

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ**

На правах рукописи

**ЧЕРНЕТЕНКО Юлия Андреевна**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
НЕКОТОРЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ  
ПОСТОЯННЫХ  
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ АСТЕРОИДОВ**

Специальность 01.03.01 - "Астрометрия и небесная механика"

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2008

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.В.Батраков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук	В.В.Бобылев
доктор физико-математических наук, профессор	Г.А.Красинский
доктор физико-математических наук	К.В.Куимов

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008\_\_ г. в \_\_\_ час. \_\_\_ мин.  
на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 в Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Ю.Д.Медведев

## 1. Общая характеристика работы

Настоящая работа имела своей первоначальной задачей подведение итогов нескольких международных наблюдательных программ избранных астероидов (ИА), последняя из которых закончилась в 2000 г. Важное отличие наблюдений, выполнявшихся в рамках этих программ, от других позиционных наблюдений астероидов состояло в том, что наблюдатели фиксировали номера опорных звезд и депенденсы. Эта информация должна была обеспечить достаточно точное приведение всех наблюдений в систему единого опорного каталога. В рамках этой задачи предполагалось приведение наблюдений в систему каталога PPM и определение ориентации системы координат каталога FK5 относительно динамической системы DE200/LE200 (Standish, 1990) (FK5-DE200). Большие надежды на получение по наблюдениям ИА, по сравнению с наблюдениями других тел Солнечной системы, более точных оценок параметров ориентации основывались на результатах моделирования и предполагаемых преимуществах наблюдений астероидов по сравнению с большими планетами, а именно, пренебрежимо малому эффекту фазы, большей точности наблюдений, покрытию большей части небесной сферы и возможности включать в качестве неизвестных систематические ошибки опорного каталога.

Полученные в 90-ые годы прошлого столетия по наблюдениям различных тел параметры ориентации (FK5-DE200) показали, что наблюдения ИА дают значения параметров, согласующиеся с результатами, полученными по наблюдениям других тел Солнечной системы, однако наблюдения ИА не имеют преимуществ по сравнению с наблюдениями других тел в смысле точности определения этих параметров. Стало ясно также, что рассогласование этих систем координат (параметры ориентации и скорости их изменения) невелико.

В этот же период времени произошло несколько важных событий, а именно:

1. Переход от наблюдений на фотографических пластинках к наблюдениям с ПЗС-приемниками, имевшими в то время небольшие размеры полей. Каталог PPM не мог обеспечить необходимое количество слабых опорных звезд, поэтому наблюдатели вынуждены были использовать менее точные каталоги, такие как GSC, и не могли обеспечить выполнение требований программы наблюдений ИА.
2. В результате успешного завершения миссии астрометрического спут-

ника Hipparcos (АСН) были получены звездные каталоги Hipparcos и Tycho (ESA, 1997), отнесенные к инерциальной системе координат (International Celestial Reference Frame (ICRF)).

3. В 1994 г. с использованием наблюдений РСДБ и результатов лазерной локации Луны получены (Folkner et al., 1994) параметры ориентации системы координат эфемерид DE200 относительно ICRF с точностью нескольких *mas* ( $1 \text{ mas} = 0.001''$ ). Такая точность не могла быть достигнута при использовании наземных позиционных наблюдений астероидов. Кроме того, оказалось, что рассогласование этих двух систем очень мало,  $\sim 14 \text{ mas}$ .
4. В программу наблюдений АСН входили наблюдения 48 астероидов для последующего определения параметров ориентации системы каталога Hipparcos относительно динамической системы DE200. Однако их обработка (Bougeard et al., 1996; Bougeard et al., 1997) показала наличие значительного, до  $\sim 10 \text{ mas/год}$ , вращения системы каталога Hipparcos. Это было объяснено ошибками наблюдений и/или их редукции, что также поставило под сомнение целесообразность использования наблюдений астероидов для решения такой задачи.

Связь динамических эфемерид с ICRF осуществляется в настоящее время непосредственно по РСДБ наблюдениям космических аппаратов. Полный набор этих наблюдений определяет ориентацию динамических эфемерид с ошибкой, меньшей нескольких десятых долей *mas* (Питьева, 2007). Необходимо отметить, однако, что относительно небольшой временной интервал этих наблюдений позволяет определить с высокой точностью только углы ориентации, т.е. предполагается, что они постоянны на всем рассматриваемом интервале.

С одной стороны, все эти обстоятельства свидетельствуют о том, что на современном этапе нет необходимости использовать наблюдения астероидов для решения задачи определения ориентации систем координат. С другой стороны, каждая из реализаций ICRF имеет свои ошибки. Так, при построении теорий движения больших планет и астероидов пока нельзя учесть влияние всех астероидов, звезды в каталогах имеют ошибки положений и собственных движений, а сама ориентация систем координат каталогов тоже может иметь ошибки. Поэтому задача определения параметров ориентации этих систем и особенно скоростей изменения параметров ориентации продолжает оставаться актуальной.

В связи с вышесказанным, задачи, поставленные в свое время перед программой наблюдений ИА, были пересмотрены, и в настоящей работе

рассматривается задача определения ориентации системы каталога Hipparcos по отношению к координатным системам эфемерид DE403/LE403 (Standish et al., 1995) и DE405/LE405 (Standish, 1998) с использованием высокоточных наблюдений астероидов, полученных в системе каталога Hipparcos. Для этого наблюдения 15 астероидов, полученные по программам наблюдений ИА на интервале 1949-1995, были приведены в систему каталога Hipparcos с помощью депенденсов. Этот ряд был дополнен наиболее точными на настоящее время наблюдениями 48 астероидов, наблюдавшихся АСН. На основе анализа точности современных наблюдений были отобраны наблюдения 116 астероидов двух обсерваторий 673 (Table Mountain Observatory, Wrightwood) и 689 (U.S. Naval Observatory, Flagstaff), в число которых входят общие с 15 ИА и 48 астероидами, наблюдавшимися АСН.

Для решения поставленной задачи рассмотрены различные составляющие модели движения и редукции наблюдений и оценено их влияние на точность вычисления эфемеридных положений астероида и сравнения их с наблюдаемыми положениями. Общее решение, основанное на более чем 50000 наблюдениях 116 астероидов на интервале 1947-2007, позволило определить искомые значения углов ориентации и скорости их изменения. Так, для параметров вращения системы каталога Hipparcos относительно системы координат DE403 и DE405 получены значения:  $\omega_x = 0.12 \pm 0.08 \text{ mas/год}$ ,  $\omega_y = 0.66 \pm 0.09 \text{ mas/год}$ ,  $\omega_z = -0.56 \pm 0.16 \text{ mas/год}$ . Возможной причиной этого вращения может быть особенность перехода от системы координат эфемерид DE200 к системе координат DE403, состоящая в предположении, что первая из этих координатных систем не имеет вращения относительно ICRF.

Следующая задача, которая была поставлена в настоящей работе, это определение массы Меркурия. В докосмическую эпоху ее значение определялось по тесным сближениям с этой большой планетой малых тел. Принятое Международным астрономическим союзом значение отношения массы Солнца,  $M_{Sun}$  к массе Меркурия,  $m_M$  (обратное значение массы Меркурия (ОЗММ)),  $6023600 \pm 250$ , было получено в 1987 г. (Anderson et al., 1987) из анализа наблюдений космического аппарата Mariner 10 во время сближений этого КА с Меркурием в 1974 и 1975 гг. и с тех пор не уточнялось. Предполагается, что оно будет уточнено в результате пролетов КА Messenger вблизи Меркурия в 2008 г. и в последующие годы. Так как орбиты многих астероидов находятся вблизи орбиты Меркурия, то представляет интерес оценка массы Меркурия по наблюдениям этих астероидов. Задача эта может быть поставлена и в связи с тем, что в

последние десятилетия значительно увеличилась интенсивность наблюдений астероидов, возросло количество вновь открываемых астероидов, произошло существенное повышение точности их наблюдений. Для ряда астероидов получены радарные наблюдения (РН), причем для некоторых астероидов РН получены в нескольких оппозициях.

Наличие РН в нескольких оппозициях позволяет получить из наблюдений величину ускорения, вызываемого эффектом Ярковского (Vokrouhlický et al., 2000), и оценить его влияние на определяемое значение массы Меркурия.

По оптическим и радарным наблюдениям 43 астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), получено ОЗММ, равное  $6023440 \pm 530$  и отличающееся от принятого (Anderson et al., 1987) менее, чем на  $1\sigma$ . Этот результат является независимым подтверждением значения, полученного в работе (Anderson et al., 1987) на основе другого наблюдательного материала. Ошибка определения ОЗММ по наблюдениям астероидов оказалась примерно в два раза больше ошибки принятого значения этой величины. В ближайшем будущем возможно дальнейшее уточнение этой оценки благодаря быстрому увеличению количества наблюдений уже известных астероидов и открытиям новых астероидов, наблюдения которых могут быть использованы для решения этой задачи.

### **Актуальность темы диссертации**

Однородные продолжительные ряды наблюдений, приведенные в систему современных точных каталогов, необходимы для решения многих задач, связанных с астероидами: планирование космических миссий, определение масс астероидов, уточнение согласованности динамической и звездной систем координат. Несмотря на высокую точность ( $< 1 \text{ mas}$ ) согласованности в настоящее время систем координат, продолжительные ряды наблюдений астероидов могут дать независимые оценки этих параметров и скоростей их изменения. Это тем более актуально, что с середины 90-ых годов не определялись соответствующие скорости изменения параметров ориентации. Сравнение результатов определений этих параметров по наблюдениям астероидам и по другим наблюдениям может дать ценную информацию о качестве наблюдений астероидов и о достаточности принятой модели движения и редукции наблюдений.

Принятое Международным астрономическим союзом значение отношения массы Солнца к массе Меркурия,  $6023600 \pm 250$ , было получено в 1987 г. из анализа наблюдений космического аппарата Mariner 10 во вре-

мя сближений этого КА с Меркурием в 1974 и 1975 гг. (Anderson et al., 1987) и с тех пор не уточнялось. Предполагается, что оно будет уточнено в результате сближений с Меркурием КА Messenger в 2008 г. и в последующие годы. Повышение точности оптических наблюдений астероидов, наличие радарных наблюдений и быстрое увеличение их количества позволяют ставить задачу определения массы Меркурия по наблюдениям этих тел.

### **Цели работы**

Основными целями настоящей работы являются:

1. Завершение программы наблюдений 15 избранных астероидов, в число задач которой входило приведение наблюдений в систему единого опорного каталога с помощью деппендсов. В качестве опорных каталогов в работе использовались каталоги PRM (был принят опорным в эпоху до миссии спутника Hipparcos) и Hipparcos, Tycho, АСТ.
2. Определение с использованием полученных в ходе программ наблюдений ИА и других высокоточных наблюдений астероидов, выполненных в системе каталога Hipparcos, углов ориентации и скоростей их изменения системы каталога Hipparcos относительно координатных систем динамических эфемерид DE200, DE403 и DE405.
3. Оценка массы Меркурия по оптическим и радарным наблюдениям 43 астероидов, сближающихся с Землей.

### **Научная новизна работы**

1. Полученные по программе ИА позиционные наблюдения 15 астероидов приведены в системы каталогов PRM и Hipparcos с помощью деппендсов. Получены параметры ориентации и движения равноденствия звездного каталога FK5 относительно DE200 с использованием позиционных наблюдений ИА. Решение этой задачи являлось целью международных программ наблюдений ИА.

Ряд наблюдений астероидов на интервале 1949–1995 приведен в систему каталога Hipparcos впервые. Наблюдения доступны по адресу <ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/SMP>.

2. Получены параметры ориентации системы координат каталога Hipparcos относительно координатных систем динамических эфемерид

DE403 и DE405 с использованием позиционных наблюдений программы ИА, наблюдений 48 астероидов, полученных спутником Hipparcos, и современных высокоточных наблюдений 116 астероидов. Впервые показано, что скорость изменения углов ориентации составляет  $0.9 \pm 0.2 \text{ mas / год}$ , т.е. системы координат динамических эфемерид DE403 и DE405 не являются инерциальными.

3. По оптическим и радарным наблюдениям 43 АСЗ получено значение отношения массы Солнца к массе Меркурия,  $6023440 \pm 530$ , согласующееся с принятым МАС значением,  $6023600 \pm 250$ , в пределах  $1 \sigma$ . Ошибка этого значения в два раза превышает ошибку принятого значения, но отмечается, что возможно ее уменьшение с увеличением числа наблюдений и интервала наблюдений.
4. Общий вывод работы состоит в том, что точность наблюдений астероидов, их большое количество позволяют использовать наблюдения этих малых тел для решения задач, требующих высокой точности результатов.

### Научная и практическая значимость работы

1. Полученные по программе ИА позиционные наблюдения астероидов приведены в системы каталогов РРМ и Hipparcos с помощью депендентов; при необходимости возможен их перевод в системы других звездных каталогов.  
Наблюдения доступны по адресу <ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/SMP>.
2. Получены параметры ориентации и движения равноденствия звездного каталога FK5 относительно DE200 с использованием позиционных наблюдений ИА; решение этой задачи являлось целью программ наблюдений ИА.
3. Получены параметры ориентации и вращения звездного каталога Hipparcos относительно DE200 с использованием позиционных наблюдений ИА и наблюдений 48 астероидов, полученных спутником Hipparcos, которые позволили сделать вывод об отсутствии значительного, до  $10 \text{ mas / год}$ , вращения системы каталога Hipparcos, полученного ранее другими авторами.
4. Оценен вклад эффекта фазы в определяемые значения параметров ориентации. На примере астероида Веста показана зависимость остаточных разностей от неравномерного распределения яркости на поверхности этого астероида.



5. Получены параметры ориентации системы звездного каталога Hipparcos относительно координатных систем динамических эфемерид DE403 и DE405, с использованием позиционных наблюдений программы ИА, наблюдений, полученных спутником Hipparcos, и современных высокоточных наблюдений астероидов.
6. По наблюдениям 43 АСЗ получено значение массы Меркурия, согласующееся с принятым МАС в пределах  $1\sigma$ . Ошибка этого значения в два раза превышает ошибку принятого значения, но возможно ее уменьшение с получением новых наблюдений и увеличением числа и интервала наблюдений астероидов.
7. Для учета эффекта Ярковского предложено аппроксимировать зависимость величины ускорения от гелиоцентрического расстояния обратноквадратической зависимостью и определять составляющие этого ускорения по осям орбитальной системы координат. Получены значения трансверсальной составляющей ускорения для четырех АСЗ, имеющих радарные наблюдения в трех оппозициях, что позволяет оценить изменения больших полуосей орбит этих астероидов, вызванные действием эффекта Ярковского.

#### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Приведенные в системы каталогов PRM и Hipparcos с помощью зависимостей позиционные наблюдения 15 астероидов, полученные по программе ИА на интервале 1949-1995. По имеющимся в базе данным эти наблюдения могут быть переведены в будущем в системы других звездных каталогов.  
Наблюдения доступны по адресу <ftp://quasar.ipa.nw.ru/pub/SMP>.
2. Параметры ориентации и вращения системы каталога Hipparcos относительно координатной системы DE200 с использованием позиционных наблюдений программы ИА и наблюдений, полученных спутником Hipparcos, которые позволили сделать вывод об отсутствии значительного, до  $10 \text{ mas / год}$ , вращения системы координат каталога Hipparcos, обнаруженного ранее другими исследователями.
3. Параметры ориентации и вращения системы каталога Hipparcos относительно координатных систем эфемерид DE403 и DE405, основанные на наблюдениях 116 астероидов, в число которых входят позиционные наблюдения программы ИА, наблюдения, полученные спутником Hipparcos, и высокоточные современные наблюдения астероидов.

4. Масса Меркурия, полученная с использованием оптических и радарных наблюдений 43 АСЗ и согласующаяся с принятым МАС значением в пределах  $1\sigma$ .

#### **Апробация работы**

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на семинарах ИПА РАН. Кроме того, результаты работы были доложены на 15 конференциях (резюме докладов опубликованы):

1. Международная конференция "Современные проблемы и методы геодинамики", Санкт-Петербург, 23–27 сентября 1996 г.

2. Всероссийская конференция с международным участием "Наблюдения естественных и искусственных тел Солнечной системы", Санкт-Петербург, 26–28 ноября 1996 г.

3. Fourth International Workshop on Positional Astronomy and Celestial Mechanics, Peniscola, Spain, 7–11 October 1996.

4. Международная конференция "Роль наземной астрометрии в Post-Hipparcos период", Николаев, 9–12 сентября 1996 г.

5. Journées 1997. Systemes de Reference Spatio-Temporels. "Reference systems and frames in the space era: present and future astrometric programmes", Prague, 22–24 September 1997.

6. Всероссийская конференция с международным участием "Компьютерные методы небесной механики-97", Санкт-Петербург, 18–20 ноября 1997 г.

7. Journées 1999 & IX. Lohrmann-Kolloquium "Motion of Celestial Bodies, Astrometry and Astronomical Reference Frames", Dresden, 13–15 September 1999.

8. Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM 2000), Moscow, May 29–June 3 2000.

9. Всероссийская конференция "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века", Санкт-Петербург, 19–23 июня 2000 г.

10. International astronomical conference "Extension and Connection of Reference Frames Using Ground-based CCD Technique", Николаев, 8–11 сентября 2001 г.

11. International conference "Celestial Mechanics-2002: Results and Prospects", S.Petersburg, 10–14 Sept. 2002

12. Международная конференция "Околосемная астрономия – 2003" Россия, Кабардино-Балкария, Терскол, 9–13 сентября 2003 г.

13. Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВНО-2005)", Санкт-Петербург, 11-15 апреля 2005 г.

14. Вторая Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВНО-2007)", Санкт-Петербург, 2-5 апреля 2005 г.

15. Всероссийская астрономическая конференция "ВАК-2007", Казань, 17-22 сентября 2007 г.

### **Публикации и вклад автора**

Результаты диссертации опубликованы в 21 работе общим объемом 245 страниц, 14 работ написаны совместно с другими авторами. В совместных работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 19] в выдвижении и обсуждении работы а также в анализе результатов авторы принимали одинаковое участие, вычислительные программы составлены автором диссертации, он же проводил вычисления и представлял оформление статей. В работе [14] автору диссертации принадлежит выдвижение и обсуждение работы, участие в вычислениях и оформлении статьи. Работы [10, 11, 12, 13, 14, 20, 21] выполнены автором. 5 работ [8, 10, 12, 13, 18] опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 6-ти глав и заключения. Общий объем диссертации 186 страниц. Диссертация содержит 36 таблиц, 32 рисунка и список литературы из 162 названий.

## **2. Содержание работы**

### **Общая структура диссертации**

Во **введении** дается постановка задачи и ее краткое обоснование (актуальность, новизна, научное и практическое значение), краткое изложение содержания, выносимые на защиту результаты, а также перечень основных публикаций и конференций, на которых докладывались результаты диссертации.

В **первой главе** дается история вопроса, теоретические основания возможности определения рассогласования динамической и звездной систем координат из наблюдений астероидов. Описываются результаты моделирования, различные программы наблюдений, эфемеридная поддержка этих программ, осуществлявшаяся в ИТА РАН, а затем в ИПА РАН, полученные ранее с использованием наблюдений астероидов результаты.

Во **второй главе** описываются использовавшиеся в работе звездные каталоги (первый параграф). Во втором параграфе приводится информация о динамических эфемеридах больших планет.

В третьем параграфе описывается принятая в работе модель движения. Гелиоцентрические уравнения движения астероида в релятивистской гармонической системе координат интегрировались численно методом Эверхарта 15-го порядка (Everhart, 1985). Учитывались возмущения от больших планет и астероидов. В уравнения движения включены релятивистские шварцшильдовские члены, связанные с гравитационным полем Солнца. Положения больших планет вычислялись по эфемеридам DE200, DE403, DE405. В соответствии с этими эфемеридами производился учет возмущений от астероидов. Учитывались также возмущения от динамического сжатия Солнца, светового давления, релятивистских членов, связанных с гравитационным полем Юпитера, эффекта Ярковского. Приводятся результаты исследования влияния составляющих модели движения астероида на точность определения параметров его орбиты (Кочетова, Чернетенко, 1997; Кочетова, 2000). Коэффициенты условных уравнений для уточнения параметров орбит астероидов, массы Меркурия и параметров, характеризующих эффект Ярковского, вычислялись с учетом возмущений в движении астероидов, при этом уравнения в вариациях интегрировались совместно с уравнениями движения астероидов. Для решения системы условных уравнений применялся метод наименьших квадратов.

В **третьей главе** описываются наблюдения, используемые в работе, и их редукции. Описывается процедура приведения этих наблюдений в системы опорных каталогов PPM и Hiparcos с помощью деппендсов и/или информации о номерах звезд сравнения. Приводятся данные о современных наблюдениях астероидов.

В первом параграфе приводится информация о наблюдениях ИА, полученных в результате реализации международных наблюдательных программ. Описывается процедура определения положений астероидов на фотопластинке методом деппендсов, распространение метода деппендсов

**Таблица 1.** Информация о наблюдениях ИА и полученных поправках нуль-пунктов,  $\Delta A$  и  $\Delta D$ , относительно координатной системы DE200 до и после приведения наблюдений в систему опорного каталога PPM

ИА	Число наблюдений	Интервал	Наблюдения в системах разных опорных каталогов			Наблюдения в системе опорного каталога PPM		
			$\sigma_0$ ( $''$ )	$\Delta A$ ( $''$ )	$\Delta D$ ( $''$ )	$\sigma_0$ ( $''$ )	$\Delta A$ ( $''$ )	$\Delta D$ ( $''$ )
1	2527	1951–1988	0.44 $\pm 56$	0.120 $\pm 9$	0.087 $\pm 9$	0.30 $\pm 41$	0.118 $\pm 7$	0.084 $\pm 7$
2	2743	1951–1988	0.44 $\pm 59$	-0.075 $\pm 11$	0.167 $\pm 11$	0.31 $\pm 44$	-0.080 $\pm 8$	0.074 $\pm 8$
3	2790	1950–1989	0.47 $\pm 60$	-0.542 $\pm 9$	0.173 $\pm 9$	0.33 $\pm 47$	0.050 $\pm 7$	0.083 $\pm 7$
4	2565	1949–1988	0.45 $\pm 47$	0.046 $\pm 9$	0.115 $\pm 9$	0.35 $\pm 39$	0.246 $\pm 7$	0.089 $\pm 7$
6	2049	1949–1989	0.41 $\pm 58$	0.111 $\pm 9$	0.105 $\pm 9$	0.30 $\pm 44$	0.179 $\pm 7$	0.055 $\pm 7$
7	1706	1954–1989	0.46 $\pm 57$	-0.138 $\pm 11$	0.135 $\pm 11$	0.31 $\pm 41$	0.167 $\pm 8$	0.093 $\pm 8$
11	1764	1955–1988	0.43 $\pm 64$	0.282 $\pm 10$	0.071 $\pm 10$	0.31 $\pm 50$	0.106 $\pm 8$	0.064 $\pm 8$
18	1825	1955–1988	0.43 $\pm 65$	-0.221 $\pm 11$	0.099 $\pm 11$	0.32 $\pm 49$	0.042 $\pm 8$	0.057 $\pm 8$
39	1904	1949–1989	0.47 $\pm 79$	-0.401 $\pm 10$	0.160 $\pm 10$	0.33 $\pm 60$	-0.063 $\pm 8$	0.074 $\pm 8$
40	1559	1955–1989	0.45 $\pm 66$	0.201 $\pm 12$	0.071 $\pm 12$	0.35 $\pm 57$	0.070 $\pm 10$	0.082 $\pm 10$

на случай нелинейной связи измеренных и идеальных координат.

Во втором параграфе описываются алгоритмы приведения положений астероидов из системы одного опорного каталога в систему другого в случаях, если известны зависимости, и если они отсутствуют.

В третьем параграфе даются результаты приведения наблюдений астероидов в систему опорного каталога PPM: изменение ошибок наблюдений по обсерваториям и по отдельным астероидам, изменение получаемых параметров ориентации опорного каталога. Так, точность наблюдений ИА, приведенных в систему каталога PPM, составляет  $\sim 0.3''$ , что соответ-

стует точности современных наблюдений астероидов. В табл. 1 приводятся результаты определения нуль-пунктов,  $\Delta A$  и  $\Delta D$ , относительно координатной системы DE200 до и после перевода наблюдений в систему опорного каталога PPM.

В четвертом параграфе обсуждаются достоинства и недостатки программы наблюдений астероидов вблизи точек пересечения видимых траекторий их движения. Показано, что эти наблюдения не могут существенно улучшить точность определения искомым параметров.

В пятом параграфе даются результаты приведения наблюдений ИА в систему каталога Hipparcos.

В шестом параграфе приводится информация о наблюдениях астероидов АСН (ESA, 1997): особенности наблюдений и их редукции, точность, составляющая, в среднем,  $14 \text{ mas}$ . Каталоги наблюдений астероидов составлены раздельно двумя группами обработчиков – NDAC (the Northern Data Analysis Consortium) и FAST (the Fundamental Astronomy by Space Techniques). Главное различие между двумя методами обработки состоит в том, что NDAC для нахождения фотоцентра использует только первую гармонику модулируемого светового сигнала, а FAST – совместно первую и вторую. Для объектов, видимый диаметр которых меньше  $0.1''$ , этот эффект совместного влияния гармоник пренебрежимо мал, так как полученные положения в этом случае соответствуют фотоцентру. Если видимый диаметр объекта превышает  $0.7''$ , наблюдения FAST могут содержать ошибку. Наблюдения этих двух каталогов имеют различающиеся моменты наблюдений. Количество их для каждого астероида также различно.

В седьмом параграфе приводится информация о современных наблюдениях астероидов, их точности. Описываются критерии отбора наблюдений для решения поставленных в работе задач.

В восьмом параграфе приводится информация о радарных наблюдениях астероидов, их точности, особенностях редукции.

В **четвертой главе** рассматриваются законы отражения света поверхностью астероидов, редукция наблюдений за эффект фазы. Приводятся результаты обработки наблюдений астероидов главного пояса и АСЗ с учетом этого эффекта и без него для различных законов отражения.

При обсуждении вопроса о возможности использования астероидов для определения нуль-пунктов фундаментальных каталогов преимущества этих объектов видели в том, что они имеют звездообразный вид, и поправку за фазу, обусловленную различием в положениях геометрического центра диска и наиболее яркой точки его освещенной части, можно

было считать пренебрежимо малой. Значимость этого аргумента объясняется тем, что поправка за фазу зависит от многих факторов, трудно поддающихся учету. Однако увеличение точности наблюдений привело к тому, что этот эффект (пока для наиболее крупных астероидов) в настоящее время превышает точность наблюдений и должен быть учтен для получения положения геометрического центра диска. Смещение фотоцентра относительно геометрического центра существенно зависит от формы астероида, фазового угла и характеристик поверхности. Для астероидов главного пояса с угловыми размерами более  $0.1''$  смещение может достигать по абсолютной величине  $0.03'' - 0.04''$  и больше, до  $0.12''$  для 1 Цереры. При углах фазы  $< 30^\circ$  величина смещения фотоцентра может составлять  $0.3 - 0.4$  углового радиуса астероида. Для АСЗ, несмотря на их относительно небольшие размеры, из-за больших значений фазовых углов и близости к Земле величина поправки за эффект фазы может превышать точность современных наблюдений.

Для выбора наиболее подходящего при редукции наблюдений астероидов за эффект фазы закона рассеяния света в диссертации сделано сравнение нескольких таких законов.

В первом параграфе рассмотрены законы рассеяния света поверхностью астероида Ламберта, Ломмеля–Зеелигера (Свешников, 1985), Буратти–Веверка (Buratti, Veverka, 1983), Акимова (Акимов и др., 1992), Хапке (Bowell et al., 1989). Для реальных поверхностей, в частности, твердых поверхностей безатмосферных тел, процессы отражения света только частично описываются перечисленными выше законами. Полученные из наблюдений изменения блеска астероидов значительно отличаются от оценок, сделанных на основании существующих теорий рассеяния света. Поэтому для учета эффекта фазы целесообразен подбор таких выражений, которые описывали бы процессы рассеяния света реальными физическими поверхностями более адекватно. Л.А. Акимовым (Акимов и др., 1992) были предложены два закона рассеяния – теоретический (для предельно шероховатых поверхностей в масштабе мезорельефа) и эмпирический.

В работе (Bowell et al., 1989) одним из соавторов, Б. Хапке, был предложен закон рассеяния, позволяющий учитывать особенности конкретного тела. При этом подходе учтено влияние мезорельефа и многократное рассеяние света в поверхностном слое, поэтому предлагаемые этим законом выражения гораздо более сложны, чем законы Ламберта или Ломмеля–Зеелигера. Авторы работы (Lupishko et al., 2001) делают вывод о том, что наиболее подходящим для астероидов законом рассеяния является закон Акимова, однако для астероидов главного пояса, для которых угол фа-

зы не превышает  $30^\circ$ , законы Ломмеля–Зеелигера, Акимова, Халке дают близкие результаты. Результаты моделирования, выполненные в работе (Kaasalainen, Tanga, 2004), показали, что смещение фотоцентра реальных тел имеет псевдослучайную компоненту той же величины, что и среднее значение смещения фотоцентра.

Вывод этого параграфа состоит в том, что при настоящем уровне знаний о физических характеристиках отдельных астероидов достаточно точный учет эффекта фазы невозможен.

Во втором параграфе приводятся формулы для учета эффекта фазы в наблюдаемых положениях астероида. Для редукции наблюдаемых сферических положений астероида использовались выражения

$$p_\alpha = kP(I) \sin Q, \quad p_\delta = kP(I) \cos Q. \quad (1)$$

Здесь  $k$  – безразмерный коэффициент, введенный для того, чтобы компенсировать, хотя бы частично, разницу между принятым законом рассеяния света,  $P(I)$ , и рассеянием света поверхностью реального астероида. При вычислениях значение коэффициента  $k$  считалось неизвестным и определялось совместно с остальными неизвестными из наблюдений, или ему присваивалось некоторое, определенное ранее, постоянное значение.

В третьем параграфе приводятся оценки влияния эффекта фазы на представление наблюдений астероидов, полученных АСН. Для выбора наиболее подходящего закона рассеяния света было рассмотрено три закона: Ламберта, Ломмеля–Зеелигера и Буратти–Веверка. Закон Буратти–Веверка характеризуется функцией  $C(i)$ ,  $i$  – угол фазы, которая может быть задана первыми членами разложения в ряд:  $C(i) = a + bi$ . Однако, из-за значительной корреляции, возникающей при попытке определить из наблюдений неизвестные  $a$  и  $b$ , только один параметр ( $C(i)$ ), который является результатом осреднения по углу фазы, определялся в работе (Hestroffer, 1998) и в настоящей работе.

С использованием этих законов варьированием коэффициента  $k$  или ( $C(i)$ ) получены приведенные в табл. 2 наименьшие значения ошибки единицы веса,  $\sigma_0$ . В последнем столбце этой таблицы приведены значения ( $C(i)$ ), полученные в работе (Hestroffer, 1998) с использованием наблюдений АСН двух каталогов, NDAC и FAST, в общем решении. Приведенные в табл. 2 данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Учет поправки за фазу в наблюдениях астероидов необходим для максимально точного определения параметров орбиты и других неизвестных.
2. Все три рассмотренных закона рассеяния света дают практически одинаковые значения  $\sigma_0$ , хотя и при различных значениях  $k$  и ( $C(i)$ ). Так как трудно отдать предпочтение какому-то одному из них, то в настоя-



шей работе при обработке всех наблюдений астероидов был принят закон Ломмеля–Зеелигера.

3. Наблюдения NDAC и FAST каталогов требуют различных значений  $k$  и  $(C(i))$  для одной и той же планеты, причем сами значения  $\sigma_0$  практически одинаковы.

4. Без учета эффекта фазы наблюдения FAST каталога имеют меньшую точность, чем наблюдения NDAC каталога. Возможно, это связано с особенностями наблюдений и их обработки двумя коллективами специалистов – NDAC и FAST (глава III, параграф 6).

**Таблица 2.** Влияние учета эффекта фазы в наблюдениях, полученных АСН. Значения  $(C(i))$  в последнем столбце получены при совместном рассмотрении наблюдений NDAC и FAST каталогов ( $k$  – безразмерный,  $\sigma_0$  – в *mas*).

Номер планеты,	Без учета фазы	С учетом эффекта фазы						
		Закон Ламберга		Закон Ломмеля–Зеелигера		Закон Буратти–Веверка (Hestroffer, 1998)		
Каталог	$\sigma_0$	$k$	$\sigma_0$	$k$	$\sigma_0$	$(C(i))$	$\sigma_0$	
NDAC 1	10.4	0.70	8.1	0.80	8.1	0.57	8.2	0.63 9.6
FAST	14.3	0.90	8.1	1.00	8.2	0.72	8.3	
NDAC 2	12.0	0.65	9.3	0.75	9.3	0.57	9.3	0.62 9.7
FAST	12.8	0.85	9.8	0.90	9.8	0.70	9.8	
NDAC 4	10.5	0.75	6.6	0.80	6.5	0.56	6.5	0.75 7.2
FAST	15.3	1.00	5.9	1.10	5.9	0.75	6.0	

В четвертом параграфе рассмотрены остаточные отклонения полученных АСН наблюдений астероида Веста, форма которого отличается от сферической. Кроме того, на поверхности этого астероида имеются темные и светлые области, которые могут вызывать смещение центра яркости в течение оборота этого астероида вокруг своей оси. К сожалению, серии наблюдений разделены большими промежутками времени и только одна из них превышает по продолжительности период одного оборота (0.2225 сут.) астероида вокруг своей оси. Однако можно выделить коле-

бания О–С с амплитудой  $\sim 15$  *mas* и периодом в  $\sim 0.22$  суток.

В пятом параграфе, на примере астероида 4179 Тоутатис, имеющего тесные сближения с Землей, приводятся результаты учета эффекта фазы в наблюдениях АСЗ. Значения угла фазы для этого АСЗ достигают  $130^\circ$ , он имеет сложное вращение и форму, существенно отличающуюся от сферы. Для учета эффекта фазы использовался закон рассеяния света Ломмеля–Зеелигера в предположении о сферической форме астероида. Ошибки единицы веса без учета фазы и с его учетом равны, соответственно,  $0.3575''$  и  $0.3569''$ , изменения в координатах и компонентах скорости в эпоху оскуляции составляют  $0.2$  км и  $2.5 \cdot 10^{-8}$  км/с. Поправка за фазу в прямом восхождении достигает  $0.25''$ , что сравнимо с точностью современных позиционных наблюдений. При углах фазы, превышающих  $80^\circ$ , в остаточных разностях по прямому восхождению обнаруживается систематика, что можно объяснить значительным отличием характеристик этого астероида от модельных.

Основной вывод этой главы состоит в том, что учет эффекта фазы необходим при работе с высокоточными наблюдениями астероидов. Однако корректный его учет требует как знания физических характеристик этих тел, так и интегрирования уравнений поступательно–вращательного движения. В настоящее время при редукации наблюдений астероидов приходится ограничиваться более простой процедурой учета этого эффекта, так как наши знания о фигурах астероидов, их вращении и свойствах поверхности во многих случаях не полны.

В **пятой главе** приводятся результаты определения ориентации и движения равноденствия системы каталога FK5 относительно динамической координатной системы DE200, ориентации и вращения системы каталога Hipparcos относительно динамических координатных систем DE200, DE403, DE405. Полученные результаты обсуждаются.

В первом параграфе приводятся основные соотношения между измеряемыми величинами и неизвестными параметрами ориентации одной координатной системы относительно другой. Для условных уравнений, зависящих от углов и угловых скоростей вращения, можно написать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \cos\delta\Delta\alpha &= \sin\delta\cos\alpha(\epsilon_x + \omega_x(t - t_0)) + \sin\delta\sin\alpha(\epsilon_y + \omega_y(t - t_0)) - \\ &\quad \cos\delta(\epsilon_z + \omega_z(t - t_0)), \\ \Delta\delta &= -\Delta D - \sin\alpha(\epsilon_x + \omega_x(t - t_0)) + \cos\alpha(\epsilon_y + \omega_y(t - t_0)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta\alpha = \alpha_{(cat)} - \alpha_{(dyn)}$ ,  $\Delta\delta = \delta_{(cat)} - \delta_{(dyn)}$ ,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  – начальные зна-

чения углов вращения вокруг осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , соответственно,  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – угловые скорости вращения относительно тех же осей,  $\Delta D$  – постоянная систематическая ошибка системы склонений каталога, не связанная с углами вращения. Это может быть также систематическая ошибка по склонению наблюдений на отдельных обсерваториях или для отдельных астероидов. Классические параметры ориентации – углы Эйлера (поправка нуль–пункта каталога  $\Delta A$ , поправка средней долготы Солнца  $\Delta L$ , отсчитываемой вдоль эклиптики от равноденствия даты, поправка угла наклона эклиптики к экватору  $\Delta e$ ) – и скорости их изменения связаны с параметрами вращения соотношениями:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \epsilon_z + \epsilon_y \operatorname{ctg} e, \Delta L = \epsilon_y / \sin e, \Delta e = -\epsilon_x, \\ \Delta \dot{A} &= \omega_z + \omega_y \operatorname{ctg} e, \Delta \dot{L} = \omega_y / \sin e, \Delta \dot{e} = -\omega_x.\end{aligned}\quad (3)$$

Во втором параграфе приводятся результаты определения параметров ориентации системы координат каталога FK5 относительно координатной системы DE200 и некоторых других параметров по наблюдениям ИА. Полученные результаты сравниваются с результатами, основанными на наблюдениях других тел Солнечной системы, и с результатами моделирования. Отмечается, что по наблюдениям астероидов точнее, чем по другим объектам, определяется поправка экватора. Определение остальных параметров не обнаруживает такого преимущества.

В третьем параграфе приводятся результаты определения параметров ориентации системы каталога Hipparcos относительно координатной системы DE200 по наблюдениям 48 астероидов, полученных АСН для решения этой задачи. Отмечается, что причиной обнаруженного ранее заметного,  $10 \text{ mas / год}$ , вращения одной системы относительно другой являются отсутствие редукиции наблюдений за эффект фазы и относительно короткий,  $\sim 3.5$  года, интервал наблюдений. Включение в обработку наблюдений 12-ти астероидов, полученных в Николаевской обсерватории в течение 1950–1995 гг., приводит к заметному уменьшению этой величины и ее ошибки.

В четвертом параграфе обсуждается возможность включения в совместную обработку наблюдений NDAC и FAST каталогов, полученных АСН. Вопрос о такой возможности не рассматривался при формировании этих рядов наблюдений, однако в большинстве работ они включались в обработку раздельно, например, в (Bougeard et al., 1996; Bougeard et al., 1997). Так как нас интересует, главным образом, определение параметров ориентации, то были определены их значения между системами координат, определяемыми наблюдениями NDAC и FAST каталогов:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= -1.0 \pm 0.6, \quad \epsilon_y = 0.6 \pm 0.7, \quad \epsilon_z = -0.7 \pm 0.8 \text{ (mas)}, \\ \omega_x &= -0.5 \pm 0.8, \quad \omega_y = 0.8 \pm 0.8, \quad \omega_z = -1.3 \pm 1.0 \text{ (mas/год)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Эти результаты показывают, что в пределах ошибок две системы координат совпадают и совместная обработка наблюдений каталогов NDAC и FAST корректна.

В пятом параграфе приводятся результаты определения параметров ориентации и вращения системы координат каталога Hipparcos относительно координатных систем DE403 и DE405. В табл. 3 приводится информация об использованных наблюдениях. Оценки точности оптических наблюдений получены в настоящей работе при уточнении параметров орбит, а оценки точности радарных наблюдений взяты такими, какими они приводятся наблюдателями. В соответствии с этими оценками назначались веса отдельным рядам наблюдений. Всего выделено 5 рядов наблюдений.

**Таблица 3.** Характеристика наблюдений, использованных в работе

Наблюдения	Интервал	Кол-во астероидов	Кол-во наблюдений	Каталог	Оценка точности
1. Фотографические (ИА)	1949–1995	15	24700	Hipparcos, Tycho, АСТ	150–430 mas ( $\sigma_0$ )
2. Космические оптические (Hipparcos)	1989–1993	48	5494	Hipparcos	6–35 mas ( $\sigma_0$ )
3. ПЗС (обс.673)	1999–2007	113	3950	АСТ	50 mas ( $\sigma_0$ )
4. ПЗС (обс.689)	1997–2004	116	16320	АСТ	70 mas ( $\sigma_0$ )
5. Радарные	1980–2000	5	7		50–140 $\mu s$

В табл. 4 приводятся полученные по всем наблюдениям значения параметров ориентации системы каталога Hipparcos относительно координатной системы DE405 и значения коэффициента  $k$  на три момента: 1988/10/01 – эпоха, на которую определены углы ориентации между DE200 и ICRF (Folkner et al., 1994); 1991/07/02.5 – средний момент наблюдений астероидов спутником Hipparcos; 2000/01/01. Необходимо отметить, что условные уравнения для радарных наблюдений не содержат параметров ориентации каталога и могут только косвенно улучшить их

**Таблица 4.** Значения параметров ориентации системы каталога Hipparcos по отношению к координатной системе эфемерид DE405 и параметра  $k$  (углы – в  $mas$ , скорости – в  $mas/год$ ,  $k$  – безразмерный).

Эпоха	1988/10/01	1991/07/02.5	2000/01/01
Решение	1	2	3
$\epsilon_x$	$0.1 \pm 0.9$	$0.4 \pm 0.9$	$1.4 \pm 1.1$
$\epsilon_y$	$0.8 \pm 1.1$	$2.6 \pm 1.1$	$8.2 \pm 1.3$
$\epsilon_z$	$-0.8 \pm 1.7$	$-2.4 \pm 1.6$	$-7.1 \pm 1.9$
$\omega_x$	$0.12 \pm 0.08$	$0.12 \pm 0.08$	$0.12 \pm 0.08$
$\omega_y$	$0.66 \pm 0.09$	$0.66 \pm 0.09$	$0.66 \pm 0.09$
$\omega_z$	$-0.56 \pm 0.16$	$-0.56 \pm 0.16$	$-0.56 \pm 0.16$
$k$	$0.89 \pm 0.04$	$0.89 \pm 0.04$	$0.89 \pm 0.04$

определение, повысив точность определения параметров орбиты. Максимальное значение коэффициента корреляции между определяемыми параметрами ориентации и параметрами орбит составило 0.61, а между параметрами ориентации  $\omega_y$  и  $\omega_z$  – 0.47.

В шестом параграфе проводится обсуждение полученных результатов. Возможной причиной относительного вращения координатных систем может быть принятая в работе (Standish et al., 1995) процедура перехода от системы координат эфемерид DE200 к системе координат DE403. При этом переходе Стэндиш использовал значения углов ориентации между DE200 и ICRF, полученные на эпоху 1988/10/01 (Folkner et al., 1994),

$$\epsilon_x = 0.002 \pm 0.002'', \epsilon_y = 0.012 \pm 0.003'', \epsilon_z = 0.006 \pm 0.003'', \quad (5)$$

предполагая, что вращение между этими системами координат отсутствует. Решение 1 в табл. 4, полученное на эпоху 1988/10/01, дает значения параметров ориентации, наилучшим образом (по сравнению с другими решениями) совпадающие с системой каталога Hipparcos, что подтверждает предположение о причинах наличия вращения систем координат DE403 и DE405.

В **шестой главе** В шестой главе приводятся результаты определения массы Меркурия по оптическим и радарным наблюдениям АСЗ.

В первом параграфе описывается процедура отбора возмущаемых астероидов (ВА), которая состоит из нескольких этапов. На первом из них из каталогов элементов орбит нумерованных и нenumерованных астероидов

Центра малых планет (США, Кембридж) были выбраны все АСЗ, т.е. те, для которых значения перигельных расстояний  $q < 1.3$  а.е. (из числа нумерованных выбирались астероиды, у которых число оппозиций было не менее двух). Всего было отобрано 2000 астероидов (по состоянию на 2007/05/04). Для 66 отобранных астероидов их перигельные расстояния удовлетворяют неравенству  $q < q_M$ , где  $q_M = 0.306$  а.е. – перигельное расстояние орбиты Меркурия. Для орбит 191 астероида выполняется неравенство  $q < Q_M$ , где  $Q_M = 0.467$  а.е. – афелийное расстояние орбиты Меркурия.

Для отбора ВА на следующем этапе был использован критерий, предложенный в работе [14] для определения масс динамическим методом: величина ошибки массы возмущающего тела, определяемой по наблюдениям одного ВА. Критерий отражает возможность использования наблюдений данного ВА в зависимости от их количества, точности и распределения во времени, а также учитывает обстоятельства сближений ВА с телом, масса которого определяется. Этот критерий был применен для оценки масс ряда крупных астероидов (Кочетова, 2003; Кочетова, 2004). Далее по наблюдениям каждого из 2000 астероидов определялись значения массы Меркурия и ее ошибки,  $\sigma_{m_M}$ . Оптические наблюдения астероидов выбирались из каталога наблюдений Центра малых планет (США, Кембридж). Радарные наблюдения были взяты из каталога радарных наблюдений Лаборатории реактивного движения (США) (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?radar>). Использовалась модель движения, описанная в главе II. Так как выбранные астероиды относятся к астероидам, сближающимся с Землей, то возмущения от Земли и Луны учитывались отдельно. Производился учет динамического сжатия Солнца (для квадрупольного момента Солнца было принято значение  $J_2 = 2 \cdot 10^{-7}$  (Питьева, 2005)) и светового давления. Коэффициенты условных уравнений для уточнения параметров орбит астероидов и массы Меркурия вычислялись с учетом возмущений в движении астероида, при этом уравнения в вариациях интегрировались совместно с уравнениями движения астероида. Сравнение радарных наблюдений с эфемеридой проводилось в соответствии с алгоритмами, описанными в работах (Мюер, 1971; Yeomans et al., 1992) и приведенными в главе III. Из этих же работ были взяты формулы для вычисления производных от наблюдаемых величин  $\tau$  и  $\Delta f/f$  по координатам и скоростям. Позиционные наблюдаемые положения астероидов исправлялись за эффект фазы в предположении, что астероиды имеют сферическую форму, а расстояние между геометрическим и световым центрами диска вычислялось на основе закона рассеяния света Ломмеля–Зеелигера. В главе IV на примере

наблюдений астероида 4179 Toutatis показано влияние этого эффекта на величину остаточных уклонений.

В результате определения  $m_M$  по каждому из 2000 ВА оказалось, что для 196 астероидов ошибка значения массы Меркурия  $\sigma_{m_M}$  меньше  $1.0 \cdot 10^{-8} M_{Sun}$ , для 131 астероида  $\sigma_{m_M} < 0.5 \cdot 10^{-8} M_{Sun}$  и для 44 –  $\sigma_{m_M} < 1.0 \cdot 10^{-9} M_{Sun}$ . Наименьшие значения  $\sigma_{m_M}$  получены по наблюдениям следующих ВА: 2212, 3200, 22753, 1997 УН9, 85182, 2100, 1862, 5143. Оценка  $m_M$  методом взвешенного среднего по всем 196 астероидам показала, что не имеет смысла включать в совместное решение наблюдения астероидов, которые имеют  $\sigma_{m_M} > 1.0 \cdot 10^{-9} M_{Sun}$ , так как это не приводит ни к уменьшению ошибки определяемого значения  $m_M$ , ни к изменению ее значения. Поэтому количество ВА, наблюдения которых могут быть включены в совместное решение, удовлетворяющих критерию  $\sigma_{m_M} < 1.0 \cdot 10^{-9} M_{Sun}$ , составило 44. Из этой группы ВА был исключен нумерованный астероид 1991 VE, для которого оказалось невозможным определение надежной орбиты астероида до его тесных сближений с Меркурием. До сближений имеется только четыре наблюдения 1991 VE, полученные 24 ноября 1954 г.

Во втором параграфе оценено влияние учета динамического сжатия Солнца на определяемые значения массы Меркурия по отдельным астероидам и из совместного решения. Для ВА с  $q < 0.2$  а.е. это влияние достигает  $\sim 200$  единиц в ОЗММ. Для астероидов с большими значениями  $q$  влияние этого эффекта меньше 1.0. Учет сжатия Солнца практически не изменяет ни ошибку определения массы Меркурия, ни само ее значение из совместного решения.

В третьем параграфе описывается предложенная в настоящей работе методика определения эффекта Ярковского и оценивается его влияние на определяемое значение массы Меркурия.

Эффект Ярковского (ЭЯ) – это негравитационное ускорение в движении астероидов и метеороидов, которое, согласно теории (Vokrouhlicky et al., 2000), вызывается анизотропным переизлучением солнечной радиации. Величина этого возмущения является функцией массы астероида и характеристик его поверхности, положения в пространстве оси вращения и скорости вращения. ЭЯ приводит к возникновению небольшого, но постоянного изменения большой полуоси, действие которого на значительных интервалах времени может приводить к заметным изменениям орбит этих тел.

Как следует из работы (Vokrouhlicky et al., 2000), для астероида 6489 Голевка этот эффект является наибольшим среди известных астероидов,

к тому же этот астероид имеет радарные наблюдения в трех оппозициях. По радарным наблюдениям астероида 6489 в работе (Chesley et al., 2003) впервые было получено подтверждение существования ЭЯ. Наилучшее представление радарных наблюдений (РН) было получено в результате варьирования параметров модели – коэффициента теплопроводности поверхности и средней плотности астероида, для которой было получено значение  $2.7 \text{ г/см}^3$ .

В настоящей работе учет ЭЯ в движении астероидов производился без каких-либо предположений о физических характеристиках этих тел. Предполагалось только, что зависимость этого эффекта от гелиоцентрического расстояния  $r$  имеет вид  $1/r^2$ , а его величина характеризуется, в общем случае, тремя составляющими ускорения - радиальной, трансверсальной и нормальной,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , которые определяются из наблюдений совместно с параметрами орбиты (по аналогии с учетом негравитационного ускорения в движении комет (Marsden et al., 1973)). Полученное нами представление РН астероида 6489 практически совпадает с результатами работы (Chesley et al., 2003), в которой авторы используют другой способ учета ЭЯ, и подтверждает допустимость нашего подхода.

Изменение большой полуоси орбиты астероида 6489,  $\Delta a$ , за оборот в результате действия этого ускорения (получено по формуле Эйлера для большой полуоси) составляет  $\sim -0.5$  км. Оценки  $A_2$  получены также для астероидов 1580 Бетулия, 2100 Ра-Шалом, 4179 Тоутатис, имеющих меньшее число РН, чем астероид 6489, но все же позволяющих произвести определение значений  $A_2$ . В табл. 5. приведены результаты для этих астероидов, позволяющие заключить, что включение в решение радарных наблюдений в несколько раз уменьшает ошибку определения  $A_2$ . В

**Таблица 5.** Значения  $A_2$  и изменений большой полуоси, полученных по радарным и оптическим наблюдениям АСЗ

Астероид	$A_2$ ( $10^{-14} \text{ a.e./сут}^2$ )			$\Delta a/\text{оборот}$ (км)
	Оптика	Радар	Оптика+Радар	
6489 Голевка	$-0.4 \pm 1.8$	$-1.96 \pm 0.11$	$-2.01 \pm 0.14$	$-0.50$
4179 Тоутатис	$-4.6 \pm 0.5$	$-0.83 \pm 0.41$	$-0.34 \pm 0.14$	$-0.09$
1580 Бетулия	$-0.48 \pm 0.39$	—	$-0.52 \pm 0.17$	$-0.10$
2100 Ра-Шалом	$-0.72 \pm 0.25$	—	$-1.53 \pm 0.12$	$-0.10$



последнем столбце табл. 5 приводятся значения  $\Delta a$ /оборот, полученные нами для этих астероидов.

Для оценки влияния ЭЯ на определяемое значение массы Меркурия и его ошибки для двух ВА, 6489 Голевка и 2100Ра–Шалом, имеющих достаточное количество радарных наблюдений, было выполнено определение из оптических и радарных наблюдений параметров орбиты, массы Меркурия и значения  $A_2$ . Результаты приведены в табл. 6. В заголовке этой таблицы в скобках приводится принятое МАС значение массы Меркурия в единицах массы Солнца. Данные этой таблицы показывают, что при совместном определении  $A_2$  и  $m_M$  происходит увеличение ошибок этих параметров, однако значения  $m_M$  в этом случае лучше согласуются со значением, принятым МАС.

**Таблица 6.** Эффект Ярковского и масса Меркурия  
(принятое МАС значение  $m_M = 0.166014 \cdot 10^{-7} M_{Sun}$ )

Астероид	Определяется $A_2$ ( $10^{-14} a e / \text{сут}^2$ )	Определяются $A_2$ и масса Меркурия		Определяется $m_M$ ( $10^{-7} M_{Sun}$ )
		$A_2$ ( $10^{-14} a e / \text{сут}^2$ )	$m_M$ ( $10^{-7} M_{Sun}$ )	
6489	$-2.0 \pm 0.1$	$-2.8 \pm 0.4$	0.16793	0.16242
Голевка			$\pm 0.00076$	$\pm 0.00031$
2100	$-1.5 \pm 0.1$	$-0.9 \pm 0.2$	0.16555	0.16517
Ра-Шалом			$\pm 0.00014$	$\pm 0.00007$

В четвертом параграфе приводятся результаты определения ОЗММ из совместных решений для разного количества ВА, по состояниям каталога наблюдений астероидов на ноябрь 2006 г., март и май 2007 г. и с использованием динамических эфемерид DE403 и DE405. Результаты суммируются в табл. 7. В скобках, после числа наблюдений указано, какие наблюдения были включены в решение – оптические и радарные или только оптические. Сравнение результатов решений 3 и 4 показывает, что включение в обработку радарных наблюдений существенно влияет на результат и в меньшей степени – на его ошибку, а решений 3 и 5 – что при использовании планетных эфемерид DE403 и DE405 получаются близкие значения и ОЗММ, и ее ошибки. Максимальное значение коэффициента корреляции между определяемым значением массы Меркурия и параметрами орбит астероидов составило 0.38, что позволяет го-

**Таблица 7.** Обратные значения массы Меркурия

Реш-е	Число ВА	Число набл-ний (о-оптич., р-радарн.)	Предельное значение $\sigma_{m_M}$ (в $10^{-9}M_{Sun}$ )	$M_{Sun}/m_M$	Дата каталога набл-ний	DE
1	23	12138 (о,р)	< 0.45	$6023520 \pm 760$	2006/11	403
2	41	24000 (о,р)	< 1.0	$6023380 \pm 540$	2007/03	403
3	43	24276 (о,р)	< 1.0	$6023420 \pm 530$	2007/05	403
4	43	24152 (о)	< 1.0	$6022610 \pm 550$	2007/05	403
5	43	24276 (о,р)	< 1.0	$6023440 \pm 530$	2007/05	405

ворить о достаточно надежном определении величины массы Меркурия. Из результатов табл. 7 следует, что наименьшую ошибку ОЗММ имеют решения 3 и 5. Сравнение решений 1, 2 и 3, полученных при последовательном увеличении интервала наблюдений и их количества, показывает, что в дальнейшем возможно уменьшение ошибки определения ОЗММ из совместного решения.

В пятом параграфе делаются выводы по результатам, полученным в предыдущих параграфах шестой главы.

1. По оптическим и радарным наблюдениям астероидов получено обратное значение массы Меркурия,  $6023440 \pm 530$  (решение 5), отличающееся от полученного в (Anderson et al., 1987) менее, чем на  $1\sigma$ .
2. Включение радарных наблюдений существенно влияет на определяемое обратное значение массы Меркурия.
3. При использовании планетных эфемерид DE403 и DE405 получаются близкие значения и обратного значения массы Меркурия, и его ошибки.
4. Ошибка определения массы Меркурия по наблюдениям астероидов примерно в два раза больше ошибки принятого значения этой величины (Anderson et al., 1987). В ближайшем будущем возможно дальнейшее уточнение этой оценки благодаря быстрому увеличению количества наблюдений уже известных астероидов и открытиям новых астероидов, наблюдения которых могут быть использованы для решения этой задачи.
5. Эффект Ярковского необходимо учитывать при определении массы Меркурия по наблюдениям астероидов. В настоящее время это сделать не удастся, с одной стороны, из-за отсутствия данных о физических параметрах этих малых тел, с другой, из-за недостаточного количества высокоточных наблюдений. Однако можно ожидать, что при общем решении, включающем большое количество ВА, влияние неучтенного действия ЭЯ

на определяемое значение массы Меркурия будет незначительным.

В **заключении** обсуждаются результаты, выносимые на защиту, и задачи, при решении которых, по мнению автора, могут быть привлечены наблюдения астероидов.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Батраков Ю.В. (отв.ред.), Вашкевич А.С., Шор В.А., Чернетенко Ю.А. 1998. Ежедневные эфемериды избранных малых планет на 1999 г. Издание ИПА РАН, С.-Петербург, 69 с.
2. Батраков Ю.В., Горель Г.К., Гудкова Л.А., Чернетенко Ю.А. 1996. Об уточнении нуль-пунктов звездного каталога по наблюдениям малых планет в Николаеве. Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики. Труды конференции. Ред. А.М. Финкельштейн. СПб, 23–27.
3. Батраков Ю.В., Горель Г.К., Гудкова Л.А., Чернетенко Ю.А. 1998. Об ориентации каталога Hipparcos относительно динамической системы координат по наблюдениям малых планет. Труды ИПА РАН, вып.3, 69–87.
4. Батраков Ю.В., Горель Г.К., Гудкова Л.А., Чернетенко Ю.А. 1998. Нуль-пункты каталога FK5 по наблюдениям малых планет в Николаеве. Труды IV съезда Астрономического общества. Москва, 60–65.
5. Батраков Ю.В., Чернетенко Ю.А. (отв.ред.), Шор В.А. 1999 г. Ежедневные эфемериды избранных малых планет на 2000 г. Издание ИПА РАН, С.-Петербург, 71 с.
6. Батраков Ю.В., Чернетенко Ю.А. 2000. Ориентация ICRS по наблюдениям малых планет. Сборник научных трудов конференции: "Околосолнечная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы", г. Обнинск, 25–29 октября 1999 г., 226–235.
7. Батраков Ю.В., Чернетенко Ю.А. 2001. Современное состояние проблемы определения ориентации звездных каталогов по наблюдениям малых планет. Труды ИПА РАН, вып. 6, 148–159.

8. Кадырова Н.Т., Мирмахмудов Э.Р., Чернетенко Ю.А. 2003. Фотографические наблюдения малой планеты (1) Церера в Ташкенте в 1951–1994 гг. *Астроном. вестник*, **37**, № 1, 83–85.
9. Чернетенко Ю.А. 2001. Приведение наблюдений избранных малых планет к системе ICRF и определение параметров ориентации динамической и звездной систем координат. Extension and connection of reference frames using ground-based CCD technique. Eds: G.M.Petrov et al., Nikolaev, 2001, 111–117.
10. Чернетенко Ю.А. 2007. Масса Меркурия по наблюдениям астероидов. *Письма в Астрон. журн.*, **33**, № 12, 1–5.
11. Чернетенко Ю.А. 2007. Эффект Яркковского в движении астероидов. Труды Всероссийской астрономической конференции "ВАК-2007". Казань. 103–104.
12. Чернетенко Ю.А. 2008. Приведение фотографических наблюдений астероидов в систему одного каталога. *Астрон. вестник*, **42**, № 1, 1–10.
13. Чернетенко Ю.А. 2008. Ориентация системы каталога Hipparcos по отношению к координатным системам эфемерид DE403/LE403 и DE405/LE405 на основе наблюдений астероидов. *Письма в Астрон. журн.*, **34**, № 3, 1–5.
14. Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М. 2003. Массы некоторых малых планет, определенные динамическим методом. "Околосемная астрономия – 2003". Сборник трудов конференции, т.1, Терскол, 9–13 сентября 2003 г. Санкт-Петербург, 233–239.
15. Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A. 1999. Minor planet observations as a base for determining Hipparcos catalogue orientation. Motion of Celestial Bodies, Astrometry and Astronomical Reference Frames. Journées 1999 & IX. Lohrmann-Kolloquium, Dresden, 50.
16. Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A., Bronnikova N.M., Kisseleva T.P. 1998. FK5 zero-point determination from Pulkovo observations of selected minor planets. Proceeding of the Fourth International Workshop on positional astronomy and celestial mechanics. Held at Peniscola, Spain, October 7–11, 1996, 33–36.

17. Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A., Gorel G.K., Gudkova L.A. 1997. On determination of zero-points of FK5 using observations of minor planets in Nikolaev. *Journées 97. Systemes de reference Spatio-Temporels*. Ed. J. Vondrak and N. Capitaine, 23.
18. Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A., Gorel G.K., Gudkova L.A. 1999. Hipparcos catalogue orientation as obtained from observations of minor planets. *Astron. and Astrophys.*, **352**, 703–711.
19. Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A., Makarova E.N., Gorel G.K., Gudkova L.A. 1998. Selected minor planets observation program: its' potential and observations processing. *Proceeding of the Fourth International Workshop on positional astronomy and celestial mechanics*. Held at Peniscola, Spain, October 7–11, 1996, 3–10.
20. Chernetenko Yu.A. 2001. International program of observations of selected minor planets: first results. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **80**, N 3/4, 185–194.
21. Chernetenko Yu.A. 2002. Using positional observations of minor planets for improving the orientation of star catalogue. *Труды ИПА РАН*, вып. 8, 51–52.

#### **Цитируемая литература**

Акимов Л.А., Лупишко Д.Ф., Шевченко В.Г. 1992. О законе рассеяния света поверхностями астероидов. Распределение яркости по диску. *Астроном. Вестник*, **26**, № 4, 62–64.

Кочетова О.М. 2000. Исследование влияния модели движения и ошибок наблюдений малой планеты на точность определения параметров орбиты. *Труды ИПА РАН*, вып. 5, 197–203.

Кочетова О.М. 2003. Применение новых критериев отбора возмущаемых малых планет для определения масс возмущающих малых планет динамическим способом. *Сообщения ИПА РАН*, № 165, 43 С.

Кочетова О.М. 2004. Определение масс малых планет динамическим методом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург, 105 С.

- Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А. 1997. Влияние эффекта фазы и других факторов на результаты обработки наблюдений малых планет. Тезисы докладов конференции "Компьютерные методы небесной механики". ИТА РАН, 92–95.
- Питьева Е.В. 2005. Релятивистские эффекты и сжатие Солнца из радарных наблюдений планет и космических аппаратов. Письма в Астрон. журн., **31**, 378–387.
- Питьева Е.В. 2007. Национальные высокоточные эфемериды планет и Луны – ЕРМ. Вторая Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2007)", Санкт-Петербург, 2–5 апреля 2007 г., СПб, 64–69.
- Свешников М.Л. 1985. Определение ориентации FK4 по вашингтонским наблюдениям Солнца и планет. Труды ИТА АН СССР, **19**, 31–74.
- Anderson, J.D., Colombo, G., Esposito, P.B., et al. 1987. The Mass, Gravity Field, and Ephemeris of Mercury. *Icarus* **71**, 337–349.
- Bougaard M.L., Bange J.-F., Mahpouz M., and Bec-Borsenberger A., 1996, Hipparcos minor planets: towards an improvement of the model analysis by detecting influence factors. Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System. Eds: Ferraz-Mello et al., 447–450.
- Bougaard M.L., Bange J.-F., Caquineau C., Bec-Borsenberger A., 1997, Robast estimation with application to Hipparcos minor planet data. Hipparcos Venice'97 Symposium. ESA SP-402, 165–168.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D. et al., 1989. Application of photometric models to asteroids. Asteroids II. Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson Univ. Arizona Press, 524–556.
- Buratti B., Veverka J. 1983. Voyager Photometry of Europa. *Icarus*, **55**, 93–110.
- Chesley S.R., S.J. Ostro, D. Vokrouhlicky, D. Capek et al. 2003. Direct Detection of the Yarkovsky Effect via Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka. *Science*, **302**, 1739–1742.
- ESA, 1997. The Hipparcos and Tycho Catalogues. ESA SP-1200.

- Everhart E., 1985. An efficient integrator that uses Gauss–Radau spacings. Dynamics of comets: their origin and evolution. Proceedings of IAU coll. 83. Eds. Carusi A., Valcecchi C.B. Dordrecht, D.Reidel Publ. Co., 185–202.
- Folkner W.M., Charlot P., Finger M.H., Williams J.G., et al. 1994. Determination of the extragalactic–planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements. *Astron. Astrophys.*, **287**, 279–289.
- Hestroffer D. 1998. Photocentre displacement of minor planets: analysis of Hipparcos astrometry. *Astron. Astrophys.*, **336**, 776–781.
- Kaasalainen, M., Tanga, P. 2004. Photocentre offset in ultraprecise astrometry: Implications to barycentre determination and asteroid modelling. *Astron. Astrophys.*, **416**, 367–373.
- Lupishko D.F., Shevchenko V.G., Tungalag N. 2001. Influence scattering law on the asteroid photocentre position. Extension and connection of reference frames using ground-based CCD technique. International astronomical conference, Nikolaev, 133–138.
- Marsden, B.G., Sekanina, Z., and Yeomans, D.K. 1973. Comets and nongravitational forces. *V. Astron.J.*, **78**, 211–225.
- Moyer Th.D. 1971. Mathematical Formulation of the Double–Precision Orbit Determination Program. JPL Technical Report. 32–1527, 160 p.
- Standish, E.M. Jr. 1990. The observational basis for JPL’s DE200 planetary ephemerides of the *Astronomical Almanac*. *Astron. Astrophys.*, **233**, 252–271.
- Standish, E.M, Newhall XX, Williams J.G., Folkner W.M. 1995. JPL planetary and lunar ephemerides, DE403/LE403. JPL Interoffice Memorandum, 314.10–127, 22 p.
- Standish, E.M. 1998. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. JPL Interoffice Memorandum, 312.F–98–048, 18 p.
- Vokrouhlicky D., A. Milini and S.R. Chesley. 2000. Yarkovsky Effect on Small Near–Earth Asteroids: Mathematical formulation and Examples. *Icarus*, **148**, 118–138.

Yeomans D.K., Chodas P.W., Keesey M.S., et al. 1992. Asteroid and comets orbits using radar data. *Astron. J.*, **103**, 303–317.

---

Подписано к печати 11.02.2008	Заказ	Формат 60 × 90/16
Печ. л. 2.0	Уч.-изд. л. 1.0	Тираж 120
		Бесплатно

---

Отпечатано в ЗАО «Полиграфическое предприятие № 3»,  
Санкт-Петербург, Литейный пр., 55

ИПА РАН, 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10