

Двумерные кольца Главного пояса астероидов и транснептуновых объектов и их влияние на движение планет

© Е. В. Питьева¹, Н. П. Питьев², Д. А. Павлов¹, М. А. Бодунова¹

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Солнечная система имеет сложную структуру, включающую как крупные тела, так и множество мелких тел, двигающихся под действием взаимного притяжения. Система дифференциальных уравнений движения, используемая для построения численных планетных эфемерид, содержит уравнения для Солнца, планет, Луны, крупных астероидов и транснептуновых объектов (ТНО). Однако гравитационное влияние более мелких тел тоже необходимо учитывать для получения высокоточных эфемерид. Суммарное притяжение со стороны таких небольших тел Главного пояса астероидов и пояса Койпера моделировалось притяжением от двух двумерных колец, лежащих в плоскости эклиптики. Для кольца Главного пояса астероидов внутренний и внешний радиусы были взяты $R_1 = 2.08$ а. е. и $R_2 = 3.27$ а. е., которые соответствуют орбитальным резонансам с Юпитером 4:1 и 2:1. Для кольца пояса Койпера радиусы равны 39.4 а. е. и 47.8 а. е. и определяются орбитальными резонансами с Нептуном 3:2 и 2:1. Массы обоих колец определялись из анализа наблюдений движения планет по радиотехническим данным космических аппаратов (КА), находящихся около разных планет. Было оценено влияние транснептуновых объектов на движение планет. Показано, что притяжение планет со стороны пояса Койпера превосходит гравитационное возмущение планет от гипотетической 9-ой планеты, если она находится далее 550 а. е. от Солнца.

На всем интервале численных эфемерид контролировалось сохранение положения барицентра Солнечной системы с учетом

движения тел и наличия модельных колец. Положение барицентра сохранялось в пределах 30 микрон на столетнем интервале.

Ключевые слова: Солнечная система, эфемериды планет, радарные наблюдения, массы Главного пояса астероидов и пояса Койпера, 9-ая планета

Введение

В структуру Солнечной системы входят крупные и небольшие тела, и множество мелких тел, сосредоточенных в поясах. Точность современных радарных наблюдений составляет несколько метров, поэтому для корректного представления движения тел требуется учет гравитационного влияния даже сравнительно небольших объектов. При построении современных высокоточных эфемерид планет интегрируется система уравнений движения, в которую включены уравнения движения для Солнца, Луны, планет, крупных астероидов и транснептуновых объектов. Массы и параметры движения более мелких тел плохо известны, но эти объекты составляют по разным оценкам около 10 % общей массы Главного пояса астероидов и 60 % массы пояса Койпера, и их гравитационное притяжение на движение планет должно быть учтено. В работе гравитационное влияние небольших тел Главного пояса и пояса Койпера на планеты было промоделировано притяжением от двумерных колец с соответствующими параметрами.

Массы обоих колец определялись из анализа движения планет (динамический метод) по радиотехническим данным КА, находящихся около разных планет. Было оценено гравитационное влияние транснептуновых объектов, включая и возможное влияние гипотетической удаленной 9-ой планеты, на движение планет. Положение барицентра Солнечной системы контролировалось при интегрировании и оставалось практически неизменным (в пределах 30 микрон на интервале 100 лет).

Возмущения двумерных колец и определение их масс

В динамическую модель Солнечной системы эфемерид ИПА РАН—ЕРМ2016 (Ephemerides of planets and the Moon) включены два двумерных кольца, моделирующих притяжение небольших тел Главного астероидного пояса и пояса Койпера. Нахождение гравитационного потенциала и его производных для плоского материального двумерного однородного кольца приводит к выражениям, включающим полные эллиптические интегралы 1-го, 2-го и 3-го рода (см. например, [1]). Вычисление можно свести, применив предварительно преобразо-

вание Ландена ([2]), к вычислению значений гипергеометрической функции от соответствующих параметров. Выражения для потенциала и ускорений двумерного кольца через гипергеометрические функции от четырех аргументов были даны в работах [3–5]. Формулы для ускорений различаются в точках, находящихся с внутренней (ближе к Солнцу) и внешней стороны (дальше от Солнца) по отношению к двумерному круговому кольцу. В работах [3–5] эти выражения были применены к главному поясу астероидов, в данной работе они впервые применяются для пояса Койпера.

При интегрировании в предыдущих версиях эфемерид ЕРМ координаты и скорость Солнца изменялись так, чтобы барицентр Солнечной системы оставался в начале координат. В версии эфемерид ЕРМ2016, вслед за коллегами из Лаборатории Реактивного движения США [6], положение Солнца подчиняется динамическим уравнениям аналогично другим телам, при этом учитываются все взаимные притяжения тел, включенных в модель эфемерид, в частности учитываются гравитационные влияния между планетами, Солнцем и модельными кольцами для поясов. Контроль положения центра тяжести Солнечной системы (барицентра) проводился на всем интервале интегрирования, и смещение барицентра Солнечной системы оказалось менее 30 микрон за 100 лет.

Массы астероидного кольца и кольца транснептуновых объектов (ТНО) входили в набор уточняемых по наблюдениям более 270 параметров планетной части эфемерид ЕРМ2016. При определении этих параметров использовались радарные наблюдения времен запаздывания (ranging) КА, находящихся около планет и марсианских посадочных аппаратов (ПА) — Viking-1, Viking-2, Pathfinder. Количество и интервалы этих наблюдений показаны в табл. 1. Для всех КА в таблице приводится не количество наблюдений, а количество нормальных мест, в которые были объединены наблюдения на одном обороте КА, так как они коррелированы между собой. Также в табл. 1 даются наблюдения марсианских ПА, которые были использованы для изучения вращения Марса в дополнение к определению других параметров.

Для оценок массы Главного пояса астероидов наиболее значимыми и ценными являются большие ряды наблюдений марсианских КА, а для массы пояса Койпера — высокоточные измерения КА Cassini, находившегося более десяти лет на орбите около Сатурна.

Таблица 1

Наблюдения КА и ПА, использованные для определения масс колец

Планета	КА, ПА	Интервал наблюдений	Количество наблюдений или норм. м.
Меркурий	MESSENGER	2011–2015	813
Венера	VEX	2006–2013	2520
Марс	Viking-1	1976–1982	1178
	Viking-2	1976–1977	80
	Pathfinder	1997	90
	MGS	1998–2006	7341
	Odyssey	2002–2015	8818
	MRO	2006–2013	2169
	MEX	2009–2014	3587
Сатурн	Cassini	2004–2014	161

Главный пояс астероидов

К Главному астероидному поясу относят многочисленные астероиды, двигающиеся по орбитам, близким к круговым и расположенные на расстояниях $1.8 \text{ а. е.} < r < 3.5 \text{ а. е.}$ от Солнца между Марсом и Юпитером. Наиболее плотная часть этого пояса расположена в кольцевой полосе между орбитальными резонансами 1:4 (2.06 а. е.) и 1:2 (3.27 а. е.) с Юпитером. Она содержит более 90 % всех нумерованных астероидов. Эти расстояния можно считать, соответственно, внутренней и внешней границами основной части Главного пояса, поскольку за их пределами количество астероидов резко падает.

Динамические модели Солнечной системы, применяемые для построения численных планетных эфемерид, включают крупные астероиды, уравнения для которых добавлены в систему дифференциальных уравнений движения при интегрировании вместе с планетами. Массы для многих астероидов плохо известны. Динамические оценки масс имеются: для ряда астероидов, с которыми сближались КА; для двойных астероидов и астероидов, имеющих спутники; для некоторых крупных астероидов по их возмущениям на Марс и Землю, определенным по радиолокационным наблюдениям. Индивидуальные оценки масс астероидов можно получить также по оценкам их плотности с учетом оценок их диаметров и таксономического класса. Однако оценки масс в этих случаях определяются со значительными ошибками, достигающими $5 \cdot 10^{-12} M_{\text{Sun}}$. Общее число включенных в интегриро-

вание EPM эфемерид астероидов с оцениваемыми массами составляет 301 астероидов [5]. Из них для 46 астероидов массы получены по индивидуальным возмущениям. Для 30 астероидов массы найдены по возмущениям движения планет из обработки радарных данных марсианских КА и ПА. Массы Эроса, Весты и Цереры оценены очень точно по данным космических аппаратов NEAR и DOWN, исследовавших эти астероиды. Для 13 астероидов, имеющих спутники, разными авторами были получены довольно точные оценки масс. Для остальных 255 астероидов массы определялись по их диаметрам и оценкам плотностей для трех таксономических классов. Значения этих плотностей найдены при улучшении параметров по наблюдениям. Таким образом, была получена общая масса 301 крупного астероида:

$$M_{301} = (11.186 \pm 0.095) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma).$$

В главном поясе есть еще миллионы тел с меньшими размерами, включая небольшие астероиды и их осколки. Для учета влияния многочисленных, большей частью, еще не найденных тел в поясе астероидов, в работе [7] Красинским Г. А. впервые было предложено моделировать гравитационное возмущение движения Марса, Земли и Венеры, вызываемое небольшими астероидами Главного пояса, притяжением от однородного кольца. Оно располагалось в плоскости эклиптики и его масса (M_{ring}) и радиус (R_{ring}) определялись из наблюдений планет и КА. Этот подход был реализован для эфемерид EPM2004, и затем в последующих эфемеридах EPM2008 и EPM2011. Однако реальный Главный пояс астероидов имеет ширину более 1 а. е. Кроме того, существует значительная корреляция между оцениваемыми параметрами M_{ring} и R_{ring} . Было решено перейти от моделирования одномерным кольцом суммарного притяжения небольших астероидов к моделированию с помощью двумерного кольца с внутренним и внешним радиусами R_1 и R_2 . Сравнение эффектов влияния на планеты одномерного и двумерного модельных колец дано в работах [3] и [5]. По радарным наблюдениям КА и ПА в данной работе была получена следующая оценка массы двумерного кольца:

$$M_{\text{annulus}} = (1.059 \pm 0.161) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma).$$

Общая масса астероидного пояса, включающая массу 301 крупных астероидов и двумерного кольца более мелких астероидов, составляет

$$M_{\text{belt}} = (12.245 \pm 0.187) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma) \text{ или } \approx 2.5 M_{\text{Ceres}}.$$

Общая масса пояса астероидов неоднократно оценивалась статистическими и динамическими методами ([3–5]), при этом оценка массы Главного пояса уточнилась и уменьшилась с $55 \times 10^{-10} M_{\text{Sun}}$ до $12.3 \times 10^{-10} M_{\text{Sun}}$.

Пояс Койпера

Пояс Койпера расположен на периферии Солнечной системы, за орбитой Нептуна, и включает большое количество крупных и небольших ТНО. Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и получил обозначение 1992 QB1. С тех пор было найдено более тысячи ТНО. При построении эфемерид ЕРМ уравнения движения для 30 крупных ТНО входят в систему дифференциальных уравнений, включающую планеты и крупные астероиды. Суммарное притяжение от небольших ТНО в работе [8] моделировались одномерным кольцом с радиусом, равным 43 а. е., а в данной работе — двумерным однородным кольцом. Такое представление является более адекватным, учитывая, что наиболее плотной частью пояса Койпера является кольцевая зона шириной более 8 а. е. Она находится между двумя основными орбитальными резонансами с Нептуном 3:2 и 2:1 с соответствующими средними расстояниями от Солнца 39.4 а. е. и 47.8 а. е.

В табл. 2 показаны смещения перигелиев планет под действием гравитационного притяжения от одномерного и двумерного кольца одной и той же массы $0.02 M_{\oplus}$ для пояса Койпера. Видны различия, особенно для Нептуна и Урана.

Таблица 2

Смещение перигелия планет от кольца $m = 0.02 M_{\oplus}$ за 100 лет

Планета	$R = 43$ а. е.	$R = 44$ а. е.	$R_1 = 39.4, R_2 = 47.8$ а. е.
Юпитер	0".0009	0".0008	0".0009
Сатурн	0".0024	0".0022	0".0023
Уран	0".0095	0".0086	0".0091
Нептун	0".0437	0".0376	0".0432

Объекты пояса Койпера (Kuper Belt Objects, КВО) обращаются вокруг Солнца в прямом направлении (как планеты), и их разделяют в настоящее время на три основных динамических класса:

а) классические КВО располагаются на орбитах, близких к круговым, в области 40–50 а. е. от Солнца с относительно небольшими эксцентриситетами;

б) резонансные КВО: объекты находятся в орбитальном резонансе со средним движением Нептуна; большинство в резонансе 3:2 («плутино», $a \sim 39.4$ а. е.) и 2:1 ($a \sim 47.8$ а. е.);

в) объекты рассеянного диска имеют орбиты, простирающиеся далеко за 50 а. е. ($a \sim 90$ а. е. и $e \sim 0.6$).

Объекты 1 и 2 класса входят в моделируемое двумерное круговое кольцо пояса Койпера, масса которого оценивается в этой работе, а 30 крупнейших ТНО интегрировались индивидуально. Суммарная масса указанных объектов составляет массу пояса Койпера, полученную в данной работе. Таким образом, были получены следующие оценки масс:

масса 30 крупнейших ТНО и системы Плутон + Харон ($M_{31\text{TNO}}$)

$$M_{31\text{TNO}} = (252 \pm 40) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma);$$

масса моделируемого кольца ТНО

$$M_{\text{TNOring}} = (434 \pm 123) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma);$$

общая масса пояса Койпера

$$M_{\text{Kuiper}} = (686 \pm 129) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \approx (0.0228 \pm 0.0043) M_{\oplus} \quad (3\sigma).$$

Все оценки масс в данной работе даются с неопределенностью, равной 3σ , где σ — это стандартная ошибка метода наименьших квадратов.

Таблица 3

Оценки массы пояса Койпера

Год	Авторы	В массах Земли (M_{\oplus})	Примечание
1997	Weissman, Levinson	0.1↔0.3	между 30 а. е. и 50 а. е.
1998	Jewitt et al.	~ 0.1	
1999	Chiang, Brown	~ 0.2	между 30 а. е. и 50 а. е.
1999	Kenyon, Luun	~ 0.1	между 30 а. е. и 50 а. е.
2001	Gladman et al.	0.04↔0.1	между 30 а. е. и 50 а. е.
2002	Luu, Jewitt	0.01↔0.1	между 35 а. е. и 150 а. е.
2002	Kenyon S.	0.1↔0.2	объекты за орбитой Нептуна
2004	Bernstein, et al.	0.01	Классические
2009	Booth, et al.	0.03	классические + рассеянные
2010	Vitense, et al.	0.12	весь пояс Койпера
2010	Pitjeva	0.026	22 ТНО + одномерное кольцо ТНО
2017	Питьева и др.	0.0228 ± 0.0043	31 ТНО + двумерное кольцо ТНО

Для сравнения в табл. 3 показаны оценки массы пояса Койпера, полученные разными авторами статистическими методами, кроме значений масс, данных в двух последних строках табл. 3, которые определялись динамическим методом.

Полученная общая масса пояса Койпера в 45 раз превышает массу Главного астероидного пояса и одновременно почти в 500 раз меньше массы предполагаемой 9-ой планеты [9]. Тем не менее, притяжение планет более близким поясом Койпера сравнимо с гравитационным возмущением от крупной гипотетической планеты массой $10 m_{\oplus}$ на ее расстояниях порядка 550 а. е. от Солнца. На расстояниях до нее больше 800 а. е., полученных в нескольких работах, ускорение от пояса Койпера на планеты превосходит ее возмущающее ускорение в несколько раз. Поэтому при исследовании существования 9-ой планеты и ее поиска, в первую очередь, следует учесть гравитационное воздействие от пояса Койпера на движения планет, и только затем исследовать остаточные невязки в наблюдениях планет для выявления возможного влияния от предполагаемой далёкой крупной планеты.

Заключение

Увеличение количества радарных наблюдений КА и повышение их качества, а также улучшение динамических моделей движения объектов Солнечной системы значительно повысило точность значений общих масс главного пояса астероидов и пояса Койпера, которые соответственно равны:

$$M_{\text{belt}} = (12.245 \pm 0.187) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma),$$

$$M_{\text{Kuiper}} = (686 \pm 129) \times 10^{-10} M_{\text{Sun}} \quad (3\sigma).$$

Литература

1. Дубошин Г. Н. Теория притяжения. — М.: Физматгиз, 1961.
2. Градштейн И., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Наука, 1971. — 1108 С.
3. Pitjeva E. V., Pitjev N. P. Development of planetary ephemerides EPM and their applications // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2014. — Vol. 119, Is. 3–4. — P. 237–256.
4. Путьева Е. В., Путьева Н. П. Массы астероидов и общая масса главного пояса астероидов // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2014. — Вып. 31. — С. 3–10.
5. Pitjeva E. V., Pitjev N. P. Masses of asteroids and total mass of the main asteroid belt // *Proc. IAU Symposium «Asteroids: New Observations, New Models»* / eds.: S. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, D. Farnocchia. — 2016. — Vol. 318. — P. 212–217.

6. *Folkner W. M., Williams J. G. et al.* The Planetary and Lunar Ephemeris DE430 and DE431 /Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H., Park R. S., Kuchynka P. // The Interplanetary Network Progress Report, 2014. — 42–196. — 81 P.

7. *Krasinsky G. A., Pitjeva E. V. et al.* Hidden mass in the asteroid belt / Krasinsky G. A., Pitjeva E. V. Vasilyev M. V., Yagudina E. I. // *Icarus*. — 2002. — Vol. 158, Is. 1. — P. 98–105.

8. *Pitjeva E. V.* Influence of trans-neptunian objects on motion of major planets and limitation on the total TNO mass from planet and spacecraft belt // Proc. IAU Symposium “Icy bodies of the solar system” / eds.: D. Lazzaro, D. Prialnik, R. Schulz, J. A. Fernandez. — 2010. — Vol. 263. — P. 93–97.

9. *Batygin K., Brown M. E.* Evidence for a Distant Giant Planet in the Solar System // *Astron. J.* — 2016. — Vol. 151, Is. 2, art. 22. — 12 p.

Two-dimensional Annuli of the Main Asteroid Belt and Trans-Neptunian Objects and Their Influence on the Motion of Planets

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

The solar system has a complex structure that includes large bodies and many small bodies moving in a common gravitational field. Our simultaneous integration for the construction of modern ephemerides includes equations of motion of the Sun, the planets, the Moon, large asteroids, and trans-neptunian objects (TNOs). However it is necessary also to take into account perturbations of smaller bodies in order to obtain high-precision ephemerides. The influence of these bodies is modeled by perturbations from two two-dimensional rings lying in the plane of the ecliptic: the annulus of the Main belt of asteroids having radii $R_1 = 2.08$ au and $R_2 = 3.27$ au determined by the orbital resonances with Jupiter 4:1 and 2:1, and the annulus of the Kuiper belt having radii 39.4 au and 47.8 au according to orbital resonances with Neptune 3:2 and 2:1. The masses of both annuli are determined from the analysis of the motion of the planets by radio ranging data of spacecraft for different planets.

The influence of the TNOs on the motion of the planets has been estimated. It is shown that the perturbation of the Kuiper belt exceeds the gravitational influence of the 9-th hypothetical remote (further 550 au) planet; that must be taken into account searching for the 9th planet. The position of the barycenter of the Solar system has been checked and its drift is below 30 microns/century.

Keywords: Solar system, planet ephemerides, radar ranging observations, masses of asteroid main belt and Kuiper belt, ninth planet.