

УДК 523.44

УМЕНЬШЕНИЕ МАССЫ ГЛАВНОГО ПОЯСА АСТЕРОИДОВ И ЗОНЫ МАРСА ВСЛЕДСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ ЮПИТЕРА. II. СЦЕНАРИЙ ЭВОЛЮЦИИ ПЛОТНОСТИ ОСТАТОЧНОГО ДИСКА

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

Дефицит массы пояса астероидов и зоны Марса представляет собой серьезную проблему. Обычно обсуждается потеря массы астероидного пояса, хотя зона Марса потеряла в три раза больше вещества на единицу площади, чем зона астероидов. В статье строится полуколичественный сценарий для эволюции остаточного протопланетного диска (после удаления газа) в зоне Марса и астероидов, который учитывает как аккреционный рост планетезималей, так и потерю массы диска из-за столкновительной эрозии. При столкновениях планетезималей генерируются облака пыли. Показано, что ~20–50% массы мелкой (0.2–40 мкм) пыли, образовавшейся в поясе астероидов, переходит под действием солнечного излучения на эксцентричные орбиты, рассеивается гравитационным полем Юпитера и покидает Солнечную систему за среднее время $\sim 3 \times 10^4$ лет. Из зоны Марса аналогичным способом выметается ~10% массы мелкой пыли, образовавшейся в каждом соударении. Влияние Юпитера падает при уменьшении орбитального радиуса R , зато частота соударений растет при этом как R^{-3} , в результате зона Марса теряет вещество быстрее, чем зона астероидов. Показано, что в зоне Земли аккреционный рост крупных тел преобладает над процессами эрозии, в то время как в зоне астероидов процессы эрозии всегда доминируют. В зоне Марса процессы столкновительной эрозии были значительны на ранних этапах эволюции диска, но потом аккреционный рост стал доминировать, что и позволило сформироваться планете небольшой массы.

Ключевые слова: астероиды, Марс, Земля, планетезимали, аккреция, метеоритная эрозия, дефицит массы астероидного пояса

DOI: 10.31857/S0320930X22040041

ВВЕДЕНИЕ

Формирование планет земной группы обычно рассматривается как процесс аккреционного роста планетезималей, который заканчивается образованием крупных планет (Шмидт, 1962; Сафронов, 1969; Витязев и др., 1990; Ипатов, 2000; Mordasini и др., 2010). Процессам столкновительной эрозии планетезималей не уделяется достаточного внимания. В случае пояса астероидов разрушение планетезималей доминирует над их ростом, что требует рассмотрения фактора столкновительной эрозии. Это позволит оценить соотношение процессов аккреции и эрозии при формировании планет.

Широко распространено мнение, что в уменьшении массы астероидного пояса важную роль сыграло резонансное гравитационное воздействие Юпитера. Но детальное рассмотрение по-

казывает, что такой механизм эффективен только в зонах сильных резонансов. Между резонансами воздействие оказывается достаточно слабым даже в поясе астероидов, не говоря уж о зоне Марса. Чтобы усилить эффективность резонансного воздействия Юпитера, делаются предположения, что он мог менять свою орбиту, тем самым, резонансы двигались по зоне астероидов (см. обсуждение в статьях (Сафронов, Зиглина, 1991; Izidoro и др., 2016)). Рассматривались даже такие экзотичные сценарии, как смещение Юпитера на радиус орбиты Марса с последующим его возвращением на современную орбиту, но такие сценарии не свободны от проблем (см. обсуждение и ссылки в статье (Трофимов, Горькавый, 2022)). Залет крупных тел из зоны Юпитера в пояс астероидов и зону Марса также рассматривается в качестве фактора, который разрушает пояс астероидов и

уменьшает поверхностную плотность зоны Марса (Жарков, Козенко, 1989; Витязев и др., 1990; O'Brien и др., 2007; Minton, Malhotra, 2009; 2010; Deienno и др., 2016). Но моделирование этого механизма содержит, с одной стороны, достаточно произвольные допущения (о том, что массы таких "юпитерианских тел" сравнимы с массами Земли или Марса), а с другой стороны, не учитывает существенные моменты. Например, с динамической точки зрения, представляется вероятным, что юпитерианские планетезимали, имеющие, очевидно, апоастр возле Юпитера, а периастр, например, возле Марса, будут не вычерпывать вещество из марсианской зоны, а наоборот, — присоединяться к этой зоне. Ведь даже сравнительно небольшой тормозящий импульс, который такое тело получит возле Марса при взаимодействии с марсианскими планетезималиями, немедленно уменьшит апоцентр его орбиты и выведет тело из сферы влияния Юпитера, после чего эта юпитерианская планетезималь уменьшит при дальнейших столкновениях свой эксцентриситет и оседет где-нибудь в зоне астероидов. Более перспективным фактором, объясняющим дефицит массы астероидного пояса и Марса, представляется механизм перераспределения пыли еще на стадии газопылевого протопланетного диска (Drażkowska и др., 2016; Макалкин, Артюшкова, 2017). В настоящее время трудно сделать какие-либо окончательные выводы: какой механизм может безусловно объяснить наблюдаемый дефицит массы астероидного пояса, а тем более — Марса, удаленного от Юпитера. Задачей данной статьи является рассмотрение нового механизма убыли массы из пояса астероидов и марсианской зоны, связанного с образованием пыли и эффектом солнечного излучения (мы не рассматриваем влияние газа на динамику пылинок, поэтому наше рассмотрение относится к стадии, когда зона планет земной группы очистилась от газа). Будущие исследования должны установить относительную роль всех обсуждаемых выше сценариев и эффектов. Известный факт, что зона астероидов потеряла более 99.9% своей массы (Витязев и др., 1990; Krainsky и др., 2002; Pitjeva, Pitjev, 2018), а зона Марса — всего около 90–95% (Жарков, Козенко, 1989; Витязев и др., 1990; Трофимов, Горькавый, 2022), создает впечатление, что отток вещества из зоны астероидов был интенсивнее, чем из зоны Марса. Поэтому модели образования астероидов часто фокусируются только на зоне астероидов и на их взаимодействии с близким Юпитером.

Если предположить, что начальная поверхностная плотность протопланетного диска зави-

села от расстояния по закону $R^{-\frac{3}{2}}$ (Weidenschilling, 1977; Izidoro и др., 2014), то окажется, что зона Марса потеряла примерно в три раза больше поверхностной плотности, чем зона астероидов

(Трофимов, Горькавый, 2022). Согласно (Трофимов, Горькавый, 2022) дефицит массы Марса составляет около 92%, а согласно (Жарков, Козенко, 1989) — 95%. Дефицит массы Марса и пояса астероидов до сих пор является нерешенной проблемой и активно обсуждается в современной литературе (Трофимов, Горькавый, 2022).

Мы полагаем, что образование пояса астероидов и планеты Марс необходимо рассматривать в рамках единой модели, которая должна объяснить наблюдаемую убыль вещества из этих зон, а также различие в финальном результате: почему, несмотря на значительную потерю вещества из своей зоны, Марс все-таки сформировался, а в поясе астероидов планета не смогла вырасти. Логично включить в рассмотрение и Землю, для которой потеря массы диска была несущественной.

Столкновительная эрозия космических тел активно исследуется для современного состояния Солнечной системы. Метеориты, которые находят на Земле, являются продуктами эрозии астероидов вследствие взаимных соударений (Додд, 1986). Часть метеоритов была выброшена с поверхностей Луны и Марса ударами крупных тел, приводившими к образованию кратеров (Мелош, 1994). Аналогичный процесс выброса вещества наблюдался при бомбардировке кометы 9P/Темпеля 1 космическим аппаратом весом в 350 кг со скоростью 10.2 км/с (A'Hearn и др., 2005; Shultz и др., 2005). Данные прямого исследования астероида 24143 Итокава со средним диаметром 330 м показывают, что небольшой астероид из-за эрозии и абляции теряет слой вещества со своей поверхности со скоростью ~ 0.1 –1 м за миллион лет (Nagaо и др., 2011). Как видно на фотографиях астероидов, полученных автоматическими станциями, их поверхность содержит мало пыли и покрыта камнями, в отличие от Луны, которая удерживает пыль силой своей гравитации (Трофимов, Горькавый, 2022).

Эффективность выброса вещества увеличивается при уменьшении массы и гравитационного притяжения разрушаемого тела. Таким образом, метеоритная эрозия должна быть важна для небольших планетезималей на протостадии образования планет, когда даже мелкие метеориты, соударяющиеся с поверхностью тел, приводят к существенному выбросу вещества. Таким образом, изучение роли процессов эрозии актуально как для проблемы образования астероидного пояса (Горькавый, 2018), так и для объяснения дефицита массы Марса.

МОДЕЛЬ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО РОСТА И РАЗРУШЕНИЯ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ

Для понимания различий в динамике роста Земли, Марса и протопланеты в поясе астерои-

дов, оценим скорость аккреционного роста планетезималей в зоне планет земной группы. Если остаточный протопланетный диск с поверхностной плотностью σ состоит из планетезималей одинакового радиуса r_p , с массой m и с плотностью отдельных тел ρ , то хорошо известное характерное время свободного пробега планетезималей будет равно (Витязев и др., 1990; Горькавый, Фридман, 1994):

$$t_{\text{coll}} \approx \frac{1}{2\Omega\tau(1+x^{-1})} \approx \frac{\rho r_p T}{3\pi\sigma(1+x^{-1})}, \quad (1)$$

где $T = 2\pi/\Omega = (GM/R^3)^{1/2}$ – период орбитального вращения на данном радиусе диска вокруг звезды с массой M , а $\tau = 3\sigma/4\rho r_p$ – оптическая

толщина диска частиц; параметр $x = \frac{r_p V^2}{Gm}$ характеризует увеличение сечения взаимодействия за счет гравитационного притяжения частицы. Запишем выражение для роста радиуса крупных тел вследствие аккреции в диске (см., например, Витязев и др., 1990 и ссылки в этой книге)

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\sigma(1+x^{-1})}{2\pi\rho} \sqrt{\frac{GM}{R^3}}. \quad (2)$$

Если учесть часто используемую зависимость поверхностной плотности от радиуса: $\sigma \propto R^{-3/2}$ (Weidenschilling, 1977; Izidoro и др., 2014), то время свободного пробега (1) будет зависеть от орбитального радиуса как $t_{\text{coll}} \propto R^3$, а скорость роста планетезималей (2) будет быстро падать с ростом орбитального радиуса как R^{-3} . Отметим, что зависимость $\sigma \propto R^{-3/2}$ получается для зоны от Венеры до Нептуна из наблюдаемой картины масс планет (Weidenschilling, 1977; Трофимов, Горькавый, 2022). Даже существенные отклонения от этого закона распределения плотности не будут критичны для нашего рассмотрения, потому что частота соударений зависит не только от плотности диска, но и от частоты орбитального вращения, которая падает по близкому и жестко заданному закону. Предположим, что в остаточном протопланетном диске число мелких тел растет с уменьшением их радиуса по дифференциальному закону распределения: $n \propto r_p^{-q}$. В распределении астероидных пылинок и частиц в планетных кольцах наблюдается $q \approx 3-3.5$ (см., например, (Divine, 1993; Горькавый, Фридман, 1994; Kun, Herrmann, 1999; Sánchez, Scheeres, 2014)). Для $q = 3$ получим примерно одинаковый вклад частиц разного размера nm в поверхностную плотность диска, при этом в основной своей части оптическая толщина диска будет определяться мелкими частицами. При $q = 3.5$ роль мелкой пыли в

значениях поверхностной плотности и оптической толщины диска возрастает. Пылинки микронных размеров сталкиваются часто, но вряд ли эти столкновения носят разрушительный характер и приводят к образованию новых частиц (Kun, Herrmann, 1999). Для генерации пыли существенны такие частицы в диске, у которых частые столкновения сопровождаются катастрофическим взаимным разрушением (Kun, Herrmann, 1999). Вероятнее всего, речь может идти о частицах сантиметровых и дециметровых размеров. Пусть наибольшее количество пыли возникает при столкновении небольших частиц с радиусом r_s , которые образуют слой с поверхностной плотностью σ_s . Именно между ними происходит максимальное количество соударений, что дает высокий темп эрозии. С ростом размера тел в зоне питания планеты, оптическая толщина диска из таких тел уменьшается, отчего темп их столкновительной эрозии тоже падает. Предположим, что столкновения небольших тел и сопутствующее образование пыли класса В (Трофимов, Горькавый, 2022) с размером менее (20–40) мкм (массовую долю которой в образующемся облаке обломков мы обозначим как δ) служат главной причиной уменьшения общей плотности диска σ с характерной скоростью:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = \delta \frac{3E\sigma_s^2}{2\sigma\rho r_s} \sqrt{\frac{GM}{R^3}}. \quad (3)$$

Предполагая, что относительная масса небольших (сантиметровых) частиц σ_s/σ слабо зависит от орбитального радиуса, получим, что скорость эрозии диска (3) будет падать с ростом радиуса орбиты как $\sigma_s/R^{3/2} \propto 1/R^3$ – как и скорость роста протопланеты (2). Из расчетов в (Трофимов, Горькавый, 2022) можно получить E – коэффициент вылета вещества в зависимости от орбитального радиуса (детальная информация приведена в статье (Трофимов, Горькавый, 2022)). Коэффициент E для каждого орбитального радиуса R_i представляет собой усредненную долю частиц (в процентах), выброшенных за рассматриваемый интервал времени.

Получим коэффициент вылета E для $q = 3$, то есть для предположения, что пылинки любого размера и любого соотношения солнечного давления к гравитации β , которое примерно обратно пропорционально радиусу пылинки, вносят приблизительно одинаковый вклад nm в распределение плотности. Для этого можно усреднить все проценты вылетевших частиц (Трофимов, Горькавый, 2022), с учетом интервала между различными β :

$$E(R_i) = \frac{E_1\Delta\beta_1 + E_2\Delta\beta_2 + \dots + E_{10}\Delta\beta_{10}}{\Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \dots + \Delta\beta_{10}}. \quad (4)$$

Таблица 1. Коэффициент вылета частиц под действием солнечного излучения и Юпитера

Зона (а. е.)		1.0–1.2	1.3–1.5	1.6–1.8	1.9–2.2	2.3–2.6	2.7–3.0	3.1–3.4
Средний коэффициент вылета $E(R_i)$, %	$q = 3$	4.7	7.0	10.4	14.5	22.4	30.9	42.1
	$q = 3.5$	7.3	10.9	15.9	21.9	32.6	43.4	56.1

Десять значений β_i соответствуют верхней строке табл. 3 в статье (Трофимов, Горькавый, 2022); в этой же табл. 3 приведены E_i для каждого радиуса R_i . Границы каждого интервала $\Delta\beta_i$ определяются просто как среднее от соседних β_i , за исключением крайних значений β_i , где внешняя граница интервала задается симметрично отно-

сительно β_i . Полученные значения $E(R_i)$ приведены в таблице ниже (с усреднением по нескольким орбитальным радиусам). Коэффициенты E для $q = 3.5$ (см. табл. 1) соответствуют более значимой роли мелких пылинок. Формула (4) в этом случае усложняется из-за повышения значимости пылинок с большими β :

$$E(R_i) = \frac{E_1(\beta_1)^{q-3}\Delta\beta_1 + E_2(\beta_2)^{q-3}\Delta\beta_2 + \dots + E_{10}(\beta_{10})^{q-3}\Delta\beta_{10}}{(\beta_1)^{q-3}\Delta\beta_1 + (\beta_2)^{q-3}\Delta\beta_2 + \dots + (\beta_{10})^{q-3}\Delta\beta_{10}}. \quad (5)$$

Из табл. 1 следует, что коэффициент вылета максимален во внешней части пояса астероидов, где влияние солнечного излучения и гравитации Юпитера выбрасывают из Солнечной системы 30–50% пылевых частиц, и остается значительным и во внутренней зоне пояса астероидов, где вылетают около 20% частиц класса В (мельче 20–40 мкм – см. статью (Трофимов, Горькавый, 2022)). Отметим, что этот параметр относится к каждому соударению каждой частицы. Следовательно, любая частица диска, проходя через множество соударений, систематически теряет часть своей массы. В зоне Марса коэффициент вылета уменьшается до ~10%, а в зоне Земли он становится еще почти в два раза меньше. Тем не менее эти значения должны учитываться в моделях эволюции, тем более, как следует из формулы (3), темп соударений растет при переходе от пояса астероидов к зоне Марса и Земли как R^{-3} , что с запасом компенсирует уменьшение коэффициента вылета E .

РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРИЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО РОСТА И РАЗРУШЕНИЯ

Изучим детальнее соотношение темпов роста протопланеты и эрозии диска на разных радиусах. На рисунке показан параметр роста планеты $\frac{dr_p}{dt} \propto R^{-3}$, нормированный на единицу на орбитальном радиусе Земли в 1 а. е. Эта функция с хорошей точностью характеризует темп роста планеты, хотя для полноты картины в ней нужно учитывать такие, например, факторы, как вероят-

ность слипания частиц или слияния тел, а также зависимость скорости соударений частиц от орбитального радиуса (Сафронов, 1969; Витязев и др., 1990). На рисунке показана также характерная скорость уменьшения поверхностной плотности диска $\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} \propto ER^{-3}$, где коэффициент вылета E для каждого орбитального радиуса с шагом в 0.1 а. е. определен из расчетов из статьи (Трофимов, Горькавый, 2022).

Мы выбираем нормировку скорости эрозии диска на орбитальном радиусе Земли такой, чтобы скорость эрозии была меньше скорости аккре-

ции: $\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} < \frac{1}{r_p} \frac{dr_p}{dt}$, потому что мы знаем, что в зоне

Земли плотность диска значительно не менялась после потери газа из диска. Для определенности

$$\text{примем } \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = 0.75 \frac{1}{r_p} \frac{dr_p}{dt}.$$

Из рисунка следует, что абсолютная скорость эрозии диска $\propto ER^{-3}$ растет от пояса астероидов к зоне Марса и к Земле. Это связано с тем, что при уменьшении орбитального радиуса падение коэффициента вылета E компенсируется быстрым ростом числа соударений планетезималей и количеством пыли, которое они производят. Это объясняет, почему зона Марса потеряла больше вещества, чем пояс астероидов. Сравнение скорости аккреции и начальной функции эрозии (при принятых предположениях) дает следующую картину: в районе 1 а. е. эрозия меньше аккреции, в зоне (1.1–1.3) а. е. эти факторы примерно равны, а в зоне от 1.4 до 3.4 а. е. (очевидно, – и для более

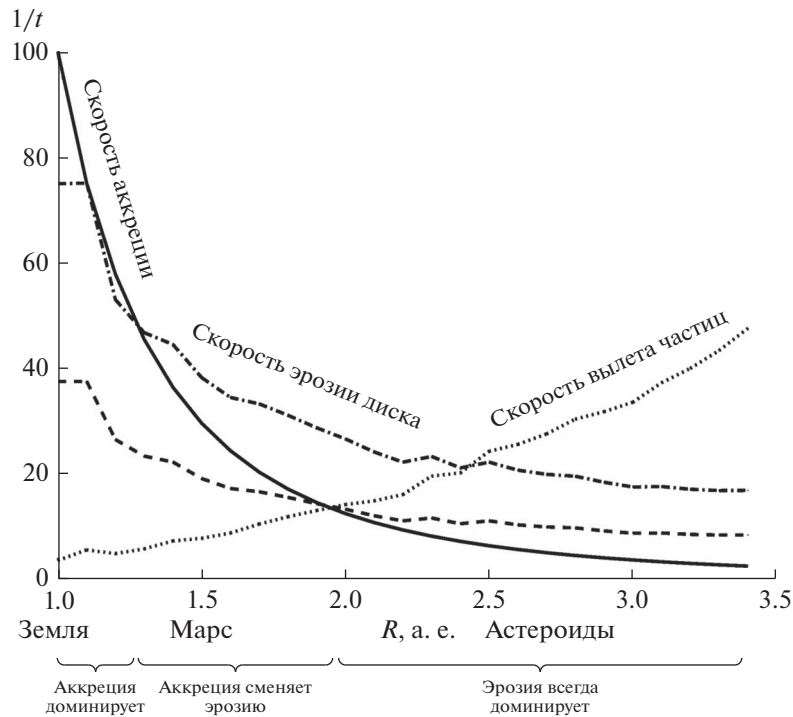


Рис. 1. Сплошная кривая $\propto R^{-3}$ показывает скорость аккреции или роста протопланеты (выражение (2), деленное на r_p), нормированную на 100% у Земли. Пунктирная кривая — зависимость коэффициента вылета E (в %, для $q = 3$) от орбитального радиуса. Штрих-пунктирная кривая — начальная скорость столкновительной эрозии диска $\propto ER^{-3}$, которая выбрана так, чтобы в зоне Земли она составляла 0.75 от скорости аккреции. Штриховая линия — скорость эрозии диска, уменьшенная в два раза по сравнению с начальной скоростью.

далеких областей) эрозия доминирует. Рассмотрим, как будет эволюционировать эта картина со временем. Запишем отношение двух скоростей: роста планеты к эрозии диска:

$$\left(\frac{1}{r_p} \frac{dr_p}{dt}\right) / \left(\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt}\right) = \frac{\left(1 + \frac{Gm}{r_p V^2}\right) r_s}{3\pi\delta E} \frac{r_s}{r_p} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2. \quad (6)$$

Изменение этого отношения со временем будет определять баланс между аккрецией и эрозией. Параметры E и δ близки к константе. С увеличением массы протопланеты величина $\frac{Gm}{r_p V^2}$ должна увеличиваться, потому что скорость V определяется “разогревом” мелких частиц при рассеянии на крупных телах с первой космической скоростью $\sqrt{\frac{Gm}{r_p}}$. Так как равновесная скорость V определяется не только гравитационным рассеянием, но и взаимными неупругими соударениями частиц (Сафронов, 1969; Горькавый, Фридман, 1994), то рост V будет отставать от первой космической скорости на поверхности крупных тел. Со

временем должны увеличиваться как средний радиус r_s мелких тел, определяющих оптическую толщину диска, так и r_p — радиус крупнейшего тела (протопланеты). Так как рост r_p ограничен из-за вычерпывания значительной части массы из зоны питания, а рост r_s не имеет такого ограничения, то можно ожидать, что r_s/r_p будет расти со временем. Анализ σ/σ_s провести сложнее, но здесь надо учесть, что в процессе аккреции роль мелких тел постепенно уменьшается из-за их вычерпывания. В целом, можно сделать достаточно обоснованное предположение, что соотношение (6) будет со временем расти. Следовательно, процессы эрозии будут уступать процессам аккреции, которые, как известно, в окончательном итоге победили в зонах Марса и Земли. Чтобы проиллюстрировать изменение соотношения процессов аккреции и эрозии, на рисунке приведена не только начальная функция эрозии, но и функция в два раза меньшая, чем начальная. Из сравнения уменьшенной кривой эрозии с графиком аккреции следует, что возле Земли и в зоне астероидов картина существенно не изменилась: аккреция увеличила свое превосходство над эрозией в зоне Земли, но в поясе астероидов она по-прежнему

отстает от интенсивной эрозии. В зоне же Марса ситуация кардинально поменялась: если на начальных этапах скорость эрозии была значительно выше скорости аккреции, что и привело к значительному уменьшению плотности зоны Марса, то, со временем, скорость эрозии уменьшилась и аккреция стала доминировать. Это и позволило Марсу сформироваться, хотя и со значительно меньшей массой, чем у Земли (как следует из статьи (Трофимов, Горькавый, 2022) без эрозии диска, согласно стандартной модели распределения поверхностной плотности диска, масса Марса должна была быть на 30% больше, чем у Земли). Марс сформировался в течение ~ 10 – 20 млн лет (Жарков, Козенко, 1989; Dauphas, Pourmand, 2011; Marchi и др., 2020). В то же время пояс астероидов остался в виде многочисленных тел и продолжал терять свою массу в течение четырех с лишним миллиардов лет. Воздействие Юпитера разогрело пояс астероидов, что усилило процессы столкновительной эрозии.

Безусловно, данные оценки и расчеты, отраженные на рисунке, представляют собой самый простой сценарий эволюции плотности диска. В частности, кривая скорости аккреции должна изменяться вместе с отклонением плотности диска от степенного закона. Тем не менее обсуждаемый сценарий может стать основой для детальной численной модели, которая примет степенные зависимости в качестве начальных условий, а далее будет рассчитывать процессы эрозии и аккреции в каждом интервале по орбитальному радиусу. Только кривая зависимости коэффициента вылета E (см. рисунок), вычисленная в данной работе, не будет меняться, так как она зависит лишь от размера пылинок, солнечного излучения и гравитации Юпитера.

Как показали численные расчеты (Izidoro и др., 2014), реалистичная картина формирования планет земной группы, включая небольшой Марс и пояс астероидов, получается при уменьшении плотности диска в области (1.1–2.1) а. е. в 2 или 4 раза по сравнению с ожидаемой по закону $\sigma \propto R^{-3/2}$. Эти расчеты можно рассматривать как подтверждение обсуждаемой модели уменьшения поверхностной плотности протопланетного диска из-за столкновительной эрозии.

Оценим эффективность такого эрозионного уменьшения плотности диска. За время формирования Марса или астероидов каждое тело успело столкнуться с другими телами множество раз, все время “обновляя” спектр частиц, в том числе и области мелкой пыли. Пусть частицы класса В, которые выбрасываются из Солнечной системы совместным действием Солнца и Юпитера, составляют долю δ от массы диска. Если эти частицы будут выброшены за время t_d , то дальнейший процесс будет зависеть от скорости возобновле-

ния спектра частиц по массам. Пусть новая компонента мелкой пыли в диске появится за время t_c , которое должно быть близко к среднему времени свободного пробега тех тел, которые являются основными поставщиками мелкой пыли.

Рассмотрим вариант, когда $t_d \gg t_c$. В этом случае, эффективность эрозионного уменьшения массы будет невысока ввиду медленного уноса пыли и ее можно описать уравнением:

$$D = \delta \frac{T_M}{t_d}, \quad (7)$$

где D – доля унесенной из диска массы, T_M – характерное время роста планеты (Марса).

Рассмотрим вариант, когда $t_c \gg t_d$. В этом случае эффективность эрозионного уменьшения массы тоже будет невысока из-за медленного возобновления мелкой компоненты:

$$D = \delta \frac{T_M}{t_c}. \quad (8)$$

Очевидно, что максимальная скорость эрозии диска будет достигнута, когда $t_c \sim t_d$. В этом случае вся генерируемая пыль будет удаляться из Солнечной системы с таким же характерным временем. Скорость образования мелкой пыли можно считать заданной величиной, а вот время удаления частиц из системы имеет более сложный характер. Вся доля δ вылетает за время $t_d \sim (3 \times 10^4)$ лет. Но, как показано в (Трофимов, Горькавый, 2022), доля $1/7$ от δ вылетает всего за $t_{1/7} \sim 500$ лет, а $1/5$ – за $t_{1/5} \sim 1000$. Легко оценить, что эффективность уменьшения плотности диска может увеличиться примерно на порядок, если учесть вылет самых быстрых частиц.

$$D = \frac{\delta T_M}{7 t_{1/7}} > \frac{\delta T_M}{5 t_{1/5}} > \delta \frac{T_M}{t_d}. \quad (9)$$

Если $T_M \sim 10^7$ лет, а $7 t_{1/7} \sim 10^3$ лет, то диск может существенно уменьшить свою массу ($D \sim 1$) за счет вылета пыли, которая занимает лишь небольшую долю по массе диска: $\delta \sim 10^{-4}$. Максимальная поверхностная плотность твердого вещества в зонах Марса и астероидов, согласно (Трофимов, Горькавый, 2022), $\sigma \sim (1-2)$ г/см², что приводит к малой оптической толщине пыли $\tau \sim (0.1-0.01)$, в предположении, что вся доля пыли $\delta \sim 10^{-4}$ массы диска содержится в частицах с радиусами $\sim (1-10)$ мкм. Отметим, что оценка времени вылета относилась к числу рассчитанных в статье (Трофимов, Горькавый, 2022) частиц (или их траекторий). В (9) должны входить времена характерного уменьшения плотности из-за вылета определенной доли массы диска, то есть эти времена в более точной модели должны зависеть

от распределения частиц. С учетом данных из таблицы, можно полагать, что в результате такого упрощения мы недооценили скорость уменьшения массы диска, которая должна зависеть от самых мелких частиц.

Эти простые оценки показывают принципиальную перспективность обсуждаемого механизма, который нужно исследовать в более детальных моделях. В этих моделях должны быть рассмотрены все механизмы образования пыли, что позволит увереннее оценить долю пылевой составляющей в протопланетном диске на разных стадиях эволюции. Возможно, что обсуждаемую выше модель нужно применять не к диску с плавно падающей плотностью, а адаптировать к диску с уже существующим дефицитом плотности в зонах Марса и пояса астероидов, возникшим при раннем перераспределении пыли, конденсирующейся из газовой фазы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассмотрели новый механизм убыли массы остаточного протопланетного диска (после удаления из него газа), который связан с выбрасыванием мелкой пыли из Солнечной системы из-за солнечного излучения и гравитационного поля Юпитера. Данный механизм, основанный на небесно-механических эффектах, потенциально способен объяснить все три факта, относящихся к зоне планет земной группы и астероидов:

1. Отсутствие дефицита поверхностной плотности в зоне Венера–Земля по сравнению со степенным законом $R^{-3/2}$.

2. Унос из зоны Марса более чем 90% поверхностной плотности остаточного протопланетного диска, что является рекордным показателем по абсолютной величине (~ 0.1 масс Земли на 1 кв. а. е.).

3. Унос из зоны астероидов около 99.97% поверхностной плотности (или ~ 0.04 масс Земли на 1 кв. а. е.), что является рекордным показателем по относительной величине.

Построить механизм с такой сложной зависимостью от орбитального радиуса, который бы мог объяснить все указанные особенности Солнечной системы, нетривиально. Например, механизмы, связанные только с гравитационными возмущениями от Юпитера, не могут объяснить значительное уменьшение плотности в зоне Марса.

Для доказательства эффективности обсуждаемого механизма эрозии остаточного диска нужно показать, что более 90% вещества этого диска находилось в некоторый момент в виде микронной пыли. Это задача, которая требует построения ряда моделей в рамках газодинамики и теории конденсации, физики твердого тела и ударных волн,

выходит за рамки данной статьи, которая опирается на небесно-механические расчеты. Мы лишь можем кратко обсудить сценарии эффективного образования мелкой пыли:

1. Частые столкновения в среде мелких тел являются иерархическим процессом, который охватывает как столкновения тел сантиметровых размеров, так и катастрофические соударения многокилометровых планетезималей. Скорости соударений значительно различаются, поэтому столкновения мелких тел и образование пылинок зависят от энергии разрушения каменных пород и льдов, а физика взаимных ударов крупных тел усложняется испарением поверхностного вещества, образованием ударных волн — как в твердом теле, так и в образовавшемся облаке газа. Оценить эффективность этих процессов сложно, при этом результат может быть “контринтуитивным” — отношение к мелкой пыли, как к незначительной компоненте остаточного протопланетного диска, легко может оказаться неправильным.

2. Эффект абляции (распыления поверхностного вещества) при воздействии на поверхность астероидов солнечного излучения и частиц солнечного ветра (Nagao и др., 2011).

3. Невзирая на неопределенность данных сценариев, которые требуют построения сложных моделей, авторы предполагают, что эффективность образования мелкой пыли окажется достаточно высокой, чтобы объяснить наблюдаемые особенности распределения массы в зонах Венеры, Земли, Марса и астероидов. В обратном случае придется предположить существование еще одного механизма убыли массы, который сложным образом зависит от радиуса орбиты и удовлетворяет всем трем наблюдаемым фактам (см. выше). Это предположение представляется нам крайне маловероятным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты и оценки подтверждают ранее высказанную гипотезу, что в формировании астероидного пояса важную роль играет выметание пыли под воздействием солнечного излучения и гравитации Юпитера (Горькавый, 2018; Gorkavyi, Taidakova, 2019). Как показано в данной статье, из пояса астероидов быстро удаляется от 20 до 50% всех пылинок класса В (с радиусами меньше 20–40 мкм). Результаты данной работы говорят о том, что этот механизм мог оказать сильное воздействие и на формирование Марса, из зоны которого удаляется около 10% пылинок, образующихся в каждом соударении

более крупных тел. На начальной стадии эволюции остаточного диска скорость аккреции превосходила скорость эрозии только в зоне Земли. В зонах Марса и в поясе астероидов доминировали столкновительная эрозия и унос вещества из Солнечной системы. Зона Марса теряла поверхностную плотность из-за частых столкновений примерно в 2 раза быстрее, чем пояс астероидов (как видно на рисунке).

Со временем, скорость эрозии диска уменьшилась по сравнению со скоростью аккреции протопланет. Это кардинально изменило ситуацию в зоне Марса: невзирая на значительную потерю массы диска, скорость аккреции здесь стала больше скорости эрозии, что позволило планете сформироваться. В поясе астероидов скорость аккреции не смогла обогнать скорость эрозии, и пояс астероидов продолжил терять массу, что и привело к невозможности формирования планеты.

Рассмотренный сценарий эрозийного уменьшения массы диска частично базируется на численных расчетах, частично на аналитических оценках, но он демонстрирует потенциальную эффективность обсуждаемого механизма и является стимулом для развития полноценных моделей расчета роста планет земной группы и астероидов.

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.* О происхождении главного пояса астероидов // Изв. Крым. астрофиз. обс. 2018. Т. 114. № 2. С. 67–73.
- Горькавый Н.Н., Фридман А.М.* Физика планетных колец. Небесная механика сплошной среды. М.: Наука, 1994. с. 348.
- Додд Р.Т.* Метеориты. Петрология и геохимия. М.: Мир, 1986. 384 с.
- Жарков В.Н., Козенко А.В.* Время формирования Юпитера // Письма в Астрон. журн. 1989. Т. 15. С. 745.
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. М.: РАН ИПМ/УРСС, 2000. 320 с.
- Макалкин А.Б., Артюшкова М.Е.* К образованию планетезималей: радиальное сжатие пылевого слоя, взаимодействующего с газом протопланетного диска // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 6. С. 524–561. (Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 6. P. 491–526)
- Мелош Г.* Образование ударных кратеров. М.: Мир, 1994. 336 с.
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Сафронов В.С., Зиглина И.Н.* Происхождение пояса астероидов // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. С. 190–198.
- Трофимов П.М., Горькавый Н.Н.* Уменьшение массы главного пояса астероидов и зоны Марса вследствие солнечного излучения и влияния Юпитера. I. Численные расчеты эволюции пыли // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 3. С. (в печати).
- Шмидт О.Ю.* Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 1962. 131 с.
- A’Hearn M.F., Belton M.J.S., Delamere A., Blume W.H.* Deep Impact: a large-scale active experiment on a cometary nucleus // Space Sci. Rev. 2005. V. 117. P. 1–21.
- Dauphas N., Pourmand A.* Hf–W–Th evidence for rapid growth of Mars and its status as a planetary embryo // Nature. 2011. V. 473. P. 489–492.
- 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. 272. P. 114–124.
- Divine N.* Five population of interplanetary meteoroids // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 17029–17048.
- Drażkowska J., Alibert Y., Moore B.* Close-in planetesimal formation by pile-up of drifting pebbles // Astron. and Astrophys. 2016. V. 594. A105.
- Gorkavyy N.N., Taidakova T.A.* The lonely Moon, double asteroids, and multiple collisions // Chelyabinsk Superbolide / Eds Gorkavyy N., Dudorov A., Taskaev S. Springer Praxis Books, 2019. P. 287–300.
- 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.
- Izidoro A., Raymond S.N., Pierens A., Morbidelli A., Winter O.C., Nesvorný D.* The asteroid belt as a relic from a chaotic early solar system // Astrophys. J. 2016. V. 833. P. 40–58.
- 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.
- Kun F., Herrmann H.J.* Transition from damage to fragmentation in collision of solids // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. 2623–2632.
- Marchi S., Walker R.J., Canup R.M.* A compositionally heterogeneous martian mantle due to late accretion // Sci. Adv. 2020. V. 6. eaay 2338.
- Mordasini Ch., Klahr H., Alibert Y., Benz W., Dittkrist K.-M.* Theory of planet formation // Proc. Circumstellar disks and planets. Kiel, 2010. P. 1–14.
- Minton D.A., Malhotra R.* A record of planet migration in the main asteroid belt // Nature. 2009. V. 457. P. 1109–1011.
- 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.
- 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.
- O'Brien D.P., Morbidelli A., Bottke W.F.* The primordial excitation and clearing of the asteroid belt – Revisited // *Icarus*. 2007. V. 191. P. 434–452.
- Pitjeva E.V., Pitjev N.P.* Массы главного пояса астероидов и пояса Койпера по движениям планет и космических аппаратов // *Письма в Астрон. журн.* 2018. Т. 44. С. 604–617.
- Sánchez P., Scheeres D.J.* The strength of regolith and rubble pile asteroids // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2014. V. 49. № 5. P. 788–811.
- Schultz P.H., Ernst C.M., Anderson J.L.B.* Expectation for crater size and photometric evolution from the Deep Impact collision // *Space Sci. Rev.* 2005. V. 117. P. 207–239.
- Weidenschilling S.J.* The distribution of mass in the planetary system and solar nebula // *Astrophys. and Space Sci.* 1977. V. 51. P. 153–158.