАО НАНУ, Киев) (Колчинский И.Г., 1977) в конце семидесятых годов двадцатого века. Идея программы была обусловлена ситуацией в области фотографической астрометрии, сложившейся в начале семидесятых годов прошлого века. Почти одновременно некоторые обсерватории бывшего Советского Союза (Голосеево, Звенигород, Душанбе, Абастумани и Китаб) были оснащены однотипными астрографами (с диаметром объектива 400 мм и фокусным расстоянием 2000 мм или 3000 мм) производства Народного предприятия «Карл Цейсс» (ГДР, Йена).

На Китабской широтной станции был установлен двойной астрограф Цейса ($F = 3$ м, поле $6^\circ \times 6^\circ$, масштаб $68''/\text{мм}$). Фотографирование северное неба (от -20° до $+30^\circ$) проводилось со сдвигом центров фотографических полей на два градуса по координатам дельта и с разницей расстояний в 4 градуса по альфа между центрами соседних полей. Фотографирование каждой площадки проводилось с двумя экспозициями (длинной – от 40 до 60 минут и короткой – от 40 секунд до одной минуты) на одной и той же фотопластинке со сдвигом по обеим координатам. Продолжительность длинной экспозиции выбиралась таким образом, чтобы получить изображения звезд до $V = 16-17$ звездной величины. По проекту ФОН фотографические наблюдения были завершены в середине 90-х годов XX века. Общее количество полученных в Китабе фотографических изображений составляет порядка 2600 астронегативов. В наблюдениях участвовали Э. Рахматов, Х. Рахматов, Э. Мирмахмудов, Л. Баштова, Ю. Иванов и др.

С помощью специально разработанного программного обеспечения в среде LINUX/MIDAS/ROMAFOT для всех сканов получено прямоугольные координаты и фотометрические величины зарегистрированных объектов [1–3]. Был использован базовый программный продукт, разработанный для сканирования с пространственным

разрешением 1200 dpi на сканере *Epson Expression 10000XL*, размер обрабатываемых полей – до 13000×13000 пкл (1 пкл = 1.45") [4–6]. Версия каталога получена из обработки одиночных сканов без поворота пластинок на 90°, что позволило сэкономить ресурсы для хранения и обработки информации в два раза без ущерба для точности полученных результатов. Принципы и этапы обработки оцифрованных астронегативов для 0 зоны, которые изложены в этой работе, уже успешно распространяются на обработку всех пластинок Китабской части программы ФОН.

Разделение звезд на две экспозиции

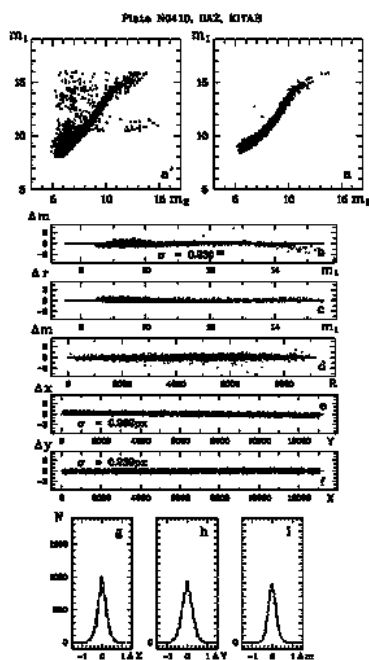


Рис. 1.

Пластинки программы ФОН экспонированы с двумя экспозициями: длинной и короткой по 16–20 мин и 30–60 сек соответственно. Для создания астрометрического каталога необходимо исключить звезды короткой экспозиции еще на начальной стадии до процедуры редукции прямоугольных координат X, Y в систему экваториальных координат α, δ [7]. Этапы и функциональные связи различных параметров при разделении зарегистрированных звезд (объектов) на две экспозиции показано на рис. 1 для пластинки № 410 нулевой зоны Китабской части программы ФОН. На верхних панелях показано связь инструментальных звездных величин короткой и длинной экспозиций m_2 и m_1 на начальной и конечной стадиях разделения (слева и справа соответственно). Приведенные к среднему значению разности звездных величин Δm , разности расстояний между центрами изображений Δr , разности координат $\Delta X, \Delta Y$ даны относительно m_1 , расстояния от центра пластинки R , прямоугольных координат Y, X (панели b, c, d, e, f). На нижних панелях (g, h, j) представлены реальные и теоретические (штриховые

линии) гистограммы распределения $\Delta m, \Delta X, \Delta Y$. Отметим, что величина значения поворота разностей $\Delta X, \Delta Y$ относительно центра прямоугольных координат Y, X зависит от склонения δ экспонируемой пластинки. Поворот систем координат для звезд двух экспозиций на экваторе ($\delta = 0^\circ$) отсутствует.

Учет поправок за систематические ошибки сканеров

Коммерческие сканеры обладают систематическими астрометрическими ошибками, особенно велики значения ошибок сканирования вдоль координаты Y , т.е. по направлению движения ПЗС-линейки. Амплитуда разностей экваториальных координат между сосчитанными и каталожными значениями достигает величин $\Delta_{\alpha\delta} = \pm 2.5''$ для сканеров *Epson Expression 10000XL*. Исправление измеренных координат X, Y за систематические ошибки сканера в настоящей работе выполнено следующим образом. Поделив длину пластинки в пкл $L_Y \approx 13000$ (вдоль направления сканирования) на количество опорных (для конкретной пластинки) звезд каталога *Tucho-2 K* ≈ 1360 получим начальный шаг (step) аппроксимации $s = L_Y/K \approx 10$ пкл, т.е., на каждый шаг длиной s должна попадать хотя бы одна звезда их опорного каталога *Tucho-2*. При наличии в шаге двух и более опорных звезд, опорные точки вычисляются для середины шага, как среднее отклонение этих звезд $\Delta X = \Delta\alpha/M$ и $\Delta Y = \Delta\delta/M$ (где масштаб сканирования M равен $1\text{пкл} \approx 1.45''$) от истинного положения на пластинке; при отсутствии опорных звезд в шаге, при вычислении отклонений опорных точек $\Delta X, \Delta Y$ делается интерполяция по значениям двух соседних участков. В процессе обработки пластинки значения

отклонений для определяемых звезд ΔX , ΔY вычисляются интерполированием относительно соседних опорных точек. Отметим, что полная редукция прямоугольных координат X , Y в систему экваториальных координат α , δ делается за четыре последовательных цикла (приближения), в каждом цикле длина шага s увеличивается на значение самого шага. Величина ошибок разностей экваториальных координат между сосчитанными и каталожными значениями σ_α , σ_δ в третьем и четвертом циклах совпадают или очень близки по значению. На рис. 2 справа и слева показан ход разностей $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ относительно прямоугольных координат пластинки (сканера) X , Y и звездных B -величин до учета и после учета систематических ошибок сканера. Указаны величины: 1) ошибок разностей между сосчитанными и каталожными значениями экваториальных координат σ_α , σ_δ и 2) значения уравнения блеска (вычисления сделаны отдельно) $mdtX$, $mdtY$ для звезд ярче $B \leq 11^m$.

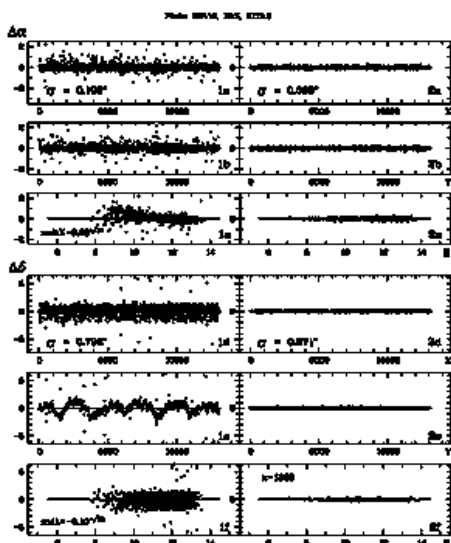


Рис. 2.

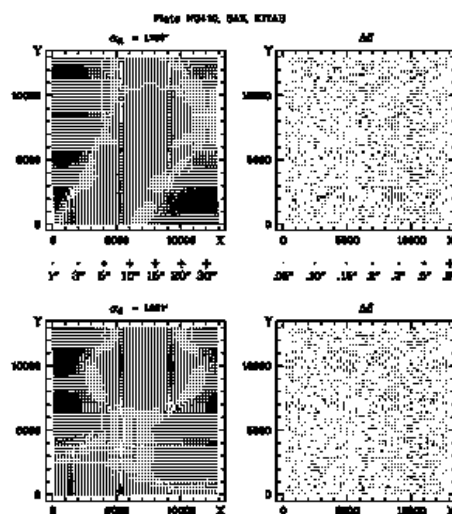


Рис. 3.

Астрометрическая редукция в системе каталога Tycho-2

Для полей 5×5 градусов, как на этапе диагностирования систематических ошибок сканера $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$, так и на этапах редукции прямоугольных координат X , Y объектов в систему экваториальных координат α , δ каталога Tycho-2 тангенциальные координаты ξ , η вычислялись согласно решениям методом наименьших квадратов уравнений по формулам вида (1):

$$\xi_i = a_1 + a_2 X_i f_i + a_3 Y_i f_i + a_4 R_i m_i + a_5 f_i + \sum b_{lm} X_i^l Y_i^m, \quad (l=0 \div 6, m=0 \div 6, l+m=n, n=1 \div 6) \quad (1)$$

$$\eta_i = c_1 + c_2 X_i f_i + c_3 Y_i f_i + c_4 R_i m_i + c_5 f_i + \sum d_{lm} X_i^l Y_i^m, \quad (l=0 \div 6, m=0 \div 6, l+m=n, n=1 \div 6)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – количество звезд каталога Tycho-2 на пластинке; X_i , Y_i и R_i – координаты и расстояние изображений звезд относительно центра пластинки; m_i – инструментальные фотометрические величины звезд; f_i – диаметры изображений звезд (FWHM); коэффициенты a_2 , a_3 , a_4 и c_2 , c_3 , c_4 ответственны за кому, коэффициенты a_5 , c_5 – учитывают влияние уравнения блеска; коэффициенты полного полинома шестой степени (27 членов) b_{lm} и d_{lm} в обобщенном случае описывают аберрации оптики телескопа, отягощенными систематическими ошибками сканера. На рис. 3 показаны результаты обработки пластинки № 410. Слева – ход систематических ошибок телескопа σ_α , σ_δ по полю пластинки, справа – ход остаточных разностей $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ для сосчитанных и каталожных значений экваториальных координат. Отрицательным и положительным разностям координат соответствуют значки в виде горизонтальных и вертикальных черточек, размер черточек соответствует приведенной на рисунке шкале значений. Величины значений ошибок получены усреднением для ячеек 250×250 пкл.

Фотометрия звезд с использованием информации о двух экспозициях

Комбинация характеристических кривых для двух экспозиций предполагает построение характеристической кривой на всем интервале звездных величин, зарегистрированных на фотоэмульсии пластинки. В качестве фотометрических стандартов использовались фотоэлектрические V_{pe} -величины звезд из каталогов [8, 9]. Этапы и принципы построения характеристической кривой астронегатива с учетом фотометрической

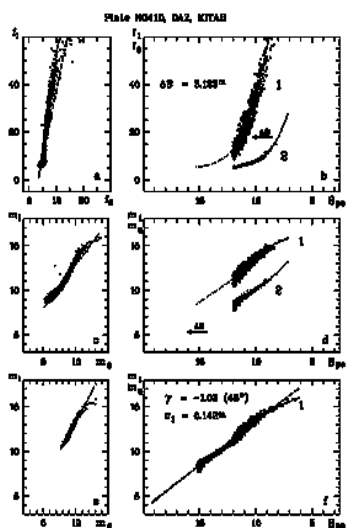


Рис. 4.

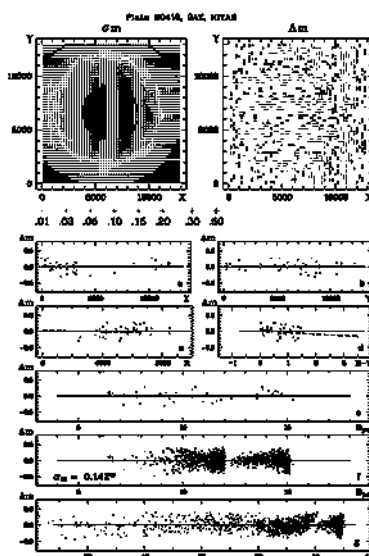


Рис. 5.

ошибки поля и с использованием информации о двух экспозициях демонстрируются на рис. 4 и рис. 5 для астронегатива № 410 программы ФОН. Рассмотрим рис. 4. На панелях слева, сверху вниз показано связь диаметров изображений звезд и инструментальных фотометрических величин для двух экспозиций: для короткой f_2 , m_2 и для длинной f_1 , m_1 . Панели а, с

соответствуют всем общим звездам двух экспозиций, а панель е – только звездам, которые использованы в качестве фотометрических стандартов. На правой верхней панели b – аналоги классических характеристических кривых для длинной (1) и короткой (2) экспозиций. Разность звездных величин для двух экспозиций в шкале фотоэлектрических стандартов V_{pe} составляет $\Delta V = 3.123^m$. На панели d – характеристические кривые для связи инструментальных фотометрических величин m_1 , m_2 со шкалой фотоэлектрических стандартов V_{pe} . На панели f представлена комбинированная из двух экспозиций характеристическая кривая, которая использовалась для редукции инструментальных фотометрических величин звезд m_1 в систему фотоэлектрических стандартов V_{pe} системы Джонсона. Точность построения характеристической кривой составляет $\sigma_1 = \pm 0.142^m$, коэффициент контрастности фотоэмульсии $\gamma = -1.03$ (или $\approx 46^\circ$). Аппроксимация характеристических кривых для всех 90 пластинок нулевой зоны выполнена решением методом наименьших квадратов систем уравнений согласно формуле (2):

$$V_i = e_1 + e_2 X_i + e_3 Y_i + e_4 R_i + e_5 R_i^2 + e_6 R_i^4 + \sum f_n m_i^n, \quad (n=1,2,\dots,5), \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – количество фотоэлектрических определений для стандартных звезд на пластинке; X_i , Y_i и R_i – координаты и расстояние изображений звезд относительно центра пластинки; m_i – инструментальные фотометрические величины звезд; коэффициенты e_2 , e_3 , e_4 , e_5 , e_6 ответственны за фотометрическое уравнение (фотометрическую ошибку) поля, а коэффициенты f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , f_5 соответствуют функциональному описанию самого вида характеристических кривых. Данный вид формулы (2) выбран как оптимальный в смысле минимизации фотометрических ошибок редукции в систему V_{pe} фотоэлектрических стандартов.

На рис. 5 на левой верхней панели – визуализация фотометрической ошибки σ_m по полю пластинки, а справа – индивидуальные разности Δm сосчитанных V_{ph} и каталожных V_{pe} величин звезд-стандартов по полю пластинки. Эти разности также даны относительно прямоугольных координат X , Y (панели а, b), расстояния от центра пластинки R (панель с) и колор-индекса $B-V$ (панель d). На панели e показан ход разностей

Δm вдоль центрального разреза характеристической кривой, а на панели f – и для звезд Tucho2 ($B_T \leq 11^m$, $0.0^m \leq (B-V)_T \leq 1.0^m$), которые дополнительно использовались для определения фотометрической ошибки поля. На нижней панели g – ход разностей Δm относительно диаметров изображений звезд f_1 .

Каталог экваториальных координат и В-величин звезд нулевой зоны Китабской части программы ФОН

Версия каталога создана на основании обработки оцифрованных астронегативов при нормальном сканировании пластинок. Каталог содержит 1 795 640 звезд и галактик до $B_{ph} \leq 16.5^m$ (фотографические величины в системе Джонсона) на эпоху 1983.29 г. Каталог получен из обработки 90 сканов пластинок размером 30×30 см или 13000×13000 px. Всего на обработанных астронегативах было зарегистрировано более 4 183 000 объектов (звезд, галактик, артефактов прочее). В перекрывающихся зонах пластинок отождествление и отбор кандидатов в звезды и галактики осуществлялся по следующим критериям:

- 1) по экваториальным координатам – \pm от значения размера пикселя в секундах дуги ($1 \text{ px} \approx 1.45''$) и
- 2) по звездным величинам расхождение не должно было превышать $\pm 2^m$ (учет переменных звезд).

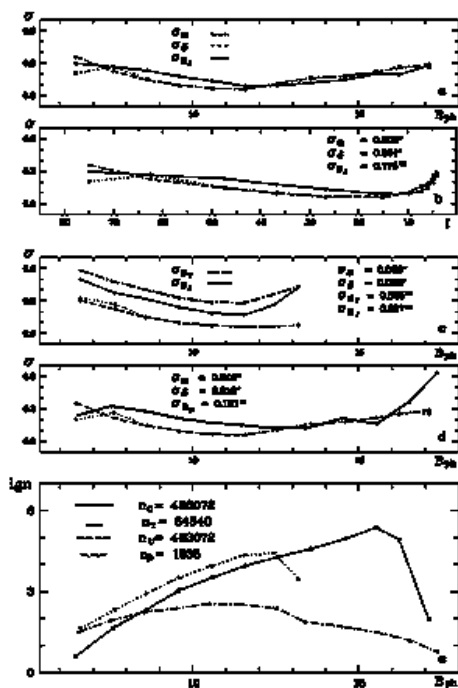


Рис. 6.

Сравнение каталога с опорным каталогом Tucho-2 дал результаты, которые в графическом виде показаны на панели с рис. 6 для 64840 звезд. Было также сделано сравнение сосчитанных экваториальных координат нашего каталога с экваториальными координатами каталога UCAC-4 (панель d рис. 6, точечные (σ_{α}) и штриховые (σ_{δ}) линии) объектов каталога k. Ошибки фотометрии были определены сравнением звездных величин нашего каталога с фотоэлектрическими величинами из опорных каталогов (1635 звезд). Результаты представлены на панели d рис. 6. В табл. 4. представлено распределение (по интервалам звездных величин) фотометрических ошибок каталога по отношению к опорной системе фотоэлектрических стандартов определения фотометрических величин $\sigma_{B_{ph}}$, диаметров изображений звезд FWHM, значений интенсивности в центре изображений объектов $cInt$ и количество объектов каталога k. На нижней панели e рис. 6 дано (в логарифмической шкале) распределение количества объектов нашего каталога и каталогов сравнения со звездной величиной.

Каталог положений и B_{ph} -величин звезд нулевой зоны Китабской части программы ФОН будет размещен на web-страницах ГАО НАНУ и Астрономического института АН РУз. Каталог на 1 795 640 звезды и галактики до $B_{ph} \leq 16.5^m$ на эпоху 1983.2 г. состоит из экваториальных координат α , δ на равноденствие 2000 г. и B_{ph} -величин звезд. Также приводятся ошибки определения этих величин и количество определений, а также дополнительная информация в виде усредненных значений для диаметров изображений звезд f (FWHM) и значений интенсивности в центре изображений объектов $cInt$.

Литература

1. Вавилова И.Б., Пакуляк Л.К., Шляпников А.А., Процюк Ю.И. и др. Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение // Кинематика и физика небес. тел. 2012. 28. № 2. С. 59–80.
2. Andruk V.M., Vidmachenko A.P., Ivashchenko Yu.M. Processing of CCD frames of images of star fields without the frame of a flat field using new software in program shell of MIDAS/ROMAFOT // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. 2005. N5. P. 413–416.
3. ESO-MIDAS users guide. – Garching. 1994. – Vol. A, B, C.
4. Андрук В.Н., Иванов Г.А., Погорельцев М.Т., Яценко А.И. Об использовании сканера для определения координат и фотометрии звёзд на пластинках программы ФОН // Кинематика и физика небес.тел. 2005. 21, № 5. С. 396–400.
5. Protsyuk Yu.I., Andruk V.N., Muminov M.M., Yuldoshev Q.X., et al. Method for evaluating the astrometric and photometric characteristics of commercial scanners in their application for the scientific purpose // Odessa Astron. Publ., 2014, v.27. Is.1, p. 61–62.
6. Protsyuk Yu.I., Kovylianska O.E., Protsyuk S.V., Andruk V.M. Results of processing of astronegatives with commercial scanner // Odessa Astron. Publ., 2014, v.27. Is.1, p. 63–64.
7. Андрук В.Н., Головня В.В., Иванов Г.А., Ижакевич Е.М., Пакуляк Л.К., Процюк Ю.И. Создание каталога экваториальных координат и В-величин звезд 60 зоны программы ФОН на основе ОЦА УкрВО // Кинематика и физика небес. тел. 2015, в печати.
8. Mermilliod J.C. Homogeneous means in the UBV system. – Institut d’Astronomie. Universite de Lausanne, 1991.
9. Muminov M.M., Yuldoshev Q.X., Ehgamberdiev Sh.A., Kahharov B.B., et.al. Astrometry of χ and h Persei based on processing of digitized plates of archive of the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan // Odessa Astron. Publ., 2014, v.27. Is.1, p. 57–58.

CATALOG OF EQUATORIAL COORDINATES AND B MAGNITUDES OF STARS IN THE EQUATORIAL ZONE OF THE NORTHERN SKY SURVEY PROJECT BASED ON THE DIGITIZED PLATES OF THE KITAB OBSERVATORY

Muminov M.M.¹, Ehgamberdiev Sh.A.¹, Latipov A.A.¹, Kahharov B.B.¹,
Yuldoshev Q.X.¹, Andruk V.M.², Golovnya V.V.²

¹Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

²Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A catalogue of equatorial α , δ coordinates and B-magnitudes of stars for an equatorial zone of the Northern Sky Survey project (FON) based on the digital plates obtained at the Kitab observatory, Uzbekistan was compiled.

The width of the zone is 5 degree and number of processed plates are 90. Digitization was carried out with a help of Epson Expression 10000XL using the scanning mode (resolution)1200 dpi, the linear size of plates – 30×30 cm or 13000×13000 px. The catalogue contains 1 795 640 stars and galaxies up to $B \leq 16.5^m$ for epoch 1983.2. Coordinates of the stars and the galaxies were taken in the system of Tycho-2 catalogue and B-magnitudes in the system of photoelectric standards. Internal accuracy of the catalogue for all objects is $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.20''$ and $\sigma_B = \pm 0.18^m$ (for the stars between $B = 6^m$ – 13^m magnitudes, errors are $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.13''$ and $\sigma_B = \pm 0.11^m$) for equatorial coordinates and B-magnitudes, respectively. Convergence between the calculated and reference positions $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.066''$ (for 64 840 stars of Tycho-2 catalogue) and the convergence with photoelectric standards and B-magnitudes is $\sigma_B = \pm 0.19^m$ (for 1 635 measured stars). External accuracy, relative to catalogue UCAC-4 is about $\sigma_{\alpha\delta} = \pm 0.33''$.

Секция 7

ИСТОРИЯ АСТРОНОМИИ

ПАМЯТИ А.А. КИСЕЛЕВА и Е.В. ХРУЦКОЙ

Княева О.В.

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

Осень 2013 года была тяжелой для нашей лаборатории астрометрии и звездной астрономии (ЛАЗА) Пулковской обсерватории. 30 сентября не стало Алексея Алексеевича Киселева, а 4 октября умерла Евгения Владимировна Хруцкая. Оба этих человека были моими учителями не только в науке, но и в отношении к жизни. Они были совершенно разные, но все же было то общее, что в моих воспоминаниях связало их навечно. Они были иноходцами – не плыли по течению жизни, а следовали своим индивидуальным путем, который был по силам только им. Мои личные воспоминания об этих людях, которые оставили свой след в истории Пулковской обсерватории, представлены в этой статье.

Евгения Владимировна Хруцкая, доктор физ.-мат. наук, зав. ЛАЗА (1939–2013)



С Евгенией Владимировной я познакомилась в 1970 году во время летней практики в Николаевской обсерватории. Мы, студенты, по очереди наблюдали на четырех основных инструментах, а она была наблюдателем на меридианном круге и руководила нами. Она была замечательным учителем и настолько приятна в общении, но совсем не вписывалась в общий стандарт полным пренебрежением тогдашней моде. Тогда я еще не понимала, что понятие внешней «моды» во всех смыслах не имело для нее никакого значения. Она всегда была предана своим любимым – людям, одежде, животным, интересам и, конечно же, работе.

Следующий этап нашего длительного общения пришелся на конец 70-х и 80-е годы, когда я работала программистом в Вычислительной лаборатории Пулковской обсерватории, а Евгения Владимировна (Женя, у нас было принято называть друг друга просто по имени) очень часто приезжала к нам в командировку. Она была основным исполнителем больших договорных работ по составлению астрометрических каталогов (руководителями этих работ были М.С. Зверев и Д.Д. Положенцев) и работала в Вычислительной лаборатории бок о бок с нами. Работала она спокойно, без лишних эмоций, и я только сейчас узнала из ее личного дела, что с 1979 по 1982 год ею было составлено 143 программы для ЭВМ Минск-22 и ЕС-1020. Только тот, кто программировал в машинных кодах на старых ЭВМ типа Минск-22 с памятью 128 Кбайт, может оценить, какой это гигантский труд. При этом культурная жизнь Ленинграда оставалась в поле зрения ее интересов. Наша группа программистов была очень дружная, мы обсуждали интересные книги, кинофильмы, ходили на выставки, в театры и т.д. Женя любила ходить в Большой зал филармонии и старалась не пропустить ни одного концерта Мравинского. Мы всё знали друг о друге, но Евгения Владимировна мало рассказывала о своей жизни. Возможно, более близкие ее подруги знают больше. Я напишу только то, что она сама рассказывала мне в разные периоды нашего общения.

Евгения Владимировна родилась 30 августа 1939 г. в Якутске, жила с мамой (об отце она не упоминала), но в раннем детстве, во время войны, она была в детском доме, и мама нашла ее, когда ей было примерно 5 лет. После окончания школы с серебряной медалью в 1957 году она поступила на технический факультет Якутского государственного университета на вечернее отделение, чтобы совмещать учебу с работой, причем работала на стройке, штукатурила потолки, так как за эту тяжелую работу платили

больше. Из ее рассказов о жизни в Якутске мне особенно запомнилось то, что во дворе была поленница из льда, который кусками заносили в дом и растапливали, получая питьевую воду. В 1960 году сотрудники Ленинградского университета провели отборочный конкурс по математике, Женя отлично написала эту контрольную работу и была приглашена продолжать учебу на математико-механическом факультете Ленинградского университета. Ей предложили перевестись с потерей года, так как требовалось из-за разницы в учебных программах досдать семь предметов, но главной чертой ее характера была воля и совершенно несгибаемое желание преодолеть непреодолимое. Она не потеряла год и окончила университет по специальности «математика» в 1962 году. Несколько раз она вспоминала свою спортивную карьеру в молодые школьные и студенческие годы. У нее был разряд по лыжам, еще упоминались фехтование и попытка прыгать с парашютом, но здесь помешал малый вес и какие-то медицинские противопоказания. Ей предлагали аспирантуру, но она предпочла пойти работать в Николаевскую обсерваторию специалистом по обработке наблюдений в Городском Вычислительном Центре. В то время далеко не все организации имели свои вычислительные машины даже в Ленинграде (я после окончания университета несколько месяцев работала программистом в предприятии №10 ГУГК и ездила по вечерам отлаживать программы на другой конец города в институт Агрофизики). Мотивацией для такого решения было желание перевезти маму, которая к тому времени уже была пенсионеркой, из Якутска на юг, в тепло. А уже потом, работая в обсерватории, переквалифицироваться из математика в астронома было проще, чем самостоятельно подготовиться и досдать семь университетских предметов.

Только после смерти мамы Евгения Владимировна согласилась обменять свою Николаевскую квартиру на комнату в Ленинграде и полностью перейти на работу в Пулковскую обсерваторию в отдел фундаментальной астрономии.

Жизнь Евгении Владимировны была очень нелегкой, но она побеждала даже там, где наука и даже природа отказывались понимать, как это возможно.

В 80-е годы ее частично парализовало. Перестали работать правая рука (по локоть) и правая нога. Несколько месяцев она лечилась, но практически безрезультатно. От инвалидности она категорически отказалась. Во время обследования в НИИ им. Бехтерева приборы показывали, что она не должна ходить, а она ходила перед изумленной Натальей Бехтеревой. Ходила чисто на волевом усилии и внимании. Она не ощущала поверхности пола, но видела, что правая нога на него встала, и тогда быстро переносила левую ногу. Такая ходьба требовала постоянного внимания и часто заканчивалась падением, а ведь она в это время каждый день ездила на работу с Фонтанки, где жила в коммунальной квартире. Мне тогда довелось побывать у нее дома, и меня поразили исключительная чистота и порядок. Только через несколько лет ей удалось перебраться в квартиру в Пулково. Организованность, чистота и порядок в мыслях, делах и в окружающем пространстве сопровождали ее всю жизнь. Женя быстро научилась писать левой рукой, но она предпочитала тренировать безжизненную правую руку – вставляла в пальцы ручку и перемещала правую руку левой. На это невозможно было спокойно смотреть, но буквы выходили ровные и четкие. Чтобы паралич не прогрессировал, она привязывала к правому предплечью гирию 5 кг и поднимала ее ежедневно 50 раз. И уж совсем не понятно, как она умудрялась в таком состоянии обслуживать себя без всякой помощи (друзья предлагали ей помощь, но она отказывалась). Это продолжалось 8 лет, и все-таки она победила, паралич отступил, и восстановилась чувствительность конечностей.

Но, конечно, бесследно это не прошло. В результате многочисленных падений были переломы, а самое неприятное – травма глаза, что привело к резкому падению зрения и к почти слепоте в конце жизни (осталось 4%).

Последний этап нашего общения наступил в 90-х годах, когда мы работали в одной лаборатории Фотографической Астрометрии и Звездной Астрономии, куда Евгения Владимировна перешла из отдела Фундаментальной Астрометрии, а затем заменила Нину Михайловну Бронникову на посту заведующей лабораторией. Поражало то, что она не делала себе никакой поблажки на возраст и здоровье. Она первая освоила наблюдения с ПЗС матрицей, программировала на всех современных алгоритмических языках, наблюдала. Никогда от нее не было слышно никаких жалоб на нехватку денег, а ведь в 90-е годы нам по несколько месяцев не платили зарплату. Всем было трудно, но у кого-то работали родственники, пенсионеры получали пенсию, в семье выживать было легче. А она была одна. И только через несколько лет она рассказала, что в то тяжелое время она, доктор наук, устроилась работать чернорабочей на «Кока-Колу», мыть чаны. В 5 часов утра, на первом автобусе, она ехала туда на работу, а в половине девятого уже была на своем рабочем месте в обсерватории. Но и черную работу она выполняла настолько качественно, что ее не хотели отпускать, предлагали повысить зарплату и сделать бригадиром.

В отличие от Нины Михайловны Бронниковой, которая была экстравертом и старалась объединить отдел, Евгения Владимировна, на мой взгляд, была больше интровертом. Сама она не стремилась к объединению, но и не мешала, когда инициатива провести какие-то общие мероприятия исходила не от нее, и принимала в них участие. При этом она была очень внимательна к нуждам сотрудников и вообще людей, находящихся в ее окружении. Я знаю три таких момента. Первый относится к тому времени, когда она жила еще в городе, в коммунальной квартире. Одна из ее соседок, старушка, попала в больницу. Женя поехала ее проведать и обнаружила, что старушку не лечат, так как никто не сдал кровь. Женя не стала искать родственников, правых и виноватых, а просто сразу же пошла и сдала кровь. Второй момент связан с операцией – катарактой – Нины Михайловны Бронниковой. Когда ей прооперировали один глаз, врач сказал, что хорошо бы сразу, не затягивая, сделать и операцию второго глаза. Однако у Нины Михайловны в тот момент не было на это денег. Женя сказала врачу: «Делайте!», и на следующий день привезла деньги. Третий – мы собрали деньги на надгробный памятник Нине Михайловне, и чтобы сделать памятник получше, не хватало 7000 рублей. Женя тут же внесла необходимую сумму. Наверное, подобных случаев было гораздо больше, просто я о них не знаю.

Только в последние годы Евгения Владимировна стала ездить на конференции за границу. Английский язык был у нее, как у большинства из нас, пассивный. Перед первой поездкой она купила диск с Оксфордским курсом английского языка и за два месяца занятий подготовила доклад так, что московские знакомые коллеги решили, что язык она знает в совершенстве. Это притом, что все свои доклады она делала вслепую, так как уже почти не видела собственную презентацию.

Умирать Евгения Владимировна не собиралась. Я видела ее последний раз в больнице за пять дней до смерти. Конечно, она понимала, что очень сильно больна, но считала, что «вырежут лишнее», и она снова будет работать. С собой у нее был учебник английского языка.

Некоторые труды Е.В. Хруцкой

- 1) *Khrutskaya E.V. The general catalog of positions and proper motions of 6637 bright stars (newbs)* // *Baltic Astronomy*, 6, 335–335 (1997).
- 2) *Khovritchev M.Ju., Khrutskaya E.V. Comparisons of the USNO-B1.0 catalogue with Pul-3 and UCAC1 in selected fields* // *Trans. of conf. Journees-2003*, 79–80 (2004).
- 3) *Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Ju., Bronnikova N.M. The Pul-3 catalogue of 58483 stars in the Tycho-2 system* // *A&A*. V. 418. P. 357–362 (2004).

- 4) Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю. **Новые высокоточные собственные движения звезд в Пулковских площадках с галактиками** // Изв. ГАО в Пулкове № 217, 337–342 (2004).
- 5) Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Измайлов И.С. **Система астрометрических баз данных Пулковской обсерватории: фотографические каталоги и оценки точности современных ПЗС-наблюдений малых планет**. Изв. ГАО в Пулкове № 217. С. 343–352 (2004).
- 6) Киселева Т.П., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В. **Результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна в 2004 г. на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове** // Изв. ГАО в Пулкове № 217. С. 292–296 (2004).
- 7) Khrutskaya E.V., Berezhnoi A.A., Khovritchev M.Ju. **Investigation of the motions of fast stars based on observations with the Pulkovo normal astrograph** // Astron. Lett., 37, 420–430 (2011).
- 8) Khovritchev M.Ju., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V. **Trigonometric parallaxes of 71 large proper motion stars** // Mon. Not. R. Astron. Soc., 435, 1083–1093 (2013).

**Алексей Алексеевич Киселев,
доктор физ.-мат. наук, профессор (1922–2013)**



Если с Евгенией Владимировной нас больше связывали человеческие отношения – мы всегда работали по разным тематикам, то Алексей Алексеевич был моим учителем, и вся моя научная деятельность связана с ним.

С Алексеем Алексеевичем меня познакомил Борис Алексеевич Фираго в 1968 году. В этот год проводился сеанс одновременных наблюдений искусственного спутника ПАГЕОС на разных обсерваториях мира. Для этой работы привлекались студенты, и я, студентка второго курса, тоже принимала в этом

участие. Период обращения спутника был приблизительно 3 часа, и пока спутник был виден, мы фотографировали его на пленку с помощью спутниковой камеры НАФА, при этом начало экспозиций должно было совпадать с началом четной минуты. Руководил нами Борис Алексеевич, а значок за участие в наблюдениях вручал Алексей Алексеевич, возглавлявший это направление.

На 4-м курсе в университете Алексей Алексеевич читал нам спецкурс «Космическая геодезия», а затем он был руководителем моей дипломной работы «Геометрический метод и его использование для исследования спутниковых камер». Это был его оригинальный метод, который использовался для определения дисторсии широкоугольных телескопов, и спустя два года мы успешно применяли его для исследования телескопов СССР от Ужгорода до Душанбе и Благовещенска.

Что всегда отличало Алексея Алексеевича – так это научная «дотошность». Он не искал готовые решения в литературе, а всегда придумывал свои, даже если уже существовали классические аналоги. Так фактически все основные формулы фотографической астрометрии он перевел для достижения более высокой точности из тригонометрического вида в векторный. Сейчас, в эпоху быстродействующих ЭВМ это не так принципиально, но 50 лет тому назад вычисление синуса занимало значительно больше времени, чем сложение и перемножение векторов. Бывало, пропустив какую-нибудь интересную опубликованную работу, он себя оправдывал словами: «Если бы я все читал, то никогда ничего не придумал бы сам. Старайтесь всегда сначала подумать, сделать, а уж потом смотрите, что по этому поводу делали другие».

А придумал он, действительно, много. Я уже упомянула геометрический метод для обработки снимков, полученных с помощью широкоугольных астрографов. Кроме того, он разработал детально теорию центральной проекции небесной сферы на кар-

тинную плоскость с учетом всех возникающих при этом ошибок, усовершенствовал методику наблюдений относительных координат на длиннофокусном телескопе, учитывая ориентировку не по опорной звезде, а по суточному следу, что точнее. Когда полетели первые искусственные спутники Земли, естественно возникла задача их наблюдений и оценки оскулирующей орбиты по короткой дуге (по наблюдениям одного пролета на одной станции) для уточнения теории движения ИСЗ. Так возник метод параметров видимого движения (ПВД), который затем был модифицирован для близких двойных звезд. Точность определения орбиты методом ПВД полностью определяется точностью, с которой возможно получить исходные данные (видимое положение и движение компонентов относительно друг друга), и сейчас, когда точность астрономических наблюдений возрастает с невероятной скоростью благодаря новым техническим возможностям, этот метод приобретает новых сторонников, так как позволяет изучать мало изученные двойные звезды с периодом обращения несколько тысяч лет. Настольным учебником астрономов стала его монография «Теоретические основания фотографической астрометрии».

Так же серьезно Алексей Алексеевич относился к наблюдениям, когда был ведущим 26-дюймовым рефрактором. Фотографические наблюдения проводились от зари до зари, пропуск наблюдений считался криминалом, и на провинившегося обрушивался такой поток ярости, что второй раз допустить такое уже никто не решался. Если в середине ночи что-то выходило из строя, то требовалось ему позвонить, он приходил на телескоп в любое время, искал неисправность и, если она была не слишком серьезная, устранял ее с помощью ножа, резинки и пластилина, после чего наблюдения продолжались. Примерно до 70 лет он лично скалывал зимой лед с купола рефрактора, и вообще он был смелым и спортивным человеком. Даже в последние годы он ходил на субботники и, несмотря на возраст, утверждал, что он мужчина, а потому будет двигать в нашей рабочей комнате тяжелые столы и шкафы, что мы пытались ему запрещать.

Характер Алексея Алексеевича не был легким, он, конечно, был диктатором, но он искренне и самоотверженно любил свое дело, именно астрономию, а не свое место в астрономии, за что лично я прощала ему все недостатки. В любое время к нему можно было обратиться с любым вопросом с уверенностью, что получишь исчерпывающий ответ. И, пожалуй, именно упорство и сильный характер спасли его, не дали сломаться под напором жизненных испытаний.

Алексей Алексеевич поступил в Ленинградский университет после школы в 1939 году, а закончил его с отличием только в 1956. В промежутке была война, плен, тюрьма и советский лагерь репрессированных в Воркуте. За годы, которые мы проработали бок о бок, он кое-что рассказывал, но, самое главное, он никогда не жаловался на судьбу. Более того, он благодарил судьбу за то, что ему удалось выжить, что при этом ему хватило здоровья на долгую жизнь и плодотворную работу. Он часто повторял, что ему для работы нужно было только иметь пень и три чемодана, чтобы из них соорудить письменный стол. Его первая статья, посвященная прямому преобразованию видимой эллиптической орбиты в истинную, была написана в лагере и послана учителю, Александру Николаевичу Дейчу. А Александр Николаевич не боялся переписываться с заключенным и бывшим учеником и даже опубликовал эту работу.

Следует добавить, что даже после освобождения в 1956 году он не был окончательно реабилитирован и был невыездным до начала 90-х годов. При этом, рассказывая о своей жизни, он подчеркивал, что ему сильно везло. Сначала в том, что немецкий плен он провел в Финляндии, что из лагеря его взяли батраком на финский хутор, где хозяева были нормальные люди, которые хорошо относились к своим работникам. Повезло в том, что в 40-е годы в НКВД уже не выбивали показания, но ему пришлось неоднократно быть «на конвейере» – это непрерывный допрос, когда следователи меня-

ются, а заключенному несколько суток не дают отдыхать. Он выдержал это, и не написал «признания», что в плену его завербовали. Здесь и проявился его стойкий характер. Если бы не выдержал, то, конечно, в живых его не оставили бы, несмотря на уверения следователей, что, мол, молодых прощают. Повезло в том, что в Воркуте ему удалось обмануть лагерную медкомиссию и работать на поверхности, а не в шахте. А нам повезло, что Алексей Алексеевич жил и работал с нами.

Вспоминаются стихи Наума Коржавина:

*Время дано.
Это не подлежит обсуждению.
Подлежишь обсуждению ты,
разместившийся в нём.*

Закончить я хочу словами Алексея Алексеевича Киселева: «Я счастливый человек, потому что за свою долгую жизнь был не только свидетелем, но и активным участником всех исторических событий моего времени».

Некоторые труды А.А. Киселева

- 1) *Киселев А.А. Интерполяционный метод определения положений небесного объекта на астрофотографии* // Астрон. ж., 36, 2, 348–360 (1959).
- 2) *Киселев А.А. Векторная интерпретация основных методов фотографической астрометрии* // Астрон. ж., 42, 2, 452–463 (1965).
- 3) *Киселев А.А., Быков О.П. Определение орбиты спутника по одной фотографии со многими экспозициями* // Астрон. ж., 50, 6, 1298–1307 (1971).
- 4) *Киселев А.А., Кияева О.В., Калинин О.А. Геометрический метод астрометрической редукции фотографий и его применение для калибровки широкоугольных камер* // Изв. ГАО в Пулкове №194, 146–160 (1976).
- 5) *Киселев А.А., Кияева О.В. Определение орбиты визуально-двойной звезды методом параметров видимого движения из наблюдений на короткой дуге* // Астрон. ж., 57, 6, 1227–1241 (1980).
- 6) *Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии* – М.: Наука (1989).
- 7) *Киселев А.А., Гнедин Ю.А., Шахт Н.А., Грошева Е.А. Черные дыры промежуточной массы в шаровых скоплениях* // Астрофизический бюллетень, 66, № 4, 467–473 (2011).
- 8) *Киселев А.А., Кияева О.В., Измайлов И.С., Романенко Л.Г., Калинин О.А., Василькова О.О., Васильева Т.А., Шахт Н.А., Горшанов Д.Л., Роцина Е.А. Пулковский каталог относительных положений и движений визуально-двойных и кратных звезд на основе фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в 1960–2007гг.* // Астрон. ж., 91, 2, 130–149 (2014).

MEMORIES OF A.A. KISELEV AND E.V. KHRUTSKAYA

Kiyeva O.V.

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

The autumn 2013 was heavy for our department of astrometry and stellar astronomy at Pulkovo Observatory. On September 30 died Alexey Alekseevich Kiselev, and on October 4 Evgenia Vladimirovna Khrutskaya died also absolutely unexpectedly for us. The both persons were my teachers not only in science, but also in the relation to life. They have found the own individual way in their difficult life. My personal memories of these people which left the trace in the history of Pulkovo Observatory are presented in this article.

ИСТОРИЯ ВЫБОРА ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КООРДИНАТ В РОССИИ

Левитская Т.И.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

В статье изложена история создания систем геодезических координат в России. Показан вклад нескольких поколений выдающихся астрономов и геодезистов в решение этой проблемы.

Проблема создания единой координатной основы является одной из важнейших задач геодезии. Эта задача может решаться для всей Земли в целом или в пределах одного государства, а может и для небольшого локального участка земной поверхности. Основой развития всех направлений геодезии является установление систем координат, связанных не только с поверхностью Земли, но и вне ее поверхности, в околоземном космическом пространстве [1]. Потребность в закреплении системы координат и распространении ее на все окружающее пространство появилась во времена Древней Греции и Римской империи. Использование систем координат было вызвано необходимостью в ориентации при строительстве различных сооружений, разбивке осей, перемещениях на местности, при плавании на море. Основной ориентирующей координатной линией принималась полуденная линия, положение которой определялось по Солнцу [2].

Выбор системы координат заключается в решении двух задач: в фиксировании начала системы координат и в способах определения в этой системе координат интересующих нас объектов. Любую координатную задачу можно решать в разных системах координат, однако ее выбор является сложной проблемой. Разнообразные системы координат (СК) необходимы как геодезическая основа в практической и научной сферах человеческого общества для картографирования земной поверхности, построения опорных геодезических сетей, решения задач прикладной геодезии при землеустройстве и кадастре. В настоящее время в геодезии активно используются спутниковые методы наблюдений, которые также требуют координатного обеспечения.

Начиная с XVI–XVII вв., основными задачами и направлениями деятельности геодезии являлось установление систем координат, единицы длины и переход к сплошной координатизации пространства с использованием принципа «от общего к частному». В XIX в. начинается применение геодезических сетей в виде сети треугольников, необходимых для обоснования топографических съемок [1].

К 1864 году на территориях ряда стран Европы были созданы опорные триангуляционные сети. Объединение национальных триангуляций в единую сеть происходило под контролем созданной для этой цели организации под названием «Среднеевропейские градусные измерения». В этой организации видная роль принадлежала известному немецкому геодезисту И.Я. Байеру (рис. 1) [2].

К концу XIX в. почти вся поверхность Европы покрылась сплошной сетью триангуляции. Длины 90 базисов сети были измерены с относительной ошибкой 2×10^{-6} , точность измерения углов составляла 0,3–2,0". В эту сеть был включен и ряд триангуляций, проложенный в России по параллели до Орска [3].

Остановимся подробнее на том, как проходили триангуляционные работы в России с целью создания единой системы координат в XIX–XX вв. С 1806 по 1917 гг. геодезистами и астрономами было определено более 5150 астрономических пунктов. Из них более 150 – основных астрономических пунктов, которые были связаны с триангу-

ляционными работами, и около 5000 экспедиционных астрономических пунктов, которые были необходимы для глазомерных и полуинструментальных съемок [3].



Рис. 1. И.Я. Байер (1794–1885).



Рис. 2. К.И. Теннер (1783–1860).



Рис. 3. В.Я. Струве (1793–1864).

История создания в России единой системы координат начинается с 1808 г., когда профессор астрономии Московского университета Х.В. Гольдбах (1763–1811) и геодезист Депо карт Л. Панснер приступили к созданию триангуляции в Московской губернии. Однако эти работы были прекращены из-за смерти Гольбаха в 1811 г. и пожара в Москве. Кроме того, результаты измерений углов и базисов, записанных в нескольких тетрадах, при пожаре сгорели. В это же время, начиная с 1809 г., К.И. Теннер, Л. Панснер и Дост должны были выполнить «тригонометрическую съемку» Петербурга и южного берега Финского залива, но им помешала война 1812 г., хотя все предварительные работы были сделаны: рекогносцировка на местности, постройка геодезических сигналов, измерение двух базисов.

С 1816 по 1821 гг. генерал от инфантерии, почетный член Петербургской академии наук К.И. Теннер (рис. 2) проводил триангуляционные работы в Виленской губернии. Геодезические сигналы, заложенные геодезистами под руководством Теннера, оказались устойчивыми и долговечными в период всего XIX в. При смыкании в 1830 г. триангуляции Теннера с прусской триангуляцией Бесселя величина относительного расхождения для общих сторон не превышала 1:200000. С 1816 по 1831 гг. под руководством академика Петербургской академии наук, профессора Дерптского университета, а через несколько лет первого директора Пулковской обсерватории, В.Я. Струве (рис. 3) начались градусные измерения в Прибалтийских губерниях России.

В 1830 г. триангуляции К.И. Теннера и В.Я. Струве были соединены. Они представляли собой первое русское градусное измерение по дуге меридиана протяженностью в 8° . Позднее усилиями В.Я. Струве и К.И. Теннера, под их руководством был проложен триангуляционный ряд длиной $25^\circ 20'$. Дуга прошла по территории России, Финляндии, Швеции и Норвегии от побережья Северного Ледовитого океана до устья Дуная. Это знаменитое градусное построение вошло в историю одних из первых коллективных геодезических работ как дуга Струве-Теннера, как Русско-Скандинавское градусное измерение. В 2005 году Геодезическая дуга Струве признана Памятником Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Точность измерения углов при выполнении триангуляционных работ под руководством В.Я. Струве и при его непосредственном участии была очень высокой и составляла $0,6''$. В 1823 г. В.Я. Струве для измерения углов предложил способ круговых приемов. Им был создан базисный прибор, которым в России до XX в. выполняли линейные измерения длин выходных сторон треугольников с точностью 1:1000000. Ре-

зультаты измерений дуги меридиана длиной 8 градусов по инициативе К.И. Теннера были переданы Ф.В. Бесселю, который включил их для вывода размеров земного эллипсоида. Данные по всей дуге Струве-Теннера длиной $25^{\circ} 20'$ использовал позднее Кларк для уточнения размеров общего земного эллипсоида [1].

Начиная с 1910 г., в России впервые находят широкое применение плоские прямоугольные координаты. Их введение особенно было актуальным в маркшейдерской практике. Инициатором обоснования общих систем координат для горнодобывающей промышленности был профессор Петербургского горного института В.И. Бауман (1867–1923). В 1897 г. он впервые в России в своей работе «О выборе системы координат» изложил необходимость введения общих систем координат для территорий, на которых производится добыча полезных ископаемых. В 1910–1917 гг. В.И. Бауман свои идеи воплотил на практике при создании триангуляции Донбасса I, II класса и дополнительной сети сгущения III класса [4].

В течение почти ста лет происходило совершенствование существующего геодезического обеспечения нашей страны. В середине XIX – начале XX в. в России под руководством генерала И.И. Померанцева была разработана первая программа построения единой государственной геодезической сети (ГГС) на всю территорию России.

В России до 1917 г. действующими считались три системы геодезических координат: Ташкентская, Юрьевская и Пулковская старая. Ташкентская система координат была введена в 1875 г., начальный пункт – меридиональный круг Ташкентской обсерватории. Юрьевская система геодезических координат с начальным пунктом в виде вышки обсерватории в Юрьеве (Дерпт, теперь Тарту), введенная в 1897 году. Пулковская старая с начальным пунктом в центре круглого зала Пулковской обсерватории основана в 1910 г.

В нашей стране до 1940 г., кроме перечисленных выше, геодезические координаты пунктов получались в нескольких, не связанных между собой системах координат. В Пулковской системе координат 1932 г. вычислялись координаты точек на земной поверхности в Европейской части страны, в Западной Сибири и в Казахстане. Для определения координат пунктов Восточной Сибири и Дальнего Востока использовалась Свободненская система, в Средней Азии – Ташкентская, на Камчатке – Петропавловская СК 1936, в Калымо-Индибирском районе – Магаданская система координат 1932 года. Во всех перечисленных системах координат был принят эллипсоид Бесселя (1841 г.), основные параметры которого $a = 6\,377\,397$ м, $\alpha = 1:299.15$ [3]. Абсолютные высоты точек определялись от разных уровневых поверхностей, совпадающих с уровнем Балтийского, Черного, Каспийского, Охотского и Японского морей. В связи с этим возникали определенные проблемы при производстве всех видов геодезических работ.

После Великой Октябрьской революции первая попытка создания опорной геодезической сети относится к 1924 году. Предполагалось построить на территории европейской части СССР 14 больших полигонов южнее 60-й параллели.

В 1928 г. была опубликована работа Ф.Н. Красовского (1878–1948) «Схема и программа государственной триангуляции». По программе Красовского передача координат на большие расстояния должна была осуществляться построением вдоль меридианов и параллелей звеньев триангуляции I класса, образующих при взаимном пересечении полигоны I класса периметром порядка 800–1200 км. Длина сторон треугольников триангуляции I класса от 20 до 30 км. В вершинах полигонов, на обоих концах базисных сторон (на пунктах Лапласа) измерялись астрономическая широта, долгота и азимут. Применялась полигонометрия I класса (звено представляло ход примерно из 10 сторон длиной 20–25 км). На обоих концах крайних сторон звена определялись пункты Лапласа с целью исключения накопления ошибок от полигона к полигону и решения редуцированных задач, для которых необходимо знать отклонения отвесных линий в

плоскости меридиана и первого вертикала, они определялись проведением гравитационной съемки в этих же пунктах. Государственная геодезическая сеть (ГГС) подразделялась на сети 1, 2, 3, 4 классов, различающиеся техническими характеристиками и порядком последовательного развития.

В качестве единой картографической проекции для редуцирования поверхности эллипсоида на плоскость и вычисления плоских прямоугольных координат была принята в 1928 г. по предложению профессора Н.Г. Келля и профессора В.В. Каврайского равноугольная картографическая проекция Гаусса-Крюгера.

В 1930 г. вычислительное бюро Главного геодезического управления под руководством Ф.Н. Красовского приступило к уравниванию 8 полигонов 1 класса европейской части страны, позднее к ним был присоединен Уральский полигон. При уравнивании был использован эллипсоид Бесселя, ориентированный относительно геоида по астрономическим данным в Пулкове и метод развертывания.

В 1932 г. уравнивание было завершено, новая система координат получила название системы 1932 года (СК-32). Начальным пунктом в СК-32 являлся центр круглого зала Пулковской обсерватории, астрономические координаты которого были приравнены к геодезическим координатам: $\varphi_0 = B_0 = 59^\circ 46' 18",71$, $\lambda_0 = L_0 = 30^\circ 19' 38",55$.

Исходным был принят астрономический азимут с пункта Саблино на пункт Бугры Саблинской базисной сети. Отступление геоида от поверхности референц-эллипсоида по высоте в Пулкове было принято равным нулю [4]. Пулковская система координат 1932 г. довольно быстро распространилась на всю европейскую территорию СССР, Западную Сибирь (до Красноярска), Казахстан и Среднюю Азию.

С 1934 г. на огромной территории восточно-сибирских и дальневосточных областей начались работы по созданию изолированной Свободненской астрономо-геодезической сети. Для обработки этой сети был принят эллипсоид Бесселя. Начальным пунктом был выбран пункт Черниговский (близ г. Свободный), астрономические координаты которого были приравнены к его геодезическим: $\varphi_0 = B_0 = 51^\circ 25' 36",55$, $\lambda_0 = L_0 = 128^\circ 11' 34",77$. Свободненская система координат дала возможность заменить применявшиеся ранее в Сибири и на Дальнем Востоке следующие системы координат: Манчжурскую, Хабаровскую, Алданскую и др. [3].

В 1936 г. вблизи Красноярска были соединены астрономо-геодезические сети Пулковской и Свободненской систем координат и выполнено сравнение координат одних и тех же пунктов, вычисленных в обеих системах. В положении пунктов были получены следующие невязки: $x_{\text{Пулковск.}} - x_{\text{Свободн.}} = -270 \text{ м}$, $y_{\text{Пулковск.}} - y_{\text{Свободн.}} = +790 \text{ м}$.

Расхождения получились значительными. Их нельзя было объяснить лишь влиянием случайных ошибок при производстве астрономо-геодезических измерений.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что Пулковская СК-32 не могла удовлетворить геодезические работы на обширной территории страны. Возникла необходимость вывода размеров нового референц-эллипсоида, а запланированное в 1940 г. переуровнивание астрономо-геодезической сети дало бы возможность введения единой системы координат с новыми исходными данными.

В ЦНИИГАиК под руководством Ф.Н. Красовского и А.А. Изотова (1907–1988) начались работы по выводу параметров референц-эллипсоида, наилучшим образом подходящего для территории СССР. Одновременно под руководством М.С. Молоденского проводились работы по определению высот квазигеоида по данным астрономо-гравиметрического нивелирования.

В 1942 г. приступили к переуровниванию астрономо-геодезической сети (АГС). Решением Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) и Военно-топографического управления Генерального Штаба Министерства Обороны (ВТУ ГШ МО) от 4 июня 1942 г. было рекомендовано в качестве референц-эллипсоида при уравни-

нивании принять эллипсоид (позднее получивший имя Красовского) со следующими параметрами: большая полуось $a = 6378245,0$ м и экваториальное сжатие $\alpha = 1:298,3$. Эти параметры были определены Ф.Н. Красовским и другими сотрудниками ЦНИИ-ГАИКа в 1940 году и были приняты для производства всех видов астрономо-геодезических и картографических работ взамен эллипсоида Бесселя.

При установлении системы координат 1942 года в уравнивание вошли 87 полигонов АГС, расположенных на большей части Европейской территории СССР, и узкой полосой пунктов, распространяющих их координаты до Дальнего Востока. Обработка выполнялась на эллипсоиде Красовского с использованием метода проектирования. Метод проектирования отличается от метода развертывания тем, что редуцирование данных геодезических измерений с земной поверхности сначала происходит на поверхность уровня моря, а затем на поверхность референц-эллипсоида. Определение высот квазигеоида и составляющих уклонов отвесных линий, необходимых для такого редуцирования, выполнено с использованием результатов гравиметрической съемки.

Начальным пунктом в системе координат 1942 г. был принят центр круглого зала Пулковской обсерватории, геодезические координаты которого имеют следующие значения: $B_0 = 59^{\circ}46'18'',55$; $L_0 = 30^{\circ}19'42'',09$. Отступление геоида от поверхности референц-эллипсоида по высоте в Пулкове было принято равным нулю [4]. Сравнивая геодезические координаты круглого зала Пулковской обсерватории в системе 1942 г. и в системе 1932 г., были получены следующие поправки: $\Delta B_0 = -0'',16$, $\Delta L_0 = +3'',54$, $\Delta A_0 = +3'',66$.

Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 на основе выполненного уравнивания была введена единая система координат и высот на территории СССР – система координат 1942 года (СК-42) [5]. Систему координат 1942 года можно считать одним из главных достижений отечественной геодезии. Все последующие системы координат строились на её основании, путем поворотов и сдвигов.

В 1963 г. на основе СК-42 была введена СК-63 с 3-х градусными зонами, которая применялась более 30 лет для решения задач народного хозяйства. В настоящее время от её применения в геодезических работах отказались.

Создание классической астрономо-геодезической сети на территорию СССР было завершено к началу 80-х годов XX века. Стала очевидной необходимость уравнивания полученной АГС без разделения на уравнивание сначала пунктов триангуляции 1 класса, а затем сплошных сетей 2 класса. Такое раздельное уравнивание полигонов 1 класса приводило к недопустимо большим ошибкам в самих пунктах 1 класса, а так же к значительным деформациям сетей 2 класса вблизи рядов 1 класса. В мае 1991 г. было завершено общее уравнивание АГС. Уравненная сеть включала в себя 164 306 пунктов триангуляции и полигонометрии 1–2 классов; 3,6 тысяч геодезических азимутов; 2,8 тысяч базисных сторон, расположенных через 170–200 км.

Точность уравнивания можно охарактеризовать величинами следующих средне-квадратических ошибок: направления составила $0,7''$; измеренного азимута – $1,3''$; взаимного положения смежных пунктов – 2–4 см; передачи координат от исходного пункта на пункты на краях АГС по каждой координате (x, y) – 1 м.

К началу 90-х годов на территории нашей страны были созданы две спутниковые геодезические сети: космическая геодезическая сеть (КГС) ВТУ ГШ МО (Военно-топографическое управление Генерального Штаба Вооруженных Сил Министерства обороны РФ) и доплеровская геодезическая сеть (ДГС) ГУГК (Главное управление геодезии и картографии).

КГС ВТУ ГШ МО включала в себя 26 стационарных астрономо-геодезических пунктов. Расстояния между смежными пунктами составляли от 500 до 1500 км. Координаты пунктов КГС были определены по фотографическим, доплеровским, даль-

мерным радиотехническим и лазерным наблюдениям ИСЗ системы ГЕО-ИК (геодезический измерительный комплекс).

Система координат КГС являлась составной частью более широкого набора фундаментальных геодезических параметров, получивших название «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Этот шифр получила и сама система координат. ДГС ГУГК состояла из 131 пункта, координаты которых определялись по доплеровским наблюдениям ИСЗ системы TRANSIT. Средние расстояния между пунктами составляли 500–700 км. Точность определения взаимного положения пунктов составила 0,4–0,6 м. ДГС строилась в системе координат WGS-84, не совпадающей с системой координат ПЗ-90.

В начале 90-х годов XX века было выполнено совместное уравнивание АГС, ДГС и КГС. В уравнивании участвовали все пункты КГС, ДГС и общие с ними (совмещенные или близко расположенные и привязанные) пункты АГС с целью распространения государственной системы координат на всю территорию нашей страны.

Плановые координаты, полученные по результатам совместного уравнивания, были дополнены значениями геодезических высот пунктов над референц-эллипсоидом Красовского. В качестве опорной системы, в которой получались окончательные уравненные значения координат пунктов, была принята система ПЗ-90. В результате такого уравнивания была создана геодезическая сеть из 134 опорных пунктов ГГС, расположенных на всей территории страны при среднем расстоянии между смежными пунктами 400–500 км. Геодезическая сеть из 134 пунктов использовалась как исходная при заключительном общем уравнивании 164306 пунктов триангуляции и полигонометрии 1 и 2 классов АГС. Точность заключительного уравнивания АГС 1995 года характеризуется следующими средними квадратическими ошибками, которые составляют:

- 0,02–0,04 м – для смежных пунктов при расстояниях до нескольких десятков км;
- 0,2–0,5 м – при расстояниях от 1 до 9 тысяч км. СК – 95 по точности определения координат пунктов превосходит СК-42 на порядок.

Система координат 1995 года была установлена постановлением Правительства РФ от 28 июля 2000 года № 568. Она предназначалась для производства геодезических и картографических работ на территории России, начиная с 1 июля 2002 года. В СК-95 начало системы координат совпадает с координатами начального пункта Пулково, сохранены эллипсоид Красовского и проекция Гаусса-Крюгера [1].

В настоящее время в мире существует несколько общеземных систем координат: WGS-84 (США), ITRF (Международная система координат), ПЗ-90, ПЗ-90.02 (Россия).

Постановлением Правительства РФ № 568 от 28 июля 2000 года геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» установлена в качестве единой государственной системы координат для применения в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Спутниковая система ГЛОНАСС работает в системе координат ПЗ-90 и более уточненной версии ПЗ-90.02.

Система координат ПЗ-90.02 принята Распоряжением Правительства РФ от 20 июня 2007 года № 797-р в целях повышения тактико-технических характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, улучшения геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

За отсчетную поверхность в системах геодезических параметров ПЗ-90 и уточненной версии ПЗ-90.02 принят общеземной эллипсоид с большой полуосью $a = 6378136$ м и сжатием $\alpha = 1:298,257839303$, полученными по спутниковым измерениям на суше и в Мировом океане.

GPS работает в системе координат WGS-84 (World Geodetic System, 1984). Основные параметры общеземного эллипсоида WGS-84 получены по спутниковым измерениям и имеют следующие значения: большая полуось $a = 6378137$ м, сжатие

$\alpha = 1:298, 257223563$. Международная система координат ITRF (International Terrestrial Reference frame – Международный наземный референцный каркас) является основой для построения различных координатных систем на поверхности Земли.

Система координат ITRF – это геоцентрическая прямоугольная пространственная система координат, включающая в себя набор фундаментальных астрономо-геодезических параметров и геофизических моделей. Система координат ITRF в настоящее время реализуется примерно 190 пунктами, среди которых есть пункты радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и пункты Международной службы вращения Земли.

В настоящее время широкое применение получили местные системы координат. Местная система координат представляет собой условную систему координат, устанавливаемую в отношении ограниченной территории, не превышающей территорию субъекта Российской Федерации. Местные системы координат устанавливаются для проведения геодезических и топографических работ при инженерных изысканиях, строительстве, межевании земель, ведении кадастра и других специальных работах [6, 7].

Обязательным требованием при установлении местных систем координат является обеспечение возможности перехода от местной системы координат к государственной системе координат, который осуществляется с использованием параметров перехода (ключей).

В 1999 году Федеральная служба геодезии и картографии приступила к созданию новой ГГС на основе спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Новая ГГС включает в себя геодезические построения различных классов точности:

- 1) ФАГС – фундаментальную астрономо-геодезическую сеть;
- 2) ВГС – высокоточную геодезическую сеть;
- 3) СГС-1 – спутниковую геодезическую сеть 1 класса;
- 4) астрономо-геодезическую сеть и сети сгущения.

Высшим уровнем в структуре новой ГГС России должна стать ФАГС. Эта сеть будет служить исходной основой для распространения с высокой точностью на территории России общеземной геоцентрической системы координат.

Положение 50 пунктов ФАГС, удаленных один от другого на 650–1000 км, определяются методами космической геодезии со среднеквадратической ошибкой не более 10–15 см.

ВГС содержит 300 пунктов, которые опираются на пункты ФАГС и удалены один от другого на 150–300 км. Координаты пунктов ВГС относительно пунктов ФАГС определяются со среднеквадратическими ошибками, равными 1–2 см в плановом положении и 3 см по геодезической высоте.

Третий уровень в структуре новой ГГС занимает спутниковая геодезическая сеть 1 класса. Исходной основой для построения СГС-1 являются ближайшие пункты ФАГС и ВГС. СГС-1 создается по мере необходимости геодезического обеспечения регионов. Расстояния между пунктами СГС-1 составляют 25–35 км. Средние квадратические ошибки определения положения пунктов СГС-1 не должны превышать 1 см по каждой плановой координате и 2 см по геодезической высоте. Спутниковая геодезическая сеть 1 класса содержит в настоящее время около 4500 пунктов [1].

Совершенствование систем координат, повышение точности координат пунктов с использованием современных геодезических технологий – концепция развития геодезии и картографии до 2020 г. Свидетельством этого является утверждение систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11 в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат» [8].

Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) предназначена для использования при осуществлении геодезических и картографических работ, общеземная

геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) – для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

ПЗ-90.11 и ГСК-2011 являются геоцентрическими экваториальными пространственными системами координат. Они определяют положение точки относительно центра масс Земли, главной отсчетной плоскостью является плоскость экватора, счет координат выполняется в правосторонней пространственной декартовой системе координат.

ПЗ-90.11 является рабочей системой координат ГЛОНАСС, которая служит для решения задач глобальной навигации и находится в ведении Министерства Обороны РФ. На поверхности Земли она закреплена глобально распределенными пунктами, включая пункты космической геодезической сети.

ГСК-2011 должна обслуживать сегмент потребителя ГЛОНАСС, обеспечивать единство представления пространственных данных в гражданском секторе экономики страны. ГСК-2011 на земной поверхности закреплена пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Пункты ФАГС должны создавать основу инфраструктуры высокоточной координатной привязки при выполнении массовых геодезических работ и картографировании территории.

Постановление ограничивает период применения действующих в настоящее время государственных систем координат СК-42 и СК-95 до 1 января 2017 года.

Литература

1. *Левитская Т.И.* Современные системы координат в геодезии // Физика космоса: Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3–7 февр. 2014 г., Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 249–260.
2. *Клепко В.Л., Александров А.В.* Системы координат в геодезии. – Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011.
3. *Телеганов Н.А., Тетерин Г.Н.* Метод и системы координат в геодезии. – Новосибирск: СГГА. – 2008.
4. *Зданович В.Г.* Высшая геодезия. – М.: Углетехиздат, 1954.
5. *Юнусов А.Г., Беликов А.Б., Баранов В.Н., Каширкин Ю.Ю.* Геодезия. – М.: Академический Проект, 2011.
6. *Герасимов А.П., Назаров В.Г.* Местные системы координат. – М.: ООО «Издательство «Проект»», 2010.
7. Постановление Правительства РФ от 3 марта 2007 г. №139 «Об утверждении правил установления местных систем координат». – [Электронный ресурс URL: http://www.to33.rosreestr.ru/blanks_norm/1027240/].
8. *Фонарёв В.М., Яблонский Л.И.* О создании новой Единой системы государственных карт Российской Федерации // Геодезия и картография. № 7, 2015.

THE HISTORY OF SELECTING SINGLE SYSTEM OF GEODETIC COORDINATES IN RUSSIA

Levitskaya T.I.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

In article describes the history of creation geodetic coordinates systems in Russia. The contribution of several generations of prominent astronomers and surveyors in solution of this problem have been showed.

НАБЛЮДЕНИЯ ШИРОТЫ ПУЛКОВА И ИСТОРИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.

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

История наблюдений широты Пулкова естественным образом разделяется на три этапа. Первый этап – наблюдения с 1840 по 1890 гг. на пассажном инструменте Репольда в первом вертикале и на большом вертикальном круге Эртеля. Начало второго этапа совпадает с началом плановых наблюдений широты Пулкова. Эти наблюдения начались в 1890 году и выполнялись на пассажном инструменте в первом вертикале (ПИПВ). В 1904 г. в строй вступил зенитный телескоп Фрейберга-Кондратьева (ЗТФ-135). Первая мировая война, революция, гражданская война, сталинские репрессии значительно усложнили работу ученых, но, несмотря на это, мы имеем непрерывные ряды наблюдений вплоть до 1941 г. Первая мировая война практически никак не отразилась на наблюдениях, а с началом Великой Отечественной войны наблюдения были прерваны. Третий этап начался с возобновления наблюдений на ЗТФ-135 в 1948 и завершился в 2006 году. Усилиями 36 наблюдателей на ЗТФ-135 был получен ряд наблюдений, который включает около 170 тыс. значений широты. В результате мы имеем уникальный ряд изменений широты Пулкова с 1840 по 2006 г.

1. Введение

Наблюдения в Пулкове начались в 1839 г. в год открытия обсерватории и продолжались до конца 2006 г. Историю наблюдений широты Пулковской обсерватории можно разделить на три этапа (рис. 1). Каждый этап характеризуется своими особенностями, трудностями, достижениями и, конечно, личностями астрономов и инженеров, выполнявших и обеспечивавших наблюдения. Ни Первая мировая война, ни революция, ни голод, ни разруха, ни сталинские репрессии не вызвали серьезного перерыва в наблюдениях, и не прервали процесс изучения движения полюса и наблюдения широты Пулкова (рис. 2). Хотя надо отметить, что основные инструменты ПИПВ и ЗТФ-135, на которых широта Пулкова наблюдалась 102 года, были изготовлены и отлажены до начала этих катаклизмов.

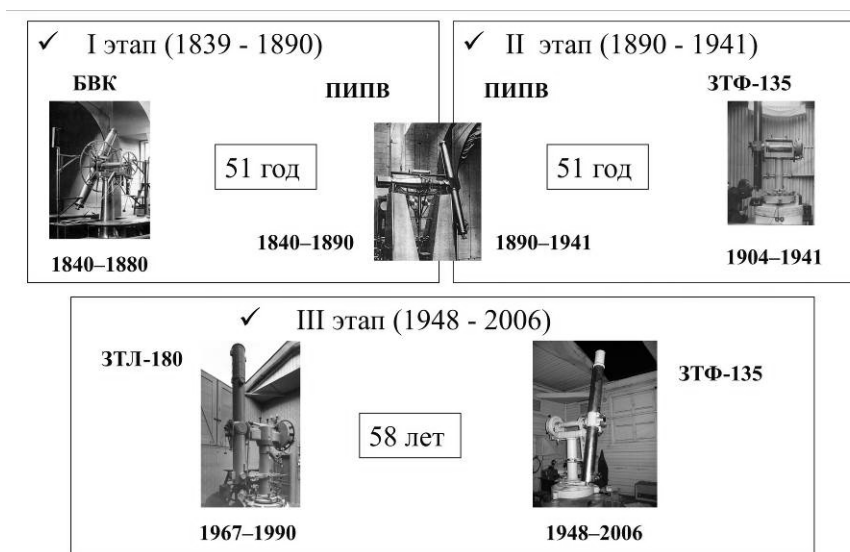


Рис. 1.

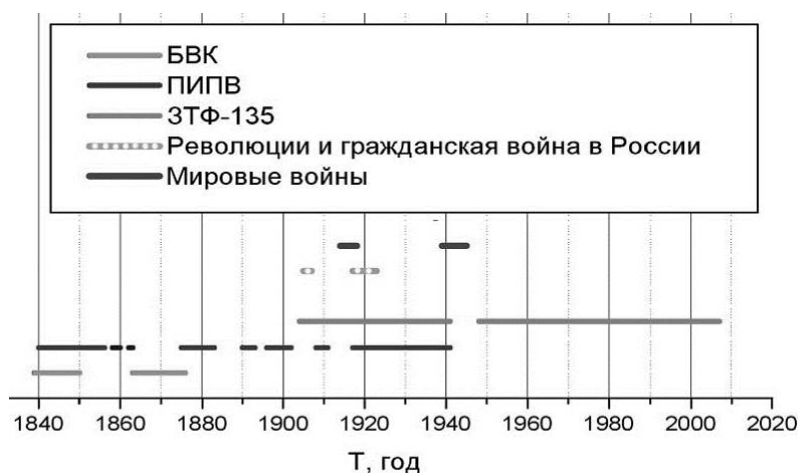


Рис. 2.

2. Первый этап (1839–1890)

Первые широты Пулкова были получены из наблюдений на большом вертикальном круге Эртеля (БВК) и пассажном инструменте Репсольда в первом вертикале (ПИПВ). Первым наблюдателем на БВК был Х.И. Петерс, который начал наблюдать с осени 1839 г. и закончил свои наблюдения в июле 1849 г. Именно Петерс первым обнаружил изменение широты. Следующие исследования были выполнены М.О. Нюренем. Для этой цели он использовал наблюдения В.Я. Струве на пассажном инструменте, установленном в первом вертикале, а также наблюдения Петерса, Гюльдена и свои собственные на вертикальном круге. Петерс и Нюрен в своих исследованиях не заметили изменения широты с периодом, большим одного года, так как они априори предполагали наличие периода Эйлера, равного 305 суткам, и использовали это значение при своих вычислениях. И только при анализе всех наблюдений, выполненных для создания каталога 1885 г. на вертикальном круге, Нюрен получает период, близкий к 430 суткам [1]. Эти исследования предшествовали работам С. Чандлера, который в 1891 году объявил о существовании периода в наблюдениях широты ~428 суток [2]. Через два года А.А. Иванов переработал наблюдения Петерса, и в 1895 г. вышла книга «Вращательное движение Земли» [3], в которой только по Пулковским наблюдениям был вычислен период Чандлера. Интересно отметить, что на заседании ученого совета, посвященного началу наблюдательной работы службы широты Пулкова после окончания войны в 1947 г., Н.И. Идельсон предложил называть период Чандлера периодом Чандлера-Иванова [4].

Все наблюдения на ПИПВ в 1840–1855 гг. были выполнены В.Я. Струве. Им же была предложена и разработана методика наблюдений и их обработки. Б. Ванах в 1892 г. вычислил изменения широты Пулкова из наблюдений, выполненных на пассажном инструменте в первом вертикале В.Я. Струве, Ф. Оомом и М.О. Нюренем за 1840–1880 гг. Исследования В.Я. Струве, Х.И. Петерса, Г. Гюльдена, М.О. Нюрена, А.А. Иванова, Б. Ванаха, С.К. Костинского и др. ученых по всему миру привели к необходимости начать периодические наблюдения широты в Пулкове.

3. Второй этап (1890–1941)

Плановые наблюдения изменения широты Пулкова начались с 1890 года на пассажном инструменте в первом вертикале (ПИПВ) и выполнялись Б. Ванахом, С.К. Костинским, А.Р. Педашенко, А.С. Васильевым. В 1898 г. была организована Международная служба широты, в которую вошло 5 станций, расположенных на одной широт-

ной параллели (39°8') и на разных долготах. В числе международных широтных станций была и Пулковская обсерватория.

В 1899 году директор О.А. Баклунд для присоединения Пулкова к Международной службе широты предложил создать зенит-телескоп, который был изготовлен в мастерской Пулкова Г.А. Фрейбергом-Кондратьевым. Весной 1904 г. инструмент был установлен в специальном павильоне, который находился между Главным зданием и башней 30-дюймового рефрактора. Установкой и исследованиями ЗТФ-135 руководил Ф.Ф. Витрам. 20 сентября 1904 г. начались наблюдения широты Пулкова. Первым наблюдателем на ЗТФ-135 был И.В. Бонсдорф, который наблюдал до 1906 г. После революции в 1917 году он уехал в Хельсинки, где впоследствии организовал Финский геодезический институт и сеть геодезических станций.

Наблюдателями на ЗТФ-135 до 1941 года были А.Я. Орлов (1907–1908), М. Вебер (1908–1909), Л.И. Семенов (1908–1911), Б.А. Земцов (1911–1913), Ю.В. Нумеров (1913–1915), Н.В. Циммерман (1915–1917), Н.И. Днепровский (1915–1917), А.Д. Дрозд (1917–1920), С.В. Романская (1917–1941), Г.С. Максимов (1920–1926), В.Р. Берг (1925–1941). Научные работы почти всех этих наблюдателей сыграли огромную роль в изучении изменчивости широты и служили своеобразной энциклопедией для послевоенных исследователей. Целью наблюдений на ЗТФ-135 было изучение изменчивости широт Пулкова и определение постоянных аберрации и нутации [1]. Спустя 100 лет со дня начала наблюдений на ЗТФ-135, В.А. Наумов отмечал, что особенность конструкции инструмента ЗТФ-135 позволила наблюдать на нём в течение 102 лет без капитального ремонта [5].

По предложению директора О.А. Баклунда, А.С. Васильев 30 ноября 1907 г. приступил к исследованию ПИПВ. В мае 1910 г. Васильев представил директору записку, в которой доложил о безукоризненности телескопа. Однако в результатах наблюдений на ЗТФ-135 и ПИПВ наблюдались систематические различия [6]. В 1911 г. наблюдения были прекращены и возобновились вновь только в 1917 г. Пассажный инструмент продолжал успешно работать до июля 4 апреля 1941 г. Журналы за апрель, май, июнь 1941 г. погибли при эвакуации. Все остальные журналы наблюдений А.С. Васильева хра-

Период	Число наблюдений	Наблюдатель
В 1840-1855	464	В. Сийриве
1861-1863	236	Ом
1869-1882	884	М. Нюрен
1890-1891	504	Б. Ванах
1891-1896	948	С. Коестинский
1896-1902	1110	Д. Педаненко
1905-1906	157	Коестинский и Витрам
1907	115	М. Камминский
1908,6-1911,5	1601	А.С. Васильев
1918-1933	3290	А.С. Васильев

Рис. 3.

Трудные условия, в которых приходилось работать ученым в период Первой мировой войны, Октябрьской революции и Гражданской войны описываются в отчетах о работе обсерватории за эти годы. В отчете директора А.А. Белопольского о деятельности обсерватории за первые послереволюционные годы встречаются указания на перебои в снабжении сотрудников обсерватории продуктами питания, топливом, научными материалами. От голода и истощения 2 ноября 1920 г. безвременно скончался Борис Александрович Земцов, возвратившийся после военной службы [9].

Обсерватория находится на Пулковских высотах и в силу своего местоположения во время боевых действий становится стратегическим объектом. Поэтому часто оказы-

ваются в архиве ГАО РАН. Результаты обработки наблюдений за весь период работы инструмента были опубликованы в 1952 г., уже после смерти автора. На рис. 3 приводится список наблюдателей на ПИПВ до 1933 г., написанный рукой А.С. Васильева [7]. Начиная с 1933 до 1941 г. наблюдения проводил сам А.С. Васильев.

валась в центре боевых действий. Имеются описания двух боев: 12 ноября 1917 г. – бой между красногвардейцами Петроградского и Царскосельского отрядов и казаками, поддерживавшими Временное правительство, и 20–21 октября 1919 г., когда к Петрограду подходил Юденич. Наблюдений в эти дни не было ни на ЗТФ-135, ни на ПИПВ. Известно, что ни инструменты, ни сотрудники не пострадали.

По свидетельству А.А. Белопольского, несмотря на все невзгоды, переносимые астрономами, «число представленных к печати рукописей, число научных докладов, интенсивность наблюдений остались почти в том же виде, как во времена несравненно более легкие, чем нынешние» [10].

Именно в период Первой мировой войны возникает вопрос об организации службы широты в России. Это было связано с тем, что Центральное бюро Международной службы широты не посылало координаты полюса ряду государств, в том числе и России. План мероприятий по организации службы широты был разработан М.А. Грачевым и доложен на 1-м Всероссийском астрономическом съезде, состоявшемся в апреле 1917 г. Однако вычисления координат полюса по наблюдениям внутри страны начались только в 1953 г. в Полтаве.

Первая мировая война, революция, гражданская война, сталинские репрессии создавали трудные будни для работы ученых. Несмотря на это, мы имеем непрерывные ряды наблюдений вплоть до 1941 г. На рис. 4 приведен статистический график числа дней наблюдений на ЗТФ-135 по годам за 1904–1941 гг.

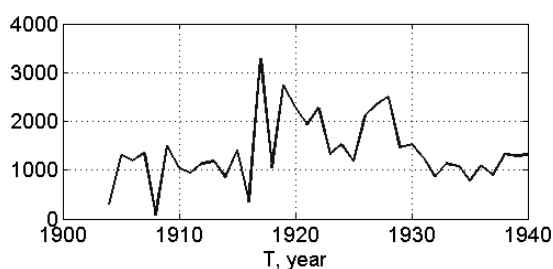


Рис. 4.

С 1934 г. в Пулкове шла подготовка к солнечному затмению 19 июня 1936 г. Расширившиеся в связи с этим контакты директора обсерватории Б.П. Герасимовича с зарубежными учеными привлекли внимание НКВД. В результате репрессий Пулковская обсерватория потеряла более десяти своих ведущих сотрудников вместе с директором Б.П. Герасимовичем. Из астрономов, проводивших наблюдения широты, были расстреляны Днепровский Николай Иванович (1887–1938) и Нумеров Борис Васильевич (1891–1938).

Очередной удар нанесла Вторая мировая война. С началом войны А.С. Васильев продолжал работать на ПИПВ до 13 июля 1941 г., когда по распоряжению директора наблюдения прекратились. Пассажный инструмент Репсольда остался в Пулкове и был разрушен. Погибли при эвакуации и журналы наблюдений Васильева за последние три месяца. После окончания войны этот инструмент восстановлен не был.

Наблюдения на ЗТФ-135 продолжались до 9 июля 1941 г. Затем инструменты были демонтированы и подготовлены к эвакуации. В архиве ГАО хранятся уникальные документы В.Р. Берга о подготовке инструментов к эвакуации. Сохранилась и опись 8 ящиков ЗТФ-135. В.Р. Берг как заведующий инструментом руководил упаковкой и эвакуацией. Ящики с разобранным ЗТФ-135 были перевезены в Ленинград и хранились в подвале здания ЛАХУ на Университетской набережной [6].

В блокадном Ленинграде погибли астрономы-наблюдатели: Берг Виктор Рудольфович (1891–1941), Циммерман Николай Владимирович (1890–1942).

После войны территория Пулкова представляла собой страшную картину разрушения. В течение 850 дней обсерватория подвергалась артобстрелу и бомбежкам. Вся территория была покрыта оборонительными сооружениями.

Сразу же после окончания войны началось восстановление обсерватории. Решение о восстановлении обсерватории было принято задолго до окончания войны на астрономическом совещании в Москве в сентябре 1943 г. и в марте 1944 г.

4. Третий этап (1948–2006)

ЗТФ-135 был первым инструментом, на котором 1 сентября 1948 года начались наблюдения. К лету 1947 г. был построен новый деревянный павильон, который располагался южнее довоенного места на 50 метров. Уже в 1947 г. возобновились наблюдения на ЗТФ-135, но работа дважды прерывалась из-за того, что при дренаже вблизи павильона были обнаружены неразорвавшиеся немецкие снаряды. Для того чтобы их обезвредить, телескоп пришлось демонтировать [6]. Из довоенных пулковских широтников продолжила наблюдения только С.В. Романская. Вместе с ней на зенит-телескопе стали работать вернувшиеся с фронта В.И. Сахаров и И.Ф. Корбут. Первый послевоенный ряд оказался самым точным за всю историю наблюдений на ЗТФ-135.

Результаты наблюдений на ЗТЛ-180 начались 1 июля 1957 г. и были закончены в марте 1990 г. Наблюдения на ЗТЛ-180 производились В.И. Сахаровым, И.Ф. Корбутом, Е.Я. Прудниковой, И.А. Зыковым [11, 12]. Результаты наблюдений на ЗТЛ-180 и ЗТФ-135 оказались в очень хорошем согласии между собой и с международными данными. Пулковские наблюдения широты неоднократно входили в ряды координат полюса с максимальными весами.

Таблица 1.

С.В. Романская	Л.Д. Костина	Н.Р. Персиянинова
1917–1941; 1947–1956	1956–2001	1954–2001
34 года	45 лет	47 лет
1619 вечеров	2217 вечеров	2388 вечеров
20046 мgn. широт	32109 мgn. широт	34121 мgn. широт

Усилиями 36 наблюдателей с помощью ЗТФ-135 был получен длительный ряд наблюдений, который включает в себя около 170 тысяч значений широты. Половина всех наблюдений на ЗТФ-135 была получена С. В. Романской, Л.Д. Костиной и Н.Р. Персияниновой. Статистика их работы приведена в табл. 1, но за сухими цифрами – годы жизни и работы в Пулковской обсерватории выдающихся женщин астрономов – наблюдателей на ЗТФ-135.

На ЗТФ-135 с 1948 по 2006 гг. наблюдали: Романская С.В. (1948–1956), В.И. Сахаров (1947–1967), И.Ф. Корбут (1948–1960), Персиянинова Н.Р. (1954–2001), Костина Л.Д. (1956–2001), Шаравин А.М. (1957–1961), Соколова В.В. (1968–1974), Калихевич (Глебова Л.А.) (1978–1990), Соколова В.В. (1968–1974), Малкин З.М. (1983–1990), Хохлов В.В. (1988–1995), Зыков И.А. (1991–2006), Фомина Н.В. (1999–2006), Прудникова Е.Я. (1988–2006) и др. (рис. 5). В списке приведены наблюдатели, которые работали на инструменте более 4-х лет.

В связи с переходом на новые, более точные, способы определения ПВЗ систематические наблюдения широты на ЗТФ-135 были завершены 25 декабря 2006 г.

Авторы выражают искреннюю благодарность Т.В. Соболевой и сотрудникам Пулковской библиотеки за помощь в работе над статьей.



Рис. 5. Слева – наблюдатели на праздновании 100-летия наблюдений на ЗТФ-135 в 2004 году Малкин З.М., Костина Л.Д., Зыков И.А., Наумов В.А., Фомина Н.В., Прудникова Е.Я. Справа – Персиянинова Н.Р. и Прудникова Е.Я. у телескопа в 80-е годы XX столетия.

Литература

1. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. – М. 1962. С. 400.
2. Chandler S.C. On the variation of latitude // Astron. J. 1891. 248. P. 59–61.
3. Иванов А.А. Вращательное движение Земли. – С-Петербург. 1895. С. 95.
4. АГАО. Ф. 1. Оп. 1. Д. 114. Л. 6.
5. Наумов В.А. Особенность конструкции зенит-телескопа ЗТФ-135 // Изв. ГАО. № 217. 2004. С. 543–545.
6. Соболева Т.В., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Драматическая судьба астронома и геодезиста А.С. Васильева (1868–1947) – Историко-астрономические исследования. Т. 37. М., 2013. С. 214–217.
7. СПФА РАН. Ф.703. Оп.1 (1933). Д.8. Л.76.
8. Дадаев А.Н. Пулковская обсерватория. – Л.: Наука, 1972. – С. 148.
9. Главная астрономическая обсерватория в Пулкове. 1839–1917 гг. Сборник документов. СПб: Наука, 1994. – С. 336.
10. Наумов В.А., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я. Некоторые итоги наблюдений, выполненных на ЗТЛ-180 за 1975–1990 гг. // Изв. ГАО. № 216. 2002. С. 227–234.
11. Костина Л.Д., Сахаров В.И. Изучение движения географического полюса Земли в Пулковской обсерватории – 150 лет Пулковской обсерватории. Л.: Наука, 1989. С. 137–152.

PULKOVO LATITUDE OBSERVATIONS AND HISTORICAL EVENTS

Miller N.O., Prudnikova E.Y.

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

History of Pulkovo latitude observations are naturally divided into three stages. The first stage - observations from 1840 to 1890 were made with the Ertel transit instrument and with the Ertel Vertical Circle. Beginning of the second stage coincided with the start of scheduled observations of the Pulkovo latitude. These observations started in 1890 and were carried on the Transit Instrument in the Prime vertical. Zenith telescope Freiberg-Kondratiev (ZTF-135) came into operation in 1904.

In spite of the First World War, revolution, Civil war, Stalin's repressions greatly complicated the work of scientists we had continuous series of observations up to 1941. The First World War had virtually no impact on the observations, but with the beginning of World War II, they were interrupted. The third stage of observation began in 1948 and ended in 2006. Through the efforts of 36 observers about 170 thousand observations of the latitude with ZTF-135 were made. The result is a unique series of the Pulkovo latitude variations from 1840 to 2006.

НИКОЛАЕВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ГАО ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

Пинигин Г.И., Пожалова Ж.А.

НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

Во второй половине XX века вплоть до момента распада СССР в начале 90-х годов Николаевская обсерватория находилась в статусе отделения Пулковской обсерватории (НО ГАО), основной задачей которого было создание базы для астрометрических исследований на юге. В период быстрого развития науки, связанного с послевоенным возрождением, здесь появляются новые направления исследований (фотографическая астрометрия, наблюдения ИСЗ), существенно была расширена и модернизирована инструментальная база, что позволило принимать участие в выполнении новых союзных и международных программ (АГКЗР, КСЗ, программа ИТА по наблюдению ИМП и т. д.) [1]. Организация высокоширотной экспедиции на о. Западный Шпицберген — пример успешного сотрудничества с Пулковской обсерваторией в эти годы.

1. Штат и директора Обсерватории во второй половине XX века

В 1951 году на пост директора Обсерватории был назначен кандидат физико-математических наук Яков Ефимович Гордон – выпускник Харьковского инженерно-строительного института и аспирантуры Академии наук СССР при Пулковской обсерватории (рис. 1). За годы его директорства штат вырос более чем в 4 раза и составлял больше 80 человек.

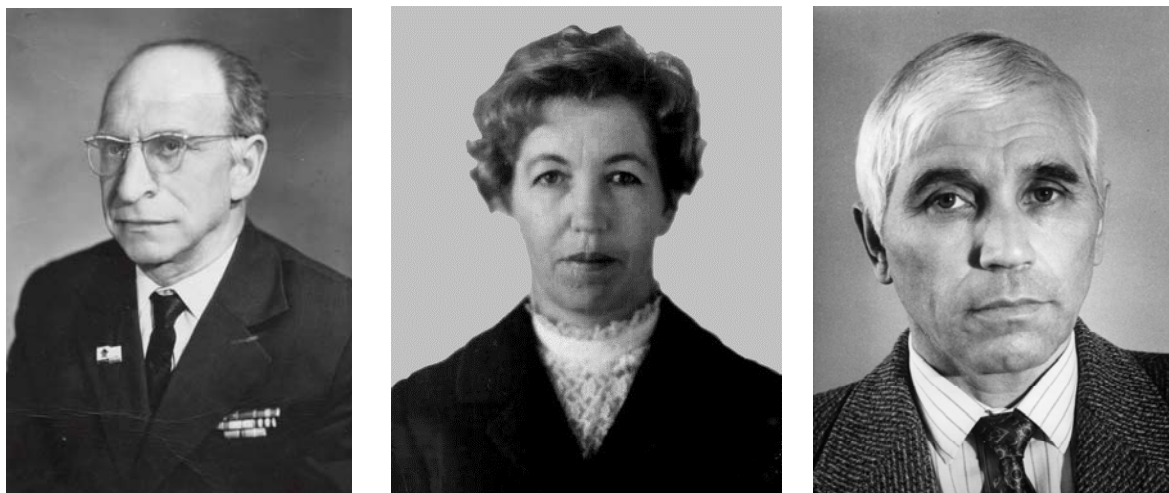


Рис. 1. Директора Обсерватории Я.Е. Гордон, Р.Т. Федорова, Г.И. Пинигин.

После внезапной смерти Я.Е. Гордона в 1978 году руководство Обсерваторией было поручено кандидату физико-математических наук Римме Тимофеевне Федоровой, которая в 1957 году окончила Киевский государственный университет и была направлена на работу в Николаевскую обсерваторию (рис. 1). В 1986 году по распоряжению Президиума АН СССР директором Обсерватории назначается сотрудник Пулковской обсерватории кандидат физико-математических наук Геннадий Иванович Пинигин, который в 1965 году окончил Томский университет по специальности астрономогеодезия, а в 1973 году Ленинградский институт авиаприборостроения (рис. 1). Новому директору в конце 80-х годов удалось выполнить большой объем работ по реставрации и ремонту помещений обсерватории. В это же время он начинает совершенствование структуры и обновление научного персонала обсерватории в соответствии с научными зада-

чами и ее возможностями. В 1992 году Г.И. Пинигин защитил докторскую диссертацию, а Николаевская обсерватория после распада СССР стала самостоятельным научным учреждением молодого независимого государства Украины. К этому моменту в общей сложности по исследованиям, проведенным в Обсерватории, было подготовлено и защищено три докторских и более десяти кандидатских диссертаций.

2. Оснащение Обсерватории и астрономическое приборостроение в НАО

Во второй половине XX века продолжали работать пассажный инструмент Фрейберга-Кондратьева (ПИФК, $D = 108$ мм, $F = 1300$ мм) и Вертикальный круг Репсольда (ВКР, $D = 108$ мм, $F = 1400$ мм). До 1967 года на них выполнялись работы по созданию абсолютных каталогов положений звезд, а потом до конца 80-х годов продолжались наблюдения Солнца, Меркурия и Венеры.

Инструментальная база Обсерватории была существенно расширена в результате передачи из Пулковской обсерватории двух телескопов: Меридианного круга Репсольда (МКР, $D = 150$ мм, $F = 2150$ мм) в 1955 году и Зонного астрографа (ЗА, $D = 120$ мм, $F = 2044$ мм) в 1960 году. Для них силами сотрудников Обсерватории были построены специальные павильоны — деревянный и каменный (рис. 2).



Рис. 2. Строительство павильонов МКР и ЗА.

Знаменитый пулковский МКР, заказанный В. Струве для строящейся Пулковской обсерватории, в годы Великой Отечественной войны сильно пострадал. В реставрации и восстановлении, а затем исследовании узлов инструмента активно участвовали механик Николаевской обсерватории И.И. Пономаренко и астроном И.И. Божко. ЗА был создан фирмой «Карл Цейсс Йена» по заказу Пулковской обсерватории в 1926 г. Однако от разрушенного во время войны телескопа сохранились лишь объектив, окулярный микрометр и кассета. После восстановления телескопа на ЛОМО установкой его в Николаеве занимались механики Обсерватории И.И. Пономаренко и С.С. Рябочинский под руководством астронома Ф.Ф. Калихевич. МКР и ЗА были основными рабочими телескопами до конца XX века. Немало этому способствовали текущие модернизации и усовершенствование отдельных узлов, которые проводились на всех работающих телескопах.

К началу 1957 года – Международного геофизического года – николаевская служба времени в дополнение к имеющемуся пассажному инструменту (ПИ) фирмы «Аска-

ния-Верке» ($D = 90$ мм, $F = 1000$ мм) получила еще два инструмента для наблюдений: новый АПМ-10 №560002 ($D = 100$ мм, $F = 1000$ мм) и пулковский «Бамберг 6353» ($D = 80$ мм, $F = 800$ мм) с фотоэлектрической системой регистрации. ПИ «Аскания-Верке» и АПМ10 были установлены в одном деревянном павильоне и работали по одной программе. В 1959 году они были оснащены ФЭУ постоянного тока по схеме Н.Н. Павлова.

Так складывалось, что астрономическое приборостроение становится традиционным направлением НО ГАО. В 1973 году здесь была создана лаборатория высокоточных угловых измерений (руководитель Н.А. Илькив). С помощью двух уникальных делительных машин ТКФ-1000, установленных в термостатированном подвальном помещении главного здания на специальном фундаменте, были реставрированы лимбы МКР НАО, восстановлены лимбы меридианных кругов Одесской обсерватории и ГАИШ (начало 80-х), изготовлен титановый лимб для ГАО (Киев).

В 80-е годы в сотрудничестве с Пулковской обсерваторией и Астрономической обсерваторией Энгельгардта (АОЭ КазГУ) проводились работы по созданию новых автоматических телескопов и приборов. Под руководством О.Е. Шорникова и А.В. Сергеева воплощалась идея создания автоматического прибора для фотометрических и координатных измерений путем заказа Астросовета на изготовление четырех приборов ПАРСеК. Николаевский проект нового телескопа горизонтальной конструкции АМК (авторы О.Е. Шорников, Г.И. Пинигин, А.В. Шульга и др.) имел три очереди инструмента и был введен в действие в 1995 году. Еще один проект МАГИС по созданию четырех автоматических меридианных инструментов на основе пулковского ГМК так и остался нереализованной кооперацией ГАО (Пулково), НО ГАО, АОЭ КазГУ и ГАО (Киев) из-за разрушения связей после развала СССР.

3. Позиционные наблюдения звезд

В 1963 году созданием двух каталогов $Nik60$ завершился выпуск серии николаевских каталогов абсолютных прямых восхождений и склонений звезд из наблюдений на ПИФК и ВКР. Все они благодаря высокой точности вошли составной частью в фундаментальные каталоги FK.

С 1956 года по наблюдениям на МКР было создано 9 дифференциальных каталогов в системе фундаментальных каталогов: каталог AGK3R (количество звезд 9994, период наблюдений 1956–66, год публикации 1966), каталог слабых звезд (2601, 1956–66, 1969), каталог звезд вблизи внегалактических туманностей (117, 1956–66, 1969), каталог собственных движений слабых звезд (12545, 1956–66, 1972), каталог положений 5969 южных опорных звезд и 726 ярких звезд (6695, 1964–66, 1983), каталог зодиакальных звезд (8832, 1969–72, 1982), каталог прямых восхождений звезд ФКСЗ (584, 1974–76, 1982), каталог положений звезд высокой светимости (1575, 1984–86, 1991), экваториальная зона каталога Кортацци (1314, 1984–86) [2]. Первые пять каталогов размещены в Страсбургском Центре астрономических данных (CDS).

Кроме того, на ЗА выполнялись наблюдения для создания каталогов положений звезд в околополярной, зодиакальной, экваториальных областях, а также по специальным программам для определения положений радиоисточников и др. Каталогные массивы составляют более 2,3 тысяч астронегативов, в настоящее время они оцифрованы и находятся в базе данных Украинской виртуальной обсерватории.

4. Наблюдения тел Солнечной системы

В 60-е годы на ПИФК и ВКР в системе фундаментального каталога FK3 наблюдались Солнце, Луна, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Многолетние ряды наблюдений тел Солнечной системы послужили основой для новой реля-

тивистской теории движения планет, за создание которой Г.М. Петров в числе других авторов был удостоен в 1982 году Государственной премии СССР.

С 1961 по 1998 годы на ЗА велись регулярные наблюдения тел Солнечной системы: 19 избранных астероидов с целью определения поправок к нуль-пунктам опорных каталогов, больших планет за исключением Меркурия и Плутона, галилеевых спутников Юпитера, ярких спутников Сатурна и комет [3]. Длительные временные ряды николаевских фотографических наблюдений находятся в числе одних из самых точных по оценке Центра малых планет (MPC). Массив около 2,5 тысяч положений избранных астероидов передан в базу данных MPC. Благодаря высокой точности николаевские фотографические наблюдения Урана и Нептуна были использованы при разработке новых теорий движения тел Солнечной системы DE410, созданной в JPL (США). Массив николаевских фотографических наблюдений Венеры, Урана и Нептуна передан в базу данных CDS. Массивы наблюдений спутников Юпитера и Сатурна размещены в Центре данных естественных спутников планет (ГАИШ).

5. Служба времени и эталоны времени и частоты

Николаевская служба времени была одной из самых точных в СССР и до 1992 года регулярно вела наблюдения с целью определения поправок часов. Эти наблюдения вошли в 9 каталогов прямых восхождений звезд (около 70 тыс. наблюдений), которые переведены в цифровую форму. Они были включены в пулковский сводный KCB2 (В.Л. Горшков, 1998 год) и использованы при изучении движения полюса и шкалы атомного времени чешским астрономом Я. Вондраком (1997 год) [3].

В 1957–59 годах служба времени принимала активное участие в международной программе Международного геофизического года по определению параметров вращения Земли из наблюдений прохождений звезд на инструментах службы времени, а также исследованию распространения радиосигналов точного времени в земной атмосфере. А в 1983–84 годах была задействована в специальном международном проекте MERIT с участием 22 стран, целью которого была выработка рекомендаций по созданию новой Международной службы вращения Земли.

Еще одной задачей службы времени является хранение и передача точного времени потребителям. Для этой цели в 50–60-е годы использовались двое кварцевых часов фирмы “Роде & Шварц” с погрешностью 50 мкс/сут. В 70-е годы на базе николаевской службы времени был создан вторичный эталон времени и частоты СССР, включающий прецизионные кварцевые генераторы и контроль по водородному стандарту с точностью 1 мкс/сут. Позже в 80-е годы использовался рубидиевый стандарт Hewlett-Packard, а контроль шкалы времени осуществлялся по сигналам LORAN-C с погрешностью 0.1 мкс/сут.

Важным экзаменом для службы времени в 70-е годы явилось обеспечение точным временем наблюдений на о. Западный Шпицберген, а в начале 80-х годов участие в эксперименте по радиоинтерферометрическим наблюдениям (Евпатория — Зеленчук), где в качестве перевозимых часов использовался николаевский рубидиевый стандарт.

6. Наблюдения искусственных спутников Земли

Через несколько дней после запуска в СССР первого в мире искусственного спутника Земли (ИСЗ) в октябре 1957 года научные работники Николаевской обсерватории приступили к его наблюдениям. Здесь создается станция визуальных наблюдений ИСЗ, а в 1963 году станция фотографических наблюдений, руководителем которой назначается Р.Т. Федорова. Обсерватория принимает участие в сеансах синхронных наблюдений ИСЗ для уточнения орбиты спутника и ее эволюции, а также получения высоко-

точной геодезической связи станций, принимающих участие в синхронных наблюдениях.

В 1966–68 годах Р.Т. Федорова была участницей международных совещаний по работе международной сети станций наблюдений ИСЗ, которые проходили в ГДР, Польше, Чехословакии, а в 1969 году была командирована на Кубу для проведения наблюдений ИСЗ.

7. Организация научных экспедиций

В 70-е годы НО ГАО под руководством кандидата физ.-мат. наук Г.М. Петрова выступило инициатором и основным организатором научных экспедиций для наблюдений в условиях полярной ночи на острове Западный Шпицберген. В период 1973–77 гг. было осуществлено три экспедиции, в которых приняло участие более 10 сотрудников Обсерватории. На основе 25 рядов непрерывных наблюдений продолжительностью 18 часов и более, выполненных на экспедиционном инструменте АПМ-10, был получен уникальный по точности каталог абсолютных прямых восхождений 531 звезды Nik(Spz)75 [3]. Эта работа была признана Астросоветом лучшей по астрономии в 1977 году.

В 70-е и 80-е годы под руководством Г.М. Петрова были организованы экспедиции на Кавказ с целью наблюдения прямых восхождений Солнца и больших планет (Агдере, 1970 год; Кисловодск, 1982–83 годы). По результатам второй экспедиции Ученым советом ГАО было принято решение об организации регулярных наблюдений на Горной астрономической станции (ГАС) Пулковской обсерватории, и сотрудники Николаевской обсерватории наблюдали там на пассажном инструменте Эртеля в течение 1987–91 годов.

8. Заключение

Два юбилея в жизни Обсерватории – 50-летие создания НО ГАО (1962 год) и 150-летний юбилей Николаевской обсерватории (1971 год) были отмечены проведением выездных заседаний Ученого совета Пулковской обсерватории, а также научных совещаний с участием известных астрометристов СССР (рис. 3). Вторая половина XX века



Рис. 3. 150-летний юбилей Николаевской обсерватории в 1971 году.

была временем благоприятного развития как в отношении материальной базы, человеческих ресурсов, так и в плане проведения научных исследований. В эти годы НО ГАО успешно участвовало в различных союзных и международных программах, проявляло инициативу и организаторские способности, в частности, в области создания астрономического оборудования и работе по организации научных экспедиций. К сожалению, ряду перспективных астрономических проектов не суждено было осуществиться (например, проект МАГИС), а разрушение союзных связей привело к свертыванию некоторых научных направлений (служба времени, фотографическая астрометрия). Остался нереализованным составленный в конце 80-х годов проект реставрации Главного здания, памятника архитектуры национального значения. Тем не менее, довольно высокий научно-технический потенциал и накопленный под руководством ГАО АН СССР опыт работы позволил Николаевской обсерватории преодолеть трудности перестройки и распада Советского Союза и стать самостоятельным научным учреждением Украины.

Литература

1. Николаевская астрономическая обсерватория. Звездный путь длиной в 175 лет. – Николаев, 1998, 302 с.
2. *Pozhalova Zh.A., Petrov G.M.* Review of the catalogues in positional astronomy made in Mykolaiv. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, 2005, Suppl, v. 5, 388-389
3. Николаевская астрономическая обсерватория 190 лет. – Николаев, 2011, 200 с.

NIKOLAEV BRANCH OF PULKOVO OBSERVATORY IN THE SECOND HALF OF THE 20th CENTURY

Pinigin G.I., Pozhalova Zh.A.

Research Institute Nikolaev Astronomical Observatory, Nikolaev, Ukraine

In the second half of the 20th century up to 1990's, when the Soviet Union fell apart, Nikolaev Observatory had a legal status as a branch of the Pulkovo Observatory. The main task of Nikolaev branch was astrometric research at the south. During the period of rapid development of science associated with the post-war reconstruction, new research fields, such as photographic astrometry and observation of artificial Earth satellites, appeared at Nikolaev Observatory. The instrumental facilities were essentially expanded and modernized that allowed the Observatory to take part in carrying out some national and international observational campaigns to obtain astrometric catalogues, such as AGK3R, catalogue of faint stars, as well as to conduct a programme, compiled by Institute of Theoretical Astronomy (USSR Academy of Sciences, Leningrad), for observation of selected minor planets. The organization of the high-latitude astronomical expedition to the West Spitsbergen is an example of successful cooperation with the Pulkovo Observatory in these years.

ИСТОРИЯ НАЦИСТСКОГО ПОДАРКА ИТАЛЬЯНСКОЙ АСТРОНОМИИ: «ТЕЛЕСКОПЫ МУССОЛИНИ»

Птицына Н.Г.¹, Альтаморе А.²

¹СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

²Университет «Roma Tre», Рим, Италия

В 1938 г., Гитлер на площади Венеции в Риме объявил о том, он дарит итальянскому народу в лице Муссолини оборудование для астрономической обсерватории. Поводом послужило 300-летие смерти Галилея. Это оборудование включало несколько больших телескопов, павильоны к ним и дополнительные инструменты. Под этот подарок в 20 км от Рима в местечке Монте Порцио Катоне было начато строительство Итальянской Национальной Обсерватории. В 1941 г. на заводе Цейса в Йене были изготовлены павильоны, а в 1944 г. – сами телескопы. Однако из-за капитуляции Италии и Германии в войне телескопы были вывезены с завода Цейса в счет репараций и оказались в Пулковской обсерватории, в КраО и Бюракане. Возможно, что Цейсовский коронограф Кисловодской Горной станции также принадлежит к этой партии телескопов предназначенных для обсерватории Монте Порцио Катоне.

1. Введение

В начале мая 1938 г. Адольф Гитлер приехал с государственным визитом в Италию. Во время торжеств в Палаццо Венеции в Риме он с большой помпой объявил о том, что в знак дружбы с дуче он дарит итальянскому народу оборудование для астрономической обсерватории по поводу 300-летия со дня смерти Галилео Галилея. Это



Рис. 1. «Дискобол», проданный Гитлеру за 5 млн. лир в мае 1938 г.

оборудование включало несколько больших телескопов, павильоны для них и вспомогательные инструменты [1]. Это все должно было производиться на заводе Цейса в Германии.

В качестве ответного жеста Муссолини, несмотря на протесты итальянской общественности, приказал продать Гитлеру национальное достояние Италии – римскую копию скульптуры «Дискобол Ланчелотти» (рис. 1) работы знаменитого греческого ваятеля Мирона [2]. После войны статуя была найдена работниками Комиссии по реституции культурных ценностей и возвращена в Италию. Теперь ее можно увидеть в Национальном Римском музее.

2. Новая обсерватория для подарка фюрера

В 20 км от Рима в местечке Монте Порцио Катоне в 1938 г. было начато строительство новой Обсерватории, *Osservatorio Astronomico nazionale del Tuscolo*, в которой должен был разместиться подарок Гитлера. Предполагалось, что эта обсерватория будет самой хорошо оснащенной в Европе, а может быть, и в мире. Директором будущей обсерватории Муссолини назначил проф. Эмилио Бьянки, а после его смерти в 1941 г. - проф. Джорджо Абетти. Несмотря на покровительство дуче, строительство шло медленно и закончилось уже много позже окончания войны. Сейчас здание этой обсерватории принадлежит Римской обсерватории и используется для дидактических целей и теоретических исследований.

Оборудование для обсерватории согласно Бьянки [1], должно было быть следующим: 26-дюймовый рефрактор (650 мм), а также ~15-метровый купол для него с подъемным полом и соответствующим электрооборудованием; астрограф с одним визуальным объективом и двумя 16-дюймовыми фотографическими; 49-дюймовый (124 см) рефлектор новой конструкции с широким полем зрения. Вспомогательное оборудование включало транзитный инструмент нового типа, микрофотометр, аппараты для измерения фотографических пластинок, компаратор и метровую линзу.

3. Приключения куполов для телескопов

Известный датско-американский астроном Джеральд Куипер летом 1945 г. посетил все немецкие обсерватории и издал обзор состояния их дел во время войны [3]. В комбинации со сведениями, изложенными в [2], вырисовывается следующая картина. В 1941 г. на заводе Цейса в Йене были изготовлены три купола для телескопов. В 1942 г. они были отправлены в Италию в сопровождении трех немецких специалистов по их монтажу. К лету 1943 г. они были почти смонтированы.

Но именно в это время, 25 июля 1943 г., совет итальянской фашистской партии смещает Муссолини. 8 сентября 1943 г. новое правительство капитулирует перед Союзниками. Германия захватывает контроль над Римом и северной Италией. И уже в декабре 1943 г. немцы демонтируют купола, вывозят их в Германию на завод Цейса и перераспределяют между немецкими обсерваториями [3]. В частности, 15-метровый купол для большого рефрактора отправился в Институт им. Фраунгофера (астрономическая станция Шауинсланд), а павильон для астрографа – в Потсдамскую обсерваторию.

4. Судьба телескопов в 1938–1945 гг.

Телескопы были готовы к началу 1944 г. Но из-за изменившейся военно-политической ситуации они не были оплачены «третьим рейхом» и не отправились в Италию, а были перераспределены между немецкими обсерваториями [3]. Купола и вспомогательное оборудование должны были получить Институт Фраунгофера, Потсдамская и Гамбургская обсерватории. Неизвестно точно, какое оборудование успели вывезти из Йены в обсерватории, однако большие телескопы оставались на заводе Цейса до конца войны. Согласно П.П. Добронравину [4], он обнаружил там в 1945 г. четыре телескопа, которые, как ему сказали, были предназначены для обсерватории Муссолини: 26" Рефрактор, двойной 16" Астрограф, метровый Телескоп Шмидта и Коронаграф. Все телескопы кроме Шмидта были практически готовы.

Различные источники [1–4 и др.] упоминают различные инструменты, которые составляли подарок Гитлера для Муссолини. Списки телескопов и их размеры менялись в литературе, опубликованной в течение 1938–1945 гг. Наш анализ показал, что первые три телескопа из списка Добронравина [4] можно соотнести с первоначальным списком Бьянки, приведенном в [1] и списком Куипера [3].

Коронаграфа нет в предыдущих перечнях инструментов. Но надо иметь в виду, что первоначальный список, составленный Бьянки, критиковался коллегами за отсутствие в нем современного оборудования, в частности, солнечного [3]. Второй директор обсерватории Абетти был экспертом в области солнечной физики. Он построил в 1925 г. первую в Европе солнечную башню, был руководителем экспедиции в Сибирь на солнечное затмение в 1936 г. Во время войны он был в тесном контакте с Муссолини и заводом Цейса по поводу различных технико-экономических аспектов строительства обсерватории. Возможно, он добавил коронаграф к списку необходимых для обсерватории телескопов. Но никаких документов по этому поводу мы не нашли.

В Потсдаме на «конференции победителей» в июле 1945 г. на Германию наложили репарации. Четыре больших телескопа в счет репараций были вывезены с завода Цейса в СССР.

5. После войны

В 1945 г. вывезенные из Германии цейсовские телескопы были отправлены на ЛОМО для проверки наличия узлов, для доводки и дальнейшего распределения по обсерваториям. 26" Рефрактор и коронограф были переданы Пулковской обсерватории. Рефрактор с 1857 г. и до сих пор является основным инструментом ГАО. Коронограф установили на горной станции в Кисловодске, которая и была построена для функционирования этого телескопа. Двойной астрограф отправился в Крымскую Астрофизическую обсерваторию, а 1-метровый Шмидт – в Бюраканскую (рис. 2–3). Поскольку метровой телескоп Шмидта на заводе Цейса находился на начальной стадии изготовления, продолжение его конструкции происходило на ЛОМО. Несмотря на то, что часть оборудования и инженерно-технического персонала с завода Цейса была депортирована на ЛОМО, работа шла медленно и продолжалась ≈ 15 лет. Телескоп Шмидта был установлен в Бюракане в 1960 г. [5].

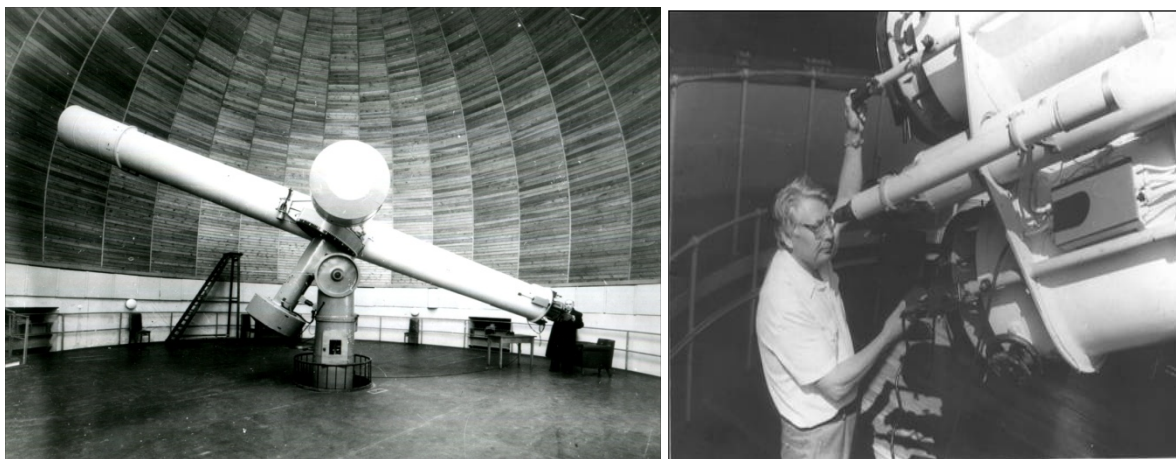


Рис. 2. Рефрактор в Пулкове, наблюдатель А. Дейч (слева); двойной астрограф в КраО, наблюдатель Н. Черных (справа).



Рис. 3. Телескоп Шмидта в Бюракане (слева); возможный член группы «телескопов Муссолини» коронограф Кисловодской Горной станции (справа).

6. Заключение

История «телескопов Муссолини» началась перед второй мировой войной в 1938 г. по воле двух диктаторов – Гитлера и Муссолини. Капитуляция Италии положила конец надеждам оснастить новую обсерваторию Монте Порцио Катоне Цейсовскими телескопами. Из-за поражения Германии во второй мировой войне телескопы не попали также и в немецкие астрономические учреждения, а оказались в обсерваториях Советского Союза.

В конце 90-х произошло событие, которое может служить жизнеутверждающим финалом этой драматической истории. В 1995 г. ЛОМО изготовил свой последний большой телескоп АЗТ-24 для Пулковской обсерватории, но в 1995 г. он был отправлен в Италию в рамках Российско-Итальянского проекта. Этот телескоп установлен в Римской обсерватории (на горной станции *Campo Imperatore*) [6].

Литература

1. *Bianchi E.* 19 Novembre 1938, Il nuovo Osservatorio Astronomico nazionale del Tuscolo a Roma, Rivista di Fis Mat e Sc Nat. Anno 13, Ser II, 1939.
2. *Strollo R.M.* (contributi di C. Baldoni, L. Donato, A. Ledda, F. Lucchini con un saggio di D. Maestri), L'Osservatorio Astronomico del Tuscolo. Rilevamento e progetti, in Quaderni di Architettura dell' Area Tuscolana – II. 2008. Roma, Aracne, p. 500, 2008.
3. *Kuiper, G.P.* German astronomy during the war. Popular Astron., 54, p.263, 1946.
4. *Добронравин П.П.* Из истории Крымской астрофизической обсерватории. Симферополь. 2008.
5. *Harper W.E.* A new Italian research observatory. Notes and Queries - Notes from the Dominion Astrophysical Observatory. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada. Vol. 33, p. 226, 1939.
6. *Амбарцумян В.А.* Эпизоды жизни. Ереван. Ар. Акад. Наук. 2000.
7. *Buonanno R.* Il Cielo Sopra Roma. Springer-Verlag, Italia, Milano, 204 p, 2008.

A STORY OF NAZI GIFT TO ITALIAN ASTRONOMY: “MUSSOLINI TELESCOPES”

Ptitsyna N.G.¹, Altamore A.²

¹*SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russia*

²*Roma-Tre University, Rome, Italy*

This story began in 1938, when Hitler on the piazza Venezia in Rome announced that he would present to Italian people in the face of Mussolini scientific equipment for an astronomical observatory. The occasion was the 300th anniversary of Galileo's death. This equipment comprised a number of big telescopes, domes and auxiliary instruments. It began construction of the Italian National Observatory in Monte Porzio Catone located 20 km from Rome to house this gift. In 1941 in the Zeiss factory in Jena three domes for which the Third Reich payed, were manufactured, sent to Italy and partly mounted. Telescopes were ready in 1944. We consider dramatic turns in the history of domes and telescopes connected with the course of the Second World War. In 1945 the “Mussolini telescopes” were transported from Germany to LOMO in Leningrad as war reparations, and later they were distributed among Pulkovo, Crimean and Byurakan observatories. Arguments in favor that the coronagraph at Kislovodsk Mountain Station could belong to the group of telescopes for the Monte Porzio Observatory are presented.

АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ЭКСПЕДИЦИИ РАМЗАЯ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Смирнов С.С.

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

Почти до самого конца XIX века не существовало точных карт центральной части Кольского полуострова. Это было крупнейшее белое пятно на карте Европы. Ситуация изменилась к лучшему только после серии экспедиций под руководством Вильгельма Рамзая. Первая экспедиция была снаряжена в 1887 г. Финляндским Обществом исследователей фауны и флоры при содействии Императорского Александровского университета. Участники экспедиции пересекли Кольский полуостров с северо-запада на юго-восток, исследуя его геоморфологию, геологию, климат, растительность и животный мир. Значительны результаты экспедиции в картографировании края. Рамзай составил первую подробную карту Хибино-Ловозерского горного массива, Линден – реки Ноты и Нотозера, Эдгрен – Умбозера. Геодезист и топограф Альфред Густав Петрелиус выполнил особенно большие топографические, картографические и астрономо-геодезические работы. Составил карты Кольского полуострова и впервые озера Имандра, определил координаты десятков астрономических пунктов. Среди экспедиционных инструментов был призмозеркальный круг Пистора. К тому времени эти приборы были вытеснены из точных геодезических работ появившимися еще в XVIII веке теодолитами.

100 лет назад в труднейших условиях Мировой войны был основан город Мурманск с незамерзающим морским портом и построена железная дорога к нему. Между тем, за 30 лет до этого не было даже точных географических карт центральной части Кольского полуострова. Просматривая старинные карты, находишь лишь полуфантастические детали. Заметный шаг в ликвидации этого последнего белого пятна на карте Европы был сделан благодаря экспедициям под руководством Вильгельма Рамзая с 1887 по 1914 г.



Рис. 1. Вильгельм Рамзай (1865–1928).

В январе 2015 г. исполнилось 150 лет со дня рождения В. Рамзая. Он родился на юге Великого княжества Финляндского, входившего в состав Российской империи [1].

Экспедиция 1887 г. на Кольский полуостров была снаряжена по инициативе профессора орнитолога Юхана Пальмена (1845–1919) Обществом исследователей финской фауны и флоры при содействии Императорского Александровского университета в Гельсингфорсе. В составе первой большой научной экспедиции в Русскую Лапландию

были геологи В. Рамзай и В. Гакман, геодезист и картограф А. Петрелиус, зоологи Ю. Пальмен, К. Эдгрэн и Р. Энвальд, ботаники О. Чильман и В. Бротериус и др. [5].

База экспедиции находилась в Коле, откуда основная группа двинулась к реке Вороньей и оттуда в Ловозеро. Был обнаружен неизвестный европейским географам горный массив Ловозерских тундр (Луяврурт). Затем часть экспедиции (Рамзай, Гакман) через Воронью и Йоканьгу отправилась к мысу Святой Нос, а другая часть (Пальмен, Петрелиус) достигла реки Поной и оттуда спустилась к горлу Белого моря.

Рамзай подробно описал нефелиновые сиениты и характер оледенения Ловозерских тундр. Открытие щелочного массива Луяврурт привлекло внимание Рамзая к соседнему Хибинскому массиву. За два полевых сезона 1891 и 1892 гг. Рамзай, Гакман, Петрелиус, Чильман пересекли Хибины в нескольких направлениях, составили карту района, собрали сведения о его геологии, петрографии и минералогии [3].

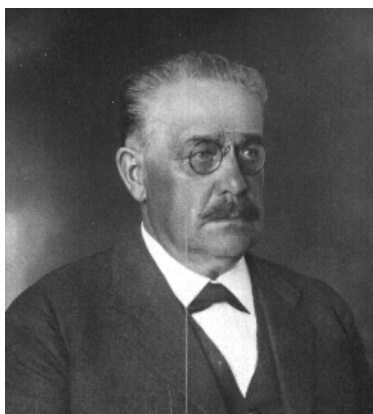


Рис. 2. Альфред Густав Петрелиус.

Значительны результаты экспедиции в картографировании края. Картограф и геодезист Альфред Петрелиус составил карты Кольского полуострова и впервые – озера Имандра, выполнил огромный объем топографических работ на трассе от Кольского залива до устья реки Поной, определил координаты многочисленных астрономических пунктов и высоты главных вершин Хибин. По результатам съемок 1887–1892 годов создается первая подробная карта Хибино-Ловозерского горного массива в масштабе 1:200000 с отсчетом долгот от меридиана о. Ферро. На итоговых картах использовались также и другие масштабы, например, 1:300000 (3 км в 1 см) и 1:2100000 (50 верст в 1 дюйме) [2]. Линден выполнил картографирование реки Ноты и Нотозера, Эдгрэн – Умбозера. Заслуженным подтверждением высокого качества этих работ являются говорящие географические названия **Перевал и Ущелье Рамзая, Западный и Восточный перевалы, Гора и Ручей Петрелиуса**.

В результате экспедиций Рамзая были составлены географические и геологические карты, послужившие основой для экспедиций академика А.Е. Ферсмана в 1920–30-х годах [3]. Тем удивительнее, что имена Петрелиуса и Рамзая не упоминаются в основных книгах по истории геодезии и картографии в России [4, 8]. Вообще экспедиция Рамзая до сих пор мало изучена из-за труднодоступности первоисточников и отсутствия их переводов с финского и шведского языков.

Так, статья Википедии об астрономе и картографе экспедиции Петрелиусе даже не содержит его фотографии. Альфред Петрелиус родился 26.6.1863 Savonlinnassa, к. 6.6.1931. 26 июня 1863 г. в Савонлинне, окончил колледж в 1881 г. Степень доктора философии получил в 1888 г. по специальности астрономия. Преподавал в Политехническом институте на кафедре геодезии с 1890 г., профессор Технологического университета в Хельсинки (1908–1928). Умер 6 июня 1931 г.

На одной из экспедиционных фотографий (рис. 3) можно видеть, как Петрелиус определяет высоту Солнца с помощью ныне малоизвестного инструмента – призмозеркального круга Пистора. Его изобрел выдающийся механик Карл Пистор (1778–1847), основатель мастерской астрономических инструментов в Берлине, известной, как фирма «Пистор и Мартинс».



Рис. 3. Петрелиус проводит астрономическое определение на Кольском полуострове.

В отличие от секстантов и октантов круг Пистора имеет круговой лимб и алидаду с двумя верньерами, что повышает точность отсчета по сравнению с секстантом. В центре алидады находится перпендикулярное плоское зеркало, вращающееся вместе с алидадой и изменяющее направление отраженных от него лучей. Это зеркало играет роль подвижного зеркала секстанта. Большого применения призмозеркальный круг не получил ни в морской навигации, ни в геодезических работах, не выдержав конкуренции с секстантами и теодолитами.

Астрономisch bestimmte Punkte:		67° 30'
☉	Polhöhe	Länge östlich von Ferro
Naonjock	67° 59' 3"	50° 58' 22"
Kunjavz	67° 54' 30"	51° 41' 44"
Mys Vuooki	67° 47' 4"	50° 53' 6"
Tuohluht	67° 45' 34"	51° 50' 45"
Vudjavi	67° 37' 33"	51° 19' 27"
Seitnuol	67° 36' 58"	50° 59' 51"
Jokastrov	67° 36' 5"	50° 42' 24"
Saasheika	67° 28' 20"	50° 11' 26"
Kantalahti	67° 8' 5"	50° 6' 2"
51°40'		

Рис. 4. Широта и долгота (от меридиана Ферро) астрономических пунктов, определенных А. Петрелиусом в районе Хибин.

Петрелиус приводит полученные им координаты астрономических пунктов с точностью до 1" (рис. 4). Чтобы пересчитать долготы от меридиана острова Ферро к современному Гринвичу, нужно из них вычесть 17°39'51".

В 1886 г. Петрелиус через полвека после градусных измерений финляндского участка Дуги Струве отыскивал на картах и на местности пункты, где проводились измерения [1]. Спустя почти 130 лет после первой экспедиции Рамзая интересно найти в Хибинах пункты наблюдений Петрелиуса и узнать, какова была реальная точность его

астрономо-геодезических определений. В последние годы удивительный мир горного комплекса Хибино-Ловозерских тундр и историю его освоения исследует Научно-поисковая экспедиция Астрономо-геодезического объединения России по изучению Кольского полуострова [6, 7].

Основными задачами полевых сезонов 2007–2015 годов были:

1. Реконструкция возможных древних астрономо-геодезических определений.
2. Знакомство с геоморфологией Хибино-Ловозерского массива.
3. Изучение роли мегалитов в ориентировании на местности.
4. Содействие охране уникальных природных комплексов Северо-Запада России.

Хорошим дополнением этой программы будет поиск астрономических пунктов, определенных на Кольской земле во время экспедиций под руководством В. Рамзая.

Благодарности

Автор благодарит А.В. Крюндаля за консультации и выражает глубокую признательность А.В. Грубе, М.А. Ершовой, С.В. Коржевской и Н.О. Миллер за участие в экспедициях Астрономо-геодезического объединения России по маршрутам В. Рамзая и А. Петрелиуса.

Литература

1. *Боргстрем Л.Х.* Вильгельм Рамзай. Воспоминания. – Хельсингфорс, 1929.
2. Земля ТРЕ. Историко-краеведческий альманах. // Гл. редактор *В.А. Лихачев*. – Ревда, 2013.
3. Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды II Ферсмановской научной сессии Кольского отделения Российского минералогического общества, посвященной 140-летию со дня рождения В. Рамзая. Апатиты, 18–19 апреля 2005 г. / Научный ред. *Ю.Л. Войтеховский, А.В. Волошин, О.Б. Дудкин*. – Апатиты: Изд-во “К & М”, 2005.
4. *Новокшанова-Соколовская З.К.* Картографические и геодезические работы в России в XIX–начале XX в. // М.: Наука, 1967.
5. *Сорокажердьев В.В.* Рамзай и его спутники на Кольском полуострове // Полярная правда. 1997, <http://www.m51.hotbox.ru/index.html>.
6. *Смирнов С.С.* 125 лет открытия Луяврурта и определения первых астропунктов в центральной части Кольского полуострова // Доклады в РГО и ГАО РАН, 2012.
7. *Смирнов С.С.* Альфред Петрелиус и определение первых астрономических пунктов в центральной части Кольского полуострова // Наука и техника: Вопросы истории и теории. Выпуск XXIX. СПб филиал ИИЕТ РАН, 2013, с. 198.
8. *Хренов Л.С.* Хронология отечественной геодезии с древнейших времен и до наших дней // ГАО АН СССР, ВАГО, Л., 1987.

ASTRONOMICAL AND GEODETIC WORKS OF RAMSAY EXPEDITION ON KOLA PENINSULA

Smirnov S.S.

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

Article is devoted to useful investigation of Kola Peninsula by expeditions of *Societas pro fauna et flora fennica* (Helsingfors) in 1887–1914, headed by Wilhelm Ramsay. The first maps of Umptek and Lujavr-Urt were created by geodesist and cartographer Alfred Gustav Petrelius, later a professor in the Helsinki Technical University. Petrelius measured latitudes and longitudes of dozens of points by means of astronomical observations.

ГОРНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ ГАО РАН. ЭПОХА СТАНОВЛЕНИЯ

Макарова В.В.

Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

*Посвящается 100-летию со дня рождения
замечательного астронома-солнечника,
доктора физ.-мат. наук
Мстислава Николаевича Гневышева*



В 2014 году исполнилось 100 лет (2 мая 1914 – 29 января 1992) выдающемуся ученому и человеку Мстиславу Николаевичу Гневышеву и 66 лет его реализованной мечте – Горной астрономической станции, которую он создал вопреки скептицизму соратников и огромным трудностям.

Еще в школьные годы он увлекался астрономией, сам мастерил телескоп. В 1938 году окончил Ленинградский государственный университет, одновременно работал в Главной геофизической обсерватории Гидрометслужбы СССР, а с 1936 года – в Пулковской обсерватории. Во время Великой Отечественной войны служил начальником гидрометеорологической службы при штабе 42-й армии Ленинградского фронта.

В 1938 году Мстиславу Николаевичу пришла идея создать солнечную обсерваторию нового типа, на которой можно одновременно и согласованно наблюдать за появлением и развитием активности во всех слоях атмосферы Солнца. И только в сентябре 1947 года он вместе с аспирантом Б.Н. Гиммельфарбом выехал на Северный Кавказ в поисках места. Это место было найдено в 28 км от Кисловодска, на высоте 2070 м на плато Шат Жат Маз.

Все физические и моральные трудности последующего периода точно и ярко описаны самим М.Н. Гневышевым в «Истории создания Горной станции».

19 июня 1969 года Отделение общей физики и астрономии АН СССР утвердило статус Горной станции, как научного отдела Главной (Пулковской) астрономической обсерватории АН СССР.

Воспоминания

О научной деятельности и об истории создания Горной станции много написано самим М.Н. Гневнышевым. Теперь же хотелось вспомнить о нем просто как о человеке, о круге его интересов, увлечений, ежедневной жизни.

Обращаясь в полувековое прошлое, не получается стройной картины, память выдает события не вдоль временной оси, скорее это есть мозаика происходящего через призму моего сознания и восприятия. Вероятно, снижается ценность таких воспоминаний, окрашенных сугубо субъективным мнением, но только таким образом всплывают десятилетия, проведенные на Горной станции.

В те годы (1959) станция воспринималась мной как некое таинственное место в горах, из-за тогдашней малодоступности и редкой посещаемости посторонними, необычностью работы, связанной с обращением к Солнцу.

Вокруг стояла ОГЛУШИТЕЛЬНАЯ тишина. Электричества не было, ветряк уже отменили, и только до десяти вечера работал небольшой дизель.

В это время на Кавказе работали несколько экспедиций по выбору места для строительства большого телескопа. Одна из них была на Горной станции, именно сюда и привела меня судьба. Это был август 1959 года.

Необходимо было трижды в определенные ночные сроки снимать на пластинки следы звезд для определения дрожания атмосферы.

В полной тьме приходилось пробираться по дорожке к телескопу (АЗТ-7), когда слышны только собственное дыхание и гулкие собственные шаги. Вся маленькая в те времена станция погружалась в сон, только освещалось керосиновой лампой окно кабинета М. Гневнышева, где он готовил к утру довольно многочисленную почту. Назавтра ее увозила машина, если таковая случалась.

Вскоре настоятельно было предложено являться утром в оптическую лабораторию и участвовать в наблюдениях Солнца наравне с другими сотрудниками. Ослушаться было нельзя. Пришлось осваивать наблюдения на телескопах, учиться составлению химических реактивов для обработки пластинок и пленок, входить в жизнь коллектива.

Тогда и произошло знакомство тесное с моими наставниками – Раисой Семеновной и Мстиславом Николаевичем Гневнышевыми.



Теперь хочется рассказать о том, какими были эти мужественные люди вначале своего творческого пути, об их жизни, радостях и тревогах.

Мои наставники

Мстислав Николаевич был, прежде всего, необыкновенным организатором, а если учесть то время и отсутствие всякого решения по поводу строительства обсерватории, то он был организатором высшей пробы.

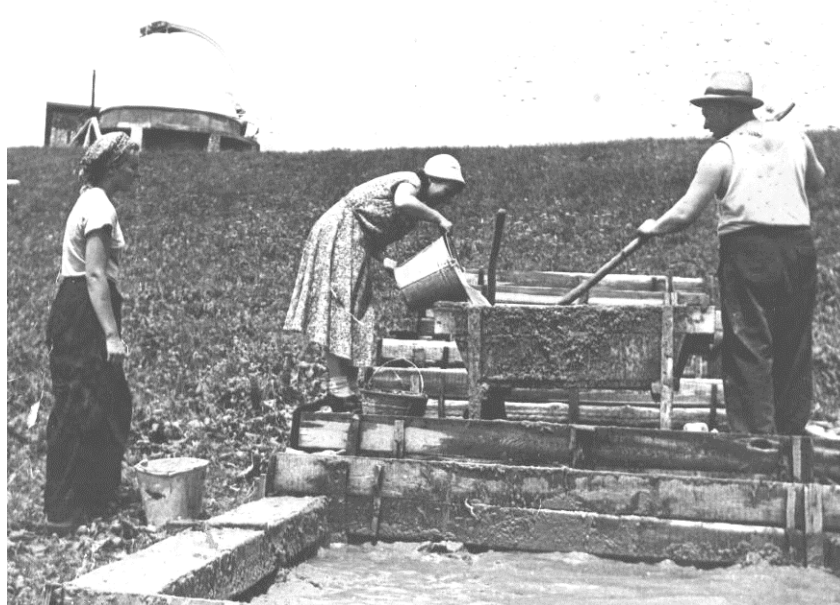
Его умение сходитья с людьми, умение обращаться с инструментами, самому участвовать во всех работах делали его незаменимым. Не сломаться (причины к тому были немалые) – было его девизом. Кстати сказать, так называемый «хозяйственный способ постройки», что означало строить своими руками, распространялся в равной мере и на него, а не только на сотрудников станции. И об этом много написал сам Мстислав Николаевич. Человеком он был редкой целеустремленности, самоотверженности и веры в свое дело. Позже он организовывал Службу Солнца.



М.Н. Гневышев. Первый колышек. 1948 год.

Это была огромная работа для объединения усилий многих учреждений, чтобы наблюдения велись по единой методике, по единой методике делались измерения, затем огромное количество данных собирались на станции и сводились воедино.

Трудолюбие и неугасимая энергия Мстислава Николаевича сделала его ведущим ученым-солнечником. Его научные достижения достаточно известны, но он также легко входил во все хозяйственные нужды станции, хотя всегда на станции был человек, управляющий хозяйством.



Строительство лестницы на научную площадку.
М.Н. Гневышев, Р.С. Гневышева, А.А. Шпитальная.



Подвоз камней для фундамента.

Мстислав Николаевич обладал искусством говорить: так ясно, доступно, просто рассказывать о сложных вещах было для него делом обычным. Слушать его было очень увлекательно. Когда он воспарял в своих рассказах, глаза его просто излучали свет и сам он преображался.

Он очень любил жизнь во всех ее проявлениях: прекрасно танцевал, обожал латиноамериканскую музыку.



М.Н. Гневывшев с мамой
Анфисой Васильевной.

Главной женщиной в его жизни была мама, Анфиса Васильевна, строгая женщина еще из 19 века. Несколько чопорная, строгая и властная, во всей ее осанке, тихом голосе сквозило достоинство и такт классной дамы.

Мстислав Николаевич нежно и трогательно любил ее, прислушивался к ее советам. С ней он вдруг становился маленьким ребенком, для нее же Славочка был самым лучшим человеком на всем свете. И это сочетание в двух фигурах двух эпох, нераздельно слитых, было удивительным явлением. В кабинете Гневывшева на тумбочке у изголовья всегда стоял портрет мамы.

Следует отметить, что М.Н. очень любил фотографировать пейзажи и людей, их быт, чему свидетельством являются огромное количество фотоальбомов, оставшихся в его кабинете на Горной станции. Он сам занимался проявлением пленок, затем печатал фотографии, так что оказалась вся его жизнь запечатленной в большом количестве снимков.

Он всегда привозил из поездок мелкую оптику, микроскопы, бинокли и пр. Это было его любимым хобби.

Любил он вкусную еду, потому женщины (Раиса Семеновна и наша повариха и домоправительница В.Н. Лифорова) частенько баловали его всякими вкусностями.

Вспоминается его умение радоваться: искренне, по-детски, как успехам в работе, так и простым жизненным обстоятельствам.

Но бывал он иногда, даже не в меру, строг.

Еще до моего появления на Горе (так ласково стали называть позднее Горную станцию) прошли практику Шпитальная А.А., Витинский Ю.И., Никольский Г.М., которые потом с благодарностью вспоминали время, проведенное на станции, и Мстислава Николаевича.

Всегда рядом, рядом и в горе, и в радости была его жена Раиса Семеновна.

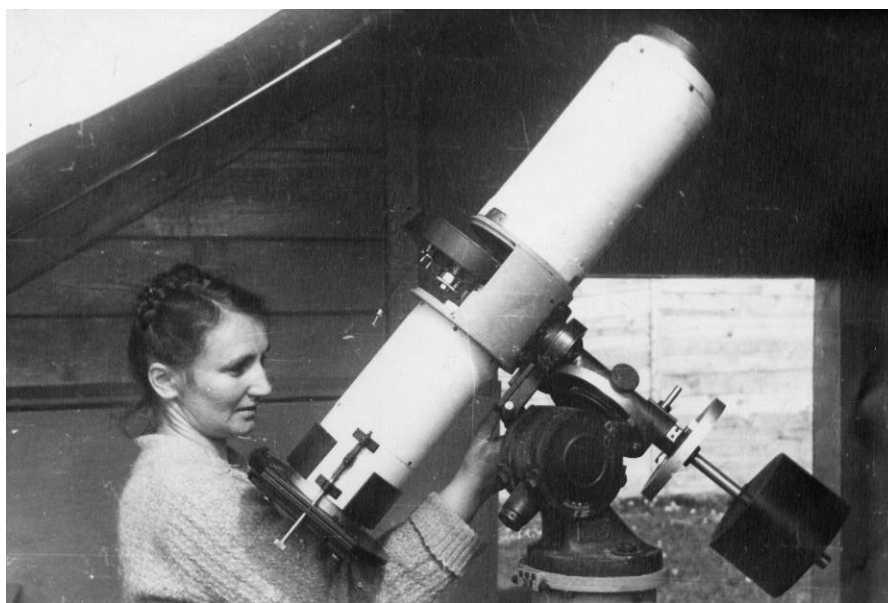
Раиса Семеновна, в девичестве Андреева, была маленькой, хрупкой женщиной, поразительной целеустремленности и цельности характера. Это только благодаря ее неукротимой энергии Мстиславу Николаевичу удалось преодолеть множество трудностей в самом начале существования станции. Главным качеством ее была ПРЕДАННОСТЬ, преданность их общему делу и мужу. Да, у нее был непростой характер, может быть, даже трудный, но все было во имя дела. Ее усилиями и трудом были получены первые снимки фотосферы, потом и короны Солнца. Именно Раиса Семеновна создавала все методики обработки снимков, постепенно получаемых на различных телескопах. Именно она создавала весь уклад и традиции жизни на Горной станции. Теперь, возможно, все это кажется таким неважным и мелким, но именно такими деталями создавался облик станции. Невозможно представить себе, чтобы кто-то вошел в лабораторию, не сменив обувь и без белого халата. Нам прививалось понятие, что в павильонах телескопов должна быть идеальная чистота, до блеска, без единой пылинки. И так и было.



Р.С. Гневыхева. 1949 год.

Отношение к работе воспитывалось ею требовательно и взыскательно. В то время в лаборатории все сотрудники сидели за одним огромным столом, сработанным нашим столяром (стол, кстати, красиво пах свежим деревом), вдоль стен по периметру стояли микрофотометр для обработки спектров короны, докumatop для измерения спектрограмм, прибор для измерения координат и площадей пятен, копировальный столик.

Конечно, с позиции сегодняшнего времени, работа могла показаться рутинной, но именно тогда прививались кропотливость и добросовестность, которые должны быть присущи наблюдателю.



Р.С. Гневышева. 1949 год.

Позже, когда меня обучали тщательности обработки фотосферы, частенько приходилось проливать слезы после перечеркнутых моих измерений с пометкой «БСК» (что означало «бред сивой кобыль»), приходилось начинать снова и, может быть, не раз, пока результаты устраивали Раису Семеновну. В итоге, спустя годы, я испытываю безмерную благодарность к этой женщине. Эта женщина успевала все: проследить, чтобы не уничтожился ни единый цветок на территории, не пропущена ли «дырка» в облаках, чтобы сделать снимок Солнца, не допустить по небрежности ошибки в переписывании таблиц данных, именно она организовала многократные дублирующие считывания данных.

Часто на кухне вечерами при керосиновой лампе читали вслух книги, т.е. читала она, а мы, все живущие в одном доме, были слушателями.

Не забывала она побаловать своего Славочку эклерами, испеченными в духовке огромной плиты на дровах и угле, проверить повязан ли шарф у него.

Конечно, суровые времена были тогда на станции. Было сказано нам молодым, что здесь нельзя болеть и нельзя иметь детей. Обращая взгляд в прошлое, понятно становится, что подобное звучит как дикость. В памяти возникает ситуация, когда сама Раиса Семеновна сильно заболела, температура зашкаливала, и тогда к ее постели принесли прибор для измерения площадей и координат пятен, дабы лежа она обработала снимки за данный день.

Жизнь этих людей была так тесно переплетена, что невозможно их разделить и могло быть так, что без подвижнической помощи Р.С. Гневышевой своему мужу многое могло в общем их деле просто не состояться.

Есть еще тайная деятельность этой замечательной женщины, отдавшей жизнь на алтарь воздвижения станции. В далекие времена, когда клевета была очень действенной, ей удалось многих людей спасти от последствий наветов.

Не забыта ею была и научная работа, кроме ежедневной Службы Солнца. Никакие жизненные трудности не могли сломить эту женщину. Можно только догадывать-

ся, что было в ее сердце, когда пришлось оставить малолетнего сына на попечение бабушки и уехать в горы.

Немного о том, как была выстроена жизнь и работа на Горной станции в 60–70-е годы. Самое главное, что осталось в сознании: станция была одной семьей. Конечно, бывали и ссоры, и обиды, но как-то это было не зло, поверхностно.

Каждый человек в условиях отдаленности (тогда отдаленность была реальной) много значил, потому что в малом коллективе один человек – очень много. Все на виду, все выпукло, все значительно.

В работе не могло быть такой причины, по которой можно было пропустить день наблюдений, это было немыслимо! С восходом Солнца начинались наблюдения на всех телескопах, снимки фотосферы делались несколько раз с тем, чтобы затем выбрать фотогелиограмму лучшего качества для дальнейшей обработки.

Наблюдения короны Солнца были самыми длительными, так как надо было сделать 72 кадра через 5 градусов вдоль лимба. Это необходимо было сделать для одной корональной линии 5303А и то же самое для линии 6374А. Часто съемка продолжалась в течение целого дня, когда надо было «ловить» просветы между облаками. Аппарат для корональных наблюдений был сделан вручную нашим механиком Василием Ильичом. Удивительный и славный был человек. Совсем немногословный, интеллигентный, добрейшей души старичок с постоянной лупой на лбу. Так и остался в памяти, постоянно согбенный над столом с приборами.

После окончания наблюдений начинался процесс проявления пластинок и пленок и дальнейшей фотообработки. Для этой цели препаратор заранее готовил растворы различных проявителей и закрепителей. Для корональных пленок проявитель должен был быть ежедневно свежим, вновь приготовленным. Для других наблюдений позволялось использовать химические растворы в течение двух-трех дней. Поскольку вода была привозная, а в первые годы ее привозили на лошадях, то для промывки невозможно было использовать проточную воду (как положено), просто в бачках и кюветах ее меняли каждые 5–10 минут в течение часа.



Подвоз воды в бочках на лошадях.

Делалось все четко, быстро, так как необходимо было все снимки еще высушить, после чего наблюдатели приступали к первичной обработке, чтобы в 12 часов вначале по радию (в эфире звучали позывные «РЕЕЛ» я «РЕЕК», перехожу на прием), а позже по телефону передать данные о состоянии Солнца на базу в Кисловодск для дальнейшей передачи телеграммами по почте. После перерыва на обед начиналась детальная обработка снимков Солнца, и завершалось все составлением таблиц и карт солнечной

активности. Данные по короне, пятнам, протуберанцам, флоккулам, магнитным полям должны были быть непременно представлены в полном объеме в день наблюдений. Именно в этот день, а не завтра. В последующие дни месяца делались только уточнения.

Измерения координат и площадей пятен и факелов, фотометрия снимков солнечной короны делались в «две руки»: измеряющий и записывающий за ним сотрудник.

Все наши лакуны фотосферы заполнялись снимками других обсерваторий (Киев, Львов, Ташкент, Иркутск, Уссурийск, Шемаха и др., включая демократические страны).

Полученные снимки (стеклянные пластинки) обрабатывались на станции, а затем многочисленные деревянные ящички с упакованными в них пластинками отправлялись во все веси. Все таблицы короны, фотосферы, волокон, протуберанцев, кальциевых флоккул много раз вручную размножались (для этого были специально два человека), перепроверялись путем считывания – такой ритуальный хор стоял!

И только затем все данные уходили адресатам во все концы от Тикси до Чехии. И вся эта отлаженная деятельность, конечно, была организована Мстиславом Николаевичем и воплощенная его женой и нами.



М.Н. Гневывшев за микрофотометром.

Да, в те непростые времена М.Н. много ездил в командировки и экспедиции в другие страны. Вскоре он приобрел множество друзей и знакомых среди ученых зарубежных и наших, везде прославляя (не побоюсь пафоса) Горную станцию. Потом, когда вполне была налажена работа на всех телескопах, когда наблюдения позволяли представить общую картину активности на Солнце ежедневно, стал формироваться архив данных. Понемногу налаживался быт, на Гору стали приезжать ученые и студенты. Кто-то – для проведения собственных наблюдений, кто-то – чтобы использовать уже имеющиеся данные.

В летние месяцы несколько часов все сотрудники должны были работать на заготовке сена, так как необходимо было какое-то количество его сдать в ближайший совхоз, но еще сделать запас для имевшихся на станции двух коров и лошадей. Коровы обеспечивали наше питание, которое почти полностью состояло из молочных продуктов.

Позже в Кисловодске жила женщина, которой по радиации передавались просьбы, и иногда она пересылала на Гору продукты, а заодно и карандаши, ручки, чернила и тетрадки.

Предтечей моего появления на Горной станции была Александра Альфредовна Шпитальная, Шурочка, так ее звали все. Очень устремленный, сердечный, влюбленный в профессию был этот человек. Она была великолепный пианист. Когда порой мир станции суживался до одного помещения, так как низкая облачность обволакивала все, в зале зажигались керосиновые лампы, все рассаживались на диванчике, и начиналась музыка, живые ее звуки уносили сознание в беспредельность, выше всех забот и тревог. Это были удивительные часы! Влияние этих минут на мое юное сознание было велико!



В.И. Макаров. 1960 год.

3 сентября 1959 года на Гору приехал Валентин Иванович Макаров после окончания Ленинградского университета, приехал по собственной просьбе. Этаким юноша из другого мира, обремененный идеями тогдашней молодежи 60-х годов. Артистичный, с огромной рыжей шевелюрой, жизнерадостный, он рассказывал нам о той неведомой и далекой жизни, даже не глядя на меня и А. Шпитальную, сидящих в полном оцепенении от восторга.

Он стал учеником, а потом и продолжателем дела М.Н. Гневышева. Только теперь Мстислав Николаевич и Раиса Семеновна смогли спокойно отлучаться со станции на продолжительное время. Горная станция находилась уже в умелых руках.

В первый же месяц нашего пребывания на станции произошли два события, когда Макаров, Шпитальная и я вначале заблудились в горах, и нашли нас благодаря опытности тогдашнего шофера И.П. Терещенко. Нашли и привезли совер-

шенно оборванных и замерзших (в эту ночь выпал первый снег). На этом дело не закончилось. Решили мы в том же составе на лошадях отправиться в театр 7 ноября. Конюх был в городе, потому запрягал лошадей и правил ими Валентин. Позже оказалось, что из трех имевшихся лошадей именно эти две никогда не ходили вместе в упряжке, потому они стали тянуть в разные стороны, но это нас не остановило. И когда начался крутой спуск, лошади просто понесли телегу. Первой под копыта лошадей и телегу свалилась я. Остальные постепенно сползали и рассыпались по дороге. Так печально закончилась эпопея с театром. Через несколько дней пришла телеграмма от М.Н., запрещающая сотрудникам выходить за ворота станции.

Непременной «внеслужебной» обязанностью были посещения сеансов кино, которые стали проводить, когда построили клуб. Необходимо было собрать 2 рубля за сеанс при стоимости билета 20 коп. Можно было не смотреть фильм, но отдать свои 20 копеек – непременно.

Гораздо позже образовалась библиотека, которая состояла из значительного числа художественных книг, принадлежавших Гневышевым, а затем постоянно пополнялась периодической научной литературой. Каждый сотрудник обязан был быть зарегистрирован в картотеке библиотеки и систематически знакомиться с новинками научных журналов. Формальный подход не был допустим, ибо в любое время ненароком Мстислав Николаевич мог задать вопрос, касающийся этих самых новинок.

Шло время. В. Макаров усердно, с большим рвением стал заниматься научной работой, сочетая это занятие с ежедневными наблюдениями. Тогда и выяснилась проблема станции, а именно, замкнутый образ жизни. Не было возможности обсудить свои

идеи и результаты исследований, надо было посещать Пулково и другие научные сообщества. Стало ясно, что выезды со станции даже в родное Пулково не приветствуются. Данная ситуация однажды привела В.И. в отчаяние, и практически готовую кандидатскую диссертацию он сжег в печи, удалось, правда, втайне сохранить черновик.

Именно в это время появился на Горе Геннадий Михайлович Никольский со своей группой. Это стало как распахнутое окно в другой мир, мы увидели другие взаимоотношения, свободу в мыслях и действиях.

Вообще Г.М. Никольский был человек уникальный, невероятный, чудесный во всех жизненных проявлениях. Он сразу проникся тревогами В. Макарова и под напором его воли черновой вариант был извлечен, а затем и защита состоялась.



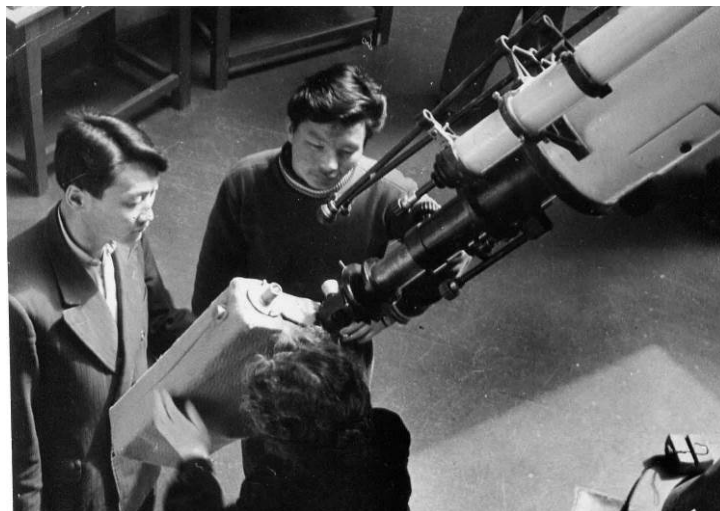
Праздник с детьми на Горной станции.

Жизнь менялась. Мстислав Николаевич, разъезжая по миру, пропагандировал Горную станцию, В.И. Макаров уже уверенно руководил ею, вначале как помощник, с 1985 года уже вполне официально. Число сотрудников станции увеличилось, в основном, жили семьями.

Много было посещений зарубежными учеными. Помню только самые яркие посещения. Таковыми были приезды на Гору Н. Zirin, J.M. Beckers, S. Koutshmy, G.L. Leroy, Нооя и многих других.



Иржи Лекса, супруги Зирины, Р.С. Гневыхева и А. Шпитальная.



Монгольские ученые наблюдают корону Солнца. 1975 год.

Неприменно хочется отметить замечательное качество Мстислава Николаевича – он был прост и доступен. К нему можно было обратиться с любым, даже незначительным вопросом или просьбой и быть уверенным, что тебя выслушают.

Так, нескольким людям он своим советом помог в критические моменты советом не принимать опрометчивых решений, которые могли резко изменить и сломать навсегда их жизнь.



М.Н. Гневышеву 70 лет.

Позже М.Н. Гневышева и Р.С. Гневышеву судьба развела по разным жизненным путям: у Мстислава Николаевича появилась другая жена, другие заботы и радости.

В последние годы он тяжело болел, с благодарностью вспоминается неоценимое участие в это время В.Н. Карпинского, его деятельная поддержка.



С 2000 года заведующим Горной станцией является доктор физико-математических наук Андрей Георгиевич Тлатов. Новый век! Новое тысячелетие! Новая Горная станция! Пришла цифровая съемка на всех телескопах и компьютерная обработка снимков Солнца.

Так началась НОВАЯ история Горной астрономической станции ГАО РАН.

*Устроителю и создателю горной станции, неумолимо труженику
Мстиславу Николаевичу Гневьшеву
сердечная благодарность от всех, помнящих его!*

СПИСОК АВТОРОВ

- Abrahamyan H.V.* 327
Авраменко А.Е. 11
Azatyun N.M. 327
Альтаморе А. 371
Амосов Ф.А. 17
Ананьевская Ю.К. 267
Андреасян А.Р. 271
Андреасян Р.Р. 271
Andreasyan H.R. 327
Андрук В.Н. 333, 339
Апелян А.А. 301
Баляев И.А. 301
Бахолдин А.В. 77
Бахтигараев Н.С. 33
Башакова Е.А. 175
Безменов И.В. 137
Бизуар К. 103
Биколова Д.А. 301
Вавилов Д.Е. 259
Vardanyan A.V. 327
Васильев А.А. 247
Васильев М.В. 163
Васильева Т.А. 195, 321
Виноградова О.Ю. 143
Виноградова Т.А. 169
Витязев В.В. 17, 23
Воротков М.В. 125
Gigoyan K.S. 327
Гламазда Д.В. 219
Головня В.В. 339
Горшанов Д.Л. 29, 175, 267
Горшков В.Л. 91, 97, 313
Gyulzadyan M.V. 327
Девяткин А.В. 175
Довгалец И.С. 183
Ершов В.Н. 175
Ершова А.П. 301
Железнов Н.Б. 259
Жуйко С.В. 277
Жучков Р.Я. 283
Зайцев А.В. 259
Захарова П.Е. 219
Зиновьев С.В. 175
Зотов Л.В. 103
Иванов А.В. 175
Иванова Т.В. 189
Измайлов И.С. 29, 71, 195, 301, 307
Йулдошев К.Х. 339
Казанцева Л.В. 333
Калиниченко О.А. 295
Карашевич С.В. 175
Каххаров Б.Б. 333, 339
Киселева Т.П. 71, 195
Кияева О.В. 283, 347
Князуян А.В. 327
Кондратьев Б.П. 201
Kostandyan G.R. 327
Кочетова О.М. 259
Кузнецов В.Б. 207, 213
Кузнецов Э.Д. 219, 241
Куликова А.М. 301
Куприянов В.В. 77, 175, 267
Кучай М.С. 149
Латыпов А.А. 339
Левитская Т.И. 353
Левкина П.А. 33
Левко Г.В. 77
Липовка А.А. 39
Липовка Н.М. 39
Лосовский Б.Я. 11
Львов В.Н. 77, 175
Ляшенко А.Ю. 175
Майгурова Н.В. 213
Макарова В.В. 381
Максимова Л.А. 301
Малкин З.М. 45, 49, 53, 109
Маркелов С.В. 77
Мартюшева А.А. 175
Медведев Ю.Д. 213
Мельников А.В. 175, 225
Mickaelian A.M. 327
Mikayelyan G.A. 327
Миллер Н.О. 113, 119, 125, 361
Мохнаткин А.В. 91, 313
Муминов М.М. 333, 339
Назаров С.В. 29
Нарижная Н.В. 59
Наумов К.Н. 175
Нефедьев Ю.А. 83
Nikoghosyan E.H. 327
Орлов В.В. 277, 283
Оськина К.И. 301

Павлов Д.А. 229
Паронян Г.М. 271
Пасынок С.Л. 131, 137, 155
Пашкевич В.В. 235
Рагопян Г.М. 327
Перминов А.С. 241
Петров Н.А. 247
Петров С.Д. 91, 313
Петрова С.Н. 175
Петюр В.В. 301
Пинигин Г.И. 367
Питьев Н.П. 183
Питьева Е.В. 65
Пожалова Ж.А. 367
Прудникова Е.Я. 361
Птицына Н.Г. 371
Романенко Л.Г. 289, 295
Рощина Е.А. 29, 71, 195, 301, 307, 321
Русов С.А. 175
Рыбин А.А. 149
Слесаренко В.Ю. 175
Смирнов С.С. 253, 377
Соков Е.Н. 175
Сокова И.А. 175
Соколов Л.Л. 247
Спиридонов Е.А. 143
Farmanyan S.V. 327
Khachatryan K.G. 327
Ховричев М.Ю. 301
Цветков А.С. 17, 23
Цекмейстер С.Д. 77, 175
Цуркис И.Я. 149
Цыба Е.Н. 137, 155
Чазов В.В. 33
Чернетенко Ю.А. 213, 259
Чубей М.С. 77
Чуркин К.О. 83
Широкова К.С. 277
Шор В.А. 259
Шуйгина Н.В. 163
Шум С.К. 103
Шумилов А.А. 301
Щербакова Н.В. 91, 97
Эгамбердиев Ш.А. 333, 339
Ягудина Э.И. 163

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ГЛАВНОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ
В ПУЛКОВЕ

№ 223

Труды Всероссийской астрометрической конференции
«ПУЛКОВО – 2015»

Ответственный редактор **А.В. Степанов**