РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

ПИТЬЕВА Елена Владимировна

Построение высокоточных эфемерид больших планет и определение некоторых астрономических постоянных

Специальность 01.03.01 - “Астрометрия и небесная механика”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, чл.-корр.РАН В.К.Абалакин
доктор физико-математических наук, профессор Э.Л.Аким
доктор физико-математических наук, профессор Ю.В.Батраков

Ведущая организация:

Научно-исследовательский астрономический институт имени В.В.Соболева СПбГУ

Защита состоится 30 июня 2005 г. в 10 час. 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 "____" ______________ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук З.М.Малкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Введение в астрономическую практику новых наблюдательных методов (локация планет и Луны, траекторные измерения, интерферометрия спутников и квазаров, CCD наблюдения покрытий) и Международной шкалы атомного времени, а также необходимость решения задач эфемеридного обеспечения космических экспериментов потребовали создания планетных эфемерид, существенно более точных, чем классические. С другой стороны, именно высокоточные современные наблюдения (и радиолокационные наблюдения планет и космических аппаратов, в частности) обеспечили возможность создания эфемерид нового поколения. Такие эфемериды, призванные быть основой национального ежегодника, позволяют решать возникающие эфемеридные задачи, требующие повышенной точности. Они предоставляют новые возможности для уточнения значений ряда астрономических постоянных: величины астрономической единицы, параметров вращения планет, масс планет и астероидов, сжатия Солнца. Особый интерес представляет исследование вековых вариаций некоторых астрономических постоянных, что дает возможность осуществить проверку эффектов общей теории относительности и конкурирующих с ней теорий, а также оценить переменность гравитационной постоянной, характеризующей фундаментальные свойства нашего пространства - времени.

Цели работы

Основными целями настоящей работы являются:

1. Построение высокоточных численных эфемерид планет для использования как основы национального ежегодника и для обеспечения космических экспериментов в дальнем космосе.
2. Уточнение постоянных этих эфемерид из обработки наблюдений разных типов, включая современные высокоточные радиотехнические астрометрические данные и оптические наблюдения за последние сто лет.

3. Определение из анализа наблюдений ряда астрономических постоянных, определяющих динамическую структуру Солнечной системы.

Научная новизна работы

1. Для уточнения редукции наблюдений и модели движения планет автором разработан и реализован ряд новых алгоритмов, в частности, для учета возмущений от сжатия Солнца и дополнительного кольца астероидов, редукции за топографию Марса, Венеры и Меркурия, существенно увеличившие точность определения элементов орбит планет и астрономических постоянных; предложено аналитическое выражение для учета задержки при распространении радиосигналов в плазме солнечной короны и определения на его основе параметров модели распределения плотности в солнечной короне для разных соединений с Солнцем.
2. Впервые совместным интегрированием уравнений движения больших планет, Луны и 301 астероида построены высокоточные численные эфемериды планет. Таким образом, учтены возмущения астероидов не только на Землю и Марс, но и на Меркурий и Венеру, что важно для проектов типа Venus Express и BepiColombo.
3. Впервые построена версия эфемерид EPM в шкале TCB, рекомендуемой резолюциями Международного Астрономического Союза в качестве независимой переменной.
4. Впервые динамическим методом из обработки радарных наблюдений планет и космических аппаратов (КА) оценено значение динамического сжатия Солнца (J_2), полученное одновременно с оценками ППН-параметров (β , γ), что ранее не удавалось из-за высокой корреляции между ними, а также найдены оценки предполагаемого в некоторых теориях векового изменения гравитационной постоянной ($\dot{G}/G$) и общей массы астероидного кольца.

Научная и практическая значимость работы

1. Построенная теория движения планет — EPM2004 может быть использована для решения эфемеридных задач, требующих повышенной точности, в частности, для обеспечения полетов в дальнем космосе.

2. Высокоточные эфемериды EPM2000 являются основой "Дополнений к Астрономическому ежегоднику" на 2000-2010 гг., а эфемериды EPM2004 положены в основу национального "Ежегодника" с 2006 г.
3. Развитые в работе методики учета возмущений астероидов на планеты, а также редукции наблюдений за топографию поверхностей планет и за запаздывание в солнечной короне используются при построении высокоточных эфемерид планет и обработке радиолокационных измерений планет и КА.
4. Полученные оценки ППН-параметров и предполагаемого векового изменения гравитационной постоянной показывают замечательное соответствие движений планет и распространения света общей теории относительности и значительно сужают область возможных значений альтернативных теорий гравитации.
5. Знание точных положений больших планет и Луны необходимо для обработки современных высокоточных астрометрических и геодезических наблюдений.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Численные эфемериды планет EPM2004, адекватные метровой точности современных радиотехнических наблюдений, построенные совместным интегрированием уравнений движения планет и 301 астероида, в которых впервые учтено возмущение астероидов на орбиты всех планет, а элементы орбит планет определены из обработки более 317000 наблюдений разных типов за 1913–2003 г.
2. Версия эфемерид планет в шкале TCB, рекомендуемой резолюциями МАС в качестве независимой переменной.
3. Оценки релятивистских параметров, полученные из анализа радарных наблюдений планет, космических и посадочных аппаратов и показывающие полное соответствие ОТО:

   а) оценка сверху величины изменения гравитационной постоянной
   $$|\dot{G}/G| < 10^{-13} \text{ в год},$$

   б) ППН-параметры $\beta = 1.0000 \pm 0.0001$, $\gamma = 0.9999 \pm 0.0002$.
4. Динамическая оценки, определяющие структуру Солнечной системы:

а) квадрупольный момент Солнца $J_2 = (1.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$,

б) оценка общей массы астероидов главного пояса

$$M_{belt} = (15 \pm 1) \cdot 10^{-10} M_{\odot},$$

в) параметры, характеризующие положение и движение оси вращения Марса, в том числе скорость прецессии его оси

$$\dot{\Omega}_q = (-7.612 \pm 0.005)'' \text{ в год.}$$

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, неоднократно докладывались на семинарах и Ученых советах ИПА РАН и представлялись на на следующих конференциях:

1. Всесоюзное совещание по астрономическим эфемеридам, Ленинград, ноябрь 1977 г.
2. Всесоюзное совещание по астрономическим эфемеридам, Ленинград, октябрь 1979 г.
3. XXII астрометрическая конференция СССР, Москва, июнь 1981 г.
4. Symposium IAU N 114, "Relativity in celestial mechanics and astrometry", Leningrad, 28–31 May, 1985.
5. Всесоюзное совещание "Исследование фигур и гравитационных полей Земли, Луны и планет", Ленинград, ИТА АН СССР, ноябрь, 1988.
6. Всесоюзное совещание "Эфемеридная астрономия и позиционные наблюдения", Ленинград, ИТА АН СССР, сентябрь, 1991.
7. Третья международная Орловская конференция "Изучение Земли как планеты методами астрономии, геофизики, геодезии", Одесса, сентябрь, 1992.
8. Международная конференция "Dynamics and astrometry of natural and artificial celestial bodies", Poznan, Poland, 13–17 September, 1993.
9. Российская астрометрическая конференция, Пулково, октябрь, 1993.
10. Российская конференция "Теоретическая, прикладная и вычислительная небесная механика", ИТА РАН, С.-Петербург, октябрь 1993.
11. Конференция "Стохастические методы и эксперименты в небесной механике", Архангельск, 13–17 июля, 1995.

12. Symposium IAU MAC 172, “Dynamic, ephemerides and astrometry in the solar system”, Paris, 3–8 July, 1995.
13. XXVI радиоастрономическая конференция, С.-Петербург, ИПА РАН, 18–22 сентября, 1995.
14. Colloquium IAU 165, “Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies”, Poznan, Poland, 1–5 July, 1996.
15. Российская конференции “Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики”, С.-Петербург, ИПА РАН, 23–27 октября, 1996 г.
16. XXVII радиоастрономическая конференция “Проблемы современной радиоастрономии”, С.-Петербург, ИПА РАН, 10–14 ноября, 1997.
17. Международная конференция Journees 1999 & IX. Lohrmann-Kolloquium “Motion of celestial bodies, astrometry and astronomical reference frames”, Dresden, Germany, 13–15 September, 1999.
18. Международная конференция JENAM-2000 “European astronomy at the turn of the Millennium”, Москва, 29 мая – 3 июня, 2000.
19. Российская конференция “Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века”, С.-Петербург, ИПА, 19 – 23 июня, 2000 г.
20. XXIV General Assembly IAU, Manchester, UK, 7–18 August, 2000.
21. Всероссийская астрономическая конференция, С.-Петербург, 6–12 августа, 2001.
22. Международная конференция “AstroKazan-2001: Astronomy and geodesy in new millennium”, Казань, 24–29 сентября, 2001.
23. Международная рабочая встреча “Ceres 2001 Workshop — astrometry and physics of minor planets from observational networks”, Paris, France, 9–12 October, 2001.
24. Международная конференция “Celestial Mechanics-2002: Results and Prospects”, С.-Петербург, 10–14 сентября 2002.
25. Международная конференция “Journees-2003, Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from Milliarcseconds to Microarcseconds”, С.-Петербург, 22–25 сентября, 2003.
26. Colloquium IAU 196 “Transits of Venus: New views of the solar system and Galaxy”, Preston, UK, 7–11 June, 2004.

Публикации и вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах общим объемом 369 страниц, 8 работ написаны совместно с другими авторами. В совместных работах автору принадлежат:

[2], [4], [5], [7], [8], [10] — моделирование движения больших планет в теории EPM и часть, связанная с радиолокационными наблюдениями больших планет: редукция, обработка, уточнение взаимных орбит внутренних планет и определение по радиолокационным наблюдениям астрономических постоянных, в том числе — релятивистских параметров;

[22], [23] — моделирование движения больших планет в теории EPM, включая эксперименты с различными наборами возмущающих астероидов и их масс; обработка радиолокационных наблюдений планет и космических аппаратов; астрофизические оценки масс около 400 крупных астероидов, динамическая оценка массы дополнительного кольца астероидов и общей массы астероидов главного пояса.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации 208 страниц. Диссертация содержит 35 таблиц, 35 рисунков и список литературы из 244 названий.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты и определена доля участия автора в совместных публикациях.

Первая глава “Математическое моделирование движения больших планет”

До 60-х годов прошлого века классические аналитические теории движения планет Леверье, Хилла, Ньюкома, Клеменса и др. совершенствовались и улучшались в соответствии с развитием астрономической практики. Космические эксперименты, проводимые в дальнем космосе, а также введение в практику новых наблюдательных методов (локация планет и Луны, траекторные измерения и т.д.) потребовали создания существенно более точных планетных эфемерид, чем классические. С другой стороны, именно современные наблюдения обеспечили возможность создания эфемерид следующего поколения.

Для обеспечения космических полетов в конце 1960-х численные теории движения планет создавались несколькими группами в США и России. Американские группы работали в Калифорнийском – JPL (Newhall et al., 1983) и Массачусетском технологическом – MIT институтах (Ash et al., 1967). В России численные эфемериды планет были созданы в результате исследований, проводившихся в Институте прикладной математики — ИПМ (Аким и Степаньянц, 1977), в Институте радиотехники и электроники — ИРЭ и Центре управления полетом — ЦУП (Кислик и др., 1980) и в Институте теоретической астрономии — ИТА, где такие теории независимо строились Глебовой и Ерошкиным (1992), а также группой под руководством Красинского (Красинский и др., 1981, 1982). В работах (Питьева 1979; 1982, 1986; Красинский и др. 1984; Krasinsky et al., 1986; Алешкина и др., 1987) отражены последовательные этапы построения численной теории EPM (**E**phemerides of **P**lanets and the **M**oon), в создании которой автор принимал непосредственное участие. На основе всех этих работ в России была создана единая релятивистская теория движения планет (Akim et al., 1986), использовавшаяся для экспериментов в дальнем космосе, и были выпущены Дополнения 21-а к Астрономическому Ежегоднику СССР (1980).

Эта работа продолжалась в Институте прикладной астрономии, где была построена серия эфемерид EPM. В ИПА для технологической поддержки таких исследований большим коллективом разработчиков под руководством Красинского был создан и продолжает совершенствоваться уникальный программный комплекс ЭРА — **Э**фемеридные **Р**асчеты в **А**строномии (Krasinsky and Vasilyev, 1997; Васильев и Красинский, 1997), основанный на использовании языка высокого уровня, ориентированного на астрономические и геодинамические приложения, что обеспечивает высокую гибкость комплекса и существенно упрощает разработку разнообразных приложений.

Две динамические модели движения планет, продолжающие свое развитие — серии эфемерид DE (**D**evelopment **E**phemeris) JPL (Standish et al., 1995; Standish, 1990; 1998; 2003) и EPM (Krasinsky et al., 1993; Питьева, 1992; 1998; 2004; 2005a; Pitjeva, 2001b, 2004, 2005), — являются наиболее завершенными к настоящему времени, имеют одинаковый уровень точности и адекватны современным радиотехническим наблюдениям.

Построение высокоточных эфемерид планет, соответствующих метровой точности современных наблюдений запаздывания и необходимых для обеспечения космических экспериментов, требует создания адекватной математической и динамической модели движения планет на основе общей теории относительности (ОТО), учитывающей все возмущающие факторы.

Движение барицентра системы Земля–Луна заметно возмущается самой Луной. Орбита Луны подвержена возмущениям от несферичности потенциалов Земли и Луны, что требует достаточно точного описания положения экваторов Земли и Луны относительно инерциальной системы координат. Резонансный характер связи между орбитальным и вращательным движением Луны делает необходимым согласование теорий в единой динамической модели. Построение и уточнение по лунным лазерным наблюдениям (LLR) теории орбитального движения и вращения Луны выполнялась в ИПА под руководством Красинского. Последняя версия лунной теории описана в работе (Красинский, 2002).

Солнечное сжатие вызывает вековые изменения элементов планет, поэтому начиная с DE405 (Standish, 1998) и EPM2000 (Pitjeva 2001a; 2001b), ненулевое значение $J_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ квадрупольного момента Солнца, полученное из некоторых астрофизических оценок, было принято для интегрирования эфемерид.

Серьезная проблема в построении современных эфемерид планет возникает в связи с необходимостью учета возмущений, вызываемых астероидами. В эфемеридах DE200 и EPM87 учитывались возмущения лишь от нескольких крупнейших астероидов, что оказалось недостаточно. Начиная с эфемерид DE403 и EPM98 были приняты во внимание возмущения от 300 астероидов, однако массы большинства этих астероидов известны недостаточно хорошо, и точность планетных эфемерид значительно ухудшалась со временем из-за этого фактора.

Массы двенадцати астероидов были оценены по возмущениям, вызываемым ими в орбитах Марса и Земли, траекторий КА NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous), исследованием движений двойных астероидов и астероидов, имеющие спутники. К сожалению, точность классического динамического определения масс астероидов по гравитационным возмущениям от других астероидов во многих случаях оказалась недостаточной из-за неточности знания масс возмущающих астероидов, неполного учета возмущений от других астероидов, и неточности самих наблюдений (Krasinsky и др., 2001; Hilton, 2002). Поэтому массы остальных астероидов были оценены астрофизическим способом (Krasinsky et al., 2001, 2002) из анализа данных о радиусах и классах астероидов.

Кроме того, тысячи небольших астероидов, многие из которых настолько малы, что не могут быть обнаружены с Земли, оказывают существенное суммарное влияние на орбиты внутренних планет. Общий дополнительный эффект от астероидов, не учитываемых при совместном численном интегрировании, моделировался потенциалом кругового кольца, расположенного в эклиптикальной плоскости с равномерным распределением в нем вещества (Krasinsky et al., 2002).

Таким образом, эфемериды планет и Луны были построены совместным численным интегрированием уравнений движения всех планет, Солнца, Луны, 301 крупного астероида, уравнений вращения Луны, с учетом возмущений от сжатия Солнца и эклиптикального кольца, моделирующего влияние остальных более мелких астероидов. Уравнения движения тел брались в постньютоновском приближении в поле Шварцшильда, описываемом трехпараметрической метрикой (α , β , γ), в гармонической системе координат $\alpha = 0$. Все варианты эфемерид были построены для общей теории относительности ОТО: $\beta = \gamma = 1$. В общем виде уравнения движения тел в невращающейся барицентрической системе координат имеют следующий вид:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = A + B + C + D, \text{ где}$$

A — ньютоновские гравитационные ускорения,

B — релятивистские члены (Newhall et al., 1983),

C — члены, вызываемые сжатием Солнца,

D — члены, вызываемые кольцом астероидов (Krasinsky et al., 2002).

Уравнения движения планет эфемерид EPM2004 приведены в работе (Питьева, 2004). Численное интегрирование уравнений движения в барицентрической системе координат на эпоху J2000.0 выполнялось методом Эверхарта на интервале 140 лет (1880–2020 гг.)

Внутренняя точность численного интегрирования для EPM2004 была проверена сравнением результатов прямого и обратного интегрирования на столетнем интервале времени. Возникающие ошибки интегрирования по крайней мере на порядок меньше неточности наблюдений. Результатом работы лунно-планетного интегратора являются коэффициенты чебышевских разложений для скоростей всех рассматриваемых объектов на заданном интервале времени. Интервалы аппроксимации и степень полиномов задавались исходя из необходимости получения аппроксимации координат для Луны, Солнца, Венеры, Земли и Марса с погрешностью не более 10 мм, для остальных планет – не более 1 метра.

Вторая глава "Радиотехнические наблюдения и особенности их обработки"

Классические эфемериды прошлого основывались исключительно на оптических наблюдениях, однако с появлением радиотехнических и лазерных астрометрических данных ситуация для внутренних планет радикально изменилась. Именно благодаря этим данным оказалось возможным построить эфемериды внутренних планет с точностью миллисекунд дуги. Появление радиолокационных наблюдений имело большое значение не только для эфемеридной астрономии, но также для исследования физической природы небесных тел и космической среды. В данной главе приводится обзор результатов, полученных по радиолокационным данным.

В главе даны описание различных типов радиотехнических наблюдений больших планет и методика вычисления наблюдаемых величин: времен запаздывания (τ), дифференциального запаздывания ($\delta\tau$), доплеровского сдвига частоты (Δf), VLBI измерений (одномерная угловая поправка к эфемеридам DE405 — *aldel*), нормальных точек космических аппаратов (КА) и VLA измерений теплового излучения.

В работе были использованы все доступные радарные наблюдения планет (58116, 1961–1997 гг.), КА и ПА (195271, 1971 – 2003 гг.). Данные были взяты из базы данных JPL (http:/ssd.jpl.nasa.gov/iau-comm4/), созданной и поддерживаемой Стэндишем и дополнены некоторыми рядами американских и российских радарных наблюдений планет 1961–1995 гг., взятыми из разных источников. Российские радиолокационные наблюдения планет вместе с ссылками на источники хранятся на сайте ИПА РАН $<$http://www. ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LEA/ENG/englea.htm$>$. Большую часть данных JPL составляют высокоточные радиотехнические измерения марсианских ПА и различных КА, вращающихся или пролетавших около Меркурия, Венеры, Марса и Юпитера, полученные на 26 станциях NASA Deep Space Network (DSN), расположенных на трех континентах: в Калифорнии (США), около Камберры (Австралия) и около Мадрида (Испания). В 1976–1982 гг. в JPL были получены измерения времени запаздывания τ ПА Viking-1,2 на Марсе. На протяжении 20 лет эти наблюдения оставались наиболее точными (априорная точность 7 м) среди позиционных наблюдений больших планет. В 1997 г. в течение 3-х месяцев были выполнены наблюдения марсианского ПА Pathfinder. С 1998 г. база данных пополняется радиолокационными наблюдениями от КА MGS (Mars Global Surveyor), а с 2002 г. КА Odyssey; точность этих измерений составляет 2 м (около 0.007 μ s).

Кроме того, имеется наблюдения теплового излучения систем спутников Юпитера и Сатурна и дисков Урана и Нептуна, полученные с помощью VLA (Very Large Array), и по два измерения времени запаздывания от спутников Юпитера Ганимеда и Калисто, полученные в Аресибо. Краткое описание всех астрометрических радиотехнических наблюдений можно найти в работах (Питьева, 2005; Pitjeva, 2005).

В работе подробно рассмотрены необходимые редукции:

- редукция моментов времени наблюдений к однородной шкале;
- релятивистские поправки — запаздывание радиосигнала в гравитационном поле Солнца (эффект Шапиро) и переход от координатного времени, аргумента эфемерид, к собственному времени наблюдателя;
- запаздывание радиосигналов в плазме солнечной короны;
- запаздывание радиосигналов в тропосфере Земли (для картирующих функций использовалась модель Niell, 1996);
- коррекция наблюдений планет за топографию их поверхностей.

Значительные затруднения вызывает редукция за топографию лоцируемых планет. Планеты земной группы имеют сложную поверхность с большим перепадом высот. Так у Марса он достигает 30 км, у Венеры 20 км, у Меркурия составляет 6 км. Пренебрежение рельефом лоцируемых планет вносит значительные систематические ошибки, вызывает большую (до 100 мкс) шумовую составляющую времен запаздывания и, как следствие, ухудшает точность определения параметров. Автором была разработана методика учета топографии планет (Питьева, 1982; 1995; Pitjeva, 1996b). В настоящее время в результате проведения программ специальных альтиметрических измерений с участием искусственных спутников планет (Mariner-9, Pioneer-Venus, Венера-15, Венера-16) и использованием разнообразных наблюдений с Земли топография Марса и Венеры изучена достаточно хорошо. В работе реализованы два метода учета топографии Венеры и Марса: с помощью разложений по сферическим гармоникам 16-18 порядка и гипсометрическим картам этих планет, результаты при этом получаются достаточно согласованными. Использовалось сочетание этих двух способов: в основном рельеф планет учитывался по разложениям, но для отдельных областей высоты определялись по гипсометрической карте этих мест с более мелкой сеткой. После такого учета топографии Марса и Венеры систематическая составляющая в остаточных невязках в значительной степени устраняется, среднее квадратичное отклонение остаточных невязок наблюдений Венеры уменьшилось на 23 % .

К сожалению, для Меркурия глобальная топография неизвестна. Топография Меркурия была представлена автором, как и в работе Standish (1998) в виде разложения по сферическим гармоникам до 2 порядка включительно (8 коэффициентов). Коэффициенты гармоник были определены из имеющихся в нашем распоряжении 637 радиолокационных наблюдений Меркурия за 1966–1997 гг. с точностью не хуже 15 μs. Это позволило на 14.5 % улучшить представление этих наблюдений Меркурия (Питьева, 2000; Pitjeva, 2001a).

Точность первых радиолокационных наблюдений была лишь 50–500 μs, и поэтому запаздыванием радиосигналов в среде вполне можно было пренебречь, но при достижении точности в 1–2 μs и выше такие эффекты уже нельзя игнорировать. Наибольшее дополнительное запаздывание возникает в плазме солнечной короны при прохождении сигналов в околосолнечном пространстве при верхнем соединении планет. Для модели распределения плотности:

$$N_e(r) = \frac{A}{r^6} + \frac{B}{r^2}$$

было получено аналитическое выражение запаздывания радиосигнала в плазме солнечной короны (если Земля и планета находятся по разные стороны от Солнца):

$$\Delta\tau_{cor} = \frac{2KBR_\odot^2}{p}\left(\arccos\frac{p}{r_E} + \arccos\frac{p}{r_P}\right) +$$
$$+ \frac{3KAR_\odot^6}{4}\left[\frac{1}{p^5}\left(\arccos\frac{p}{r_E} + \arccos\frac{p}{r_P}\right) +\right.$$
$$\left. + \frac{\sqrt{r_E^2 - p^2}}{p^2 r_E^2}\left(\frac{2}{3r_E^2} + \frac{1}{p^2}\right) + \frac{\sqrt{r_P^2 - p^2}}{p^2 r_P^2}\left(\frac{2}{3r_P^2} + \frac{1}{p^2}\right)\right],$$

причем параметры модели уточнялись из наблюдений.

В настоящее время точность наблюдений (например, КА MGS) возросла настолько, что необходимо учитывать эффект солнечной короны для всех моментов наблюдений, а не только вблизи верхних соединений. Если Земля и лоцируемая планета находятся по одну сторону от Солнца, то члены уравнения для r_E и r_P входят с разными знаками ($\vec{r}_E$, $\vec{r}_P$ — гелицентрические вектора станции на Земле и точки отражения на планете). К сожалению, в отличие от двухчастотных наблюдений Viking, дававших возможность полного учета запаздывания в солнечной короне, измерения КА MGS и Odyssey были выполнены лишь в X-диапазоне, что затрудняет учет эффекта солнечной короны. Для редукции наблюдений КА MGS и Odyssey в модель короны был введен член $\dot{B}t$, описывающий изменения параметра B со временем. Параметры B и $\dot{B}$ определялись из наблюдений независимо для разных соединений. После такой редукции за солнечную корону, невязки в наблюдениях вблизи соединений уменьшаются в 20 раз (до 6–7 м).

В тех случаях, когда дополнительная информация о каких-либо параметрах не могла быть получена, радарные наблюдения, выполненные в течение суток или в пределах одной сессии для КА MGS и Odyssey, после внесения всех необходимых коррекций объединялись в нормальные места. При объединении всем наблюдениям приписывался вес согласно их априорной точности, приводимой, как правило, в публикациях. Для измерений ПА Viking и Pathfinder нормальные места не составлялись, как как в этом случае была бы потеряна ценная информация о вращении Марса. Точность нормальных мест выше, чем точность отдельных наблюдений вследствие уменьшения случайных ошибок, поэтому в тех случаях, когда образовывались нормальные места, именно они, а не сами первоначальные данные использовались для уточнения параметров эфемеридной теории. Таким образом, наблюдения представлены в сжатой форме, удобной для дальнейшего использования по уточнению различных постоянных.

Третья глава “Оптические наблюдения и их редукция”

В главе описаны различных типы оптических наблюдений: меридианные, фотографические, CCD, измерения положений спутников внешних планет, покрытия звезд кольцами Урана и диском Нептуна.

Классические теории движения планет целиком основывались на оптических наблюдениях, в основном, прохождений планет через меридиан. Эти наблюдения могут считаться достаточно точными после введения в практику наблюдений Морской обсерватории США (USNO) микрометра в 1911 г. Примерно в тоже время появились первые фотографические наблюдения планет, но они имели слишком большие случайные и систематические ошибки. По этой причине фотографические наблюдения до 60-тых годов прошлого века, когда точность фотографических наблюдений значительно улучшилась, не использовались нами в улучшении больших планет, за исключением наблюдений Плутона. Некоторое количество радиотехнических наблюдений КА около Юпитера (Pioneer-10,11, Voyager-1,2, Ulysses, Galileo) обеспечивают эфемеридам этой планеты лучшую точность, чем остальным внешним планетам. Эфемериды остальных внешних планет еще в течение многих лет будут целиком основываться на оптических наблюдениях. Следует отметить, что современные оптические наблюдения — это CCD измерения, точность которых уже настоящее время достигает $0\farcs06$ и продолжает улучшаться за счет улучшения характеристик CCD матриц и использования более совершенных телескопов для позиционных наблюдений планет.

Для улучшения орбит внешних планет особое значение имеют наблюдения спутников внешних планет, поскольку такие наблюдения намного точнее наблюдений самих планет и практически свободны от трудно учитываемого фазового эффекта. Программа астрометрических фотографических наблюдений галилеевых спутников Юпитера была начата в 1962 г. в Николаевской обсерватории, а с 1973 г. там же начали наблюдаться и спутники Сатурна. Программа успешно продолжалась до 1999 г. Во Флагстаффе (США) с 1998 г. помимо наблюдений внешних планет начались и наблюдения их спутников. Ряды наблюдений спутников в Николаеве и Флагстаффе характеризуются высоким качеством и дополняют друг друга. Они были успешно использованы для улучшения орбит внешних планет. Набор для внешних планет был расширен некоторым количеством VLA наблюдений и наблюдениями покрытий звезд планетами. Все используемые в работе оптические наблюдения внешних планет (около 50000) приведены в работах (Питьева, 2005; Pitjeva, 2005).

Диски планет при наблюдении с Земли большей частью не полностью освещены Солнцем и видны как серповидные или ущербные диски. Это явление очень затрудняет астрометрические наблюдения планет и ведет к большим ошибкам, особенно для внутренних планет. Основные коррекции за эффект фазы вводятся самими наблюдателями. Аналогично работе (Standish, 1990) значения коэффициентов для дополнительного учета фазового эффекта были определены из оптических наблюдений планет. Дополнительный учет фазы приводит к лучшему представлению наблюдений. Хотя доля наблюдений, где требуется учет фазы, невелика и незначительно сказывается на величине общей ошибки единицы веса σ_0, однако эта ошибка при введении учета фазы уменьшилась с 0.734 до 0.729.

Плутон фактически является двойной системой Плутон-Харон с отношением масс примерно 8:1. При оптических наблюдениях Плутона реально измеряется центр света системы Плутон-Харон, в то же время эфемериды (как EPM, так и DE) построены для барицентра системы Плутон-Харон. В принципе, центр света и барицентр этой системы могут не совпадать, что привело бы к дополнительным ошибкам в наблюдениях, поэтому этот эффект оценивался из самих наблюдений. Оказалось, что смещение центра света от центра масс системы составляет 1% расстояния Плутон-Харон, и введение такого смещения практически не сказывается на представлении наблюдений.

Большинство современных оптических наблюдений планет и их спутников (обсерватории: Флагстафф, Маунтейн, Николаев, Ла Пальма) уже отнесены к системе ICRF самими наблюдателями. Остальные оптические наблюдения, относящиеся к разным каталогам, сначала были приведены к каталогу FK4 Свешниковым (1974), затем были переведены к FK5 по известным формулам (Standish, 1995) и окончательно отнесены к системе ICRF, используя три угла поворота между каталогами HIPPARCOS и FK5, J2000 в mas (Mignard, Froeschle, 2000): $\varepsilon_x = -19.9$, $\varepsilon_y = -9.1$, $\varepsilon_z = 22.9$.

Четвертая глава “Построение эфемерид EPM2004 на 140-летнем интервале времени (1880–2020 гг.) и сравнение с эфемеридами DE”

Создание эфемерид — это итерационный процесс, включающий следующие этапы:

1. численное интегрирование уравнений движения планет с принятыми начальными значениями для координат и скоростей всех объектов, участвующих в процессе интегрирования, а также начальными значениями для других динамических параметров модели,

2. вычисление по полученным эфемеридам теоретических значений наблюдаемых величин для каждого момента наблюдений, вычисление $O - C$ и необходимых частных производных,

3. уточнение параметров методом наименьших квадратов (МНК), ввод их в теорию и построение новой версии эфемерид.

В основном варианте улучшения планетной части EPM2004 эфемерид определялось около 200 параметров: элементы орбит всех планет и 13 спутников внешних планет, наблюдения которых использовались для уточнения орбит этих планет; величина астрономической единицы в километрах; три угла ориентации эфемерид относительно международной небесной системы отсчета — ICRF; параметры вращения Марса (два угла ориентации экватора Марса относительно его орбиты и их вековые изменения, угловая скорость и 8 коэффициентов сезонных членов вращения оси Марса) и координаты трех посадочных аппаратов (ПА) на поверхности Марса; массы тел (Юпитера и 6-ти астероидов, наиболее сильно возмущающих Марс), средние плотности для трех таксономических классов астероидов (C, S, M), масса и радиус астероидного кольца; квадрупольный момент Солнца (J_2) и 12 параметров солнечной короны для разных соединений с Солнцем; 8 коэффициентов топографии Меркурия и поправки к уровенным поверхностям Венеры и Марса, относительно которых вычислялась топография этих планет; релятивистские параметры (β, γ, $\dot{G}/G$, вековые движения перигелиев планет); 5 параметров для вычисления дополнительного эффекта фазы в оптических наблюдениях внешних планет; постоянные сдвиги для 6 групп наблюдений, которые интерпретировались как систематические ошибки, либо ошибки в калибровке аппаратуры.

Для нахождения параметров теории методом МНК необходимо знать частные производные от наблюдаемых величин (например, времени запаздывания τ) по улучшаемым параметрам. В работе приведены условные уравнения для обработки радарных и оптических уравнений.

Эфемериды EPM2004 были получены улучшением по 317041 позиционному наблюдению (1913–2003 гг.) разных типов, включая радиометрические измерения планет и космических аппаратов, оптические наблюдения разных видов. Как уже отмечалось, эфемериды внутренних планет целиком основаны на радиолокационных и VLBI наблюдениях. Радиолокационные наблюдения позволяют определять все орбитальные элементы планет за исключением трех углов орбиты Земли: наклон, долгота восходящего узла и средняя долгота ее орбиты. Эти три угла определяют ориентацию всей системы планет и однозначно связаны с углами поворота ε_x , ε_y , ε_z . Система внутренних планет была ориентирована в систему ICRF включением VLBI измерений КА (Magellan, Phobos, MGS и Odyssey), выполненных в системе

ICRF, в общее решение. Углы поворота между эфемеридами EPM2004 и системой ICRF в mas:

$$\varepsilon_x = 1.9 \pm 0.1,\ \varepsilon_y = -0.5 \pm 0.2,\ \varepsilon_z = -1.5 \pm 0.1.$$

Среднеквадратичные ошибки представления наблюдений составляют для Меркурия 1.4 км, для Венеры и Марса 0.7 км, для КА Viking 8.8 м, для Pathfinder 5.1 м, для MGS и Odyssey 1.4 м.

В таблице 1 даются формальные стандартные точности орбитальных элементов планет, где a — большая полуось, i — наклон орбиты, Ω — долгота восходящего узла, e — эксцентриситет, π — долгота перигелия, λ — средняя долгота. Следует отметить, что как показывает опыт, реальные ошибки могут быть на порядок величины больше формальных ошибок МНК.

Таблица 1. Формальные стандартные точности элементов орбит планет

Планета	a	$\sin i \cos\Omega$	$\sin i \sin\Omega$	$e\cos\pi$	$e\sin\pi$	λ
	[м]	[mas]	[mas]	[mas]	[mas]	[mas]
Меркурий	0.103	0.655	1.417	0.122	0.094	0.350
Венера	0.328	0.567	0.567	0.041	0.043	0.150
Земля	0.141	—	—	0.001	0.001	—
Марс	0.637	0.003	0.004	0.001	0.001	0.011
Юпитер	642	2.410	2.207	1.280	1.169	1.545
Сатурн	4167	3.141	4.055	3.789	2.936	3.327
Уран	38095	4.065	6.058	4.841	3.349	7.230
Нептун	472109	4.209	8.525	13.812	18.528	25.744
Плутон	3329750	6.787	14.892	79.453	36.345	44.707

При интегрировании уравнений движения и в процессе улучшения значений больших полуосей планет используется астрономическая единица длины АЕ. Для перехода к системе СИ используется величина АЕ, выраженная в м и уточненная по радиолокационным наблюдениям планет и КА. Было получено следующее значение величины астрономической единицы и ее формальной ошибки:

$$\text{АЕ} = 149597870696.3 \pm 0.1 \text{ м},$$

которое отличается от последнего значения, полученного Стэндишем по примерно тому же набору наблюдений (Standish, 2005)

$$\text{АЕ}_{Standish} = 149597870698 \text{ м},$$

на 1.7 м, что и является, вероятно, реальной ошибкой определения этой величины.

Качество эфемерид, т.е. их точность, а также точность всех параметров планетных теорий зависит от трех факторов: точности процедур редукций наблюдений, динамических моделей движения планет, а также от наблюдений, которые используются для построения эфемерид. В работе продемонстрировано влияние этих факторов на точность определяемых параметров.

Эфемериды EPM2004 (Ephemerides of Planets and the Moon) доступны внешним пользователям через FTP или сайт ИПА РАН:

ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM2004 (anonymous)

или через сайт ИПА РАН:

http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LEA/RUS/ruslea.htm.

Пакет файлов позволяет профессиональному пользователю получать в системе отсчета ICRF прямоугольные барицентрические (центр солнечной системы) координаты Солнца и всех больших планет, а также геоцентрические координаты Луны на интервале 1880-2020 гг. (JD 2407715.5-2458850.5) в шкале времени TDB с помощью простых подпрограмм, написанных на стандартном Фортране.

Для контроля полезно сравнение построенной теории EPM с другими теориями такого же класса точности. Такое сравнение проводилось на всех этапах построения эфемерид EPM. Было выполнено сравнение эфемерид EPM2004 и DE410 на интервале 1970–2010 гг. Эти эфемериды основаны на приблизительно одинаковых наблюдениях и использовании близких математических моделях движения планет, но отличаются способами учета возмущений астероидов, их массами, а также редукцией за топографию поверхностей планет и солнечную корону. Координаты Меркурия и Венеры были получены по радарным наблюдениям этих планет, имеющим ошибки порядка 1 км, поэтому выявленные максимальные расхождения гелиоцентрических расстояний до 258 м для Меркурия и 139 м для Венеры можно считать приемлемыми. Максимальные расхождения гелиоцентрических расстояний этих эфемерид для Земли и Марса значительно меньше: до 12.8 м для Земли и 35.7 м для Марса, что неудивительно, т.к. точность данных КА MGS и Odyssey, по которым улучшались эфемериды этих планет, порядка двух метров. Разница гелиоцентрических расстояний для Юпитера не превосходит 3 км. Орбиты остальных планет целиком определялись оптическими наблюдениями; кроме того, даже один полный период оборота Нептуна и Плутона не обеспечен достаточно точными наблюдениями. Расхождения для Сатурна доходят до 180 км, для Урана до 410 км, для Нептуна до 1200 км, и до 14000 км для Плутона, что характеризует реальную точность современных эфемерид.

Улучшение качества и увеличение количества наблюдений являются решающими факторами улучшения эфемерид. Дальнейшее увеличение точности зависит от пополнения наблюдательной базы новыми радарными наблюдениями КА и ПА и от прогресса в определении точных масс большого числа астероидов.

В соответствии с резолюциями МАС, система отсчета ICRS должна рассматриваться как четырехмерная система координат с независимой переменной — координатным временем TCB, в шкале которого должны даваться планетные эфемериды. Поскольку для пользователей, обрабатывающих VLBI измерения и наблюдения спутников Земли, согласно рекомендациям МАС необходимы планетные эфемериды, построенные в шкале TCB, то нами построен дополнительный вариант эфемерид EPM в шкале TCB. Переход к шкале координатного времени TCB не должен был и не привел к увеличению точности эфемерид и улучшаемых параметров. Невязки наблюдений для этих двух версий эфемерид EPM идентичны. Как и следовало ожидать, формальные стандартные точности всех параметров и их значения (за исключением значений орбитальных элементов планет) совпадают в пределах формальных неопределенностей.

Пятая глава "Определение астрономических постоянных".

Нахождение **возможного векового изменения гравитационной постоянной** исключительно важно, так как по существу проверяется сильный принцип эквивалентности. Непосредственно наблюдаемый эффект в планетных долготах зависит от временного интервала квадратически, и исходя из априорных ошибок можно ожидать погрешность в определении величины $\dot{G}/G$ порядка 10^{-12} в год и меньше. Значение возможного изменения гравитационной постоянной может быть получено из анализа лунных лазерных измерений, радарных наблюдений планет и КА и данных пульсарного тайминга. В таблице 2 приводятся значения $\dot{G}/G$, полученные авторами разными методами. Нулевое значение $\dot{G}/G$ было получено из обработки радарных наблюдений планет и 6-летнего ряда данных ПА Viking Hellings et al. (1989 г.). Значение $\dot{G}/G$ было получено Williams et al. в 2002 г. из обработки лунных лазерных данных 1970–2000 гг. Damur and Taylor

(1991) получили значение $\dot{G}/G$ из анализа скорости изменения орбитального периода двойного пульсара PSR 1913+16. В нижней части таблицы 2 приведены значения, полученные автором в разные годы из обработки радарных наблюдений планет и КА. Ненулевое значение $\dot{G}/G$ 1986 г., вероятно, объясняется систематическими ошибками наиболее ранних радарных наблюдений. Из таблицы 2 виден значительный прогресс в точности оценки этой величины и уменьшение возможных пределов изменения $\dot{G}/G$.

Таблица 2. Вековое изменение гравитационной постоянной

$\dot{G}/G$ (10^{-11} в год)	
0.2 ± 0.4	Hellings et al., 1983, 1989
1.10 ± 1.07	Damur and Taylor, 1991
0.00 ± 0.11	Williams et al., 2002
4.1 ± 0.8	Питьева, 1986
0.28 ± 0.32	Pitjeva, 1993
-0.002 ± 0.005	Питьева, 2005б

Параметры ППН-формализма — β, γ описывают метрические теории тяготения: β представляет степень нелинейности гравитации, γ характеризует кривизну пространства, порождаемую массой покоя. В случае ОТО $\beta = \gamma = 1$. Оценки параметра γ с высокой точностью получают из измерений отклонения света при VLBI наблюдениях квазаров (Eubanks et al., 1997), а также из эффекта Шапиро запаздывания радиосигналов при прохождении около Солнца, измеряемого по радарным наблюдениям планет и КА. Наиболее точная оценка γ (Bertotti et al., 2003) (см. таблицу 3) получена по измерениям сдвига частоты радиофотонов, проходящих до КА Cassini и обратно. Возможностей для оценки параметра β значительно меньше. Этот параметр может быть получен из эффекта Нордтведта (коэффициент которого $4\beta - \gamma - 3$) при обработке лазерных наблюдений Луны (Williams et al., 2002), либо из обработки радиолокационных наблюдений внутренних планет и КА по релятивистским возмущениям, вызывающим периодические и вековые изменения орбитальных элементов планет (Anderson et al., 2002). В конце таблицы 3 указаны оценки параметров β и γ, полученные автором из обработки радарных наблюдений внутренних планет и КА. По сравнению с работой Anderson et al. (2002) результаты автора 2005 г. были получены включением в обработку большого количества высокоточных радарных и VLBI наблюдений КА MGS и Odyssey (1998–2003 гг.), и некоторых других рядов наблюдений, например, российских радарных наблюдений (1961 – 1995 гг.). Кроме того астероидный шум был значительно уменьшен включением в совместное численное интегрирование 301 крупного астероида и возмущений от астероидного кольца с оценкой их масс из наблюдений.

Таблица 3. Параметры ППН-формализма

$\gamma - 1$	Автор	$\beta - 1$
-0.00006 $\pm$ 0.00031	Eubanks et al., 1997	-0.00019 $\pm$ 0.00026
0.002 $\pm$ 0.004	Williams et al., 2002	-0.001 $\pm$ 0.004
-0.0015 $\pm$ 0.0021	Anderson et al., 2002	-0.0010 $\pm$ 0.0012
0.000021 $\pm$ 0.000023	Bertotti et al., 2003	
-0.13 $\pm$ 0.06	Питьева, 1986	0.24 $\pm$ 0.12
0.006 $\pm$ 0.037	Pitjeva, 1993	0.014 $\pm$ 0.070
-0.0001 $\pm$ 0.0002	Питьева, 2005б	0.0000 $\pm$ 0.0001

Обнаружение отклонений в движении перигелиев планет и, в дальнейшем, объяснение их эффектами ОТО являлось одним из первых релятивистских тестов. Оценки величин релятивистского смещения перигелия $\Delta\pi$ для внутренних планет даны в таблице 4. Однако ситуация осложняется тем, что сжатие Солнца тоже вызывает вековое смещение перигелиев планет и, таким образом, общее смещение перигелиев δ это — линейная комбинация ППН-параметров и квадрупольного момента Солнца J_2

$$\delta = \Delta\pi\left[\frac{1}{3}(2+2\gamma-\beta) - \frac{1}{2}\frac{R_\odot^2}{R_\mu a(1-e^2)}J_2(3\sin^2 i - 1)\right].$$

Из сравнения модельных наблюдений, вычисленных по определенным построенным эфемеридам, с реальными наблюдениями можно получить поправку $\Delta\delta$, которая может интерпретироваться как поправка к комбинации ППН-параметров $2+2\gamma-\beta$, либо как поправку к J_2, либо как поправки к ним обоим. Точность и количество существующих наблюдений в 1960–1980–х годах не позволяли определять отдельные параметры β, γ, J_2, а лишь поправку $\Delta\delta$ к их линейной комбинации, причем только для Меркурия. Реальные поправки к движениям перигелиев других планет в то время не могли быть определены. В таблице

4 приведены, полученные автором в разные годы, поправки к вековым движениям планет. Из нее видно, что точности определения этих параметров для всех планет, кроме Венеры, значительно возросли за счет увеличения временного интервала, на котором наблюдаются планеты, и благодаря высокоточным наблюдениям MGS и Odyssey.

Таблица 4. Вековые движения перигелиев планет ($''$ /ст)

Меркурий	Венера	Земля	Марс	год
42.98	8.62	3.84	1.35	Брумберг, 1972
0.11 ± 0.22	-3.03 ± 0.71	-0.12 ± 0.16	-0.35 ± 0.24	Питьева, 1986
-0.017 ± 0.052	—	—	—	Pitjeva, 1993
-0.0036 ± 0.0050	0.53 ± 0.30	-0.0002 ± 0.0004	0.0001 ± 0.0005	Питьева, 2005б

Определение динамического сжатия Солнца является важной задачей, так как значение сжатия Солнца служит контролем для теорий, описывающих внутреннее строение Солнца и его вращение, а также является одним из параметров, необходимых для построения высокоточных теорий движения планет и Луны. Это значение может быть определено косвенным путем из различных астрофизических наблюдений Солнца. Такие наблюдения связаны со многими осложняющими проблемами. Наиболее точная астрофизическая оценка получена Pijpers (1998) $(2.18 \pm 0.06) \cdot 10^{-7}$.

Динамическое сжатие Солнца может быть независимо определено в процессе построения теории движения тел Солнечной системы при определении параметров этой теории из наблюдений. До появления в последние годы большого количества высокоточных данных КА MGS и Odyssey получить реальную оценку не удавалось, и динамическую оценку сжатия Солнца выводили из оценок движения перигелия Меркурия, куда входила линейная комбинация ППН-параметров и сжатия Солнца. Только в последние годы появилась возможность одновременно оценивать все три параметра J_2, β и γ. Такие определения даны в таблице 5. Значение Williams et al. (2002) получено из обработки лазерных наблюдений Луны, оценки Anderson et al. и автора данной работы получены из анализа радарных наблюдений внутренних планет и КА.

Таблица 5. Квадрупольный момент Солнца

$J_2 \cdot 10^{-7}$	
-5 $\pm$ 10	Williams et al., 2002
2.3 $\pm$ 5.2	Anderson et al., 2002
1.9 $\pm$ 0.3	Питьева, 2005б

Прохождение фотонов и движение планет в гравитационном поле Солнца позволяют рассматривать Солнечную систему как лабораторию по тестированию теорий гравитации. Современные радарные наблюдения планет и КА, имеющие метровую точность (относительная ошибка $10^{-11} - 10^{-12}$), обеспечивают возможность одновременного тестирования релятивистских эффектов и оценки сжатия Солнца.

Наблюдения посадочных аппаратов на других планетах позволяют не только уточнять орбиты этих планет и Луны, но и изучать динамику прецессионно - нутационного движения оси вращения планет, что представляет большой интерес для исследования их геофизики. В 1976-1982 г.г. в Лаборатории реактивного движения (США) были получены измерения времени запаздывания τ посадочных аппаратов на Марсе Viking-1,2, а в 1997 г. были выполнены наблюдения ПА Pathfinder. Одновременно с измерениями времен запаздывания проводились и наблюдения дифференциального запаздывания — $d\tau$. Все эти данные использованы в этой работе.

При вычислении положений посадочных аппаратов VIKING использовалась теория вращения Марса, при этом принимались во внимание не только прецессия и солнечная нутация, вычисляемая для контроля по двум разным теориям, но и сезонные члены во вращении оси Марса. В работе приведены уравнения для вычисления положений ПА в системе отсчета эфемерид и условные уравнения для обработки этих данных.

Были уточнены координаты посадочных аппаратов, угловая скорость вращения Марса ($\dot{V}$), параметры, определяющие ориентацию оси вращения Марса (I_q , Ω_q), и их вековые вариации (Pitjeva 1996a; 1996b; 1997; Питьева, 1997; 1999).

Таблица 6. Координаты посадочных аппаратов: Viking-1, Viking-2, Pathfinder

	Viking-1	Viking-2	Pathfinder
l [град.]	311.82218 ± 0.00006	134.05397 ± 0.00007	326.51947 ± 0.00002
px [км]	3136.5189 ± 0.0002	2277.3803 ± 0.0057	3203.2051 ± 0.0002
py [км]	1284.4440 ± 0.0010	2500.0176 ± 0.0026	1109.2009 ± 0.0039

Таблица 7. Параметры вращения Марса

$\dot{V}$ [^{o}/сутки]	I_q [^{o}]	$\dot{I}_q$ [$''$/год]	Ω_q [^{o}]	$\dot{\Omega}_q$ [$''$/год]
350.891985279 $\pm$ 0.000000009	25.1893835 $\pm$ 0.0000047	-0.0056 $\pm$ 0.0022	35.437559 $\pm$ 0.000019	-7.6120 $\pm$ 0.0048

Значение прецессии вращения Марса оказалось близким к значению, недавно полученному по наблюдениям ПА, а также радиотехническим данным КА MGS (Yoder и др., 2003):

$$\dot{\Omega}_q = [-7.597 \pm 0.025(10\sigma)]''/\text{год}.$$

Угловая скорость $\dot{V}$ соответствует следующему значению периода вращения Марса:

$$P_{\text{м}} = 24^h 37^m 22\overset{s}{.}662995 \pm 0\overset{s}{.}000003.$$

Юпитер и несколько крупнейших астероидов оказывают заметное влияние на орбиту Марса; поэтому используя современные высокоточные наблюдения Марса, можно из анализа возмущений орбиты Марса оценить **массы** этих объектов. В таблице 8 кроме полученных значений масс приведены и реальные неопределенности параметров, полученные из сравнения различных решений.

Таблица 8. Массы Юпитера и шести астероидов

Юпитер	Церера	Паллада	Юнона	Веста	Ирис	Бамберга
$M_\odot/M_{Jupiter}$	$10^{-12} M_\odot$					
1047.348591 $\pm$ 0.000026	475.3 $\pm$ 2.0	102.7 $\pm$ 2.0	15.1 $\pm$ 0.8	134.4 $\pm$ 2.0	6.3 $\pm$ 0.8	5.5 $\pm$ 0.8

Прямые значения масс, полученные из анализа динамических возмущений разных объектов, имеются примерно для двух десятков астероидов, для остальных массы были оценены астрофизическим способом по их диаметрам и плотностям. Все астероиды, имеющие спектральные коды (Tolen, 1989) были разделены на три таксономических типа Carbonic (C), Sillicum (S), and Metallic (M). Принятое нами разделение на таксономические типы вместе с их плотностями, определенными из обработки радиотехнических наблюдений планет и КА, дано в таблице 9.

Таблица 9. Таксономические типы астероидов и соответствующие им плотности в г/см^3

классы Толена	C, D, P, T, B, G, F	S, K, Q, V, R, A, E	M
таксономический тип	C	S	M
априорная плотность	1.8	2.4	5.0
плотность: Pitjeva, 2003	1.22—1.46	2.75—3.12	2.93—5.30
плотность: Питьева, 2005a	1.50 ± 0.3	2.20 ± 0.4	3.84 ± 1.2

В средней строке приведены интервалы изменения плотностей для трех версий тестовых версий эфемерид, построенных с возмущающими астероидами, имеющими немного отличающиеся диаметры, а значит и массы (Pitjeva, 2003).

Большинство оценок диаметров было получено из измерений потока их излучения в инфракрасной области на спутниках по программам IRAS и MSX (Tedesco et al., 2002a, 2002b), а также из покрытий звезд астероидами и из радарных наблюдений. Однако в ряде работ указывалась ограниченность стандартной тепловой модели астероидов, которая применялась Тедеско для определения диаметров астероидов из наблюдений IRAS, и были предложены несколько корректировок шкал диаметров Тедеско. Для того, чтобы исследовать, как влияют принятые значения диаметров астероидов на эфемериды планет и представление наблюдений были построены тестовые варианты эфемерид с возмущающими астероидами, чьи диаметры соответствовали системам Tedesco, Лупишко (1998), Hasegawa and Masanao (2001) и получены несколько вариантов улучшения этих эфемерид. Оказалось, что версии эфемерид для систем диаметров Тедеско и Hasegawa примерно одинаковы, совпадают в пределах точности и представления наблюдений. В тоже время, по-видимому, система диаметров Лупишко несколько хуже соответствует радиолокационным наблюдениям, поскольку ошибка единицы веса для этого варианта эфемерид заметно больше.

Общая масса 301 астероида, которые при построении эфемерид EPM2004 интегрировались индивидуально, составляет $1165.35 \cdot 10^{-12} M_{\odot}$ или 2.46 массы Цереры. Одновременно определялись два параметра: масса M_r и радиус R_r , характеризующих кольцо, моделирующее эффект от остальных более мелких астероидов,

$$M_r = (335 \pm 35) \cdot 10^{-12} M_{\odot}, \quad R_r = (3.13 \pm 0.05) \text{ AE}.$$

Масса дополнительного кольца составляет примерно 70% массы Цереры. Таким образом, оценка общей массы астероидов главного пояса, представленного суммой масс 301 астероида и астероидного кольца, равна:

$$M_{belt} = (1500 \pm 100) \cdot 10^{-12} M_{\odot} \text{ или } \sim 3 \text{ массы Цереры.}$$

Интересно отметить, что полученная динамическим путем общая масса астероидов главного пояса соответствует результатам Petit et al. (2002) для массы главного пояса астероидов, выведенной из эволюционных соображений и некоторых наблюдательных фактов, таких как распределение размер-частота для главного пояса.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Питьева Е.В., 1979. Использование радиолокационных наблюдений для уточнения элементов орбиты Меркурия. - Бюлл. ИТА, 14, N 7, 421–425.

2. Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С., 1981. Некоторые результаты обработки радиолокационных, лазерных и оптических наблюдений внутренних планет и Луны. - ДАН СССР, 261, N 6, 1320–1324.

3. Питьева Е.В., 1982. Учет топографии Марса и Венеры при обработке радиолокационных наблюдений. - Бюлл. ИТА, 15, N 3, 169–175.

4. Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С., 1982. Уточнение эфемерид внутренних планет и Луны по радиолокационным, лазерным и меридианным измерениям 1961–1980 гг. - Бюлл. ИТА, 15, N 3, 145–164.

5. Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С., 1984. Уточнение эфемерид внутренних планет и Луны. - Сб. "Проблемы астрометрии" (XXII астрометрическая конференция), ред. Подобед В.В., МГУ, М-ва, 296–299.

6. Питьева Е.В., 1986. Экспериментальное определение релятивистских эффектов по радиолокационным наблюдениям внутренних планет. - Бюлл. ИТА, 15, N 9, 538–543.

7. Krasinsky G.A., Aleshkina E.Yu., Pitjeva E.V., Sveshnikov M.L., 1986. Relativistic effects from planetary and lunar observations of the XVIII-XX centuries. - IAU Symp. N 114 / Relativity in celestial mechanics and astrometry (eds. J. Kovalevsky, V.A. Brumberg), D.Reidel Publ.Com., Dordrecht, 315–328.

8. Алешкина Е.Ю., Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., 1987. Экспериментальная проверка релятивистских эффектов и оценка величины изменения гравитационной постоянной по наблюдениям внутренних планет и Луны. - Успехи физических наук, 15, N 4, 720–724.

9. Питьева Е.В., 1992. Экспериментальная проверка релятивистских эффектов, оценка величины изменения гравитационной постоянной и топография поверхности Меркурия из радиолокационных наблюдений 1964–1989. - Препринт ИПА РАН, 39, 15 с.

10. Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Sveshnikov M.L., Chunajeva L.I., 1993. The motion of major planets from observations 1769–1988 and some astronomical constants. - Celest. Mech., 55, 1–23.

11. Pitjeva E.V., 1993. Experimental testing of relativistic effects, variability of the gravitational constant and topography of Mercury surface from radar observations 1964–1989. - Celest. Mech., 55, 313–321.

12. Питьева Е.В., 1995. Использование радарных данных космических аппаратов и радиолокационных наблюдений для уточнения элементов планет и параметров вращения Марса. - Сообщения ИПА РАН, 80, 16 с.

13. Pitjeva E.V., 1996a. Using spacecraft range data and radar observations for the improvement of the orbital elements of planets and parameters of Mars rotation. - IAU Symp. 172 / Dynamics, ephemerides and astrometry of the solar system (eds. S. Ferraz-Mello, B. Morando, J.E. Arlot), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 45–48.

14. Pitjeva E.V., 1996b. Using range observations of soasecraft Viking-1, Viking-2, Mariner-9 for the improvement of orbital elements of planets and parameters of Mars rotation. - Third international workshop on position astronomy and celestial mechanics (eds. G.A Lopez, E.I. Yagudina, U.M. Martinez and B.A. Condero), Valencia, 583–589.

15. Pitjeva E.V., 1997. The ephemerides of inner planets from spacecraft range data and radar observation 1961–1995. - IAU Coll. N 165 / Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies (eds. I.M. Wytrzyszc- zak, J.H. Lieske, R.A. Feldman), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251–256.

16. Питьева Е.В., 1997. Уточнение эфемерид больших планет и оценка величины векового изменения гравитационной постоянной по радарным наблюдениям космических аппаратов и планет 1961-1995 гг. - Труды ИПА РАН, вып. 1, "Астрометрия и геодинамика", 249–261.

17. Питьева Е.В., 1998. Новая численная теория движения планет EPM98 и ее сравнение с эфемеридой DE403 Лаборатории реактивного движения США. - Труды ИПА РАН, вып. 3, "Астрометрия и геодинамика", 5–23.

18. Питьева Е.В., 1999. Изучение динамики Марса из анализа наблюдений посадочных аппаратов Viking и Pathfinder. - Труды ИПА РАН, вып. 4 "Астрометрия, геодинамика и небесная механика", 22–35.

19. Питьева Е.В., 2000. Прогресс в определении некоторых астрономических постоянных из радарных наблюдений планет и космических аппаратов. - Труды ИПА РАН, вып. 5 "Радиоастрономия и эфемеридная астрономия", 58–69.

20. Pitjeva E.V., 2001a. Progress in the determination of some astronomical constants from radiometric observations of planets and spacecraft. - Astron. & Astroph., 371, 760–765.

21. Pitjeva E.V., 2001b. Modern numerical ephemerides of planets and the importance of ranging observations for their creation. - Celest. Mech. & Dyn.Astr., 80, N 3/4, 249–271.

22. Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., and Yagudina E. I., 2001. Estimating masses of asteroids. - Communication of IAA RAS, 139, 43 p.

23. Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., and Yagudina E. I., 2002. Hidden mass in the asteroid belt. - Icarus, 158, 98–105.

24. Pitjeva E.V., 2003. EPM2002 and EPM2002C - two versions of high accuracy numerical planertary ephemeredes constructed for TDB and TCB time scales. - Communication of IAA RAS, 155, 20 p.

25. Питьева Е.В., 2004. Современные численные теории движения Солнца,Луны и больших планет. - Труды ИПА РАН, вып. 10 "Эфемеридная астрономия", "Расширенное объяснение к Астрономическому ежегоднику" (гл.6), 112–134.

26. Pitjeva E.V., 2004. Numerical ephemerides of planets and the Moon — EPM and improvement of some astronomical constants. - Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcsecond to microarcseconds / Journees-2003" (eds. A.Finkelstein, N.Capitaine), IAA RAS, St.-Petersburg, 243–250.

27. Pitjeva E.V., 2005. Precise determination of the motion of planets and some astronomical constants from modern observations. - IAU Coll. N 196 / Transit of Venus: new views of the solar system and galaxy (eds. D.W. Kurtz, G.E. Bromage), Cambridge: Cambridge University Press, 1–12.

28. Питьева Е.В., 2005. Высокоточные эфемериды планет — EPM и определение некоторых астрономических постоянных. - Астрон. вестн., 2, 1–12.

29. Питьева Е.В., 2005. Релятивистские эффекты и сжатие Солнца из радарных наблюдений планет и космических аппаратов. - Письма в Астрон. журн., 4, 1–10.

Цитируемая литература

1. Аким Э.Л., Степаньянц В.А., 1977. Численная теория Земли и Венеры по данным радиолокационных, оптических наблюдений

и наблюдений за движением искусственных спутников "Венера-9" и "Венера-10". - ДАН СССР, 233, N 3, 314–317.

2. Брумберг В.А., 1972. Релятивистская небесная механика. - М: Наука, 382 с.

3. Васильев М.В., Красинский Г.А., 1997. Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии. - Труды ИПА РАН, вып. 1, 228–248.

4. Ерошкин Г.И., Глебова Н.И., Фурсенко М.А., 1992. Дополнения N 27-28А, к Астрономическому ежегоднику, ИТА РАН, С.-Петербург, 8 с.

5. Кислик М.Д., Колюка Ю.Ф., Котельников В.А., Петров Г.М., Тихонов В.Ф., 1980. Единая релятивистская теория движения внутренних планет Солнечной системы. - ДАН СССР, 255, 545–547.

6. Лупишко Д.Ф., 1998. Улучшенные IRAS-альбедо и диаметры астероидов. - Астрон. вестн., 32, N 2, 141–146.

7. Akim E.L., Brumberg V.A., Kislik M.D., Koljka Yu.F.,Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Shiskov V.A., Stepanianz V.A.,Sveshnikov M.L., Tihonov V.F., 1986. A relativistic theory of motion of inner planets. - IAU Symp. N 114 / Relativity in celestial mechanics and astrometry (eds. J. Kovalevsky, V.A. Brumberg), D. Reidel Publ. Com., Dordrecht, 63–68.

8. Anderson J.D., Lau E.L., Turyshev S., Williams J.D., Nieto M.M., 2002. Resent results for solar-system tests of General Relativity. - Bull. Am. Astron. Soc., 34, 660.

9. Ash M.E., Shapiro I.I., Smith W.B., 1967. Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations. - Astron. J., 72, 332–350.

10. Bertotti B., Iess L., P. Tortora P., 2003. A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft. - Nature, 425, 374–376.

11. Damour T., Taylor J.H., 1991. On the orbital period change of the binary pulsar PSR 1913+16. - Astroph. J., 366, 501–511.

12. Eubanks T.M., Matsakis D.N., Martin J.O., Archinal B.A., MacCarthy D.D., Klioner S.A., Shapiro S., Shapiro I.I., 1997. Advances in solar system tests of gravity. - American Physical Society / APS/AAPT Joint Meeting.

13. Hasegawa S., Masanao A., 2001. An estimate of surface regolith condition from IRAS observed asteroids using the free-beaming parameter thermal model. - 34th ISAS Lunar and Planetary Symposium (eds. H.Mizutani, M.Kato), ISAS, Kanagawa, Japan, 91–94.

14. Hellings R.W, Adams P.J, Anderson J.D., Keesey M.S., Lau E.L., Standish E.M., Canuto V.M., Goldman I., 1989. Experimental test of the variability of G using Viking lander ranging data. - Int. J. Theor. Phys., 28, 1035–1041.

15. Hilton J.L., 2002. Asteroid masses and densities. - In: Asteroids III (eds. W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel), Univ. Arizona Press, Tucson, 103–112.

16. Krasinsky G. A., Vasilyev M. V., 1997. Universal programming system ERA for high precision applications of dynamic and ephemeris astronomy. - IAU Coll. N 165 / Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies (eds. I.M.Wytrzyszczak, J.H.Lieske, R.A.Feldman), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 239–244.

17. Krasinsky G.A., 2002. Selenodynamical parameters from of LLR observations of 1970-2001. - Communication of IAA RAS, 148, 27 p.

18. Mignard F., Froeschle M., 2000. Global and local bias in the FK5 from the HIPPARCOS data. - Astron. & Astrophys., 354, 732–739.

19. Newhall XX, Standish E. M., Williams J. G., 1983. DE102: a numerical integrated ephemeris of the Moon and planets spanning forty-four centuries. - Astron. & Astrophys., 125, 150–167.

20. Niell A.E., 1996. Global mapping functions for the atmospheric delay of radio wavelenghs. - J. Geophys. Res., 101, 3227–3246.

21. Petit J.-M., Chambers J., Franklin F., Nagasawan M., 2002. Primordial excitation and depletion of the mail belt. - In: Asteroids III (eds. W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel), Univ. Arizona Press, Tucson, 711–723.

22. Pijpers F.P., 1998. Helioseismic determination of the solar gravitational quadrupole moment. - MNRAS, 297, L76–L80.

23. Standish E.M.Jr., 1990. The orservational basis for JPL's DE200, planetary ephemerides of the Astronomical Almanac. - Astron. & Astroph., 233, 252–271.

24. Standish E. M., Newhall XX, Williams J. G., Folkner W. M., 1995. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE403/LE403. - Interoffice Memorandum, 314.10-127, 22 p.

25. Standish E. M., 1998. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. - Interoffice Memorandum, 312.F-98-048, 18 p.

26. Standish E. M., 2003. JPL planetary ephemeris DE410. - Interoffice Memorandum, 312.N-03-109, 16 p.

27. Standish E. M., 2005. The astronomical unit now. - IAU Coll. N 196 / Transit of Venus: new views of the solar system and galaxy (eds. Kurtz D.W., G.E. Bromage), Cambridge: Cambridge University Press, 13 p.

28. Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D., 2002a. The supplemental *IRAS* minor planet survey. - Astron. J., 2002a., 123, 1056–1085.

29. Tedesco E. F., Egan M.P., Price S.D., 2002b. The Midcourse Space Experiment infrared minor planet survey - Astron. J. 2002b., 124, 583–591.

30. Tholen D.J., 1989. Asteroid taxonomic classifications, - Asteroids II (eds. Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S.), Univ. Arizona Press, 1139–1150.

31. Williams J.G., Boggs D.H., Dickey J.O., Folkner W.M., 2002. Lunar laser tests of gravitational physics. - Ninth Marcel Grossman Meeting (eds. V.G. Gurzadyan, R.T. Jantzen, R. Ruffini), World Scientific, 1797–1801.

32. Yoder C. F., Konoplev A. S., Yuan D. N., Standish E. M., Folkner W.M., 2003. Fluid core size of Mars from detection of the solar tide. - Science, 300, 299–303.