

Российская академия наук
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН

№ 156

Е. В. Питьева

**Современные численные теории движения Солнца,
Луны и больших планет**

Санкт-Петербург
2003

Е. В. Питьева. Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет.

Ключевые слова: Эфемериды DE и EPM: описание и сравнение.

В работе описаны современные численные эфемериды Солнца, Луны и планет DE200/LE200, DE403/LE403, DE405/LE405 Лаборатории реактивного движения США (JPL), а также эфемериды EPM87, EPM98, EPM2000, EPM2003, построенные в ИПА РАН. Приводятся релятивистские уравнения тел в невращающейся барицентрической системе координат, а также описаны общие свойства, различия и сравнение этих эфемерид между собой. Показано довольно хорошее согласие между DE403, DE405 и EPM98, EPM2000 соответственно на 120-летнем интервале (1886–2006 гг.), покрываемом EPM эфемеридами. Небольшие различия объясняются несколько более точными орбитами Цереры, Паллады и Весты, и следовательно, их возмущениями на орбиты планет в современную эпоху в эфемеридах EPM.

Эфемериды EPM для сопоставления с DE эфемеридами строились с временной шкалой TDB (в качестве независимой переменной), близкой к T_{eph} , которая используется для построения DE эфемерид. В соответствии с резолюциями IAU 2000 должна рассматриваться как четырехмерная система координат с независимой переменной — координатным временем TCB, в шкале которого должны создаваться планетные эфемериды. В работе описаны преобразования, необходимые для перехода к шкале TCB. Последние версии эфемерид EPM построены для двух шкал времени TDB и TCB. Переход к шкале координатного времени TCB не должен был и не привел к увеличению точности эфемерид и улучшаемых параметров.

Теория EPM2000 использовалась как эфемеридная основа “Дополнений к Астрономическому ежегоднику”, поэтому в работе для EPM2000 даются массы объектов и начальные параметры для интегрирования на эпоху JD 2448800.5 (TDB).

E. V. Pitjeva.

Modern numerical ephemerides of the Sun, the Moon and major planets.

Keywords: Ephemerides DE and EPM: description and comparison.

The JPL planetary, solar and lunar ephemerides — DE200/LE200, DE403/ LE403, DE405/LE405 and the ephemerides, EPM87, EPM98, EPM2000, EPM2003, constructed in the Institute of Applied Astronomy of RAS are described. Relativistic equations of bodies in a nonrotating solar–system barycentric Cartesian coordinate frame are given, as well as common properties and differences and comparisons of these ephemerides with each other are presented. A fairly good agreement of planetary orbits is between DE403, DE405 and EPM98, EPM2000, respectively, over the interval of 120 years (1886–2006) covered by EPM98 and EPM2000. Some differences are explained by the more correct computation of the orbits of Ceres, Pallas and Vesta and they affect the planets by EPM ephemerides over the present epoch.

For comparison with the JPL DEs ephemerides EPM ephemerides of IAA have been created up to now in TDB time scale (as the independent variable of the equations) close to T_{eph} used for the DEs ephemerides. To be consistent with IAU resolutions ICRS (International Celestial Reference System) should be treated as four-dimensional reference frame with TCB time scale in which planetary ephemerides should be constructed. The necessary modifications for the conversion to TCB time scale are described in the paper. The last versions of EPM ephemerides have been produced for TDB and TCB time scales. The conversion to TCB time scale could not and did not allow greater accuracy of ephemerides and adjusted parameters.

Since the EPM2000 have been used as the ephemeris base for “Addenda to the Astronomical Yearbook” the masses of objects and the initial conditions for the integrations at the epoch JD 2448800.5 (TDB) are given.

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 156 – Санкт-Петербург, 2003. – 32 с.

Содержание

1. Историческое введение: математическое моделирование движения планет	5
2. Общие свойства и различия в разных вариантах DE и EPM эфемерид	6
3. Эфемериды DE118/LE62 (1981 г.) и DE200/LE200 (1982 г.)	10
4. Эфемериды EPM87 (1974 – 1987 гг.)	10
5. Эфемериды DE403/LE403 (1995 г.)	11
6. Эфемериды EPM98 (1998 г.)	12
7. Эфемериды DE405/LE405 (1998 г.)	14
8. Эфемериды EPM2000 (2000 г.)	15
9. Эфемериды EPM2003 (2003 г.)	18
10. Заключение	22
11. Приложения	24
Список литературы	27

1. Историческое введение: математическое моделирование движения планет

Космические эксперименты, проводимые в дальнем космосе, а также введение в астрономическую практику новых наблюдательных методов (локация планет и Луны, траекторные измерения и т.д.) потребовали создания планетных эфемерид гораздо более точных, чем классические аналитические эфемериды [1] Леверье, Хилла, Ньюкома, Клеменса. С другой стороны, именно эти наблюдения обеспечили возможность создания эфемерид следующего поколения.

Ошибки современных лучших радиолокационных наблюдений не превышают нескольких метров, что требует правильности вычисления 12-ой значащей цифры в величине времени запаздывания. Для обеспечения такой высокой точности необходимо построение соответствующей модели движения небесных тел, что представляет собой серьезную проблему, которую в настоящее время проще всего можно решить численным интегрированием на ЭВМ уравнений движения планет и Луны.

Впервые координаты пяти внешних планет были получены Эккертом и др. [2] численным интегрированием на четырехсотлетнем интервале времени. Для построения численной теории движения больших планет высокой точности необходимо совместное численное интегрирование уравнений орбитального движения планет и Луны, а также уравнений вращения Земли и Луны. Впервые совместное численное интегрирование больших планет и Луны было выполнено Оестервинтером и Коэном [3] на интервале 1911-1973 гг.

Для обеспечения космических полетов в конце 1960-х численные теории создавались несколькими группами в США и России. Американские группы работали в Калифорнийском (JPL) [4], [5] и Массачусетском технологическом (MIT) институтах [6]. В России высокоточные численные эфемериды планет [7] были созданы в результате исследований, проводившихся в Институте прикладной математики (ИПМ) [8], в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ и ЦУП) [9] и в Институте теоретической астрономии (ИТА), где теории независимо строились Глебовой [10], Ерошкиным [11], а также группой под руководством Красинского [12], [13]. Эта работа продолжалась в Институте прикладной астрономии (ИПА), где построена серия эфемерид ЕРМ (Ephemerides of Planets and the Moon).

Наиболее точными аналитическими теориями движения планет является серия французских эфемерид VSOP, созданные в Бюро Долгот (BDL). В [14] учтены третьи порядки относительно возмущающих масс, учтено влияние Луны и релятивистские эффекты. Значения постоянных этой теории определены сравнением с численной теорией DE200, а не с наблюдениями, точность этой теории $0''.01$. Параллельно в BDL была построена и аналитическая теория движения Луны ELP-2000 [16]. Уточненные варианты этих теорий, где постоянные находятся сравнением с DE403/LE403, DE405/LE405 изложены в [17], [18]. В настоящее время начата работа по сравнению теорий с наблюдениями. Эти эфемериды используются во французском астрономическом ежегоднике.

Далее рассматриваются численные эфемериды серий EPM (ИПА РАН) и DE (Development Ephemeris, JPL), как наиболее развитые к настоящему времени и соответствующие точностям современных радиотехнических и лазерных наблюдений.

2. Общие свойства и различия в разных вариантах DE и EPM эфемерид

Основным общим свойством эфемерид DE и EPM является совместное численное интегрирование уравнений движения 9 больших планет, Солнца, Луны и лунной физической либрации, выполненное в постньютоновском приближении, описываемом трехпараметрической метрикой (α, β, γ) , в гармонической системе координат $\alpha = 0$; все варианты эфемерид были построены для ОТО: $\beta = \gamma = 1$.

Различные версии эфемерид DE и EPM слегка отличаются:

- моделированием лунной либрации;
- моделированием возмущений астероидов;
- системами отсчета, в которых строятся эфемериды;
- различными наборами наблюдений, по которым уточнялись параметры теорий.

Релятивистские уравнения движения планет, Солнца и Луны в невращающейся барицентрической системе координат имеют следующий вид:

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = A + B + C + D, \quad (2.1)$$

где A — ньютоновские гравитационные ускорения:

$$A = \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3}; \quad (2.2)$$

В — релятивистские члены рассмотрены в работах ([60], [61], [62], [63]), для программного комплекса ЭРА ([32]) были взяты из [62]:

$$\begin{aligned} B = \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3} & \left\{ -\frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \sum_{k \neq i} \frac{\mu_k}{r_{ik}} - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{\mu_k}{r_{jk}} + \gamma \left(\frac{v_i}{c} \right)^2 + \right. \\ & + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c} \right)^2 - \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_j - \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \dot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \right]^2 + \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \ddot{\mathbf{r}}_j \left. \right\} + \\ & + \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j}{r_{ij}^3} \{ [\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j] \cdot [(2 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_i - (1 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_j] \} (\dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j) + \\ & + \frac{3 + 4\gamma}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j \ddot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}}; \quad (2.3) \end{aligned}$$

C — члены, вызываемые сжатием Солнца:

$$C = 3J_2 \mu_S \frac{R^2}{r_{iS}^4} \left\{ \left[\frac{5}{2} \left(\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_S)}{r_{iS}} \cdot \mathbf{p} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_S)}{r_{iS}} - \left(\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_S)}{r_{iS}} \cdot \mathbf{p} \right) \mathbf{p} \right\}; \quad (2.4)$$

D — дополнительные члены для Земли(3) и Марса(4), вызываемые кольцом астероидов ([45]):

$$D = \frac{1}{2} \frac{M_r}{R_r^3} F(1.5, 1.5, 2; \alpha^2) \mathbf{r}_{3,4}. \quad (2.5)$$

В уравнениях (2.1) — (2.5) приняты следующие обозначения:

\mathbf{r}_i , $\dot{\mathbf{r}}_i$, $\ddot{\mathbf{r}}_i$ — барицентрические вектора-координаты, скорости и ускорения i -ого тела,

$\mu_j = Gm_j$, где G — гравитационная константа, m_j — масса j -ого тела; для больших планет, кроме Земли, массы m_j включают в себя и массы спутников, вращающихся около этих планет,

$$r_{ij} = |r_j - r_i|,$$

β, γ — параметры PPN формализма,

$$v_i = |\dot{\mathbf{r}}_i|,$$

c — скорость света,

$\ddot{\mathbf{r}}_j$ — в двух членах с правой стороны уравнения (2.3) означает барицентрическое ускорение тела j благодаря ньютоновским эффектам остальных тел,

J_2 — коэффициент второй зональной гармоники Солнца,

R — экваториальный радиус Солнца,

\mathbf{p} — единичный вектор, направленный на северный полюс Солнца,

$M_r = Gm_r$, m_r — масса астероидного кольца,

R_r — радиус астероидного кольца,

F — гипергеометрическая функция, $\alpha = r_{3,4}/R_r$, $r_{3,4} = |\mathbf{r}_{3,4}|$.

Необходимо отметить, что в процессе интегрирования реально интегрируются только уравнения движения планет, астероидов и Луны. Барицентрические координаты и скорости Солнца получаются из уравнения (2.6):

$$\sum_i \mu_i^* \mathbf{r}_i = 0, \quad (2.6)$$

где

$$\mu_i^* = \mu_i \left\{ 1 + \frac{1}{2c^2} v_i^2 - \frac{1}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j}{r_{ij}} \right\}. \quad (2.7)$$

Некоторые характеристики эфемерид DE118/LE62, DE200/LE200, DE403/LE403, DE405/LE405, EPM87, EPM98, EPM2000 даются в табл.2.1 (Символ \Downarrow указывает на модификацию эфемериды без изменения математической модели или набора наблюдений).

Таблица 2.1.

Сравнение характеристик эфемерид DE и EPM

Эфемериды	Интервал интегрир.	Система отсчета	Математическая модель	тип	Данные	
					число	интервал
DE118 (1981)	1599→2169	FK4	интегрирование: Солнце, Луна, 9 пл. + возмущения от динам. от 3 астероидов	оптика	44755	1911-79
↓				радарные	1307	1964-77
DE200				космич. ап.	1408	1971-80
			система (задача 2-х тел)	LLR	2954	1970-80
				Всего:	50424	1911-80
EPM87 (1987)	1700→2020	FK4	интегрирование: Солнце, Луна, 9 пл. + возмущения от 5 астероидов (задача 2-х тел)	оптика	48709	1717-80
				радарные	5344	1961-86
				космич. ап.	—	—
				LLR	1855	1972-80
				Всего:	55908	1717-86
DE403 (1995)	-1410→3000	ICRF	интегрирование: Солнце, Луна, 9 пл. + возмущения от 300 астероидов (средние элементы)	оптика	26209	1911-95
↓				радарные	1341	1964-93
DE404	↓			космич. ап.	1935	1971-94
	-3000→3000			LLR	9555	1970-95
				Всего:	39057	1911-95
EPM98 (1998)	1886→2006	DE403	интегрирование: Солнце, Луна, 9 пл. 5 астер. + возмущ. от 295 астероидов (средние элементы)	оптика	—	—
				радарные	55959	1961-95
				космич. ап.	1927	1971-82
				LLR	10000	1970-95
				Всего:	67886	1961-95
DE405 (1997)	1600→2200	ICRF	интегрирование: Солнце, Луна, 9 пл. + возмущения от 300 астероидов (отдельное интегр.)	оптика	28261	1911-96
↓				радарные	955	1964-93
DE406				космич. ап.	1956	1971-95
	-3000-3000			LLR	11218	1969-96
				Всего:	42410	1911-95
EPM2000 (2000)	1886→2011	DE405	интегрирование: Солнце, Луна, 9 планет, 300 астероидов	оптика	—	—
				радарные	58076	1961-1997
				космич. ап.	24587	1971-1997
				LLR	13500	1970-1999
				Всего:	96163	1961-1999
EPM2003 (2003)	1886→2011	ICRF	интегрирование: Солнце, Луна, 9 планет, 300 астероидов, кольцо астероидов	оптика	44490	1913-2003
				радарные	58076	1961-1997
				космич. ап.	164193	1971-2002
				LLR	14612	1970-2001
				Всего:	281371	1913-2003

3. Эфемериды DE118/LE62 (1981 г.) и DE200/LE200 (1982 г.)

Различные варианты эфемерид серии DE появлялись в 60-ые годы XX-ого века. При построении эфемериды DE118/LE62 [19] учитывались возмущения Цереры, Паллады и Весты, орбиты которых вычислялись по задаче 2-х тел. Параметры теории определялись сравнением с более чем 50000 позиционных наблюдений, включающих меридианные и фотографические наблюдения, выполненные, в основном, в Морской обсерватории (Вашингтон, США) на интервале 1911–1979 гг., американские радарные измерения планет и космических аппаратов и лазерные наблюдения Луны. По меридианным наблюдениям внутренних планет и Солнца были уточнены углы ориентации эфемерид DE118/LE62 по отношению к фундаментальному каталогу FK4. Эфемериды DE118/LE62 были трансформированы в эфемериды DE200/LE200 поворотом DE118/LE62 к среднему экватору J2000.0 и динамическому равноденствию, определенному осреднением мгновенных значений долготы узла и наклона орбиты барицентра Земля+Луна вокруг Солнца [20]. До недавнего времени эфемериды DE200/LE200 являлись основной публикуемых эфемерид для почти всех национальных астрономических ежегодников.

4. Эфемериды EPM87 (1974 – 1987 гг.)

Эфемериды EPM начали создаваться в ИТА в 1974 г. Наиболее заверченный вариант, обозначенный в табл.2.1, как EPM87, был создан в 1987 г. [21]. Основное отличие EPM97 от DE200 заключается в том, что параметры теории уточнялись по широкому набору различных наблюдений XVIII-XX вв.

Красинским была предложена специальная методика последовательной обработки различных типов наблюдений, позволяющая полностью реализовать их точность и заложенную в них информацию.

На первом этапе из обработки радиолокационных и лазерных наблюдений находились все орбитальные параметры движения внутренних планет и Луны, за исключением трех углов, определяющих привязку к инерциальной системе координат. С помощью этих точных эфемерид исторические наблюдения прохождений Меркурия и Венеры по диску Солнца (1715-1959 гг.) были использованы для распространения

шкалы атомного времени до 1715 г. корректировкой принятой в 1952 г. Брауэром [22] системы различий шкал эфемеридного и всемирного времени. После продолжения атомной шкалы времени назад, до 1715 г., в ней можно было обрабатывать другие классические наблюдения на этом интервале времени. Так, меридианные наблюдений внешних планет были использованы для уточнения элементов этих планет, и определена величина приливного замедления Луны из анализа солнечных затмений 1778–1974 гг., лунных покрытий Венеры 1832–1971 гг., Марса 1821–1971 гг. и Альдебарана, а также гринвичских меридианных наблюдений прямых восхождений Луны: $\dot{n}_M = (-22''9 \pm 0''8)/\text{столетие}^2$ [23].

Эфемериды EPM87 были привязаны к фундаментальному каталогу FK4 по меридианным наблюдениям Солнца и внутренних планет, выполненных в Морской обсерватории за период 1911–1971 гг., а также по точным наблюдениям покрытий звезд фундаментального каталога Венерой (1959 г.) и Марсом (1976 г.) [24].

EPM87 были уникальными эфемеридами планет и Луны, превосходившими по точности эфемериды DE200 для XVIII–XIX вв. Однако, эфемериды EPM87 были реализованы на российской ЭВМ БЭСМ-6, которая вскоре после этого была разобрана. К счастью, создатели этой теории имели возможность использовать накопленный опыт в своей последующей работе.

5. Эфемериды DE403/LE403 (1995 г.)

В 1995 г. появилась новая версия JPL эфемерид — DE403/LE403 [25]. Ее основные отличия от DE200/LE200 следующие.

- Эфемериды DE403/LE403 основаны на системе отсчета ICRF (International Celestial Reference Frame), которая определяется направлениями на неподвижные квазизвездные радиоисточники, наблюдаемые методом VLBI. Привязка эфемериды DE403 к системе ICRF осуществлялась включением в обработку VLBI наблюдений космических аппаратов “Phobos” и “Magellan” около Марса и Венеры соответственно, а также использованием данных, полученных из комбинации VLBI и лунных лазерных наблюдений [26].
- Моделирование возмущений от астероидов было значительно улучшено, поскольку, как показал опыт, недостаточно принимать во внимание возмущения на орбиту Марса лишь от нескольких,

наиболее массивных астероидов. Сначала, используя средние элементы, полученные Вильямсом [27], были вычислены координаты 300-х астероидов, оказывающих наибольшее влияние на орбиту Марса. Затем, астероиды были разбиты на две группы. Зная координаты и массы Цереры, Паллады и Весты, были вычислены возмущения от этих объектов и прямо включены в уравнения движения. Для остальных 297 астероидов массы были получены из оценок их диаметров и плотностей для 3-х таксономических классов: C, S, M, на которые разбиты астероиды. По этим массам и их средним элементам были вычислены возмущения от каждого астероида на Марс, Землю и Луну для всего временного интервала эфемерид. Они суммировались по всем 297 астероидам и запоминались в файле, который использовался при интегрировании.

Все эти изменения привели к довольно значительному улучшению орбит всех планет (до 1-2 км для внутренних планет, до 100 км для Юпитера). Разности (DE403–DE200) геоцентрических расстояний на интервале 1800-2050 г. составили для Луны и Солнца 100-200 м, для внутренних планет около 20 км; а для внешних планет разности гелиоцентрических расстояний изменялись от 100 км для Юпитера до 400000 км для Плутона.

6. Эфемериды EPM98 (1998 г.)

Новая стадия построения эфемерид EPM началась примерно с 1995 г.

Алешкиной и др. [28] была уточнена численная эфемерида движения Луны. Параметры теории были определены по 25-летнему ряду лунных лазерных наблюдений.

Эфемериды планет и Луны EPM98 получены совместным численным интегрированием уравнений движения 9-ти больших планет, Солнца, Луны, пяти наиболее массивных астероидов и лунной физической либрации [29]. Начальные элементы пяти малых планет (Церера, Паллада, Веста, Ирида и Бамберга) взяты из "Эфемерид малых планет на 1992 год" [30] и затем улучшены автором [29] по столетнему ряду оптических наблюдений. По сравнению с предыдущими версиями EPM эфемерид динамическая модель планетного движения была дополнена моделированием возмущений от трех таксономических классов астеро-

идов (295 объектов), чьи возмущения на движение планет учитывались так же, как в эфемеридах DE403.

Численное интегрирование уравнений движения в барицентрической системе координат на эпоху J2000.0 выполнялось методом Эверхарта [31] девятнадцатого порядка с постоянным шагом 0.25 суток на интервале JD 2410000.5–2454000.5 (1886 – 2006 гг.). Интегратор для моделирования движения планет в рамках программной системы ЭРА (Эфемеридные Расчеты в Астрономии) [32] создан М.В.Васильевым. Результатом работы интегратора являются коэффициенты чебышевских разложений для положений и скоростей всех рассматриваемых объектов на заданном интервале времени. Интервалы аппроксимации и степень полиномов задавались, исходя из требуемой точности аппроксимации для координат планет (для внутренних планет ошибки аппроксимации не превосходили долей метра). Исходные начальные условия для численного интегрирования и значения параметров динамической теории были взяты из эфемерид DE403. Внутренняя точность эфемерид EPM98 контролировалась сравнением результатов прямого и обратного интегрирования на 50-летнем интервале. Расхождение координат для Солнца, Луны и всех планет, кроме Меркурия, составило меньше 1 метра. Ошибка долготы растет пропорционально временному интервалу со скоростью $\Delta\dot{\lambda} = 5$ м/столетие для Меркурия и со скоростью $\Delta\dot{\lambda} = 0.12$ м/столетие для Луны.

На интервале почти в 50 лет (JD 2435000.5–2452000.5) было проведено сравнение эфемерид EPM98 и DE403 всех планет и Солнца. Сравнивались барицентрические координаты, скорости и расстояния, а также гелиоцентрические эклиптические элементы. Сравнение показало довольно хорошую согласованность эфемерид: расхождение для полюсей составило от 0.4 м для Меркурия до 344 м для Плутона, а для средних долгот всех планет (кроме Марса) — меньше 0.027 mas. Максимальные расхождения в расстояниях — до 500 м получены для Марса на интервале 1963–1973 гг. Это объясняется некоторым различием динамических моделей эфемерид DE403 и EPM98. В теории EPM98 несколько более корректно вычисляются орбиты наиболее массивных астероидов Церера, Паллада, Веста в современную эпоху, и как следствие, орбита Марса. При изменении нашего интегратора таким образом, чтобы возмущения всех астероидов учитывались аналогично их учету в DE403 (теория EPMTEST), расхождения между орбитами Марса для двух теорий уменьшились в расстояниях до 10.3 м. Рассогласование между орбитами других планет также значительно уменьшилась. В табл.6.1

приведены максимальные различия (ΔR) в метрах для барицентрических координат и расстояний всех планет и Солнца эфемерид DE403 и EPM98 на интервале 1954–2001 гг.; ΔR^* , данное в последней колонке табл.6.1, - это максимальные различия барицентрических расстояний эфемерид DE403 и EPMTEST.

Таблица 6.1.

Максимальные различия барицентрических координат и расстояний в теориях DE403 и EPM98 (в метрах), (ΔR^* — разность расстояний для DE403 и EPMTEST)

Планета	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔR	ΔR^*
Меркурий	4.9	5.7	2.5	3.3	0.2
Венера	16.4	14.2	6.5	3.9	0.3
Земля+Луна	13.0	14.8	7.8	3.8	0.5
Марс	458.9	455.8	216.8	80.6	10.3
Юпитер	76.1	68.2	28.3	32.8	12.9
Сатурн	75.7	60.2	23.3	29.6	5.4
Уран	69.8	82.5	34.7	59.5	18.1
Нептун	44.0	140.7	55.9	96.5	41.7
Плутон	151.4	183.2	22.5	118.1	54.0
Солнце	2.8	2.6	1.3	3.1	1.2

Параметры движения планет были уточнены по американским и российским радарным наблюдениям планет, полученным с 1961 по 1995 гг. (около 60000 наблюдений), по наблюдениям времени запаздывания КА “Mariner-9” и посадочных аппаратов “Viking-1,2”.

7. Эфемериды DE405/LE405 (1998 г.)

Вариант эфемерид серии DE, DE405/LE405 [33], отличается от предыдущего DE403 включением в обработку новых наблюдений. В частности, фотоэлектрические и CCD наблюдения внешних планет позволили существенно уточнить их орбиты. Кроме того, была уточнена привязка к системе ICRF включением в обработку новых VLBI наблюдений космических аппаратов. Процедура вычисления положений астероидов была также значительно улучшена: орбиты всех астероидов вычислены численным интегрированием. В результате точность

DE405/LE405 ограничена, в основном, неточным знанием масс астероидов и оценивается порядка 1-ого км для внутренних планет [34].

Впервые при интегрировании принималось во внимание ненулевое сжатие Солнца: $J_2 = 2.0 \cdot 10^{-7}$, полученное из астрофизических оценок. Солнечное сжатие вызывает вековые тренды во всех элементов планет, кроме полуосей и эксцентриситета. Значения вековых трендов обратно пропорциональны квадрату полуосей, максимальный вековой ход из-за сжатия Солнца возникает в перигелии Меркурия. Согласно В.А.Брумбергу [35] скорость векового движения перигелия дается формулой:

$$\frac{d\pi}{dt} = \frac{3}{2} \left(\frac{R_{\odot}}{a_i} \right)^2 \frac{n_i}{(1 - e_i^2)^2} J_2. \quad (7.1)$$

Если $J_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ тогда для Меркурия вековые вариации равны

$$\frac{d(ecos\pi)}{dt} = -5.12 \text{ mas}, \quad \frac{d(esin\pi)}{dt} = 1.04 \text{ mas}, \quad (7.2)$$

и согласуются со значениями разностей DE403 и DE405 для этих же параметров на интервале с 1600 г. по 2200 г.; для элементов Марса таких вековых движений элементов не наблюдается [36].

Сравнение различий планетных эфемерид DE403-DE200 и DE405-DE403 показывает, что разности DE405-DE403 существенно (для внешних планет на порядок) меньше.

8. Эфемериды EPM2000 (2000 г.)

Эфемериды EPM2000 [36] построены на интервале 125 лет численным интегрированием уравнений движения 311 тел и лунной физической либрации. Для 16 основных тел (9 больших планет, Солнце, Луна и 5 выбранных астероидов) уравнения включали их взаимные возмущения, релятивистские эффекты, эффекты сжатия Солнца и возмущения от других 295 выбранных астероидов. Для этих 295 астероидов уравнения движения включали только ньютоновский гравитационный эффект от 16 основных тел и эффект сжатия Солнца. Пятью особыми астероидами являются Церера, Паллада, Веста, Ирида и Бамберга, выделенные из-за их сильных возмущений на Марс во второй половине 20-ого века. Остальные 295 астероидов были выбраны Вильямсом [37] по той же самой причине — из-за их возмущений, но только значительно меньших. Массы планет и астероидов, первоначальные координаты и скорости

планет для интегрирования соответствовали эфемеридам DE405. Так как средние элементы астероидов определены Вильямсом [37] на большом интервале времени, то орбиты, вычисленные с использованием этих средних элементов (как это делалось в DE403 и EPM98), отличаются от их современных орбит. Поэтому орбиты всех 300 астероидов были получены совместным численным интегрированием всех объектов. Орбиты наиболее массивных астероидов (Церера, Паллада, Веста, Ирида и Бамберга), а также Андромаха и Татьяна, для которых координаты, вычисленные с использованием средних элементов отличаются от их координат, полученных интегрированием более, чем на 1 а.е., были улучшены из оптических наблюдений. Положения для интегрирования других астероидов были вычислены из их элементов, взятых из "Эфемерид малых планет на 1992 год" [30].

Эфемериды EPM2000 были улучшены по набору данных (табл.2.1), содержащих более 80000 американских и российских радарных наблюдений планет (1961 – 1995 гг.), доплеровских и наблюдений запаздывания ПА “Viking” и “Pathfinder”, различных измерений КА около Юпитера (1973 –1997 гг.), и VLA позиционных измерений теплового излучения Юпитера. Эфемериды Луны были улучшены по 13500 LLR наблюдениям (1970 – 2000), остаточные невязки LLR измерений близки к их априорным стандартным отклонениям [38].

Редукция радиолокационных наблюдений включала релятивистские поправки, запаздывание радиосигналов в тропосфере Земли и в плазме солнечной короны, с одновременным оцениванием параметров ее модели. Большое внимание уделялось редукции радарных наблюдений за топографию поверхностей планет. Коррекция наблюдений Марса и Венеры за топографию была выполнена с помощью современных гипсометрических карт поверхностей этих планет, а также пользуясь представлением топографии по сферическим гармоникам 16–18 степени. Топография Меркурия была представлена в виде разложения по сферическим гармоникам (до 2 порядка включительно), коэффициенты которых были оценены из радарных наблюдений.

Необходимо отметить чрезвычайно точные наблюдения марсианских посадочных аппаратов “Viking” (1976 – 1982) и “Pathfinder” (1997). Уникальность таких наблюдений заключается в том, что они свободны от ошибок топографии, которая остается в радарных наблюдениях планет несмотря на редукцию измерений за топографию. Наблюдения посадочных аппаратов являлись наиболее точными наблюдениями из всех позиционных наблюдений планет. Положение посадочных ап-

паратов на поверхности Марса вычислялось, принимая во внимание прецессию, нутацию марсианской оси и сезонные члены во вращении Марса [39], [40].

В табл.8.1 приведены наблюдения запаздывания и дифференциального запаздывания ПА “Viking-1,-2” и “Pathfinder” вместе с их априорными ошибками σ_{apr} и среднеквадратичными ошибками представления наблюдений, где σ_{EMS} — среднеквадратичные ошибки, полученные Стэндишем, σ_{DE} и σ_{EPM} — ошибки представления наблюдений, полученные автором при использовании эфемерид DE405 и EPM2000 соответственно.

Таблица 6.2.

Радиолокационные наблюдения посадочных аппаратов “Viking-1,-2” и “Pathfinder” (для τ все σ даны в м, для $d\tau$ — в мм/сек.).

Объект	Тип набл.	Интервал набл.	Кол.-во набл.	σ_{apr}	σ_{EMS}	σ_{DE}	σ_{EPM}
Viking-1	τ	7.1976-11.82	1078	7-12	9.5	8.5	9.4
Viking-2	τ	9.1976-09.77	80	7-10	-	5.4	6.0
Viking-1	$d\tau$	7.1976-12.78	15030	1.3-27	0.7-4.3	0.9	0.9
Pathfinder	τ	7.1997-09.97	90	10-22	5.3	5.7	2.9
Pathfinder	$d\tau$	7.1997-10.97	7613	0.11	0.1	0.1	0.1

Точность определения элементов орбиты из радарных наблюдений довольно высокая. Например, формальные стандартные ошибки метода наименьших квадратов для больших полуосей Земли и Марса и астрономической единицы около одной – двух десятых метра. Однако, как показывает опыт, реальная точность в несколько раз хуже формальной из МНК. Полученная величина астрономической единицы оказалась совпадающей с ее значением в теории Лаборатории реактивного движения (JPL) DE405/LE405:

$$\begin{aligned}
 AU_{EPM2000} &= (149597870691.2 \pm 0.2)\text{м}, \\
 AU_{DE405} &= (149597870691.0 \pm 0.4)\text{м}.
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

Среднеквадратичные ошибки радарных наблюдений составляли для Меркурия 1.4 км, для Венеры и Марса 0.7 км и 8 м для “Viking” и “Pathfinder” измерений.

Более подробную информацию об эфемериде EPM2000 можно получить из работы [36].

9. Эфемериды EPM2003 (2003 г.)

Серьезные проблемы в построении современных эфемерид планет возникают в связи с необходимостью учитывать возмущения, вызываемые астероидами. В DE200 и EPM98 учитывались возмущения лишь от нескольких крупнейших астероидов, что оказалось недостаточно. В DE403, DE405, EPM2000, EPM2003 были приняты во внимание возмущения от 300 астероидов, но массы большинства этих астероидов либо совсем неизвестны, либо известны недостаточно хорошо, и как было показано Стэндишем и Фиенгой [43], точность планетных эфемерид значительно ухудшается со временем благодаря этому фактору.

Массы нескольких астероидов, наиболее сильно возмущающих орбиты Марса и Земли, могут быть оценены из обработки высокоточных наблюдений марсианских посадочных аппаратов или спутников, вращающихся около Марса. Массы астероидов Эрос(433) и Матильда(253) были определены с высокой точностью из возмущений КА “NEAR” [47], [48]. В последнее время были открыты и изучены двойные астероиды и астероиды, имеющие спутники; массы таких систем (пять из них: Каллиопа(22), Евгения(45), Сильвия(87), Антиора(90), Пулкова(762) входят в список 300 астероидов) теперь известны достаточно хорошо [49], [50]. К сожалению, точность динамического определения масс астероидов из возмущений других астероидов во многих случаях оказалась недостаточной из-за неточности знания масс возмущающих астероидов, недоучета возмущений других астероидов, и неточности самих наблюдений [44], [49]. Поэтому массы остальных из 300 астероидов и 57 дополнительных, наиболее значительно возмущающих планеты, оценивались астрофизическим способом из анализа данных о радиусах и классах астероидов [44], [45]. Были использованы последние опубликованные диаметры, полученные из наблюдений в инфракрасной области спутника IRIS ([51]), из покрытий звезд астероидами ([52]) и из радарных наблюдений ([53]); плотности астероидов трех таксономических классов были уточнены из обработки радарных наблюдений планет и космических аппаратов. Тесты, в которых варьировалось общее число возмущающих астероидов и их массы продемонстрировали влияние этих факторов на эфемериды больших планет ([44]).

В табл.9.1 приведены оценки масс Цереры (1), Паллады(2), Юноны(3, Весты(4), Ирида(7) и Бамберги(324), полученные автором из обработки наблюдений ПА “Viking”, “Pathfinder”и КА “Mars Global Surveyor” (“MGS”).

Таблица 9.1.

Массы Цереры, Паллады, Юноны, Весты, Ирида и Бамберги
в $(GM_i/GM_\odot) \cdot 10^{-10}$

Церера	Паллада	Юнона	Веста	Ирида	Бамберга
4.789	1.014	0.119	1.362	0.051	0.061
±0.007	±0.003	±0.003	±0.001	±0.001	±0.001

Кроме того, тысячи небольших астероидов, многие из которых настолько малы, что никогда не будут открыты с Земли, оказывают существенное суммарное влияние на орбиты внутренних планет. Общий дополнительный эффект от астероидов, не учитываемых при совместном численном интегрировании, моделировался потенциалом от кругового кольца астероидов, расположенного в эклиптической плоскости с равномерным распределением в нем вещества (формулы возмущающей силы кольца астероидов, полученные Красинским, даны в [45]. Масса M_r кольца его радиус R_r были включены в число улучшаемых параметров. Получена оценка $M_r \approx 3.12 \cdot 10^{-10} M_\odot$ (без 300 крупнейших астероидов) с неопределенностью 10%; как следствие, для общей массы астероидов главного пояса получено $M_{belt} \approx 14.36 \cdot 10^{-10} M_\odot$. Для среднего радиуса кольца выведена оценка $R_r \approx 2.76$ AU с неопределенностью 3%.

Таким образом, в динамической модели эфемерид EPM2003, учитываются взаимные возмущения больших планет и Луны в рамках ОТО, эффекты, связанные с физической либрацией Луны, возмущения от 300 крупнейших астероидов и массивного кольца, а также динамические возмущения от сжатия Солнца. Эфемериды были улучшены по набору наблюдений (табл.2.1), содержащих более 220000 американских и российских радиотехнических наблюдений планет и космических аппаратов (1961-2002 гг.), в том числе и измерения КА “MGS”, имеющие точность несколько метров, а также около 50000 CCD астрометрических наблюдений внешних планет и их спутников, меридианных и фотографических наблюдений XX-ого века. Наряду с планетными эфемеридами

Красинским ([54]) было улучшено орбитальное и вращательное движение Луны обработкой LLR наблюдений 1971–2001 гг.

Для улучшения орбит внешних планет особое значение имеют наблюдения спутников внешних планет, выполненные в обсерваториях Николаев (1962–1998 гг.) и Флагстафф (1998–2003 гг.), которые заметно точнее наблюдений самих планет и не отягощены ошибками определения фазового центра. Кроме того, эти наблюдения, как и фотоэлектрические наблюдения прохождений, полученные в Ла Палме (1984 – 1998 гг.) уже были отнесены к международной системе ICRF самими наблюдателями. Остальные оптические наблюдения, относящиеся к разным каталогам, сначала были приведены к каталогу FK4 Свешниковым [55], [56], затем они были переведены к FK5 по известным формулам (смотри, например, [25]), и окончательно отнесены к системе ICRF, используя три угла поворота между каталогами HIPPARCOS и FK5, J2000 в mas [57]:

$$\varepsilon_x = -19.9, \quad \varepsilon_y = -9.1, \quad \varepsilon_z = 22.9. \quad (9.1)$$

Элементы орбит четырех внутренних планет (кроме ориентации) целиком определяются радарными наблюдениями планет и КА. Система этих планет была ориентирована к ICRF включением VLBI измерений КА “Magellan” и “Phobos”, выполненных в системе ICRF, в общее решение аналогично тому, как это было сделано Стэндишем ([33]) для эфемерид DE405/LE405. Углы поворота между эфемеридами EPM2003 и системой ICRF в mas:

$$\varepsilon_x = 4.5 \pm 0.8, \quad \varepsilon_y = -0.8 \pm 0.6, \quad \varepsilon_z = -0.6 \pm 0.4. \quad (9.2)$$

В табл.9.2 приведены формальные стандартные точности орбитальных элементов планет, улучшенные по всем наблюдениям.

Таблица 9.2.

Формальные стандартные точности элементов орбит планет.

Планета	a [m]	$\sin i \cos \Omega$ [mas]	$\sin i \sin \Omega$ [mas]	$e \cos \pi$ [mas]	$e \sin \pi$ [mas]	λ [mas]
Меркурий	0.211	3.596	3.760	0.363	0.315	0.933
Венера	0.347	0.685	0.676	0.044	0.046	0.209
Земля	0.146	—	—	0.001	0.001	—
Марс	0.635	0.004	0.008	0.001	0.001	0.002
Юпитер	655	2.572	2.313	0.334	0.385	1.153
Сатурн	4730	3.839	4.436	4.306	3.308	3.896
Уран	44000	4.312	7.097	5.638	3.644	10.447
Нептун	561000	4.447	9.754	17.339	20.790	42.985
Плутон	40014000	8.207	16.090	97.219	38.599	97.513

Среднеквадратичные ошибки недавних радарных наблюдений КА “MGS” составляют 6 м для наблюдений 1998 г., когда аппарат находился вблизи верхнего соединения с Солнцем, где ошибки из-за солнечной короны значительно увеличиваются, и 1.5 м для наблюдений 1999–2002 гг.

В соответствии с резолюциями МАС ICRS должна рассматриваться как четырехмерная система координат с независимой переменной — координатным временем TCB, в шкале которого планетные эфемериды должны создаваться. Для сравнения с широко распространенными DE эфемеридами Лаборатории реактивного движения США наши EPM эфемериды до настоящего времени строились с временной шкалой TDB (в качестве независимой переменной), близкой к T_{eph} ([64]), которая используется для построения DE эфемерид. Пользователи, обрабатывающие VLBI измерения и наблюдения спутников Земли, должны иметь планетные эфемериды, построенные в шкале TCB, поэтому дополнительный вариант эфемерид EPM2003 был построен в шкале TCB. Для перехода от шкалы TDB к шкале TCB, согласно резолюциям МАС (например, [58]), должны быть выполнены следующие преобразования:

- начальная эпоха интегрирования $JD=2448800.5$ TDB выражена в TCB:

$$\text{date}(TCB) = (\text{date}(TDB) - 2443144.5) * L_B + \text{date}(TDB), \quad (9.3)$$

— координаты умножены на $(1 + L_B)$:

$$x_i(TCB) = x_i(TDB) * (1 + L_B), \quad (9.4)$$

— массы умножены на $(1 + L_B)$:

$$GM_i(TCB) = GM_i(TDB) * (1 + L_B), \quad (9.5)$$

— интервал запаздывания радарных наблюдений, вычисляемый в шкале TCB, должен быть выражен в собственном времени, т.е. сначала

$$\tau_{TDB} = \tau_{TCB} * (1 - L_B), \quad (9.6)$$

а затем переводится в шкалу собственного времени обычным способом.

Так как эфемериды EPM близки к DE405, было использовано значение

$$L_B = 1.55051976772 \cdot 10^{-8}, \quad (9.7)$$

полученное для связи между TCB и TDB эфемерид DE405 [59].

Переход к шкале координатного времени TCB не должен был и не привел к увеличению точности эфемерид и улучшаемых параметров. Как и следовало ожидать, формальные стандартные точности всех параметров и их значения (за исключением орбитальных элементов планет) совпадают в пределах формальных неопределенностей.

Более подробное описание наблюдений, их представление, а также определение других параметров можно найти в работе [46].

10. Заключение

Следует подчеркнуть еще раз, что только использование радарных наблюдений обеспечило построение эфемерид внутренних планет с миллисекундной точностью.

До выпуска на 1986 г. эфемериды Солнца и внутренних планет в “Астрономическом ежегоднике” основывались на аналитических теориях движения Ньюкома [1], эфемериды внешних планет — на численной эфемериде Эккерта и др. [2], а лунные эфемериды — на уточненной теории движения Луны Брауна-Эккерта [1]. С 1986 г. в соответствии с решениями XVIII Генеральной Ассамблеи МАС (Патры, 1982) вычисления эфемерид Солнца, Луны и больших планет базируются на численной теории DE200/LE200.

В связи с возросшей точностью наблюдений в стандартах IERS с 1996 г. рекомендовано применение эфемерид DE405/LE405 [41], [59]. Резолюции XXIV ГА МАС (Манчестер, 2000) рекомендуют использовать эти эфемериды и в национальных ежегодниках. В “Астрономическом ежегоднике”, начиная с выпуска на 2004 г., планетные и лунные эфемериды основываются на эфемериде DE405/LE405. Теория EPM2000 используется как эфемеридная основа “Дополнений к Астрономическому ежегоднику”, содержащих таблицы прямоугольных координат Солнца, Луны и больших планет для интервала 2001–2010 гг.

Более детальную численную и графическую информацию о сравнении теорий серий DE и EPM даны в работе [36].

Автор благодарит Стэндиша (JPL) за предоставление необходимых материалов и полезные комментарии.

11. Приложения

Таблица 11.1.

Массы планет, Луны, Цереры, Паллады, Весты в а.е.³/сутки² × 10⁻¹⁵ и в GM_{\odot}/GM_i — для планет, в $(GM_i/GM_{\odot}) \cdot 10^{-10}$ — для астероидов.

Объект	EPM2000		DE200/LE200
	GM_i а.е. ³ /сутки ² × 10 ⁻¹⁵	GM_{\odot}/GM_i (планеты) $(GM_i/GM_{\odot}) \cdot 10^{-10}$ (астероиды)	GM_{\odot}/GM_i (планеты) $(GM_i/GM_{\odot}) \cdot 10^{-10}$ (астероиды)
Меркурий	49125.4745	6023600.0000	6023600
Венера	724345.2486	408523.7100	408523.5
Земля+Луна	899701.1347	328900.5614	328900.55
Марс	95495.3511	3098708.0000	3098710
Юпитер	282534590.9526	1047.3486	1047.350
Сатурн	84597151.8568	3497.8980	3498.0
Уран	12920249.1678	22902.9800	22960
Нептун	15243589.0078	19412.2400	19314
Плутон	2188.6998	135200000.0000	130000000
Церера	139.0787	4.7000	5.90
Паллада	29.5912	1.0000	1.08
Веста	38.4686	1.3000	1.38

Примечания:

1. Системы масс планет эфемерид EPM2000 и DE405/LE405 совпадают.
2. Отношение масс Луны и Земли равно $\mu_{EPM2000} = \mu_{DE405} = 1/81.30056 = 0.0123000383$.

Таблица 11.2.

Максимальные различия барицентрических координат и расстояний в теориях DE405 и EPM2000 (в метрах).

Объект	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔR
Меркурий	1321	1203	2043	384
Венера	439	825	1536	158
Земля+Луна	96	83	104	59
Марс	186	203	238	88
Юпитер	61663	59006	101143	9466
Сатурн	1594	1399	871	1085
Уран	1175	3059	1933	2106
Нептун	992	1008	623	367
Плутон	2553	5485	1526	4794
Солнце	63	42	98	28

Таблица 11.3.

Координаты и скорости EPM2000 для планет, Солнца (барицентрические) и Луны (геоцентрические) на дату JD 2448800.5 (TDB) в а.е. и а.е./сутки.

Объект	X, \dot{X}	Y, \dot{Y}	Z, \dot{Z}
Меркурий	-0.38570755095557	-0.15087958437133	-0.04073017397765
	0.00478962001259	-0.02179940107354	-0.01214146216417
Венера	-0.17801702966787	0.63346194219299	0.29624976675062
	-0.01964621202815	-0.00517972682092	-0.00108678119977
Земля+Луна	0.10339837080300	-0.92498197771442	-0.40113581359729
	0.01683890261525	0.00151456858049	0.00065668488796
Марс	1.39429554379411	0.05182310692485	-0.01404766949184
	0.00015072910224	0.01381190973891	0.00633087590460
Юпитер	-5.31978204481487	0.91503897105547	0.52183470228003
	-0.00155077138198	-0.00649913636287	-0.00274800681733
Сатурн	6.87472592820694	-6.47844219435640	-2.97126943525179
	0.00371245195541	0.00362783852854	0.00133861792432
Уран	5.38936613285570	-17.17389743752988	-7.59793148932786
	0.00375116379646	0.00084602674400	0.00031746752308
Нептун	9.12714210990709	-26.55134043920853	-11.09485731122918
	0.00297193161863	0.00092205307723	0.00030342332385
Плутон	-17.68872255081144	-23.76305733512715	-2.08620665558347
	0.00261126811956	-0.00192542479511	-0.00138760699645
Луна	0.00165437432561	0.00169158122495	0.00090295855834
	-0.00047539057690	0.00034983561529	0.00010423037709
Солнце	0.00240827590262	0.00309748834704	0.00125500572750
	0.00000009847036	0.00000509098675	0.00000221223720
Церера	1.36693910360704	-2.23439125974066	-1.32878912947081
	0.00861950393511	0.00448101216513	0.00034807358718
Паллада	-0.02059769253549	-3.17925358590336	0.63235031868625
	0.00854938254235	-0.00155513899955	-0.00027033659980
Веста	-2.05134623046716	-0.84177258906976	-0.06668071700678
	0.00502877519026	-0.00975011436780	-0.00453821328687

Список литературы

- [1] Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. 1979, М.: Наука.
- [2] Eckert, W. J., Brouwer, D. and Clemence, G. M. Coordinates of the five outer planets 1653-2060. *Astron. Pap.*, 1951, **12**.
- [3] Oesterwinter C., Cohen Ch. J. New orbital elements for Moon and planets. *Celest. Mech.*, 1972, **5**, 317–395.
- [4] Standish E. M., Keesey M. S. W., Newhall XX. JPL development ephemeris number 96. JPL Technical Report **32-1603**, 1976, Pasadena, 1–34.
- [5] Newhall XX, Standish E. M. Jr., Williams, J. G. DE102: a numerically integrated ephemerides of the Moon and planets spanning forty-four centuries. *Astron. & Astrophys.*, 1983, **125**, 150–167.
- [6] Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B. Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations. *Astron. Journ.*, 1967, **72**, 332–350.
- [7] Akim Eh. L., Brumberg V. A., Kislik M. D., Koljuka Yu. F., Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Shiskov V. A., Stepanianz V. A., Sveshnikov M. L., Tikhonov V. F. A relativistic theory of motion of inner planets. In: “Proceedings of the IAU Symp. N 114, Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry (J.Kovalevsky and V. A. Brumberg (eds))”, 1986, Kluwer, Dordrecht, 63–68.
- [8] Аким Э.Л., Степаньянц В.А. Численная теория Земли и Венеры по данным радиолокационных, оптических наблюдений и наблюдений за движением искусственных спутников "Венера-9" и "Венера-10". *ДАН СССР*, 1977, **233**, 314–317.
- [9] Кислик М.Д., Колюка Ю.Ф., Котельников В.А., Петров Г.М., Тихонов В.Ф. Единая релятивистская теория движения внутренних планет Солнечной системы. *ДАН СССР*, 1980, **255**, 545–547.
- [10] Глебова Н.И. Уточнение эфемерид внутренних планет на основе обработки оптических и радиолокационных наблюдений на интервале 1960-1980. *Бюлл. ИТА*, 1984, **15**, 241–250.

- [11] Ерошкин Г.И., Глебова Н.И., Фурсенко М.А. Дополнения **27-28А**, к “Астрономическому ежегоднику”, 1992, Санкт-Петербург, ИТА РАН, 1–8.
- [12] Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С. Некоторые результаты обработки радиолокационных, лазерных и оптических наблюдений внутренних планет и Луны. ДАН СССР, 1981, **261**, 1320–1324.
- [13] Красинский Г.А., Питьева Е.В., Свешников М.Л., Свешникова Е.С. Уточнение эфемерид внутренних планет и Луны по радиолокационным, лазерным и меридианным измерениям 1961-1980 гг. Бюлл. ИТА, 1982, **261**, 169–175.
- [14] Bretagnon P. Theorie du mouvement de l’ensemble des planets: Solution VSOP82. *Astron. and Astrophys.*, 1982, **114**, 278–288.
- [15] Moisson X., Bretagnon P. Analytical planetary solution VSOP2000. *Celest.Mech.& Dyn.Astr.*, 2001, **80**, N 3/4, 205-213.
- [16] Chapront J., Chapront-Touzé M. The lunar ephemeris ELP-2000. *Astron. and Astrophys.*, 1983, **124**, 50–62.
- [17] Bretagnon P., Francou G. Planetary theories in rectangular and VSOP87 solutions. *Astron. and Astrophys.*, 1988, **202**, 309–315.
- [18] Chapront J., Chapront-Touzé M. ELP2000-85: a semi-analytical lunar ephemeris adequate for historical times. *Astron. and Astrophys.*, 1987, **190**, 342–352.
- [19] Standish, E. M. Jr. The observational basis for JPL’s DE200 planetary ephemerides of the *Astronomical Almanac*. *Astron. and Astrophys.*, 1990, **233**, 252–271.
- [20] Standish, E. M. Jr. Orientation of the JPL ephemerides, DE200/LE200, to the dynamical equinox of J2000. *Astron. and Astrophys.*, 1982, **114**, 297–302.
- [21] Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Sveshnikov M. L., Chunajeva L. I. The motion of major planets from observations 1769-1988 and some astronomical constants. *Celest. Mech. and Dyn. Astron.*, 1993, **55**, 1–23.
- [22] Brouwer, D. A study of the changes in the rate of rotation of the Earth. *Astron. Journ.*, 1952, **57**, 125–146.

- [23] Krasinsky G. A., Saramonova E. Yu., Sveshnikov M. L., Sveshnikova, E. S. Universal time, lunar tidal deceleration and relativistic effects from observations of transits, eclipses and occultations XVIII-XX centuries. *Astron. and Astrophys.*, 1985, **145**, 90–96.
- [24] Красинский Г.А. Наклонение эклиптики по наблюдениям покрытий Марсом ε *Geminorum* (1976 г.) и Венерой α *Leonis* (1959 г.). Бюлл. ИТА, 1985, **15**, 440–448.
- [25] Standish E. M., Newhall XX, Williams J. G., Folkner W. M. JPL planetary and lunar ephemerides, DE403/LE403. Interoffice Memorandum, 1995, **314.10-127**, 1–22.
- [26] Folkner W. M., Charlot P., Finger M. H., Williams J. G., Sovers O. J., Newhall XX, Standish E. M. Determination of the extragalactic-planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements. *Astron. and Astrophys.*, 1994, **287**, 279–289.
- [27] Williams J. G. 1988 (Private communication to E. M. Standish)
- [28] Aleshkina E. Yu., Krasinsky G. A., Vasilyev M. V. Analysis of LLR data by the program system ERA. In: “Proceedings of the IAU Coll.165, Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies (eds. I.M.Wytrzyszczak, J.H.Lieske, R.A.Feldman)”, 1997, Dordrecht, Kluwer, 227–238.
- [29] Питьева Е.В. Новая численная теория движения планет EPM98 и ее сравнение с эфемеридой DE403 Лаборатории реактивного движения США. Труды ИПА РАН, 1998, **3**, “Астрометрия и геодинамика”, 5–23.
- [30] “Ephemerides of Minor Planets for 1992 (Ed. Yu. Batrakov)”, 1991, SPb, “Nauka”.
- [31] Everhart F. Implicit single-sequence methods for integrating orbits. *Celest. Mech.*, 1974, **10**, 35-36.
- [32] Krasinsky G. A., Vasilyev M. V. Universal programming system ERA for high precision applications of dynamic and ephemeris astronomy. In: “Proceedings of the IAU Coll.165, Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies (eds. I.M.Wytrzyszczak, J.H.Lieske, R.A.Feldman)”, 1997, Dordrecht, Kluwer, 239–244.
- [33] Standish E. M. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. Interoffice Memorandum, 1998, **312.F-98-048**, 1–18.

- [34] Standish E. M. Dynamical reference frame – current relevance and future prospects. In: “Proceedings of the IAU Coll.180, Towards models and constants for sub-microarcsecond astrometry (eds. K.J.Johnston, D.D.McCarthy, B.J.Luzum, G.H.Kaplan)”, 2000, U.S. Naval Obs., Washington, 120–126.
- [35] Брумберг В.А. Релятивистская небесная механика, 1972, М.: "Наука".
- [36] Pitjeva E.V. Modern numerical ephemerides of planets and the importance of ranging observations for their creation. *Celest.Mech.& Dyn.Astr.*, 2001, **80**, N 3/4, 249-271.
- [37] Williams J. G. Harmonic analysis. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1989, **21**, 1009–1010.
- [38] Алешкина Е.Ю., Васильев М.В., Красинский Г.А. Построение численной теории орбитально-вращательного движения Луны с учетом приливных эффектов на основе лазерных наблюдений. В кн.: “Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века (тезисы докладов)”, 2000, СПб, ИПА РАН, 235-236.
- [39] Folkner W. M., Yoder C. F., Yuan D. N., Standish E. M., Preston R. A. Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars Pathfinder. *Science*, 1997, **278**, 1749–1752.
- [40] Питьева Е.В. Изучение динамики Марса из анализа наблюдений посадочных аппаратов Viking и Pathfinder. Труды ИПА РАН, 1999, **4** “Астрометрия, геодинамика и небесная механика”, 22–35.
- [41] IERS-1996 (IERS Conventions). Ed. McCarthy D.D. IERS Technical Note 21, 1996, IERS/Obs. de Paris.
- [42] IERS-2000 (IERS Conventions). Ed. McCarthy D.D. IERS Technical Note 22, 2000, IERS/Obs. de Paris (<http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>)
- [43] Standish E. M., Fienga A. Accuracy limit of modern ephemerides imposed by uncertainties in asteroid masses. *Astron.& Astrophys.*, 2002, **384**, 322–328.
- [44] Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., and Yagudina E. I. Estimating masses of asteroids. *Communication of IAA RAN*, 2001, **139**, 1–43.
- [45] Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., and Yagudina E. I., 2002. Hidden mass in the asteroid belt. *Icarus*, 2002, **158**, 98–105.

- [46] Pitjeva E.V. EPM2002 and EPM2002C – two versions of high accuracy numerical planetary ephemerides constructed for TDB and TCB time scales. Communication of IAA RAN, 2001, **155**, 1–19.
- [47] Yeomans D. K. and 12 colleagues. Estimating the mass of asteroid 253 Mathilde from tracking data during the NEAR flyby. *Science*, 1997, **278**, 2106–2109.
- [48] Yeomans D. K. and 14 colleagues. Estimating the mass of asteroid 433 Eros during NEAR spacecraft flyby. *Science*, 1999, **285**, 560–561.
- [49] Hilton J.L. Asteroid masses and densities. In: *Asteroids III* (W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel, Eds.), 2002, Univ. Arizona Press, Tucson, 103–112.
- [50] Merline W. J., Weidenschilling S. J., Durda D. D., Margot J., Pravec P., Storrs A. D. Asteroids do have satellites. In: *Asteroids III* (W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel, Eds.), 2002, Univ. Arizona Press, Tucson, 289–312.
- [51] Tedesco E. F., Noah P.V., Noah M., Price S.D. The supplemental *IRAS* minor planet survey. *AJ*, 2002, **123**, 1056–1085.
- [52] Dunham D. W., Goffin E., Manek J., Federspiel M., Stone R., Owen W. Asteroidal occultation results multiply helped by HIPPARCOS. *Journal of the Italian Astronomical Society*, 2002, **73**, N 3, 662–665.
- [53] Ostro S. J., Hudson R. S., Berner A. M. M., Giorgini J. D., Magri Ch., Margot J., Nolan M. C. Asteroid radar astronomy. In: *Asteroids III* (W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel, eds.), 2002, Univ. Arizona Press, Tucson, 289–312.
- [54] Krasinsky G. A. Selenodynamical parameters from analysis of LLR observations of 1970–2001. Communication of IAA RAN, 2002, **148**, 1–27.
- [55] Свешников М. Л. Редукция вашингтонских наблюдений больших планет Солнца к однородной системе. *Бюлл. ИТА*, 1974, **152**, 563–570.
- [56] Свешников М. Л., 2000 (частное сообщение).
- [57] Mignard F. Report of the IAU working group on ICRS. In: *Towards models and constants for sub-microarcsecond astrometry* (Johnston K. J., McCarthy D. D., Luzum B. J., Kaplan G. H., eds.), 2000, U.S. Naval Observatory, Washington, DC, USA, 10–19.

- [58] Brumberg V.A., and Groten E. IAU resolutions on reference systems and time scales in practice. *Astron.& Astrophys.*, 2001, **367**, 1070–1077.
- [59] IERS-2000 (IERS Conventions). (McCarthy D.D. ed.), IERS Technical Note 22, 2000, IERS/Obs. de Paris (<http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>).
- [60] Estabrook F. B. Post-Newtonian n-body equations of the Brans-Dicke theory. *Astrophys.J.*, 1969, **158**, 81–83.
- [61] Anderson J. D. Lectures on physical and technical problems posed by precision radio tracking. In: *Experimental Gravitation* (Bertotti B., ed.), 1974, New York, Academic, p. 163.
- [62] Newhall XX, Standish E. M., Williams J. G. DE102: a numerical integrated ephemeris of the Moon and planets spanning forty-four centuries. *Astron.& Astrophys.*, 1983, **125**, 150–167.
- [63] Brumberg V. A. *Essential relativistic celestial mechanics*. Bristol, Philadelphia and New York, 1991, Adam Hilger, 263p.
- [64] Standish E. M. Time scales in the JPL and CfA ephemerides. *Astron.& Astrophys.*, 1998, **336**, 381–384.

Е. В. Питьева

Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**

Подписано к печати 8.08.2003 Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Печ.л. 2.1
Уч.-изд.л. 2.1 Тираж 150 Заказ 320 бесплатно

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.