

УДК 523.44

УМЕНЬШЕНИЕ МАССЫ ГЛАВНОГО ПОЯСА АСТЕРОИДОВ И ЗОНЫ МАРСА ВСЛЕДСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ ЮПИТЕРА. I. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ЭВОЛЮЦИИ ПЫЛИ

© 2022 г. П. М. Трофимов^a, Н. Н. Горькавый^a, *

^aЧелябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: nickgorkavyi@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Масса Марса на порядок меньше, а масса астероидного пояса – на три порядка меньше теоретически ожидаемой из экстраполяции плотности твердой компоненты протопланетного диска из зон Венеры и Земли. Статья посвящена изучению эрозии массы зон астероидного пояса и Марса из-за выметания пылинок под воздействием солнечного излучения и гравитации Юпитера. Рассмотрена динамика мелких частиц, образующихся при столкновениях тел, в зоне от 1 до 3.4 а. е. Показано, что более 10% рассчитанных орбит мелкой (0.2–40 мкм) пыли, образовавшейся, например, в результате каждого соударения астероидов, приобретают под действием солнечного излучения значительные эксцентриситеты, рассеиваются гравитационным полем Юпитера и покидают Солнечную систему за среднее время $\sim (3 \times 10^4)$ лет. Это может объяснить большую потерю массы астероидным поясом и зоной Марса. Эффективность выметания пылинок с астероидов со слабой гравитацией подтверждается снимками, полученными с космических станций, которые показывают, что поверхность мелких астероидов представляет собой россыпь камней, в отличие от поверхности массивной Луны, покрытой мелкой пылью, которую лунное притяжение удерживает от вылета.

Ключевые слова: главный пояс астероидов, Марс, межпланетная пыль, эффект Пойнтинга–Робертсона, Юпитер

DOI: 10.31857/S0320930X22030070

ВВЕДЕНИЕ

Планетезимальная аккреционная модель формирования Солнечной системы и планет земной группы, выдвинутая в группе Шмидта–Сафронова, к настоящему моменту является наиболее развитой (Шмидт, 1951; 1962; Сафронов, 1969; 1993; Рускол, 1975; Рингвуд, 1982; Витязев и др., 1990; Wetherill, 1990; Weidenschilling, 1977; Weidenschilling и др., 1997; Ипатов, 2000; Chambers, Halliday, 2007; Nesvorný и др., 2021). Тем не менее ряд нерешенных проблем остается, в том числе – проблема происхождения пояса астероидов и дефицит массы Марса.

Дефицит массы пояса астероидов и зоны Марса

Сравним массу пояса астероидов с массой трех планет земной группы: Венеры, Земли и Марса. Согласно стандартной теоретической модели, поверхностная плотность протопланетного диска или облака, предположительно, зависит от радиуса облака как $R^{-3/2}$ (Weidenschilling, 1977). Оценим плотность зоны питания планеты по совре-

менной массе i -ой планеты, поделенной на полувеличину площади пространства между соседними планетами $\pi(R_{i+1}^2 - R_{i-1}^2)/2$. Проверим простую функцию $R^{-3/2}$, начиная с планеты Венеры, потому что для Меркурия сложнее оценить зону питания. В табл. 1 приведены рассчитанная по зависимости $R^{-3/2}$ величина поверхностной плотности твердой компоненты протопланетного диска и ожидаемая масса планет, оцененная по этой плотности, умноженной на площадь кольцевой зоны данной планеты (масса Венеры выбрана в качестве начальной точки теоретической зависимости). Поверхностная плотность в четвертом столбце получается делением значения наблюдаемой массы планеты (или пояса астероидов) на площадь кольцевой зоны, минимальный и максимальный радиус которой соответствуют среднему от радиусов орбит соседних планет. Например, минимальный и максимальный радиусы зоны Земли равны $0.5 \times (0.732 + 1.0) = 0.8615$ а. е. и $0.5 \times (1.0 + 1.524) = 1.262$ а. е. соответственно.

Таблица 1. Поверхностная плотность диска и ожидаемые массы планет земной группы

Объект	Радиус орбиты (а. е.)	Ожидаемая поверхностная плотность по закону $R^{-3/2}$ * в $M_{\oplus}/(\text{а.е.})^2$	Поверхностная плотность, оцененная по наблюдаемым массам планет в $M_{\oplus}/(\text{а.е.})^2$	Дефицит поверхностной плотности $M_{\oplus}/(\text{а.е.})^2$	Ожидаемая масса планеты (по закону $R^{-3/2}$ ** (в M_{\oplus})	Реальная масса планеты (в M_{\oplus})
Венера	0.723	0.61	0.61	0.0	0.815	0.815
Земля	1.0	0.32	0.35	-0.03	0.91	1.0
Марс	1.524	0.14	0.011	0.13 (92%)	1.3	0.108
Астероиды	~2.7	0.044	1.4×10^{-5}	≈ 0.044 (99.97%)	1.7	4×10^{-4}

* Поверхностная плотность приведена в массах Земли на квадрат астрономической единицы.

** Массы планет приведены в массах Земли.

Из табл. 1 следует, что массы Венеры и Земли хорошо соответствуют степенной функции $R^{-3/2}$: значение массы Земли отклоняется от предсказанного менее чем на 10%, зато масса реального Марса меньше ожидаемой в 12 раз. Масса пояса астероидов меньше прогнозируемой более чем в 4000 раз (Krasinsky и др., 2002; Pitjeva, Pitjev, 2018). Можно сделать вывод о том, что в зоне Марса и в поясе астероидов действовал мощный фактор, уменьшивший плотность остаточного диска. Так как речь идет об уменьшении плотности на несколько порядков, то этот вывод слабо зависит от конкретной степени в функции $R^{-3/2}$.

В уменьшении массы астероидного пояса важную роль могут играть гравитационное воздействие планет-гигантов, залет крупных тел из зоны Юпитера и формирование зародышей планет (Сафронов, 1969; Витязев и др., 1990; Minton, Malhotra, 2010; Deienno и др., 2016). Подобные факторы важны, но они не могут гарантировать наблюдаемый дефицит массы астероидного пояса и Марса (Горькавый, 2018).

Дефицит массы Марса является труднейшей проблемой для моделей формирования планет земной группы (см. (Izidoro и др., 2014) и ссылки в этой работе). Для объяснения этого дефицита, а также для объяснения больших эксцентриситетов и наклонов орбит астероидов, предлагаются такие сильнодействующие средства, как приписывание Юпитеру и Сатурну нереально большого эксцентриситета (~ 0.1), или смещение Юпитера на радиус орбиты Марса, а потом возвращение его на современную орбиту, что фактически обрезает протопланетный диск на радиусе ~ 1 а. е. (Walsh и др., 2011). Обе эти модели имеют значительные проблемы, которые ставят под сомнение их реалистичность (см. обзор Izidoro и др., 2014). Изучению и обсуждению проблемы дефицита массы Марса и пояса астероидов в рамках модели сильных смещений Юпитера посвящена свежая работа Clement и др. (2021).

Заметную роль в убыли массы пояса астероидов и Марса могут играть выметание пылинок под воздействием солнечного излучения и гравитационное воздействие Юпитера (Gorkavii и др., 2000; Горькавый, 2007; 2018). Данная статья посвящена анализу этого эффекта.

Строение поверхности астероидов

Земные наблюдения с помощью телескопов свидетельствуют, что астероиды покрыты крупными камнями и лишь припорошены пылью (Симоненко, 1985). Фотографии, полученные с космических аппаратов (рис. 1), подтвердили эти наблюдения: мелкие астероиды покрыты камнями, в то время как Луна покрыта рыхлой пылью и реголитом. По оценкам, только гравитация астероидов с диаметром более 800 км может удержать почти все вещество, выброшенное при ударе (Витязев и др., 1990). Астероиды с поперечником 200 км теряют 20% ударной эжекты, а у астероидов с размером менее 100 км более половины пыли и частиц, образовавшихся при ударе, вылетают в межпланетное пространство (Симоненко, 1985). Это означает, что пыль, непременно образующаяся при ударе метеоритов, практически полностью уносится в космос с поверхности небольших астероидов с размерами 1–10 км. Кроме того, типичная современная скорость соударения тел в поясе астероидов ~ 5 км/с (на стадии образования планет она могла быть значительно выше), поэтому падение любого тела (или эжекты) на поверхность астероида выбрасывает с его поверхности как минимум в 100 раз больший объем вещества (Витязев и др., 1990). Большая часть выброшенных частиц оседает на других астероидах, но определенная доля пыли может покинуть не только пояс астероидов, но и саму Солнечную систему.

Содержание изотопов инертных газов в образцах поверхностного астероидного реголита, доставленных на Землю космической станцией Hayabusa с астероида (25143) Итокава, указывает на то, что за миллион лет астероид Итокава, имею-

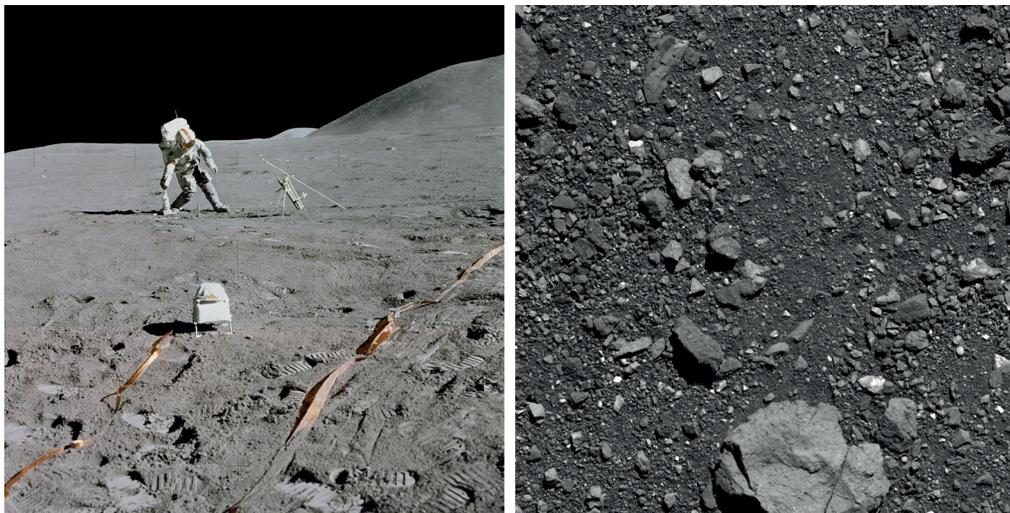


Рис. 1. Слева: Поверхность Луны, покрытая реголитом и пылью. Фото сделано 1 августа 1971 г. экспедицией Apollo-15 (фото: NASA). Справа: Каменистая поверхность астероида Бенну с диаметром 560 м (поле зрения 14.6 м). Фото от 5 октября 2018 г., получено орбитальным аппаратом OSIRIS-Rex (NASA/Годдардский центр космических полетов/Университет Аризоны).

ший средний диаметр 330 м, теряет со своей поверхности слой вещества толщиной в многие десятки сантиметров (Nagaо и др., 2011).

Таким образом, актуальна проблема исследования судьбы пылинок, выброшенных в межпланетное пространство с поверхностей небольших астероидов. Если существует эффективный механизм выметания мелких частиц из зон астероидов и Марса, то это может объяснить дефицит массы в данных зонах.

Классификация частиц

Пылинки в Солнечной системе с точки зрения динамики можно разделить на три класса:

A — достаточно крупные частицы, которые слабо реагируют на солнечное давление, потому что для них отношение солнечного давления к гравитации (см. следующий параграф) $\beta \ll 1$. Если они достаточно далеко от Юпитера, то доминирующим фактором их динамики будет эффект Пойнтинга–Робертсона, под действием которого они смещаются к Солнцу. Динамика таких частиц детально изучалась в ряде работ (см., например, Jackson, Zook, 1992; Marzari, Vanzani, 1994; Kortenkamp, Dermott, 1998; Taidakova, Gorkavyi, 1999; Ipatov и др., 2004).

B — пылинки средних размеров, с $\beta \sim (0.005–0.5)$. В момент своего рождения они испытывают значительное увеличение большой полуоси и эксцентриситета e_d , отчего в перигелии своей орбиты такие частицы сближаются с Юпитером и могут подвергнуться сильному гравитационному возмущению.

C — пылинки мелких размеров с $\beta \sim 1$. Такие пылинки получают гиперболические скорости уже в момент рождения и немедленно покидают Солнечную систему. Эксцентриситеты орбит таких частиц больше единицы, если $\beta > \frac{r}{2a}$ (Kortenkamp, Dermott, 1998). Для круговой орбиты родительского тела $r = a$, и пылевые частицы с его поверхности, имеющие $\beta > 0.5$, сразу выходят на гиперболические орбиты.

Все три класса пылинок уменьшают массу остаточного диска: пылинки класса **A** уносят ее на Солнце, частицы класса **C** — в межзвездное пространство. Частички класса **B** могут как смещаться к Солнцу, где будут испаряться, так и улетать из Солнечной системы. Задачей данной статьи является анализ причин дефицита массы в достаточно локальной зоне — в поясе астероидов и в районе Марса. Пылинки классов **A** и **C** не могут отвечать за этот дефицит, потому что унос массы, осуществляемый ими, плавно зависит от радиуса орбиты. Поэтому унос массы диска частицами классов **A** и **C** не может объяснить, почему в зоне Венеры и Земли существенного отклонения от степенного закона (см. табл. 1) не наблюдается; в зоне Марса дефицит поверхностной плотности максимален, а в поясе астероидов абсолютная убыль вещества меньше, зато относительный дефицит оказывается рекордным. Мы рассматриваем частицы класса **B** в качестве возможного эволюционного фактора, который обеспечивает дополнительную эрозию диска в зонах Марса и астероидов. Выбирая Венеру как точку отсчета зависимости поверхностной плотности диска от радиуса орбиты (см. табл. 1), мы фактически обнуляем

Таблица 2. Соответствие параметра β и радиусов частиц из разных материалов (Mukai, Yamamoto, 1982), а также доля частиц, вылетевших из Солнечной системы

Параметр β	Радиус частицы (мкм)			Доля вылетевших частиц (%)	
	обсидиан	магнетит	водный лед	из зоны 1–2 а. е.	из зоны 2.1–3.4 а. е.
0.005	20	40	30	0	0.5
0.01	10	14	15	0	0.1
0.03	4	4.3	6	0	0
0.06	2.2	2.2	3.5	0	0.4
0.1	1.6	1.5	2.3	0	2.2
0.15	1.05	1	1.5	0	7.9
0.2	1	0.83	1.02	0.05	17.8
0.25	0.75	0.66	1	1.2	30.8
0.35	0.52	0.52	0.8	9.0	44.5
0.45	0.22	0.46	0.55	32.3	64.9

эффекты уноса массы диска частицами классов А и С. Рассматриваемая в статье пылевая компонента класса В может представлять меньшую часть массы пыли планетезимального диска, но именно она оказывается важным фактором эволюции, потому что только она может покинуть диск в локальных зонах Марса и астероидов за короткое время, сблизившись с Юпитером. Кроме того, эта пылевая компонента все время возобновляется при соударениях, тем самым через нее может пройти значительная часть массы диска. Соответствующие оценки будут приведены в следующей статье (Горькавый, Трофимов, 2022). Если не оговаривается другого, то под термином “пылинка” в нашей статье понимается частица класса В. Отметим, что пылинки могут рождаться не только при взаимных столкновениях астероидных тел. Обсуждаемый механизм начинает работать тогда, когда появляется Юпитер или его массивный зародыш, наличие астероидов для него несущественно. Как показывают расчеты (Mukai, Yamamoto, 1982), для самых мелких частиц в сотые и десятые доли микрона, которые конденсируются из газовой фазы, величина $\beta > 1$ из-за слишком малых размеров. При укрупнении этих частиц параметр β приближается к единице и такие частицы уже могут интенсивно выбрасываться из Солнечной системы в соответствии с обсуждаемым механизмом.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим фотогравитационную задачу трех тел, в которой изучим трехмерное движение пылевой частицы в гравитационном поле Солнца и Юпитера. Учтем влияние на частицу корпускулярного и электромагнитного излучения Солнца в виде таких эффектов, как давление излучения и эффект Пойнтинга–Робертсона (Burns и др.,

1979) и солнечный ветер (Mukai, Yamamoto, 1982). Юпитер движется по заданной эллиптической орбите с эксцентриситетом 0.048775.

Запишем уравнения движения частицы в барицентрической системе координат:

$$\ddot{\vec{r}}_p = (1 + sw)\beta Gm_S \left[\frac{V_{rad}}{c} \frac{\vec{r}_{pS}}{r_{pS}} - \frac{\vec{V}_p}{c} \right] \frac{1}{r_{pS}^2} + (1 - \beta) Gm_S \frac{\vec{r}_{pS}}{r_{pS}^3} + Gm_J \frac{\vec{r}_{pJ}}{r_{pJ}^3}.$$

Индексы S, J, p (Солнце, Юпитер, частица) указывают на объектную принадлежность индексированной величины (пары индексов указывают направление вектора); r – радиус-вектор; V_{rad} – радиальная скорость частицы; \vec{V}_p – вектор полной скорости частицы; m_S и m_J – массы Солнца и Юпитера; β – отношение давления излучения на частицу к гравитационной силе, зависящее от материала частицы и радиуса (табл. 2) (Burns и др., 1979); $sw = 0.35$ – отношение давления солнечного ветра к давлению солнечного излучения (Mukai, Yamamoto, 1982; Jackson, Zook, 1992; Gustafson, 1994; Taidakova, Gorkavyi, 1999; Gorkavyi и др., 2000). Для решения вышеприведенной системы уравнений использовался код, написанный на языке python3. В коде использовалась программа LSODE (Livermore Solve for Ordinary Differential Equations), реализованная в библиотеке SciPy. LSODE, в числе прочего, реализует метод Адамса–Мультонна 4-го порядка, который мы использовали для наших расчетов и который обеспечивает высокую точность вычислений.

Из табл. 2 следует, что только меньшинство частиц вылетело из Солнечной системы. Остальные частицы (таких частиц большинство) смещаются к Солнцу и испаряются вблизи него. Отметим,

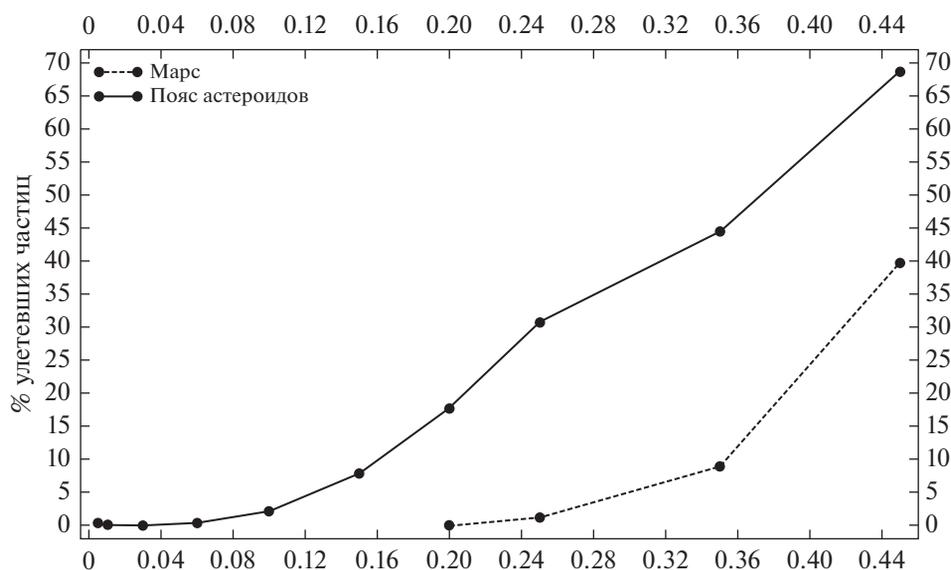


Рис. 2. Зависимость процента улетевших частиц от β . Сплошная линия — зона астероидов; штриховая линия — зона Марса.

что для частиц, стартующих на разных радиальных расстояниях, примерно одинаковый процент траекторий заканчивается на Солнце. Поэтому учет такого механизма потери частиц, как смещение их к Солнцу, не может существенно влиять на доли вещества, потерянного из зон Земли, Марса и астероидов.

Из теоретических оценок и экспериментальных результатов следует, что даже при медленном соударении твердых тел возникает множество мелких частиц (Горькавый, Фридман, 1994). Следовательно, при столкновительном разрушении каменных астероидов и планетезималей будет образовываться большое количество мелких частиц, для которых $\beta \gtrsim (0.1-0.4)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены расчеты траекторий 50000 частиц, запускаемых из области больших полуосей от 1 до 3.4 а. е. (с шагом в 0.1 а. е.). Данный интервал больших полуосей условно разделен на две части. Зона больших полуосей от (1–2) а. е. — зона питания Марса; зона от (2.1–3.4) а. е. — зона питания главного пояса астероидов. Эксцентриситеты орбит сравнительно крупных тел, с которых запускались пылинки, e варьировались от 0 до 0.2 (0.001; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2), наклоны орбит этих тел принимают значения 0° ; 5° ; 10° ; 15° ; 20° . Десять значений коэффициента β , зависящего от материала и радиуса пылевых частиц, взяты в интервале 0.005–0.45 (см. табл. 2), что соответствует интервалу радиусов пылинок (0.2–40) мкм. Для каждого значения эксцентриситета, наклона, орбитального радиуса и параметра β рассчитыва-

лось одинаковое количество частиц, например, для каждого орбитального радиуса и параметра β рассчитывалось по 200 траекторий частиц.

На рис. 2 (см. также табл. 2 и 3) показан процент улетевших частиц в зависимости от β для зон Марса и главного пояса астероидов, учитывающий всю выборку траекторий. На кривой, образуемой точками зоны астероидов, видна выпуклость в области $\beta = 0.25$, она возникла по причине того, что орбиты многих частиц, запускаемых с таким β , начинают приближаться к орбите Юпитера или пересекать ее, что приводит к избытку выбрасываемых частиц.

Отметим, что в случае $\beta = 0.45$ около 11% частиц (которые стартуют возле афелия орбит крупных тел с эксцентриситетами $e = 0.1, 0.15$ и 0.2) сразу выходят на гиперболическую орбиту с $e_d > 1$. Тем самым, они относятся к классу частиц C, которые нас не интересуют. Оценить количество таких гиперболических частиц можно с помощью уравнения $\beta > \frac{r}{2a}$ (Kortenkamp, Dermott, 1998). Тело на орбите $e = 0.1$ порождает пыль с $e_d = 1$ только в одной точке афелия, поэтому такими частицами можно пренебречь. Если тело на орбите с $e = 0.15$ пылит на протяжении всей орбиты, то 17% пылинок, образовавшихся в районе афелия, выходят на орбиты с $e_d > 1$. Для тела на орбите с $e = 0.2$ процент таких гиперболических пылинок достигает 39%.

Данные в табл. 3 приведены с учетом вычета этого небольшого количества гиперболических частиц. Результирующая статистика нашего чис-

Таблица 3. Процент улетевших частиц как функция параметра β и радиуса орбиты

R (а. е.)	β									
	0.45	0.35	0.25	0.2	0.15	0.1	0.06	0.03	0.01	0.005
3.4	81.5	65.5	63	47	25	12	3.5	0	0.5	1
3.3	81.5	59.5	53.5	40.5	20	8.5	1.5	0	1.5	4
3.2	75.8	56	51.5	33	20	4	1	0	0	1
3.1	68.0	59.5	49	27	12.5	3.5	0	0	0	0
3.0	71.4	52	39	20	8.5	1	0	0	0	0.5
2.9	66.9	55	30.5	18.5	7.5	1	0	0	0	0
2.8	68.5	46.5	34	14	6.5	1	0	0	0	0
2.7	62.4	46.5	26	13.5	4	0	0	0	0	0
2.6	65.2	42	18.5	10	2.5	0	0	0	0	0
2.5	62.4	37	21.5	8	3	0	0	0	0	0
2.4	54.5	31.5	15	5	1	0	0	0	0	0
2.3	56.2	26.5	14.5	7	0.5	0	0	0	0	0
2.2	51.7	21	8	2.5	0	0	0	0	0	0
2.1	42.7	24.5	7.5	3	0	0	0	0	0	0
2.0	46.6	21	4	0.5	0	0	0	0	0	0
1.9	44.9	17	4	0	0	0	0	0	0	0
1.8	42.1	15	2.5	0	0	0	0	0	0	0
1.7	38.2	12	2.5	0	0	0	0	0	0	0
1.6	33.2	10	0.5	0	0	0	0	0	0	0
1.5	31.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4	31.5	5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	25.3	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	21.4	3	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	23.6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	17.4	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0

ленного эксперимента становится следующей: из зоны Марса запущено 21758 частиц класса В, из которых улетело за пределы Солнечной системы 858 частиц (или 3.9%). Из зоны пояса астероидов запускалось 27692 частицы класса В, из которых улетело 4537 (16.4%). В сумме около 10.9% общего числа частиц с рассчитанными траекториями покинуло Солнечную систему; для оценки доли вещества, выброшенного из зон Марса и астероидов, нужно задаться определенным распределением частиц по размерам, что будет проделано в следующей статье (Горькавый, Трофимов, 2022). Максимальное время счета – 100 тыс. лет. Среднее время вылета по всем частицам – около 30 тысяч лет. Но, как показывают наши расчеты, значительная доля частиц класса В покидает Солнечную систему достаточно быстро: 14% от количества улетевших частиц тратит на это всего 500 лет, 18% – 1000 лет.

На основании расчетов (см. рис. 2) можно сделать вывод, что для параметра $\beta > 0.25$, соответ-

ствующего частицам микронных и субмикронных размеров (см. табл. 2 и 3), существует интенсивный унос частиц из зоны Марса и пояса астероидов.

Доля улетевших частиц из зоны Марса заметно меньше, чем из зоны астероидов, но нужно учитывать, что плотность вещества и частота соударений между планетезималями в зоне Марса были больше, чем в поясе астероидов. В сумме это может объяснить небольшой вес Марса. Аналитическая модель убыли массы зоны Марса и астероидного пояса, использующая данные численные результаты, будет изложена в статье (Горькавый, Трофимов, 2022). Вероятнее всего, интенсивный унос пыли из зоны от 1 до 3.4 а. е. существовал на ранних стадиях планетной аккреции, когда планетезимали были малы, а их суммарная площадь велика. В это время Юпитер уже существовал, благодаря более быстрому механизму образования (Pollack и др., 1996; Рускол, Сафронов, 1998). Через 10–20 млн лет эволюции планетной систе-

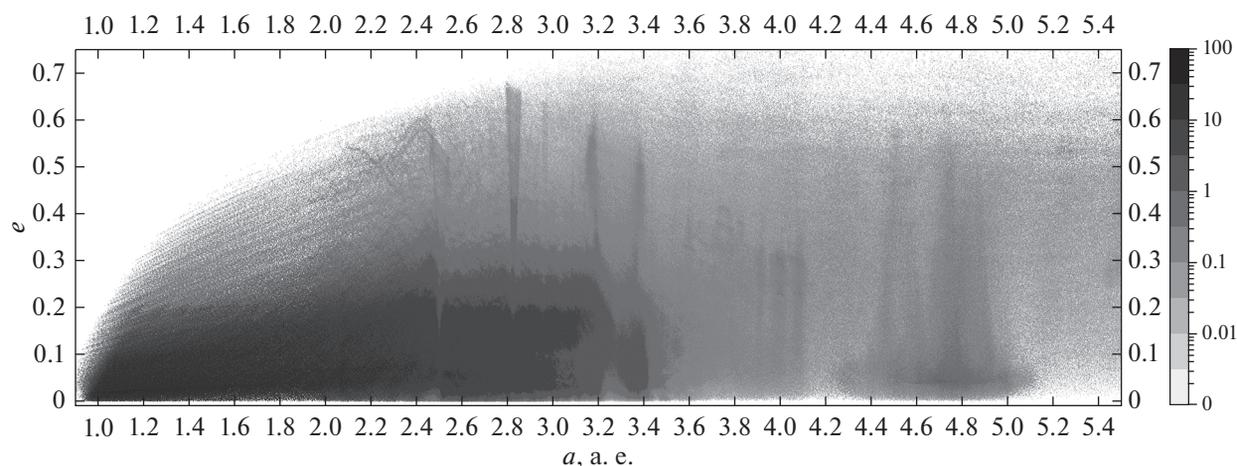


Рис. 3. Суммарная по всем β концентрация частиц в (a, e) -пространстве. Градиентом серого показана орбитальная концентрация положений частиц в (a, e) -пространстве. Число рассчитываемых траекторий частиц для каждого β и орбитального радиуса (и других орбитальных параметров) было одинаковым, хотя число реальных частиц зависит от параметра β , радиуса орбиты и других факторов. Поэтому концентрация частиц на рисунке не отражает реалистичную картину распределения плотности пыли в Солнечной системе, а носит иллюстративный характер, показывающий суммарную картину всех рассчитанных траекторий.

мы Марс сформировался, и убыль массы из его зоны резко уменьшилась, в то время как пояс астероидов, где тела сталкивались довольно часто, продолжил терять массу на протяжении миллиардов лет.

Определенную роль в убыли массы астероидного пояса сыграло и резонансное выметание астероидов из щелей Кирквуда, но это не универсальный механизм, который не может объяснить низкую массу Марса, находящегося вне действия основных резонансов Юпитера. Отметим, что уменьшение параметра β замедляет дрейф частиц вследствие эффекта Пойнтинга–Робертсона и облегчает захват частиц в резонанс с Юпитером. Резонансное влияние планеты-гиганта должно усилить эксцентриситеты орбит таких медленно дрейфующих частиц и увеличить вероятности их вылета из Солнечной системы. Некоторое повышение процента частиц с малыми β , улетевших из внешней части пояса астероидов, можно увидеть в табл. 1.

На рис. 3 в пространстве “большая полуось–эксцентриситет” показаны все рассчитанные траектории частиц, рожденных в поясе астероидов и подвергшихся воздействию солнечного излучения и солнечного ветра. В результате солнечного давления мелкие частицы при образовании увеличивают полуось и эксцентриситет своей орбиты. Если орбита пылинки пересекает орбиту Юпитера или приближается к этому, то гравитационное воздействие планеты-гиганта меняет орбиту частицы вплоть до ее выбрасывания из Солнечной системы или падения на Солнце. Если частица остается на стабильной гелиоцентрической орбите достаточно долго, то она теряет

момент из-за эффекта Пойнтинга–Робертсона и медленно дрейфует к Солнцу. На рис. 3 вправо уходит поток частиц, покидающих Солнечную систему, влево – поток частиц, теряющих угловой момент из-за торможения на солнечном излучении, и сближающихся с Солнцем. Некоторые частицы захватываются юпитерианскими резонансами и образуют в (a, e) -пространстве плотные скопления с примерно одинаковым периодом орбитального вращения.

Резонансы образуют не только скопления, но и вертикальные щели в распределении астероидной пыли. Щели образуются всегда, когда частица проходит транзитом сквозь резонанс – внешний или внутренний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Часть микронной пыли, образующейся при каждом соударении в современном поясе астероидов или в популяции планетезималей в ранней Солнечной системе, переходит из-за давления солнечного излучения на вытянутые орбиты. Частицы на таких орбитах подвергаются гравитационному воздействию Юпитера и покидают Солнечную систему. Рассмотренный механизм эффективного выметания пылинок из пояса астероидов может отвечать за уменьшение массы пояса астероидов и зоны Марса. Активный унос пыли с поверхности небольших тел подтверждается фотографиями, сделанными на межпланетных аппаратах, которые демонстрируют малое количество пыли на поверхностях астероидов, покрытых камнями разных размеров.

Авторы выражают благодарность С.И. Ипатову, А.Б. Макалкину и анонимному рецензенту за полезные замечания, приведшие к существенному улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы. Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Горькавый Н.Н.* Образование Луны и двойных астероидов // Изв. Крым. астрофиз. обс. 2007. Т. 103. № 2. С. 143–155.
- Горькавый Н.Н.* О происхождении главного пояса астероидов // Изв. Крым. астрофиз. обс. 2018. Т. 114. № 2. С. 67–73.
- Горькавый Н.Н., Трофимов П.М.* Уменьшение массы главного пояса астероидов и зоны Марса вследствие солнечного излучения и влияния Юпитера. II. Сценарий эволюции плотности остаточного диска // Астрон. вестн. 2022 (в печати).
- Горькавый Н.Н., Фридман А.М.* Физика планетных колец. Небесная механика сплошной среды. М.: Наука, 1994. 348 с.
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. М.: РАН ИПМ/УРСС, 2000. 320 с.
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Сафронов В.С.* Проблемы образования планет // Происхождение Солнечной системы. Кинетические и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1993. С. 5–23.
- Симоненко А.Н.* Астероиды. М.: Наука, 1985. 208 с.
- Рингвуд А.Е.* Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 293 с.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Рускол Е.Л., Сафронов В.С.* Рост Юпитера как важный фактор формирования планетной системы // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. С. 291–300. (Sol. Syst. Res. 1998. V. 32. P. 255.)
- Шмидт О.Ю.* Проблема происхождения Земли и планет // Тр. первого совещания по вопросам космогонии, 16–19 апреля 1951 г. М.: Изд. АН СССР, 1951. С. 9–32.
- Шмидт О.Ю.* Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 1962. 131 с.
- Chambers J.E., Halliday A.N.* The Origin of the Solar System // Encyclopedia of the Solar System (Second Edition). 2007. P. 29–52.
- Clement M.S., Kaib N.A., Raymond S., Chambers J.E.* The early instability scenario: Mars' mass explained by Jupiter's orbit // Icarus. 2021. V. 367. P. 114585.
- Burns J.A., Lamy P., Soter S.* Radiation forces on small particles in the Solar System // Icarus. 1979. V. 40. P. 1–48.
- Deienno R., Gomes R.S., Walsh K.J., Morbidelli A., Nesvorný D.* Is the Grand Tack model compatible with the orbital distribution of main belt asteroids? // Icarus. 2016. V. 172. P. 114–124.
- Gorkavyi N.N., Ozernoy L.M., Mather J.C., Taidakova T.* NGST and the zodiacal light in the Solar system // NGST Science and Technology Exposition / Eds Smith E.P., Long K.S. ASP Ser. 2000. V. 207. P. 462–467.
- Gustafson B.A.S.* Physics of zodiacal light // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1994. № 22(1). P. 553–595.
- Ipatov S.I., Mather J.C., Taylor P.A.* Migration of interplanetary dust // Ann. New York Acad. Sci. 2004. V. 1017. P. 66–80.
- Izidoro A., Haghighipour N., Winter O.C., Tsuchida M.* Terrestrial planet formation in a protoplanetary disk with a local mass depletion: A successful scenario for the formation of Mars // Astrophys. J. 2014. V. 782. P. 31–51.
- Jackson A.A., Zook H.A.* Orbital evolution of dust particles from comets and asteroids // Icarus. 1992. V. 97. P. 70–84.
- Kortenkamp S.J., Dermott S.F.* Accretion of interplanetary dust particles by the Earth // Icarus. 1998. V. 135. P. 469–495.
- Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Vasilyev M.V., Yagudina E.I.* Hidden mass in the asteroid belt // Icarus. 2002. V. 158. P. 98–105.
- Marzari F., Vanzani V.* Dynamical evolution of interplanetary dust particles // Astron. and Astrophys. 1994. V. 283. P. 275–286.
- Minton D.A., Malhotra R.* Dynamical erosion of the asteroid belt and implication for large impacts in the inner Solar system // Icarus. 2010. V. 207. P. 744–757.
- Mukai T., Yamamoto T.* Solar wind pressure on interplanetary dust // Astron. and Astrophys. 1982. V. 107. P. 97–100.
- Nagao K., Okazaki R., Nakamura T., Miura Y., Osawa T., Bajo K., Matsuda Sh., Ebihara M., Ireland T., Kitajima F., Naraoka H., Noguchi T., Tsuchiyama A., Yurimoto H., Zolensky M., Uesugi M., Shirai K., Abe M., Yada T., Kawaguchi J.* Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples // Science. 2011. V. 333. P. 1128–1131.
- Nesvorný D., Roig F.V., Deienno R.* The role of early giant-planet instability in terrestrial planet formation // Astrophys. J. 2021. V. 161. P. 50.
- Pitjeva E.V., Pitjev N.P.* Masses of the main asteroid belt and the Kuiper Belt from the motions of planets and spacecraft // Astron. Lett. 2018. V. 44. P. 554–566.
- Pollack J.B., Hubickyi O., Bodenheimer P., Lissauer J.J., Podolak M., Greenzweig Y.* Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas // Icarus. 1996. V. 124. P. 62–85.
- Taidakova T., Gorkavyi N.* New numerical method for non-conservative systems // The Dynamics of Small Bodies in the Solar Systems: A Major Key to Solar Systems Studies / Eds Steves B.A., Roy B.A. Kluwer Acad. Publ. 1999. P. 393–398.
- Walsh K.J., Morbidelli A., Raymond S.N., O'Brien D.P., Mandell A.M.* A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration // Nature. 2011. V. 475. P. 206–209.
- Wetherill G.W.* Formation of the Earth // Ann. Rev. Earth and Planet Sci. 1990. V. 18. P. 205–256.
- Weidenschilling S.J.* The distribution of mass in the planetary system and solar nebula // Astrophys. and Space Sci. 1977. V. 51. P. 153–158.
- Weidenschilling S.J., Spaute D., Davis D.R., Marzari F., Ohtsuki K.* Accretional evolution of a planetesimal swarm. 2. The terrestrial zone // Icarus. 1997. V. 128. P. 429–456.