

Динамическая модель Солнечной системы в эфемеридах планет ЕРМ

© Е. В. Питьева¹, Д. А. Павлов¹, Н. П. Питьев^{2,1}

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время точность координат в эфемеридах планет и Луны для внутренних планет составляет несколько метров и 10–20 м — для Юпитера и Сатурна. Необходимость построения более точных эфемерид планет требует совершенствования динамической модели Солнечной системы. При построении эфемерид тел Солнечной системы обычно учитываются возмущения от Солнца, планет и Луны, а также основные релятивистские эффекты.

В статье рассмотрены возмущения следующего порядка малости, которые также оказывают влияние на движение планет. Такими возмущениями являются притяжение со стороны Главного пояса астероидов, пояса Койпера, троянцев Юпитера, а также сжатие Солнца и релятивистский эффект Лензе-Тирринга. Кроме того, оценено влияние всех этих возмущений на движение планет Солнечной системы и приведены области в Солнечной системе, где влияние этих возмущений проявляется наиболее сильно.

Ключевые слова: небесная механика, эфемериды планет, радарные наблюдения, астероиды, ТНО, эффекты Общей теории относительности.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.51.82-92>

Введение

В ИПА РАН в основе построения современных высокоточных эфемерид планет и Луны (ЕРМ, Ephemeris of Planets and the Moon) лежит динамическая модель Солнечной системы, в которой учтены основные силы, действующие на тела, и эффекты Общей теории относительности (ОТО). Также учитываются притяжение крупных астероидов и транснептуновых объектов (ТНО), гравитационное влияние Главного пояса астероидов, транснептунового пояса Койпера и сжатие Солнца.

Динамическая модель Солнечной системы ЕРМ требует уточнения в силу нескольких факторов. С одной стороны, эфемериды должны соответствовать растущей точности наблюдений, увеличению их количества и временного интервала. С другой стороны, растет потребность в более точных эфемеридах планет при реализации или планировании национальных и международных космических программ.

В настоящее время, наряду с учетом притяжения Солнца, планет и крупных тел Солнечной системы, а также важнейших релятивистских эффектов, при получении высокоточных положений планет необходимо учитывать более слабые гравитационные возмущения и эффекты, которые менее масштабны

и различны в разных частях Солнечной системы. Например, для космических исследований в районе Меркурия и в окосолнечном пространстве становится существенным не только учет сжатия Солнца, но и релятивистский эффект Лензе-Тирринга, связанный с вращением Солнца. При исследованиях периферийной части Солнечной системы и проведении космических миссий к большим планетам и ТНО нужно принимать во внимание не только гравитационные влияния крупных тел, но и суммарное притяжение многочисленных небольших объектов пояса Койпера: их суммарная масса больше, чем масса известных крупных тел последнего [1].

В области пространства, где происходит движение Земли, Марса и Юпитера, необходимо рассмотрение возмущений от тел Главного пояса астероидов. Наряду с традиционным учетом притяжения крупных тел пояса, стал возможным учет гравитационного влияния совсем небольших астероидов, их обломков и пыли (которые составляют около 5 % от полной массы Главного пояса). При расчете ЕРМ оно моделируется вращающимся дискретным кольцом [2]. Как было показано в [3], при современной точности эфемерид целесообразно учитывать систематическое влияние двух компактных групп троянцев Юпитера. Это вызвано тем, что в районах устойчивых точек Лагранжа L4, L5 Юпитера находятся сотни тысяч астероидов, суммарное притяжение которых значимо для ближайших планет.

В данной работе приводится обзор и оценка влияния таких эффектов, как сжатие Солнца, эффект Лензе-Тирринга, притяжение пояса Койпера и Главного пояса астероидов.

Эфемериды планет и Луны — ЕРМ2019 ИПА РАН

Оценка влияния вышеупомянутых эффектов на движение планет выполнена с использованием новой версии эфемерид ЕРМ2019. Эфемериды, начиная с версии ЕРМ1987 до версии ЕРМ2014, описаны в [4]. Дальнейшее развитие ЕРМ, связанное с новой версией программного комплекса ЭРА-8 [5] и новой версией орбитально-вращательного движения Луны [6], описано в [1, 7]. Эфемериды ЕРМ2019 содержат барицентрические координаты и скорости Солнца, 8 планет и карликовой планеты Плутон, трех крупнейших астероидов (Церера, Паллада, Веста) и 4 ТНО (Эрида, Хаумеа, Макемаке, Седна), а также параметры лунной либрации и разность шкал времени TT-TDB. Все эфемериды охватывают интервал времени более 400 лет (1787–2214 гг.), кроме «длинной» эфемериды 2017H, охватывающей интервал более 13100 лет.

Наблюдения, которые использовались для построения эфемерид ЕРМ, охватывают интервал более 100 лет. К ним относятся оптические наблюдения, начиная с 1913 г., а также высокоточные радиотехнические наблюдения, которыми охвачен интервал более чем в 50 лет.

В эфемеридах ЕРМ теория движения Солнца, Луны и планет описывается релятивистскими уравнениями Эйнштейна-Инфельда-Гофмана в инерциальной барицентрической системе и шкале времени TDB [7] с учетом дополнительных возмущений от крупнейших астероидов и ТНО, колец астероидов и пояса Койпера, эффектов сжатия Солнца и Лензе-Тирринга, а также гравитационного возмущения от троянцев Юпитера.

При построении эфемерид планет уточнялось около 300 модельных параметров по примерно 120 000 наблюдений. Эти наблюдения представляют собой в основном нормальные места, составленные из данных 800 000 измерений космических аппаратов (КА). Точность радарных наблюдений КА для внутренних планет достигла нескольких метров, для Юпитера, благодаря 4 оборотам КА Juno — 10 м; для Сатурна по 10-летним наблюдениям КА Cassini — 20 м. Эфемериды Урана и Нептуна опираются почти исключительно на оптические наблюдения. Имеется только по одному пространственному положению этих планет, полученному из радиотехнических наблюдений КА Вояджер. В табл. 1 показаны ошибки определения положений планет для эфемерид EPM2019.

Т а б л и ц а 1

Ошибки определения положений планет для эфемерид EPM2019

Планета	Ошибка положения
Меркурий	< 1 м
Венера	~3 м
Земля	2 м
Марс	1–2 м
Юпитер	10 м
Сатурн	20 м
Уран	~500 км (0".05)
Нептун	~1000 км (0".05)

Влияние 301 астероида Главного пояса астероидов

В первых версиях эфемерид EPM (EPM1980) учитывались гравитационные возмущения только 5 астероидов, сильнее всего влияющих на Землю и Марс. Джеймс Вильямс [8] в конце 1980-х показал, что необходимо учитывать возмущения по крайней мере 300 больших астероидов, чтобы обеспечить необходимую точность определения орбиты Марса, а в 1995 г. в JPL были построены эфемериды DE403 [9] с учетом гравитационных возмущений этих астероидов.

В эфемеридах EPM, начиная с EPM1998 [10], учитываются возмущения от 301 крупного астероида Главного пояса, которые включены в общую систему уравнений движения планет. Наша последняя оценка массы 301 астероида дана в работе [2]:

$$M_{301} = (3.839 \pm 0.024) \cdot 10^{-4} M_{\oplus} (3\sigma),$$

где σ — среднеквадратическая ошибка.

Здесь и далее в статье влияние дополнительного возмущения, учитываемого в динамической модели Солнечной системы, будет оцениваться как разность двух положений планеты в прямоугольной инерциальной барицентрической системе (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) на один и тот же момент времени в шкале времени TDB. Положения планеты (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) вычисляются численным интегрированием системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику

ческую модель Солнечной системы, с одинаковыми начальными условиями, с дополнительным возмущением и без него соответственно. Смещение планеты вследствие действия возмущающего фактора вычисляется по формуле:

$$\Delta S = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{1/2}.$$

Суммарное гравитационное влияние 301 астероида на смещение планет ΔS представлено на интервале 10 лет (1984–1994 гг.) на рис. 1.

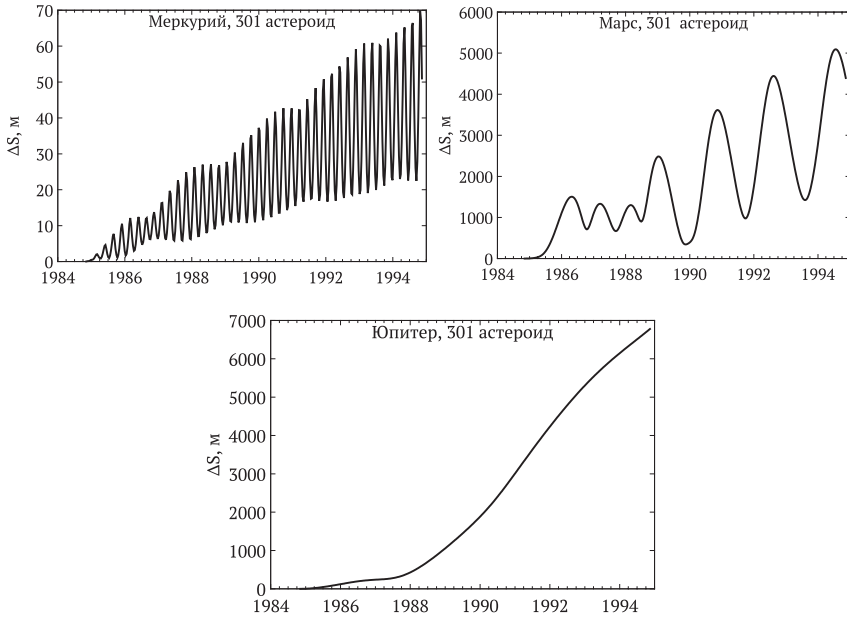


Рис. 1. Смещение положений Меркурия, Марса и Юпитера из-за гравитационного возмущения от 301 крупного астероида Главного пояса

Модель кольца астероидов

Кроме влияния крупных астероидов могут быть учтены гравитационные возмущения от небольших тел, обломков и пыли, чья суммарная масса составляет около 5 % общей массы Главного пояса астероидов. Г. А. Красинский в 2002 г. [11] предложил учитывать их влияние с помощью модели одномерного кольца с оцениваемыми радиусом и массой. Впоследствии это возмущение было описано более точной моделью двумерного кольца, а затем моделью дискретного вращающегося двумерного кольца, состоящего из 180 материальных точек с общей массой [2]

$$M_{\text{ast.ring}} = (0.1695 \pm 0.0097) \cdot 10^{-4} M_{\oplus} (3\sigma).$$

На рис. 2 показаны ΔS Меркурия, Марса и Юпитера вследствие суммарного гравитационного возмущения от небольших тел Главного астероидного пояса (кроме 301 большого астероида).



Рис. 2. Смещение положений Меркурия, Марса и Юпитера из-за гравитационного возмущения от небольших объектов Главного пояса астероидов

Возмущения от 30 крупных транснептуновых объектов

За орбитой Нептуна существует множество тел, образующих пояс Койпера, среди них есть достаточно крупные тела — планеты-карлики. Начиная с версии EPM2008 [12] в эфемеридах EPM учитываются возмущения от 30 крупнейших ТНО. Массы этих ТНО определялись из движения их спутников либо по их плотностям и диаметрам. Общая масса 30 ТНО была определена динамическим методом по радарным наблюдениям КА:

$$M_{30\text{TNO}} = (0.76 \pm 0.37) \cdot 10^{-2} M_{\oplus} (3\sigma).$$

На рис. 3 показаны ΔS Марса, Юпитера и Сатурна вследствие гравитационного влияния 30 крупнейших ТНО.

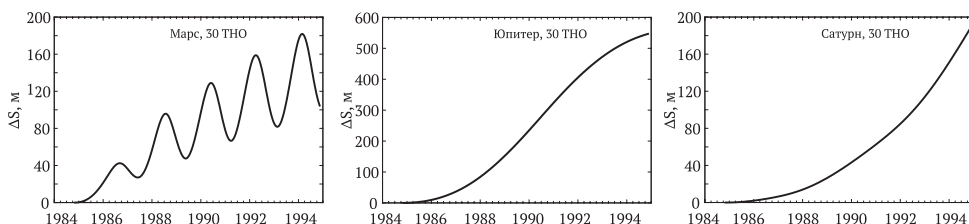


Рис. 3. Смещения положений Марса, Юпитера и Сатурна из-за гравитационного влияния 30 наибольших ТНО

Модель пояса Койпера

Аналогично Главному поясу астероидов, кроме 30 крупнейших ТНО существует множество более мелких ТНО, их обломков и пыли. Все это составляет около 60 % массы пояса Койпера [1]. В эфемеридах EPM2017, EPM2019 возмущения от этих объектов моделировались дискретным вращающимся кольцом (аналогично кольцу Главного пояса астероидов), состоящим из 160 массивных точек, распределенных по трем орбитам [1]. Также учитывалось уплотнение ТНО на расстоянии 44 а.е. от Солнца, где на второй орбите располагалось 80 точек. Ближняя и дальняя границы кольца ТНО принимались равными $R_1 = 39.4$ а.е. и $R_3 = 48.7$ а.е. Эти расстояния соответствуют орбитальным резонансам 2:3 и 1:2 со средним движением Нептуна.

Масса кольца ТНО была получена по возмущениям от этого кольца на КА во время их сближения с планетами [1]:

$$M_{\text{TNoring}} = (1.11 \pm 0.35) \cdot 10^{-2} M_{\oplus} (3\sigma).$$

Так как кольцо находится за границами орбиты Нептуна, оно оказывает более существенное воздействие на самые далекие планеты Солнечной системы. На рис. 4 показаны смещения положений Земли, Сатурна и Нептуна из-за гравитационных возмущений от пояса Койпера (без 30 крупнейших ТНО).

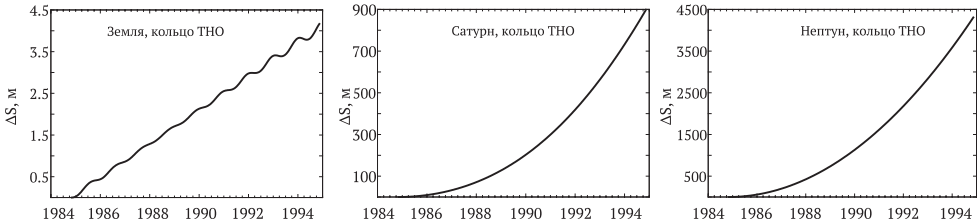


Рис. 4. Смещение положений Земли, Сатурна и Нептуна из-за гравитационного влияния кольца пояса Койпера

Троянцы Юпитера L4, L5

Группы троянцев, связанные с Юпитером и находящиеся в окрестности его лагранжевых точек L4 и L5, включают в себя сотни тысяч тел. Гравитационное воздействие троянцев на движение ближайших планет было учтено в эфемериде EPM2019 [3]. Массы тел, находящихся в окрестности лагранжевых точек L4 и L5 Юпитера, были определены по возмущениям от троянцев в движении КА около Марса и КА Juno около Юпитера:

$$M_{L4} = (7.33 \pm 0.68) \cdot 10^{-6} M_{\oplus} (1\sigma),$$

$$M_{L5} = (5.82 \pm 0.72) \cdot 10^{-6} M_{\oplus} (1\sigma).$$

На рис. 5 показаны смещения положений Марса, Юпитера и Сатурна из-за гравитационного влияния троянцев Юпитера на планеты.

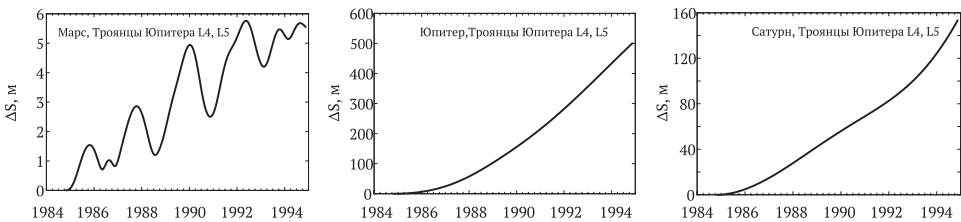


Рис. 5. Смещение положений Марса, Юпитера и Сатурна, обусловленное гравитационным влиянием троянцев

Квадрупольный момент Солнца J_2

Сжатие Солнца вызывает вековое движение в орбитальных элементах планет, за исключением полуосей и эксцентриситетов. Ненулевое значение квадрупольного момента Солнца ($J_{2\text{Sun}}$) учитывается при построении эфеме-

рид планет, начиная с версий DE405 [13] и EPM2000. Это значение в настоящее время определяется из обработки высокоточных измерений дальности. Наше последнее значение $J_{2\text{Sun}}$ (2018 г.) получено из обработки данных КА Messenger:

$$J_{2\text{Sun}} = (2.331 \pm 0.003) \cdot 10^{-7} (1\sigma).$$

На рис. 6 показаны смещения положений Меркурия, Марса и Юпитера, обусловленные квадрупольным моментом Солнца. Сжатие Солнца прежде всего влияет на ближайšie к Солнцу планеты от Меркурия до Марса.

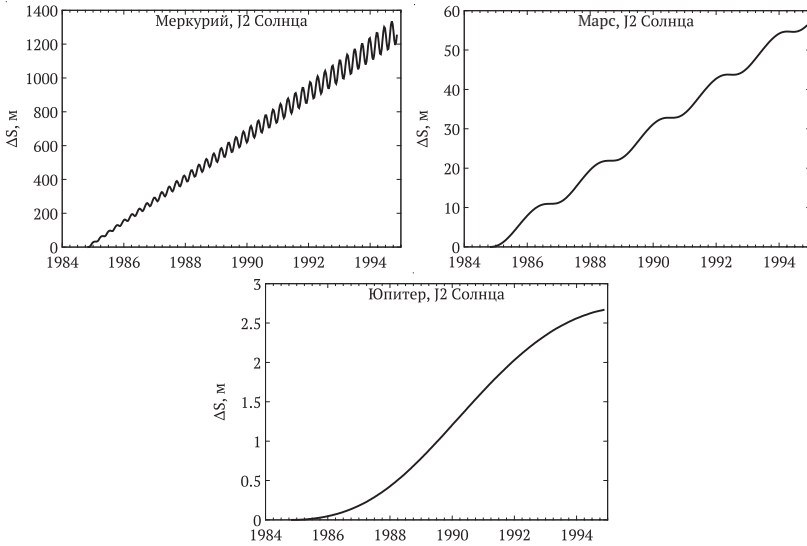


Рис. 6. Смещение положений Меркурия, Марса и Юпитера, обусловленное сжатием Солнца

Эффект Лензе-Тирринга

Релятивистский эффект Лензе-Тирринга, вызванный вращением Солнца, учитывается при построении эфемерид ЕРМ, начиная с версии ЕРМ2017. На рис. 7 показаны смещения положений Меркурия, Венеры и Марса, вызванные этим эффектом, который прежде всего влияет на внутренние планеты от Меркурия до Марса.

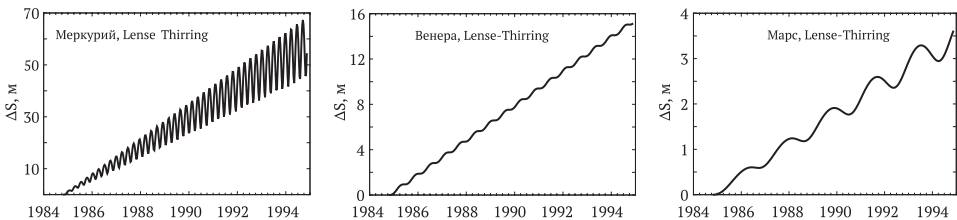


Рис. 7. Смещение положений Меркурия, Венеры и Марса из-за эффекта Лензе-Тирринга

Смещение планет за счет разных эффектов в различных эфемеридах и сравнение остаточных невязок трех эфемерид

В табл. 2 показаны смещения всех планет эфемерид EPM2019 за счет описанных выше эффектов на интервале 10 лет (1984–1994 гг.). Жирным шрифтом выделены величины смещения планет для тех возмущений, которые целесообразно учитывать в динамической модели Солнечной системы при обработке современных и перспективных высокоточных наблюдений.

Таблица 2

Смещение планет ΔS на интервале 10 лет (1984–1994 гг.) за счет разных эффектов, м

	1	2	3	4	5	6	7
Планеты	301 астер.	Астер. Кольцо	30 ТНО	ТНО кольцо	Троянцы Юпитера L4, L5	J2 Солнца	Лензе-Тирринг
Меркурий	70	0.14	3.0	0.5	0.4	1335	68
Венера	368	0.5	13	1.8	2.4	314	15.1
Земля	233	0.5	34.2	4.2	1.0	141	8.0
Марс	5092	1.8	182	15.3	5.7	56.1	3.6
Юпитер	6777	87.8	547	270	500	2.7	0.35
Сатурн	1680	66.7	188	898	153	0.03	0.05
Уран	2174	1208	41	1691	90.2	0.003	0.001*
Нептун	2327	220	17	4307	106	0.003	0.001*

В настоящее время существуют три реализации высокоточных эфемерид планет и Луны: американские DE (JPL), российские EPM (ИПА РАН), французские INPOP (IMCCE). Все эти эфемериды имеют примерно одинаковую точность, адекватны современным наблюдениям, постоянно совершенствуются и находятся в открытом доступе.

Динамические модели данных эфемерид имеют некоторые различия. В табл. 3 представлены данные об учете рассматриваемых в статье возмущений в эфемеридах DE, EPM, INPOP.

Таблица 3

Учет возмущений в эфемеридах DE, EPM и INPOP

	1	2	3	4	5	6	7
	301 аст.	Меньшие аст. Главного пояса	30 ТНО	ТНО кольцо	Троянцы Юпитера L4, L5	J2 Солнца	Лензе-Тирринг
DE	+	+	-	-	-	+	+
EPM	+	+	+	+	+	+	+
INPOP	+	-	-	-	-	+	+

В динамической модели эфемерид DE возмущения от небольших астероидов Главного пояса тоже учитываются [14], но отличным от описанного в данной работе способом. Для наиболее крупных 343 астероидов массы определялись из измерений дальности марсианских КА и посадочных аппаратов (ПА) с помощью регуляризации Тихонова. Для остальных 3371 астероида оценки масс были получены по их диаметрам, выведенным по инфракрасным наблюдениям, и средней предполагаемой плотности 2.2 г/см^3 .

В настоящее время возмущения от 30 ТНО и всего пояса Койпера учитываются только в динамической модели эфемерид EPM. Однако, в связи с подготовкой миссии НАСА к Урану и Нептуну, возмущения от крупнейших ТНО и кольца ТНО планируется включить в динамические модели последующих версий эфемерид DE и INPOP: DE440 и INPOP19 [15].

В табл. 4 приведены СКО остаточных невязок оптических наблюдений внешних планет для трех версий эфемерид планет: EPM2019, DE430 и INPOP17a. Наблюдения подразделяются на наблюдения самих планет и на наблюдения их спутников. Для вычислений положений спутника относительно центральной планеты во всех случаях использовались одинаковые эфемериды. Вычисление остаточных невязок оптических наблюдений производилось с помощью программного комплекса ЭРА-8 [5]. В столбцах 3 и 4 под величиной среднеквадратической ошибки указано на сколько процентов эта ошибка в эфемеридах DE430 и INPOP17a больше, чем в эфемеридах EPM2019.

Таблица 4

СКО остаточных невязок оптических наблюдений внешних планет для трех эфемерид EPM2019, DE430, INPOP17a, сек. дуги

Тип наблюдений	σ_{EPM2019}	σ_{DE430}	σ_{INPOP17a}
Планеты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, $\alpha \cos \delta$	0.1265	0.1274 0.8 %	0.1337 5.4 %
Планеты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, δ	0.1247	0.1256 0.7 %	0.1371 9.0 %
Спутники планет: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, $\alpha \cos \delta$	0.0675	0.0705 4.4 %	0.0910 25.0 %
Спутники планет: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, δ	0.0715	0.0761 6.1 %	0.0807 11.4 %

Из сравнения 2, 3, и 4 столбцов табл. 4 видно, что среднеквадратические ошибки остаточных невязок оптических наблюдений внешних планет для эфемерид EPM2019 несколько меньше, чем для эфемерид DE430 и INPOP17a, как для всех внешних планет, так и их спутников. Это может быть как следствием учета в динамической модели эфемерид дополнительных возмущений, так и разностью методов обработки наблюдений принятых при построении эфемерид DE430, INPOP17a и EPM2019.

Заключение

1. Динамическая модель Солнечной системы для построения эфемерид планет должна постоянно совершенствоваться и соответствовать современным и перспективным высокоточным наблюдениям планет, их спутников, КА и ПА.

2. Динамическая модель Солнечной системы в новой версии эфемерид EPM2019 включает ряд дополнительных физически обоснованных возмущений (например, возмущения от ТНО), учет которых важен для обработки наблюдений и построения эфемерид внешних планет.

Работа подготовлена при поддержке Программы Президиума РАН №12 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований».

Литература

1. *Pitjeva E. V., Pitjev N. P.* Mass of the Kuiper belt // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 2018. — Vol. 130, no. 9. — 17 p.

2. *Путьева Е. В., Путьев Н. П.* Массы главного пояса астероидов и пояса Койпера по движениям планет и космических аппаратов // *Письма в Астрон. журн.* — 2018. — Т. 44, № 8–9. — С. 604–617.

3. *Путьева Е. В., Путьев Н. П.* Исследование влияния групп Троянцев Юпитера на движение планет и динамические оценки их массы // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове.* — 2018. — №225. — С. 207–212.

4. *Pitjeva E. V., Pitjev N. P.* Development of planetary ephemerides EPM and their applications // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 2014. — Vol. 119. — P. 237–256.

5. *Pavlov D., Skripnichenko V.* Rework of the ERA software system: ERA-8 // *Proceedings of the "Journées 2014 Sys-tèmes de référence spatio-temporels" / ed. by Malkin Z., Capitaine N.* Pulkovo Observatory, Russia, 22–24 September 2014. — 2014. — P. 243–246.

6. *Pavlov D. A., James G., Williams J. G., Suvorkin V. V.* Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRILL and IERS-recommended models // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 2016. — Vol. 126. — P. 61–88.

7. *Pitjeva E., Pavlov D.* Ephemerides EPM2017 and EPM2017H. — 2017. — URL: <http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017/29.04.2019/>.

8. *Williams J. G.* Harmonic analysis // *Bull. Amer. Astron. Soc.* — 1989. — Vol. 21. — P. 1009–1010.

9. *Standish E. M., Newhall X. X., Williams J. G., Folkner W. M.* JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE403/LE403 // *JPL Interoffice Memorandum.* — 1995. — Vol. 314.10–127. — 27 p.

10. *Путьева Е. В.* Новая численная теория движения планет EPM98 и ее сравнение с эфемеридой DE403 Лаборатории реактивного движения США // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 1998. — Вып. 3. — С. 5–23.

11. *Krasinsky G. A., Pitjeva E. V., Vasilyev M. V., Yagudina E. I.* Hidden mass in the asteroid belt // *Icarus.* — 2002. — Vol. 158, no. 1. — P. 98–105.

12. *Pitjeva E. V.* Influence of trans-neptunian objects on motion of major planets and limitation on the total TNO mass from planet and spacecraft // *Icy bodies of the solar system. Proc. IAU Symp. / ed. by D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, J. A. Fernandez.* — Cambridge University Press. — 2010. — Vol. 263. — P. 93–97.

13. *Standish E. M.* Planetary and Lunar Ephemerides DE405/LE405 // *JPL Interoffice Memorandum.* — 1998. — Vol. 312.F-98-048. — 18 p.

14. *Kuchynka P., Folkner W. M.* A new approach to determining asteroid masses from planetary range measurements // *Icarus.* — 2013. — Vol. 222, no. 1. — P. 243–253.

The Dynamic Model of the Solar System in the Planet Ephemerides EPM

E. V. Pitjeva, D. A. Pavlov, N. P. Pitjev

Currently, the accuracy of determining coordinates in the EPM ephemeris is several meters for the inner planets and 10-20 meters for Jupiter and Saturn. The need to build more accurate ephemeris of planets requires improving the dynamic model of the solar system. When constructing the ephemeris of the bodies of the solar system, perturbations from the Sun, planets, and the Moon, as well as the main relativistic effects are usually taken into account. The perturbations of the next order of smallness, which also affect the motion of the planets, are also considered in the paper. Such perturbations are the following: the attraction from the Main asteroid belt, Kuiper belt, Jupiter's trojans, as well as oblateness of the Sun and the relativistic Lense-Thirring effect. In addition, the influence of all these perturbations on the motion of the solar system planets is estimated and the regions in the solar system where the influence of these perturbations is most pronounced are given.

Keywords: celestial mechanics, planet ephemerides, radar observations, asteroids, TNO, effects of General Relativity.