

УДК 523-52

ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗОНЫ ПИТАНИЯ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ С ФОРМИРУЮЩИМИСЯ ПЛАНЕТАМИ И ЛУНОЙ

© 2019 г. С. И. Ипатов*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

**e-mail: siipatov@hotmail.com*

Поступила в редакцию 20.03.2019 г.

После доработки 26.03.2019 г.

Принята к публикации 26.03.2019 г.

Проведены расчеты миграции планетезималей из зоны питания планет земной группы, разделенной в зависимости от расстояния от Солнца на семь областей. Учитывалось гравитационное влияние всех планет. В ряде вариантов расчетов вместо планет земной группы рассматривались зародыши этих планет с массами, составлявшими 0.1 или 0.3 от современных масс планет. Полученные при расчетах массивы элементов орбит мигрировавших планетезималей использовались при вычислении вероятностей их столкновений с планетами, с Луной, или с их зародышами. В отличие от проводившегося ранее моделирования эволюции дисков тел, объединявшихся при столкновениях, такой подход позволяет для ряда стадий эволюции аккуратнее вычислять вероятности столкновений планетезималей с зародышами планет различных масс. При изучении состава зародышей планет из планетезималей, первоначально находившихся на различных удалениях от Солнца, рассматривались более узкие, чем ранее, зоны, из которых приходили планетезимали, и изучались изменения состава зародышей планет со временем, а не только конечный состав планет. На основании проведенных расчетов сделаны выводы о процессе аккумуляции планет земной группы. Зародыши планет земной группы, массы которых не превышали одной десятой от масс современных планет, аккумуляровались в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели современных масс планет, и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог аккумуляроваться во внутренних слоях планет земной группы и Луны. Вероятности выпадений планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а. е. от Солнца, на зародыши Земли и Венеры с массами, равными 0.3 от масс современных планет, отличались для этих зародышей не более чем в два раза. Суммарная масса планетезималей, первоначально находившихся в каждой из частей области, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а. е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в 2 раза. Внутренние слои каждой планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестностей орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумуляровать одинаковый для этих двух планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы. Земля и Венера могли приобрести более половины своей массы за 5 млн лет. Не учитывавшийся в рассмотренной модели выброс вещества при столкновениях тел с планетами может увеличить время аккумуляции планет. Формирование зародыша Марса с массой, в несколько раз меньшей массы Марса, в результате сжатия разреженного сгущения может объяснить относительно быстрый рост основной массы Марса. При отношении масс зародышей Земли и Луны, равном 81 (отношению масс Земли и Луны), отношение вероятностей выпадений планетезималей на зародыши Земли и Луны в рассмотренных вариантах не превышало 54 и было максимально при массах зародышей примерно в три раза меньших современных масс этих небесных тел. Особенности формирования планет земной группы можно объяснить даже при относительно плавном уменьшении большой полуоси орбиты Юпитера за счет выброса им планетезималей на гиперболические орбиты, без рассмотрения миграции Юпитера к орбите Марса и обратно (“модель большого поворота”, the Grand Tack model) и без резких изменений орбит планет-гигантов, попадавших в резонанс, в модели Ниццы (the Nice model).

Ключевые слова: планетезимали, планеты земной группы, рост зародышей планет, Земля, Луна, вероятности столкновений

DOI: 10.1134/S0320930X19050049

ВВЕДЕНИЕ

Аналитические оценки (Сафронов, 1969; Витязев и др., 1990; Wetherill, 1980) показали, что время формирования Земли порядка 100 млн лет. Различные аналитические исследования процесса формирования планет земной группы проводились и во многих других работах, например, в (Шмидт, 1945; Гуревич, Лебединский, 1950; Сафронов, 1954; 1958; 1960; 1975; Левин, 1964; 1978; Weidenschilling, 1974; Зиглина, Сафронов, 1976; Витязев и др., 1978; Levin, 1978; Печерникова, Витязев, 1979; 1980; Сафронов, Витязев, 1983; Safronov, 1986; Safronov, Vitjazev, 1986; Lissauer, 1987; 1993; Витязев, 1991; Зиглина, 1991; 1995; Greenberg и др., 1991). Опубликовано большое число работ, посвященных численному моделированию формирования планет земной группы. В работах (Cox, 1978; Cox, Lewis, 1980; Wetherill, 1980; 1985; 1988a, 1998b; Ипатов, 1981; 1982; 1987; 1993a; 2000; Lecar, Aarseth, 1986; Wetherill, Stewart, 1989; Beauge, Aarseth, 1990; Ipatov, 1992; Chambers, Wetherill, 1998; Chambers, 2001; 2013; Raymond и др., 2004; 2006; 2009; O'Brien и др., 2006; Hansen, 2009; Morishima и др., 2010; Morbidelli и др., 2012; Izidoro и др., 2014; Hoffmann и др., 2017; Lykawka, Ito, 2017) рассматривалась модель эволюции дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях, соответствующих зоне питания планет земной группы. Характеристики и эволюция планет земной группы рассмотрены в (Маров, 2017).

Первая работа, посвященная моделированию на ЭВМ процесса аккумуляции планет, была опубликована Dole (1970), постулировавшим концепцию зародышей планет (в алгоритме зародыши вбрасывались в диск и аккумуляировали мелкие объекты без учета гравитационных взаимодействий). В работах (Козлов, Энеев, 1977; Энеев, Козлов, 1979; 1981; Энеев, Kozlov, 1981) методом численного моделирования исследовалось образование протопланет путем объединений сильно разреженных газопылевых сгущений, двигавшихся по почти круговым орбитам. В этих работах считалось, что сгущения объединились в гигантские разреженные протопланеты с современными массами планет до того, как они сжались до плотности твердых тел. Первые работы, в которых при исследовании эволюции дисков твердых тел моделировались гравитационные взаимодействия тел диска и считалось, что два тела объединяются, когда расстояние между их центрами масс становится равным сумме их радиусов (а не радиусу какой-то большой условной сферы) появились в 1978 г. для плоской модели (Ипатов, 1978; Cox, 1978). Пространственная модель эволюции таких дисков была впервые рассмотрена в (Wetherill, 1980). В (Cox, Lewis, 1980; Wetherill, 1980) число начальных тел равнялось 100. В этих

работах при учете гравитационного влияния тел использовался метод сфер (Cox и др., 1978).

Ипатов (1981; 1982; 1987; 1993a; 2000) рассматривал эволюцию дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях, соответствующих зоне питания планет земной группы. Взаимное гравитационное влияние тел учитывалось методом сфер действия, то есть вне сфер действия тела двигались вокруг Солнца по невозмущенным кеплеровским орбитам, а внутри сферы относительное движение тел рассматривалось в рамках задачи двух тел. Расстояние начальных тел от Солнца варьировалось от 0.36 а. е. (или от 0.4 а. е.) до 1.2 а. е. Суммарная масса тел равнялась $1.87m_E$, где m_E – масса Земли. В случае почти круговых начальных орбит тел при изучении эволюции плоских дисков (Ипатов, 1981; 1982) число образовавшихся планет было больше реальных четырех планет земной группы, а нужное число планет получалось только при начальных эксцентриситетах, равных 0.35. При эволюции пространственных дисков можно получить (Ипатов, 1982; 1987; 1993a; 2000) реальное число планет. Например, в вариантах, рассмотренных в (Ипатов, 2000) в результате эволюции образовывалось по четыре планеты с массами, большими $0.046m_E$. Ипатов (1982; 1987; 1993a; 2000) рассматривал до 1000 начальных тел в каждом диске. Начальные эксцентриситеты e_0 орбит тел при расчетах эволюции пространственных дисков методом сфер действия равнялись 0.02. Было показано, что для рассматриваемых дисков такие эксцентриситеты довольно быстро достигаются при учете гравитационного влияния тел на расстояниях, больших их радиусов сфер действия. Рассматривались распределения тел, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца, по большим полуосям и эксцентриситетам на нескольких стадиях эволюции диска. Средний эксцентриситет e_{av} орбит тел в ходе эволюции пространственных дисков превышал 0.2, а в ряде вариантов в некоторые моменты времени был больше 0.4. Например, в варианте, представленном на рис. 6.1 в (Ипатов, 2000), при $e_0 = 0.02$ и 960 начальных телах e_{av} равнялось 0.09, 0.20 и 0.35 при числе тел в диске равном 500, 250 и 100, соответственно. При этом большие средние эксцентриситеты орбит были у тел, расположенных по краям диска (с большими полуосями $a < 0.4$ а. е. и $a > 1.2$ а. е.). В рассмотренных вариантах расчетов орбиты некоторых планет с массами порядка масс Меркурия и Марса приобретали в конце эволюции эксцентриситеты, близкие к эксцентриситетам орбит этих планет, причем тела с большими эксцентриситетами образовывались в основном по краям кольца.

На основании результатов расчетов эволюции дисков тел Ипатов (1982; 1987; 1993a; 2000) сделал

следующие выводы об аккумуляции планет земной группы. В реальном случае при очень большом числе начальных тел предположение о том, что Меркурий и Марс приобрели большие эксцентриситеты при гравитационных взаимодействиях тел только из зоны питания планет земной группы, означает наличие в ходе эволюции больших эксцентриситетов и у других тел с массами порядка масс Меркурия и Марса. Вероятность выброса на гиперболические орбиты тел из зоны питания планет земной группы невелика (около 10%). Поэтому такие тела, скорее всего, столкнулись бы с зародышами Земли и Венеры. Рост эксцентриситетов орбит Меркурия и Марса (и наклона орбиты Меркурия) мог быть частично обусловлен гравитационным влиянием тел, залетавших в зону питания планет земной группы из зон питания планет-гигантов. При этом эти залетавшие тела могли не сталкиваться с телами из зоны питания планет земной группы, а только гравитационно возмущать их орбиты.

По оценкам Ипатова (2000, гл. 6) время формирования 80 % массы крупнейшей планеты (аналога Земли) не превышало 10 млн лет, а общее время эволюции дисков было порядка 100 млн лет. Ipatov (1992) отмечал, что времена формирования основной массы планет порядка 1–10 млн лет были получены при рассмотрении “детерминированного” выбора пар сближающихся тел в диске (когда для моделирования сближения выбиралась пара тел с минимальным временем до сближения). При использовании “вероятностного” метода выбора пар сближающихся тел (когда пара тел выбиралась пропорционально вероятности их сближения) при моделировании методом сфер действия эволюции диска гравитирующих тел времена формирования основной массы планет были почти на порядок больше, чем при использовании “детерминированного” метода. “Детерминированный” метод (Ипатов, 1993b; 2000) лучше отражает реальную эволюцию дисков тел, чем “вероятностный” метод, использовавшийся в (Ипатов, 1982; 1987) и дает времена эволюции более близкие к временам, полученным позднее при численном интегрировании уравнений движения (обзор таких работ приведен ниже).

Время, за которое число тел в диске уменьшалось от N_0 до N , обычно было примерно в два раза меньше времени, за которое число тел в диске уменьшалось от N_0 до $N/2$. Основное время эволюции рассмотренных дисков приходилось на последние стадии аккумуляции планет. Поэтому в (Ипатов, 1988; 2000) был сделан вывод о том, что при $N_0 = 10^{12}$ общее время эволюции диска примерно такое же, как и при $N_0 = 10^3$, однако учет дроблений тел при столкновениях может в несколько раз увеличить время формирования основной массы планет.

Формирование и миграция планет-гигантов тесно связаны с аккумуляцией планет земной группы. Планетезимали из зоны питания планет-гигантов, приобретающие в ходе эволюции орбиты с небольшими перигелийными расстояниями, возмущали орбиты планетезималей и зародышей планет в зоне питания планет земной группы, а также тел астероидного пояса и сталкивались с ними. Изменения орбит Юпитера и Сатурна вызывали изменения положений резонансов и способствовали очистке зоны астероидного пояса, некоторые тела из которого могли проникать в зону питания планет земной группы. Поэтому при изучении аккумуляции планет земной группы нужно учитывать влияние формирующихся планет-гигантов и тел из их зоны питания.

Ипатов (1993a; 2000) исследовал эволюцию диска, первоначально состоявшего из планет земной группы, Юпитера, Сатурна, 750 одинаковых тел на расстоянии R от 8 до 32 а. е. от Солнца с общей массой равной $150m_E$, а также 150 небольших тел с $2 < R < 4$ а. е. В ходе эволюции этого диска небольшие тела были выметены из астероидного пояса, а отдельные массивные тела имели в ходе эволюции большие полюсы сильно эксцентричных орбит, меньшие 2 а. е. Такие тела целиком пронизывали зону питания планет земной группы. Аналогичные результаты были получены при моделировании эволюции дисков с такими же начальными телами, но с Юпитером и Сатурном с современными массами и с зародышами Урана и Нептуна с массами, равными $10m_E$, и с почти круговыми начальными орбитами. Начальные значения больших полюсов орбит таких планет-гигантов равнялись 5.5, 6.5, 8 и 10 а. е. соответственно. В ходе такой эволюции Уран и Нептун приобретали орбиты, близкие к современным орбитам этих планет. Расчеты такой миграции планет-гигантов были впервые опубликованы в (Ипатов, 1991; 1993a; Ipatov, 1991) задолго до первых работ по модели Ниццы (Gomes и др., 2005; Morbidelli и др., 2005; Tsiganis и др., 2005 и более поздние работы). Позже аналогичные расчеты, но с использованием симплектического метода интегрирования, проводились в (Thommes и др., 1999). Идея о формировании зародышей Урана и Нептуна около орбиты Сатурна была впервые высказана в работах (Жарков, Козенко, 1990; Zharkov, 1993) на основе изучения состава этих планет-гигантов. Жарков и Козенко пришли к выводу о том, что зародыши Урана и Нептуна приобрели водородные оболочки массой около $(1-1.5)m_E$ в зонах роста Юпитера и Сатурна еще до диссипации газа из протопланетного диска. Увеличение больших полюсов орбит Сатурна, Урана и Нептуна, а также уменьшение большой полуоси орбиты Юпитера было получено в (Fernandez, Ip, 1984). Однако из-за ограниченности алгоритма, использовавшегося в этой работе, выброс плане-

тезимальей на гиперболические орбиты и изменения больших полуосей орбит планет-гигантов были сравнительно небольшими. В частности, Fernandez и Ip (1984) при учете гравитационных взаимодействий тел с планетами использовали сферы, значительно меньшие сферы действия, и моделировали выпадение тел на планету, когда расстояние между ними равнялось нескольким (до 8) радиусам планеты. В отличие от (Ипатов, 1991; 1993а), взаимное гравитационное влияние планетезимальей в (Fernandez, Ip, 1984) не учитывалось. В (Ипатов, 1991; 1993а; 2000) масса планетезимальей, выброшенных из зон питания планет-гигантов на гиперболические орбиты, на порядок превышала массу планетезимальей, вошедших в планеты.

В отличие от модели Ниццы, в (Ипатов, 1991; 1993а; 2000; Ipatov, 1991) миграция зародышей Урана и Нептуна происходила без попадания планет-гигантов в резонансы, и общая масса планетезимальей в зонах питания Урана и Нептуна была больше. В рассмотренных вариантах она варьировалась от $135m_E$ до $180m_E$. Более 80% планетезимальей выбрасывалось на гиперболические орбиты. В (Ипатов, 2000) был сделан вывод, что для миграции зародышей Урана и Нептуна на современные орбиты достаточно диска планетезимальей с массой, равной $100m_E$. Эта масса меньше, если рассматривать большие (чем при расчетах) значения больших полуосей начальных орбит зародышей Урана и Нептуна (в расчетах они равнялись 8 и 10 а. е.). Основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов в расчетах Ипатова (1993а; 2000) происходили за время не более 10 млн лет, хотя отдельные тела могли выпадать на эти зародыши через время порядка миллиардов лет. Если большая часть массы диска приходилась на небольшие тела, то времена миграции зародышей планет могли быть больше, чем при расчетах (в расчетах массы начальных тел равнялись $0.2m_E$). Кроме расчетов миграции планет-гигантов, находившихся первоначально на круговых или почти круговых орбитах, в (Ипатов, 1991; 1993а; 2000) был рассмотрен также предложенный в 1990 г. В.Н. Жарковым случай больших (0.75–0.82) начальных эксцентриситетов массивных ($10m_E$) зародышей Урана и Нептуна. В этом случае при взаимодействиях зародышей с планетезимальями эксцентриситеты орбит этих зародышей уменьшались, и зародыши также могли попасть на современные орбиты Урана и Нептуна, если начальные перигелии их орбит лежали за орбитой Сатурна (при меньших перигелийных расстояниях в большинстве случаев эти зародыши выбрасывались на гиперболические орбиты). Однако приобретение зародышами Урана и Нептуна таких эксцентричных орбит с перигелиями, лежащими за орбитой Сатурна, маловероятно.

Считается (Cameron, Pine, 1973; Torbett, Smoluchowski, 1980; Сафронов, Зиглина, 1991; Safroнов, 1991), что сканирование резонансов, связанное с изменением большой полуоси орбиты Юпитера, наряду с влиянием тел из зон питания планет-гигантов, могло быть одной из причин выметания тел из астероидного пояса. В вариантах расчетов (Ипатов, 1993а; 2000) большая полуось орбиты Юпитера (в а. е.) уменьшалась примерно на $0.005m_{un}^0/m_E$, а большая полуось орбиты Сатурна увеличивалась на $(0.01–0.03)m_{un}^0/m_E$, где m_{un}^0 – суммарная начальная масса тел в зонах питания Урана и Нептуна. Таким образом, при $m_{un}^0/m_E \geq 100$ смешивающиеся резонансы перекрывали значительную часть пояса астероидов. Для транспортировки зародышей Урана и Нептуна из области около орбиты Сатурна на современные орбиты в (Ипатов, 1991; 1993а; 2000; Ipatov, 1991) требовалось $m_{un}^0/m_E \approx 100$. В ходе эволюции, рассмотренных в этих работах дисков, на некоторых этапах эволюции орбиты около 1% тел, первоначально находившихся в зонах питания Урана и Нептуна, пересекали орбиту Земли. При эволюции этих дисков масса тел, выброшенных на гиперболические орбиты, на порядок превышала массу тел, вошедших в планету.

Ипатов (1993а; 2000) исследовал также эволюцию дисков, состоявших первоначально из планет земной группы, Юпитера, Сатурна, 250 планетезимальей с общей массой m_{js}^0 , равной $10m_E$, и большими полуосями начальных орбит от 5 до 10 а. е., а также из 250 “астероидов” с большими полуосями начальных орбит от 2 до 5 а. е. В этом варианте расчетов в ходе эволюции большие полуоси орбит Юпитера и Сатурна уменьшались на $0.005m_{js}^0/m_E$ и $0.01m_{js}^0/m_E$ а. е. соответственно. То есть зависимость изменения большой полуоси орбиты Юпитера от m_{un}^0 и m_{js}^0 была примерно одинаковой, и поэтому изменения большой полуоси орбиты Юпитера зависели в основном от общей массы планетезимальей в зоне питания планет-гигантов, а не от ее распределения по расстояниям в этой зоне. При расчетах значения m_{js}^0 значительно меньше реальной суммарной массы планетезимальей в зоне Юпитера и Сатурна брались, чтобы рассмотреть влияние на “астероиды” планетезимальей меньших масс. Эволюция похожих дисков, состоящих из “астероидов” и массивных тел в зоне Юпитера и Сатурна, рассматривалась также в (Wetherill, 1989). В (Ипатов, 1993а; 2000; Wetherill, 1989) был получен рост средних эксцентриситетов орбит “астероидов” до значений, не меньших, чем в современном астероидном поясе. Большая часть “астероидов” выбрасывалась на

гиперболические орбиты. В (Ипатов, 1993а; 2000) 5% “астероидов” выпадали на Венеру, а 2.5% – на Землю. В этих расчетах Меркурий и Марс даже покинули Солнечную систему, что, видимо, было связано с тем, что массы тел при расчетах (равные $0.04m_E$) значительно превышали средние массы реальных планетезималей в зонах питания Юпитера и Сатурна.

Уменьшение большой полуоси орбиты Юпитера происходило сначала за несколько миллионов лет на $0.005m_{js}^0/m_E$ а. е. из-за выброса им тел из зон питания Юпитера и Сатурна, затем более медленно на $0.005m_{in}^0/m_E$ вследствие выброса тел, первоначально находившихся за орбитой Сатурна. При этом менялись положения резонансов, а некоторые тела пронизывали зону астероидного пояса и зону питания планет земной группы.

Оценки доли планетезималей, выброшенных из зон питания планет-гигантов, были получены мною также при исследовании миграции планетезималей, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца (Ipatov, 2019). В этих расчетах эволюция орбит планетезималей под влиянием планет моделировалась путем численного интегрирования уравнений движения. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся за орбитой Юпитера, с Ураном или Нептуном не превышала 0.015, а в большинстве вариантов расчетов составляла не более нескольких тысячных. Поэтому при суммарной массе планетезималей за орбитой Сатурна и Нептуна, мигрировавшие из зоны около орбиты Сатурна на современные орбиты, увеличивали свои массы не более, чем на $2m_E$. Вероятность столкновения планетезимали с Юпитером в большинстве вариантов расчетов не превышала 0.05, а с Сатурном была в несколько раз меньше. Согласно (Gudkova, Zharkov, 1999; Жарков, 2003), масса силикатной компоненты в Юпитере составляет $(15-20)m_E$. Планетезимали в зонах питания Урана и Нептуна наряду с силикатами содержали также льды. Поэтому при суммарной массе планетезималей за орбитой Сатурна, меньшей $200m_E$, увеличение массы силикатной компоненты Юпитера за счет таких планетезималей не превышало нескольких масс Земли. Масса твердой компоненты в составе Сатурна больше, чем в составе Юпитера (Жарков, 1991; 2013; Жарков, Гудкова, 2019). Поэтому суммарная масса планетезималей за орбитой Сатурна, меньшая $200m_E$, не противоречит составу планет-гигантов. При отношении массы пыли (каменистого вещества и льдов) к массе газа, равном 0.015 (Lodders, 2003; Зиглина, Макалкин, 2016), масса планетезималей, равная $200m_E$, соответствует массе протопланетного диска за орбитой Сатурна, равной

$0.04M_S$, где M_S – масса Солнца (полная масса диска в этом случае составит $0.06M_S$). Примерно такие же значения массы протопланетного диска $[(0.04-0.1)M_S]$ рассматривались во многих работах по космогонии (Сафронов, 1969; Сафронов, Витязев, 1983; Рузмайкина, Маева, 1986; Макалкин, Артюшкова, 2017).

С появлением более мощных ЭВМ при моделировании эволюции дисков тел, объединяющихся при столкновениях, соответствующих зоне питания планет земной группы, взаимное гравитационное влияние тел стало учитываться путем численного интегрирования уравнений движения (Chambers, Wetherill, 1998; Chambers, 2001; 2013; Raymond и др., 2004; 2006; 2009; Hansen, 2009; Morishima и др., 2010; Izidoro и др., 2014; Hoffmann и др., 2017; Lykawka, Ito, 2017). В своих расчетах Chambers и Wetherill (1998) рассматривали не более 56 планетных зародышей в каждом варианте, и все их расчеты потребовали около трех лет процессорного времени. В последние годы число тел в расчетах достигло нескольких тысяч. Например, в (Lykawka, Ito, 2017) рассматривалось 6000 планетезималей.

Raymond и др. (2004) рассматривали различные орбиты и массы Юпитера. В их расчетах планеты земной группы достигали половины их конечных масс за первые 10–20 млн лет, хотя отдельные тела выпадали на них через 100 млн лет. Raymond и др. (2006; 2009) рассматривали 1000–2000 планетезималей в начальном диске, в 5–10 раз больше, чем в предыдущих работах, в которых взаимное гравитационное влияние тел учитывалось путем численного интегрирования уравнений движения. Исходный диск массы $9.9m_E$ простирался до 5 а. е. За миллиард лет астероидный пояс очищался более, чем на 99%, из-за попадания планетезималей в резонансы с Юпитером вследствие их взаимного гравитационного влияния и влияния зародышей.

Morishima и др. (2010) и Hoffmann и др. (2017) учитывали влияние газа. Morishima и др. (2010) отмечали, что при современном эксцентриситете орбиты Юпитера большинство тел астероидного пояса выметались из него вследствие движения векового резонанса. Hoffmann и др. (2017) отмечали, что по мере диссипации газа вековые резонансы (ν_5 , ν_6 , ν_{15} и ν_{16}) с Юпитером и Сатурном двигались внутрь, толкая перед собой планетезимали. После 3 млн лет газовый диск уменьшал свою массу в 20 раз и динамически не влиял на миграцию. В работе (Ohtsuki и др., 1988) при учете сопротивления газа получен рост Земли за 10 млн лет.

Kokubo и Ida (2000) рассматривали эволюцию узких колец планетезималей шириной в 0.02 а. е. и 0.092 а. е. на расстоянии около 1 а. е. от Солнца. Учитывалось влияние сопротивления газа на движение планетезималей. На расстоянии 1 а. е. от

Солнца время формирования протопланет с массами $\sim 10^{26}$ г было получено равным 0.5 млн лет. Массы образовавшихся зародышей не превышали $0.16m_E$ ($m_E \approx 6 \times 10^{27}$ г – масса Земли). Эволюция аналогичных узких дисков, но без учета газа, рассматривалась в (Kokubo, Ida, 1998). В этой работе авторы показали, что расстояние между орбитами формирующихся зародышей составляло около $(5-10)r_H$, где r_H – радиус сферы Хилла зародышей. Результаты (Weidenschiling и др., 1997; Kokubo, Ida, 2000) свидетельствуют в пользу того, что после 1 млн лет основная масса диска находилась в телах с массой больших нескольких 10^{26} г. В полуаналитических моделях (Chambers, 2006) формирование зародыша с массой $0.1m_E$ на расстоянии 1 а. е. и зародыша с массой $10m_E$ на расстоянии 5 а. е. занимало 0.1 и 1 млн лет соответственно.

В расчетах (Lukawka, Ito, 2017) большая часть массы, вошедшей в состав аналогов Меркурия, приходила из зоны от 0.2 до 1.5 а. е. в течение 10 млн лет, а оставшаяся часть массы приходила позднее из зоны до 3 а. е. (рассматривался диск с массой, равной $7m_E$, на расстоянии от 0.2 до 3.8 а. е. от Солнца). Средняя масса таких аналогов была порядка $0.2m_E$, т.е. превышала массу Меркурия. Орбиты таких аналогов имели большие полуоси близкие к $0.27-0.34$ а. е., а их эксцентриситеты и наклоны были небольшими. Raymond и Izidoro (2017) полагали, что первичный астероидный пояс мог быть пустым. Hansen (2009) рассматривал эволюцию более узкого (на расстоянии от 0.7 до 1.0 а. е. от Солнца) диска, чем другие авторы. В его расчетах аналоги Земли и Марса аккумулялировали большую часть своей массы за 10 млн лет. Kokubo и Genda (2010) полагают, что только половина столкновений планетезималей и зародышей приводила к аккреции.

Morbidelli и др. (2010) рассматривали эволюцию орбит астероидов во время резкого изменения орбиты Юпитера, приводившего к резкому изменению положений резонансов. Вероятность столкновений астероидов с Луной была получена равной 4×10^{-5} , а с Землей была в 20 раз больше. Clement и др. (2018; 2019) исследовали формирование планет земной группы во время такой нестабильности орбит планет-гигантов. Они пришли к выводу, что если такая нестабильность (в рамках модели Ниццы) произошла в течение 1–10 млн лет после диссипации газового диска, то модель хорошо объясняет формирование Марса и астероидного пояса.

На начальных стадиях эволюции Солнечной системы большую роль играл газ. При изучении аккумуляции тел в зоне от 0.5 до 4 а. е. Hoffmann и др. (2017) считали, что поверхностная плотность газа экспоненциально убывала со временем $\Sigma_{\text{gas}}(r, t) =$

$= \Sigma_{\text{gas}, 0}(r/1 \text{ а. е.})^{-1} \exp(-t/\tau)$. В их расчетах считалось, что $\tau = 1$ млн лет, а $\Sigma_{\text{gas}, 0} = 2000 \text{ г/см}^2$. Через 4.6 млн лет оставался только 1% газа. На аккумуляцию тел в зоне планет земной группы также большое влияние оказывало гравитационное влияние Юпитера и влияние тел из его зоны питания. Обзор работ по формированию Юпитера приведен в (D'Angelo, Lissauer, 2018). При аккумуляции планетезималей зародыш Юпитера на расстоянии 5.2 а. е. мог достигнуть массы в $3m_E$ за 0.1 млн лет, но затем в окрестности его орбиты оставалось уже немного планетезималей. При росте зародыша Юпитера в газе путем аккумуляции $1 \text{ см} - 1 \text{ м}$ твердых объектов его масса могла увеличиться до $10m_E$ за время не большее нескольких десятков тысяч лет. Когда масса твердотельной компоненты зародыша Юпитера и масса газа в ближайшей его окрестности достигли некоторых критических значений, началась стадия быстрой аккреции газа, в ходе которой зародыш Юпитера увеличил свою массу в несколько раз за время ~ 0.1 млн лет. В некоторых моделях общее время роста массы Юпитера от нуля до примерно современной массы составляет около 2 млн лет (D'Angelo, Lissauer, 2018). Однако, уже достигнув массы около $10m_E$ за время ~ 0.1 млн лет, зародыш Юпитера был способен увеличивать эксцентриситеты орбит тел из своей зоны питания так, чтобы в перигелии они могли достигать зоны питания планет земной группы. По мере роста масса планетезималей и уменьшения плотности газа в зоне питания Юпитера, взаимное гравитационное влияние планетезималей увеличивало возможность некоторых планетезималей начать пересекать орбиту Юпитера и затем получать небольшие перигелийные расстояния.

В ряде работ (Walsh и др., 2011; Morbidelli и др., 2011; Jacobson, Morbidelli, 2014; O'Brien и др., 2014; Rubie и др., 2015) при изучении формирования планет земной группы рассматривалась “модель большого поворота” (the Grand Tack model). В этой модели в присутствии газа Юпитер сначала двигался к Солнцу до 1.5 а. е., а потом после формирования массивного Сатурна стал двигаться вместе с Сатурном обратно от Солнца, находясь в резонансе 2 : 3 с Сатурном. При этой миграции Юпитер очистил астероидный пояс и уменьшил количество материала в зоне питания Марса. Такая миграция объясняет также доставку воды к сформировавшимся планетам земной группы. При миграции Сатурна от Солнца многие тела, находившиеся далее 6 а. е. от Солнца, мигрировали к Солнцу. Rubie и др. (2015) полагали, что после приобретения Юпитером и Сатурном достаточного больших масс газ присутствовал в течение 0.6 млн лет, причем в первые 0.1 млн лет Юпитер и Сатурн мигрировали внутрь с 3.5 и 4.4 а. е. до 1.5 и 2 а. е., соответственно. После того как масса Сатурна увеличилась с $10m_E$ до его современной

массы, Юпитер и Сатурн в течение 0.5 млн лет мигрировали от Солнца на расстояние до 5.25 и 7 а. е. соответственно. Вода была доставлена к Земле в основном после того, как Земля аккрецировала 60–80% своей конечной массы. Дорофеева и Макалкин (2004) отмечали, что в зоне Земли летучие компоненты могли быть аккумулированы родительскими телами только через 1 млн лет эволюции допланетного околосолнечного диска, когда температура в нем стала меньше 700 К. Тела, содержавшие воду, образовались на расстоянии от Солнца, большем 6 а. е. В различных вариантах (O'Brien и др., 2014) время роста аналога Земли до $0.5m_E$ принимало значения от нескольких до 20 млн лет, а его столкновение с телом с массой $(0.03–0.16)m_E$ происходило через 20–150 млн лет после начала эволюции диска.

Drolshagena и др. (2017) отмечали, что количество материала, выпадающего каждый день на земную атмосферу, составляет около 30–180 т. В том числе для объектов, меньших 0.5 м, эта оценка составляет 32 т в день, причем для объектов, не превышающих сантиметров, основную роль в аккумуляции играют частицы от 10 мкм до мм. Из-за постоянных взаимных столкновений планетезималей суммарная масса небольших объектов и пыли во время аккумуляции планет была не мала. Вероятность столкновения с планетой частицы диаметром порядка 100 мкм могла на порядки превышать вероятность столкновения планетезималей с планетой при одинаковых исходных орбитах планетезималей и пылинок (Ipatov, Mather, 2006; Ipatov, 2010a). Это вызвано меньшими (по сравнению с планетезималами) типичными эксцентриситетами орбит (и, соответственно, меньшими относительными скоростями), которые имели такие частицы, когда они обычно сближались с планетой.

Изучая соотношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ изотопов свинца в кристаллах циркона, содержащихся в веществе марсианского метеорита NWA 7034, Bouvier и др. (2018) пришли к выводу, что формирование ядра и кристаллизация океана магмы на Марсе завершились за время не более 20 млн лет после формирования Солнечной системы. Эти результаты согласуются с представленными в (Mezger и др., 2013) результатами исследований распада системы короткоживущих изотопов ^{182}Hf – ^{182}W , которые указывают на возраст не более 10 млн лет после формирования Солнечной системы. Тепловые модели, представленные в (Elkins-Tanton, 2008) свидетельствуют о том, что история отвердения Марса была завершена в течение 10 млн лет аккреции. Elkins-Tanton (2018), полагает, что Марс вырос до примерно современных размеров, вероятно, за менее, чем 5 млн лет, после образования CAIs (кальций-алюминиевых включений). Nimmo и Kleine (2007) пришли к вы-

воду о том, что отношение Hf/W для марсианской мантии составляет ~ 4 , но является неопределенным на $\sim 25\%$, что приводит к временам образования марсианского ядра в диапазоне от 0 до 10 млн лет.

Ограничение на формирование основной массы Земли и Луны за время не более 30 млн лет было получено в работах (Kleine и др., 2002; Yin и др., 2002) при изучении отношений Hf/W . Williams и Sujoy (2019) изучали соотношение $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ и пришли к выводу о том, что присутствие небулярного неона требует, чтобы зародыш Земли достиг значительной массы за несколько миллионов лет, чтобы захватить небулярные газы и растворить их в океане магмы.

В отличие от цитированных выше публикаций, рассматривавших относительно небольшие времена формирования основной массы планет земной группы, анализируя ^{182}Hf – ^{184}W систему, Галимов (2013), пришел к выводу, что формирование ядер Земли и Луны не могло начаться раньше 50 млн лет, отсчитывая от времени возникновения Солнечной системы. Из анализа Rb – Sr системы Э.М. Галимов сделал вывод о том, что прежде, чем Луна сформировалась как конденсированное тело, она должна была развиваться в среде с более высоким отношением Rb/Sr . Вследствие большого атомного веса убегание рубидия с поверхности Луны невозможно, а возможно лишь с нагретой поверхности небольших тел или частиц. Поэтому, по мнению Галимова, исходное для Луны вещество первые 50 млн лет пребывало в диспергированном состоянии, например, в виде газопылевого сгущения.

Различные модели формирования Луны обсуждались в (Ипатов, 2018). Ниже исследования проводятся в рамках модели мегаимпактов, рассматривающей выпадение большого числа тел на зародыши Земли и Луны и рост зародыша Луны в основном за счет вещества, выбрасываемого при столкновениях планетезималей с зародышем Земли.

В настоящей работе основное внимание уделяется изучению перемешивания планетезималей в зоне питания планет земной группы и оценкам относительного количества планетезималей, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца, при изучении их выпадений на различные формирующиеся планеты земной группы. В (Ипатов, 1993а; 2000) при моделировании эволюции дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях, начальный диск первоначально одинаковых тел, соответствующий зоне питания планет земной группы, был поделен на 4 зоны в зависимости от расстояний тел от Солнца (0.4–0.6, 0.6–0.8, 0.8–1.0 и 1.0–1.2 а. е.). Начальное число тел в диске достигало 1000. Было получено, что тела, первоначально на-

Таблица 1. Доли числа тел, образовавших планету, первоначально находившихся в четырех зонах (на расстоянии от Солнца в диапазонах 0.4–0.6, 0.6–0.8, 0.8–1.0 и 1.0–1.2 а. е.)

| Исходный диск | 0.156 | 0.219 | 0.281 | 0.344 |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Планеты с массой $m > 0.5m_E$ | 0.148–0.187 | 0.194–0.249 | 0.25–0.303 | 0.319–0.353 |
| Планеты с массой $m > 0.1m_E$ | 0.114–0.217 | 0.191–0.249 | 0.193–0.336 | 0.319–0.398 |

ходившиеся на различных расстояниях от Солнца, вошли в состав Земли и Венеры в близких пропорциях. В (Ипатов, 2000) приведена следующая табл. 1, характеризующая состав образовавшихся планет для нескольких вариантов расчетов. В табл. 1 приведены значения доли числа тел, образовавших планету, первоначально находившихся в четырех упомянутых выше зонах.

В первой строке табл. 1 приведены доли числа тел, находившихся первоначально в различных зонах (сумма долей равна 1). В таблице представлены данные по всем образовавшимся планетам независимо от их расстояния от Солнца. Образовавшаяся планета с массой Меркурия (планеты таких масс в таблице не представлены) состояла из тел различных зон, но доля числа тел из определенной зоны, вошедших в эту планету, в основном вдвое отличалась от доли числа тел этой зоны в общем составе начального диска.

В (Chambers, 2013) начальный диск состоял из 14 зародышей с массами, равными $0.093m_E$, и из 140 меньших тел с массами, равными $0.0093m_E$. В этой работе, как и в (Chambers, 2001), рассматривался состав образовавшихся планет из тел, первоначально находившихся на расстояниях 0.4–0.7, 0.7–1.1, 1.1–1.5 и 1.5–2.0 а. е. от Солнца. Состав крупных планет, образовавшихся на расстоянии около 1 а. е. от Солнца, в различных вариантах расчетов мог отличаться более, чем в два раза, даже для основной компоненты этих планет, пришедшей из области на расстоянии от 0.7 до 1.1 а. е. от Солнца. Возможно, это было связано с небольшим числом рассмотренных начальных объектов. Планета, подобная Земле, достигала половины своей конечной массы за время около 20 млн лет. В (O'Brien, 2006) рассматривался состав образовавшихся планет, как из таких же зон, как в (Chambers, 2001; 2013), так и из более широких зон с расстояниями от Солнца в диапазонах 0.3–2, 2–2.5, 2.5–3 и 3–4 а. е. Начальное число тел было около 1000. Планеты с большими полуосями орбит, меньшими 2 а. е., формировались в основном из вещества из зоны, находившейся на расстоянии от 0.3 до 2.0 а. е. от Солнца. Средняя доля вещества из зоны, удаленной от Солнца на расстояние большее 2.5 а. е., в образовавшихся планетах земной группы была получена равной 15% и 0.3% при круговых и при эксцентричных орбитах Юпитера и Сатурна, соответственно.

Круговые орбиты Юпитера и Сатурна рассматривались в модели Ниццы.

В настоящей работе сначала обсуждаются исходные данные и алгоритмы моделирования рассматриваемой модели миграции тел-планетезималей и алгоритмы вычисления вероятностей столкновений тел с растущими планетами земной группы. В следующих разделах приводятся результаты расчетов и обсуждаются вероятности выпадений планетезималей, первоначально находившихся в различных областях зоны питания планет земной группы, на планеты и их зародыши. Далее рассматриваются вероятности выпадений планетезималей на Солнце и на планеты-гиганты, вероятности выброса планетезималей на гиперболические орбиты, а также вероятности их столкновений с зародышем Луны. В конце статьи обсуждается формирование планет земной группы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ ПЛАНТЕЗИМАЛЕЙ И ВЕРОЯТНОСТЕЙ ИХ СТОЛКНОВЕНИЙ С ПЛАНЕТАМИ

В настоящей работе приводятся результаты расчетов миграции планетезималей, первоначально находившихся в сравнительно узком кольце, под гравитационным влиянием планет или их зародышей. В каждом варианте расчетов рассматривалось $N_0 = 250$ начальных планетезималей. Начальные значения a_0 больших полуосей a орбит планетезималей менялись от $a_{0\min}$ до $a_{0\min} + d_a$ а. е., причем число планетезималей с a_0 было пропорционально $a_0^{1/2}$. Для $i + 1$ планетезималей значение a_0 вычислялось по формуле $a_{0(i+1)} = (a_{0i}^2 + [(a_{0\min} + d_a)^2 - a_{0\min}^2]/N_0)^{1/2}$, где a_{0i} – значение a_0 для i планетезималей. Значения $a_{0\min}$ варьировались от 0.3 до 1.5 а. е. При $a_{0\min} = 1.5$ а. е. считалось, что $d_a = 0.5$ а. е. В остальных вариантах расчетов $d_a = 0.2$ а. е. Ниже все расстояния приводятся в а. е. Как отмечалось во введении, в (Chambers, 2001; 2013; O'Brien, 2006) рассматривался состав образовавшихся планет из тел, первоначально находившихся на расстояниях 0.4–0.7, 0.7–1.1, 1.1–1.5 и 1.5–2.0 а. е. от Солнца. В интервале до 1.5 а. е. эти авторы рассматривали три зоны вместо шести зон в моей данной работе.

В одних вариантах расчетов начальные эксцентриситеты e_0 орбит планетезималей равнялись 0.05, а в других вариантах равнялись 0.3. Начальные наклонения i_0 орбит планетезималей равнялись $e_0/2$ рад. В (Ипатов, 1982; 1987; 1993а; 2000) было получено, что вследствие взаимного гравитационного влияния планетезималей средний эксцентриситет орбит планетезималей в зоне питания планет земной группы в ходе эволюции мог превышать 0.2.

В серии *MeN* расчетов моделировалась миграция планетезималей, первоначально расположенных в относительно узком кольце, под гравитационным воздействием всех планет (от Меркурия до Нептуна). Массы и элементы орбит планет равнялись современным значениям. В серии *MeN₀₃* расчетов в отличие от серии *MeN* рассматривались зародыши планет земной группы с массами, равными $m_{rel} = 0.3$ от современных масс планет, а массы и элементы орбит планет-гигантов равнялись их современным значениям. В серии *MeS₀₁* расчетов рассматривались зародыши планет земной группы с массами, равными $m_{rel} = 0.1$ от современных масс планет, двигавшиеся по современным орбитам планет, а также Юпитер и Сатурн с их современными массами и их современными орбитами. В серии *MeS₀₁* Уран и Нептун были исключены, так как эти планеты могли еще не приобрести современные массы и орбиты, когда массы зародышей планет земной группы были небольшими. Гравитационное влияние Урана и Нептуна слабо влияло на миграцию планетезималей в зоне планет земной группы.

При моделировании миграции планетезималей использовался симплектический интегратор из пакета интегрирования Swift (Levison, Duncan, 1994). При этом интегрировании столкновения планетезималей с планетами не моделировались (т.е. планетезимали и планеты рассматривались, как материальные точки), но планетезимали исключались из интегрирования, когда они сталкивались с Солнцем или удалялись от Солнца на расстояние большее 2000 а. е.

Элементы орбит мигрировавших планетезималей записывались в память ЭВМ с шагом в 500 лет. На основании полученных массивов элементов орбит аналогично расчетам, приведенным в (Ipatov, Mather, 2003; 2004а; 2004b; Маров, Ипатов, 2018), за рассматриваемый интервал времени T вычислялись вероятности столкновений планетезималей с планетами, Луной и их зародышами. При этом на основании этих массивов элементов орбит мигрировавших планетезималей вычислялись вероятности столкновений планетезималей не только с теми зародышами планет и Луны, которые рассматривались при численном интегрировании уравнений движения и изучении миграции планетезималей, но и с зародышами других

масс (хотя при интегрировании зародыши других масс не рассматривались). Подобный подход к изучению роста зародышей планет за счет планетезималей, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца, ранее не применялся. В отличие от проводившегося ранее моделирования эволюции дисков тел, объединявшихся при столкновениях, такой подход позволяет для ряда стадий эволюции более точно вычислять вероятности столкновений планетезималей с зародышами планет.

При вычислениях вероятности p_{dts} сближений планетезимали и планеты до радиуса r_s рассматриваемой сферы (обычно сферы действия планеты массы m_{pl} и радиуса $r_s \approx R(m_{pl}/M_S)^{2/5}$, где M_S — масса Солнца) за время d_t в пространственной модели использовались следующие формулы (Ипатов, 1988; 2000 [§2 главы 4]): $p_{dts} = d_t/T_3$, $T_3 = 2\pi^2 k_p T_s k_v \Delta i R^2 / (r_s^2 k_{fi})$ — характерное время до сближения, Δi — угол в радианах между плоскостями орбит сближающихся небесных объектов, R — расстояние от места сближения объектов до Солнца, k_{fi} — сумма углов (в радианах) с вершиной в Солнце, внутри которых расстояние между проекциями орбит (по лучу с вершиной в Солнце) меньше r_s (эта сумма различная для различных орбит, см. рис. 4.1 в (Ипатов, 2000)), T_s — синодический период обращения, $k_p = P_2/P_1$, $P_2 > P_1$, P_i — период обращения i -го объекта (планетезимали или планеты) вокруг Солнца, $k_v = (2a/R - 1)^{1/2}$, a — большая полуось орбиты планетезимали (коэффициент k_v был добавлен в (Ipatov, Mather, 2004a) для учета зависимости скорости сближения от положения планетезимали на эксцентричной орбите). Вероятность столкновения объектов, вошедших в сферу действия, полагалась равной $p_{dts} = (r_\Sigma/r_s)^2 (1 + (v_{par}/v_{rel})^2)$, где $v_{par} = (2Gm_\Sigma/r_\Sigma)^{1/2}$ — параболическая скорость, v_{rel} — относительная скорость объектов, сблизившихся на расстояние r_s , r_Σ — сумма радиусов сталкивающихся объектов суммарной массы m_Σ , G — гравитационная постоянная. При малых значениях Δi в алгоритме использовались другие формулы. Алгоритмы (и их обоснование) вычисления k_{fi} и характерного времени между столкновениями объектов приведены С.И. Ипатовым в приложении 3 (стр. 86–130) отчета Института прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР № О-1211 за 1985 г. Вероятность p_{dt} столкновения планетезимали и планеты за время d_t равна $p_{dts} p_{dts}$. Значения p_{dt} суммировались по всему динамическому времени жизни планетезимали.

Наши предыдущие исследования (например, Ipatov, Mather, 2003; 2004а; 2004b; 2006; 2007; Ipatov, 2010а) миграции тел в Солнечной системе и доставки воды и летучих к планетам земной груп-

пы были первоначально основаны на наших результатах численного моделирования миграции десятков тысяч малых тел и пылевых частиц, стартовавших с таких тел, под гравитационным влиянием всех планет в случае, когда исходные орбиты тел были близки к орбитам известных комет, а массы и элементы орбит планет равнялись современным значениям. Маров и Ипатов (2018) моделировали миграцию планетезималей к планетам земной группы из зоны питания Юпитера и Сатурна и рассматривали доставку воды и летучих к планетам земной группы и к Луне. Ниже рассматривается миграция планетезималей к этим же планетам и Луне из зоны питания планет земной группы. В наших предыдущих расчетах при интегрировании использовались метод Булирша–Штера (BULSTO; Bulirsh, Stoer, 1966) и симплектический метод интегрирования, которые дали примерно аналогичные результаты (Ipatov, Mather, 2004a; 2004b). Поэтому представленные ниже результаты новых расчетов получены только с использованием более быстрого симплектического метода. Для некоторых серий расчетов (Ipatov, Mather, 2004b; 2007), в каждой из которых исходные орбиты тел были близки к орбите одной кометы, значения p_E вероятности столкновения тела с Землей могли отличаться почти в 100 раз для различных комет. Среди около 30 000 рассмотренных объектов, начальные орбиты которых пересекали орбиту Юпитера, (Jupiter-crossing objects, JCOs), несколько объектов в ходе эволюции приобретали орбиты, целиком лежавшие внутри орбиты Юпитера, и двигались по таким орбитам в течение миллионов и даже сотен миллионов лет. Вероятность столкновения такого объекта с планетой земной группы могла быть больше суммарной вероятности тысяч других объектов с почти такими же начальными орбитами, но не пересекавшими орбиту Земли в течение длительного времени. Чтобы понять, как вероятности столкновений планетезималей с планетами земной группы и с Луной могут зависеть от исходных ориентаций орбит (при одинаковых элементах орбит) планетезималей из зоны питания планет земной группы ниже рассматриваются варианты расчетов, отличающиеся только ориентациями исходных орбит планетезималей и шагом интегрирования. Как будет показано ниже, значения p_E для таких планетезималей (в отличие от рассмотренных ранее тел, пришедших к Земле из-за орбиты Юпитера) не сильно зависят от исходных ориентаций орбит и шага интегрирования.

В табл. 2–4 представлены вероятности столкновений планетезималей с планетами, Луной и их зародышами для нескольких значений интервалов времени T от 0.5 до 50 млн лет. Результаты для серий расчетов MeS_{01} , MeN_{03} и MeN приведены в табл. 2, 3 и 4, соответственно. Вероятности столк-

новений планетезимали за время T с Землей, Венерой, Марсом, Меркурием, Юпитером, Сатурном, Луной и Солнцем обозначены через p_E , p_V , p_{Ma} , p_{Me} , p_J , p_S , p_M и p_{Sun} соответственно. На основании полученных массивов элементов орбит мигрировавших планетезималей вычислялись также вероятности p_{E01} , p_{V01} , p_{Ma01} , p_{Me01} и p_{M01} столкновений планетезимали с зародышами планет земной группы и Луны, массы которых в 10 раз меньше современных масс планет и Луны. Аналогично вычислялись вероятности p_{E03} , p_{V03} , p_{Ma03} , p_{Me03} и p_{M03} столкновений планетезимали с зародышами планет земной группы и Луны, массы которых составляли 0.3 от современных масс этих небесных тел. Через p_{Ma0} , p_{Me0} , p_{Ma03-0} , p_{Me03-0} , p_{Ma01-0} и p_{Me01-0} обозначены вероятности столкновений планетезимали с Марсом и Меркурием и их зародышами в случае, когда их орбиты имели нулевые эксцентриситеты. В табл. 2–4 приведены также отношения вероятностей столкновений планетезимали с планетами, Луной и их зародышами к вероятностям столкновений планетезимали с Землей или ее зародышем. Приведены также отношения вероятности столкновения планетезимали с Землей или с ее зародышем к вероятности столкновения этой планетезимали с Луной или с ее зародышем. Рассматривались также отношения (p_M/p_{M01} или p_M/p_{M03}) вероятностей столкновений планетезимали с Луной и с ее зародышем, а также отношение p_E/p_{E01} , при условии, что используемые массивы элементов орбит планетезималей одинаковы при рассмотрении Луны и ее зародыша (или Земли и ее зародыша). Вероятность выброса планетезимали на гиперболическую орбиту за рассматриваемое время T обозначена через p_{ej} . Звездочкой в табл. 2–4 помечены аналогичные варианты расчетов с другими исходными ориентациями орбит и с другим шагом интегрирования. Эти варианты расчетов показывают возможный диапазон значений полученных вероятностей столкновений при одинаковых орбитах и массах зародышей и одних и тех же больших полуосях, эксцентриситетах и наклонениях орбит планетезималей.

Жирным шрифтом в табл. 2–4 помечены значения вероятностей, большие 0.1, и отношения вероятности столкновения планетезимали с планетой (или с ее зародышем) к вероятности ее столкновения с Землей (или с ее зародышем), если эти отношения вероятностей находятся в диапазоне от 0.5 до 2 от отношения современной массы планеты к массе Земли. Отношения вероятностей в этом диапазоне указывают на существенное вхождение в планету вещества аналогичного веществу, входящему в состав зародыша Земли, а вероятности, большие 0.1, соответствуют вариантам расчетов, вносящих большой вклад в рост масс зародышей. Несколько ячеек в табл. 4 при $T = 5$ млн лет не заполнены и помечены бук-

Таблица 2. Вероятности столкновений планетезимали с зародышами планет, зародышем Луны и Солнцем за время T (в млн лет) для дисков, состоящих из 250 начальных планетезималей с большими полуосями орбит от $a_{0\min}$ а. е. до $a_{0\min} + d_a$ а. е., эксцентриситетами $e_0 = 0.05$ и наклонениями $i_0 = e_0/2$ рад. Значение $d_a = 0.2$ а. е. во всех вариантах серии MeS_{01} расчетов кроме $a_{0\min} = 1.5$ а. е., при котором $d_a = 0.5$ а. е. **Отношение масс зародышей планет земной группы к современным массам планет равнялось $m_{rel} = 0.1$.** Варианты в табл. 2–4, помеченные звездочкой (*), отличаются только ориентациями исходных орбит планетезималей и шагом интегрирования (их элементы орбит и массы такие же, как и в вариантах без звездочки).

Обозначения: p_{E01} , p_{V01} , p_{Ma01} , p_{Me01} и p_{M01} – вероятности столкновений планетезимали с зародышами планет Земли, Венеры, Марса, Меркурия и Луны, массы которых в 10 раз меньше современных масс планет и Луны, соответственно. p_{Ma01-0} и p_{Me01-0} – вероятности столкновений планетезимали с зародышами Марса и Меркурия таких масс в случае, когда орбиты этих зародышей имели нулевые эксцентриситеты. p_E и p_M – вероятности столкновений планетезимали с Землей и Луной современных масс. p_{Sun} и p_J – вероятности столкновений планетезимали с Солнцем и Юпитером. p_{ej} – вероятность выброса планетезимали на гиперболическую орбиту. Все вероятности вычислялись за рассматриваемое время T . Значения отношений вероятностей, соответствующие делению на ноль, помечены Inf

| | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|----------------------|-------------|--------------|
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.3 | 0.3 | 0.3* | 0.3* | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| T | 1 | 5 | 0.5 | 5 | 5 | 20 | 1 | 2 | 5 |
| p_{E01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.024 | 0.196 | 1.8×10^{-4} | 0.0022 | 0.023 |
| p_{V01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.358 | 0.995 | 0.217 | 0.40 | 0.819 |
| p_{Ma01-0} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01-0} | 0.0649 | 0.0663 | 0.039 | 0.0539 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01} | 0.0317 | 0.0318 | 0.024 | 0.0298 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun} | 0.012 | 0.036 | 0 | 0.024 | 0.004 | 0.016 | 0 | 0 | 0 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0 |
| p_{V01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 15.0 | 5.1 | 1200 | 182 | 35.8 |
| p_{Ma01-0}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01-0}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_J/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 0.17 | 0.082 | 0 | 1.8 | 0 |
| p_{E01}/p_{M01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 19.8 | 18.1 | 25.6 | 16.7 | 23.5 |
| p_M/p_{M01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 4.59 | 4.69 | 5.31 | 4.55 | 5.12 |
| p_E/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | Inf | 8.49 | 8.19 | 15.8 | 9.78 | 9.44 |
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| T | 20 | 1 | 2 | 5 | 20 | 5 | 20 | 50 | 50 |
| p_{E01} | 0.31 | 0.20 | 0.518 | 1.03 | 3.27 | 0.0010 | 0.0208 | 0.024 | 0.024 |
| p_{V01} | 2.13 | 0 | 0.0007 | 0.013 | 0.208 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01-0} | 0.0011 | 0 | 3.3×10^{-5} | 4.4×10^{-5} | 0.0034 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01} | 0.0002 | 0 | 1.2×10^{-5} | 1.8×10^{-5} | 7.2×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01-0} | 0.0013 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01} | 2.9×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun} | 0.004 | 0 | 0 | 0 | 0.016 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{V01}/p_{E01} | 6.9 | 0 | 0.0013 | 0.0126 | 0.0635 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01-0}/p_{E01} | 0.0036 | 0 | 6.3×10^{-5} | 4×10^{-5} | 0.001 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Ma01}/p_{E01} | 6×10^{-4} | 0 | 2.4×10^{-5} | 2×10^{-5} | 2.2×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01-0}/p_{E01} | 9×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01}/p_{E01} | 0.0009 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_J/p_{E01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E01} | 0.013 | 0 | 0 | 0.17 | 0.082 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{E01}/p_{M01} | 23.2 | 24.0 | 24.3 | 24.4 | 23.5 | 17.3 | 17.1 | 22.6 | 22.6 |
| p_M/p_{M01} | 5.16 | 5.06 | 5.1 | 5.08 | 4.98 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| p_E/p_{E01} | 9.44 | 15.9 | 9.78 | 9.62 | 9.60 | 6.3 | 5.8 | 5.6 | 5.6 |

Таблица 2. Окончание

| | | | | | | | | |
|----------------------|--------|-------|-------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|
| $a_{0\min}$, а. е. | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| T | 1 | 5 | 20 | 50 | 1 | 5 | 20 | 50 |
| p_{E01} | 0 | 0 | 0 | 2.1×10^{-5} | 0 | 6.4×10^{-5} | 0.0028 | 0.011 |
| p_{V01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.7×10^{-4} |
| p_{Ma01-0} | 0.0044 | 0.011 | 0.035 | 0.061 | 0.0015 | 0.0075 | 0.032 | 0.069 |
| p_{Ma01} | 0.0045 | 0.015 | 0.053 | 0.073 | 0.0005 | 6.5×10^{-4} | 0.0052 | 0.0134 |
| p_{Me01-0} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{V01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 0 | Inf | 0 | 0 | 0.015 |
| p_{Ma01-0}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 2330 | Inf | 117 | 11.4 | 6.3 |
| p_{Ma01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 3420 | Inf | 10 | 1.9 | 1.2 |
| p_{Me01-0}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 0 | Inf | 0 | 0 | 0 |
| p_{Me01}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 0 | Inf | 0 | 0 | 0 |
| p_J/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 0 | Inf | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 0 | Inf | 0 | 0.082 | 0 |
| p_{E01}/p_{M01} | Inf | Inf | Inf | 13.6 | Inf | 19.6 | 14.6 | 13.9 |
| p_M/p_{M01} | Inf | Inf | Inf | 4.8 | Inf | 5.3 | 4.8 | 4.7 |
| p_E/p_{E01} | Inf | Inf | Inf | 4.9 | Inf | 5.5 | 5.9 | 6.1 |

вами Abs, так как к тому времени, когда было решено рассмотреть также вероятности столкновений с Марсом и Меркурием для их орбит с другим эксцентриситетом, массивы элементов орбит мигрировавших планетезималей были уже удалены. Отсутствие в некоторых ячейках табл. 2–3 отношений вероятностей столкновений планетезималей с зародышами планет к вероятности ее столкновения с зародышем Земли вызвано нулевым значением последней вероятности. Такие ячейки помечены буквами Inf. Значения вероятности, большие 1, указывают на то, что подавляющее большинство планетезималей выпало на рассматриваемый зародыш за время, меньшее T . Такие большие вероятности могут использоваться при сравнении вероятностей столкновений планетезималей с зародышами различных планет. При больших T отношения вероятностей столкновений планетезималей с различными зародышами соответствуют, как правило, большим средним эксцентриситетам орбит планетезималей, которые увеличивались со временем при $e_0 = 0.05$. Из-за взаимного гравитационного влияния планетезималей и влияния планетезималей, проникших в зону питания планет земной группы из-за орбиты Юпитера, средние эксцентриситеты орбит реальных планетезималей в зоне питания планет земной группы могли превышать средние эксцентриситеты орбит в рассмотренной модели, учитывавшей только гравитационное влияние планет. В частности, в (Ипатов, 1982; 1987; 1993а; 2000) отмечалось, что при учете взаимного гравитационного влияния планетезималей их средний

эксцентриситет в ходе эволюции достигал 0.2–0.3. Поэтому в табл. 4 приведены результаты расчетов не только при $e_0 = 0.05$, но и при $e_0 = 0.3$. При больших значениях e_0 вероятности столкновений планетезималей с планетами обычно были меньше (иногда в несколько раз).

ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ МИГРИРОВАВШИХ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ С ЗАРОДЫШАМИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

На основании полученных вероятностей столкновений планетезималей с зародышами планет земной группы можно сделать оценки роста этих зародышей планет, в том числе можно оценить вероятности столкновений планетезималей, образовавшихся на различных расстояниях от Солнца, с зародышами планет. В настоящем разделе эти вероятности рассматриваются в рамках рассматриваемой модели расчетов. При расчетах не учитывалось взаимное гравитационное влияние планетезималей, которое увеличивало эксцентриситеты их орбит и перемешивание планетезималей в зоне питания планет земной группы. Поэтому результаты, представленные в табл. 2–4, соответствуют минимальным оценкам перемешивания планетезималей в зоне питания планет земной группы.

При анализе результатов расчетов нужно учитывать, что в действительности зародыши планет земной группы росли с различной скоростью и в некоторые моменты времени их число могло

Таблица 3. Вероятности столкновений планетезимали с зародышами планет, зародышем Луны и Солнцем за время T (в млн лет) для дисков, состоявших из 250 начальных планетезималей с большими полуосями орбит от $a_{0\min}$ а. е. до $a_{0\min} + d_a$ а. е., эксцентриситетами $e_0 = 0.05$ и наклонениями $i_0 = e_0/2$ рад. Значение $d_a = 0.2$ а. е. во всех вариантах серии MeN_{03} расчетов кроме $a_{0\min} = 1.5$ а. е., при котором $d_a = 0.5$ а. е. **Отношение масс зародышей планет земной группы к современным массам планет равнялось $m_{rel} = 0.3$.**

Обозначения: p_{E03} , p_{V03} , p_{Ma03} , p_{Me03} и p_{M03} – вероятности столкновений планетезимали с зародышами планет Земли, Венеры, Марса, Меркурия и Луны, массы которых составляют 0.3 от современных масс планет и Луны, соответственно. p_{Ma03-0} и p_{Me03-0} – вероятности столкновений планетезимали с зародышами Марса и Меркурия таких масс в случае, когда орбиты этих зародышей имели нулевые эксцентриситеты. Все вероятности вычислялись за рассматриваемое время T . Остальные обозначения такие же, как для табл. 2

| | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|----------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| T | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0085 | 0.021 | 0.062 | 0.11 |
| p_{V03} | 0.0002 | 0.003 | 0.010 | 0.019 | 0.094 | 0.367 | 0.610 | 1.05 | 1.42 |
| p_{Ma03-0} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.4×10^{-5} | 3.3×10^{-4} | 0.0095 |
| p_{Ma03} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.4×10^{-5} | 4.5×10^{-5} | 1.9×10^{-4} |
| p_{Me03-0} | 0.034 | 0.038 | 0.042 | 0.043 | 0.045 | 0.014 | 0.022 | 0.038 | 0.046 |
| p_{Me03} | 0.048 | 0.051 | 0.053 | 0.053 | 0.054 | 0.003 | 0.0048 | 0.0086 | 0.011 |
| p_{Sun} | 0.008 | 0.02 | 0.04 | 0.116 | 0.208 | 0 | 0 | 0.008 | 0.02 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.008 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{V03}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 43.1 | 29.5 | 16.9 | 12.8 |
| p_{Ma03-0}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0.0021 | 0.0053 | 0.0085 |
| p_{Ma03}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0018 |
| p_{Me03-0}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 1.61 | 1.07 | 0.615 | 0.415 |
| p_{Me03}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 0.32 | 0.236 | 0.138 | 0.096 |
| p_J/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 0 | 0 | 0.13 | 0.18 |
| p_{E03}/p_{M03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 39.5 | 33.4 | 30.4 | 28.2 |
| p_M/p_{M03} | Inf | Inf | Inf | Inf | Inf | 2.51 | 2.47 | 2.40 | 2.35 |
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7* | 0.7* | 0.7* | |
| T | 20 | 1 | 2 | 5 | 10 | 1 | 2 | 5 | |
| p_{E03} | 0.21 | 0.074 | 0.22 | 0.81 | 1.93 | 0.061 | 0.228 | 1.12 | |
| p_{V03} | 2.02 | 0.24 | 0.44 | 0.97 | 1.84 | 0.26 | 0.497 | 1.60 | |
| p_{Ma03-0} | 0.012 | 0 | 1.5×10^{-4} | 0.002 | 0.0080 | 0.036 | 4.5×10^{-4} | 0.0037 | |
| p_{Ma03} | 4.9×10^{-4} | 0 | 3.8×10^{-5} | 6×10^{-4} | 0.0018 | 0.0031 | 6.6×10^{-5} | 7.8×10^{-4} | |
| p_{Me03-0} | 0.053 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0056 | |
| p_{Me03} | 0.013 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0009 | |
| p_{Sun} | 0.056 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.008 | |
| p_{ej} | 0.004 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| p_{V03}/p_{E03} | 9.63 | 3.26 | 1.99 | 1.20 | 0.96 | 4.21 | 2.18 | 1.43 | |
| p_{Ma03-0}/p_{E03} | 0.0102 | 0 | 6.9×10^{-4} | 0.003 | 0.0042 | 0.0023 | 0.0020 | 0.0033 | |
| p_{Ma03}/p_{E03} | 0.0023 | 0 | 1.7×10^{-4} | 8×10^{-4} | 0.0010 | 0.0002 | 2.9×10^{-4} | 0.0007 | |
| p_{Me03-0}/p_{E03} | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0050 | |
| p_{Me03}/p_{E03} | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0008 | |
| p_J/p_{E03} | 0.016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| p_{Sun}/p_{E03} | 0.27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.007 | |
| p_{E03}/p_{M03} | 53.6 | 52.3 | 47.6 | 44.0 | 43.4 | 50.6 | 53.7 | 44.6 | |
| p_M/p_{M03} | 2.3 | 2.3 | 2.52 | 2.3 | 2.54 | 2.35 | 2.53 | 2.50 | |

Таблица 3. Продолжение

| | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----------------------|
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 1.1 |
| T | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 1 | 2 |
| p_{E03} | 0.336 | 0.78 | 1.40 | 2.67 | 4.04 | 6.08 | 5×10^{-4} | 0.0049 |
| p_{V03} | 0.0019 | 0.023 | 0.089 | 0.40 | 1.02 | 2.00 | 5×10^{-5} | 3.5×10^{-4} |
| p_{Ma03-0} | 4.4×10^{-5} | 2.6×10^{-4} | 9×10^{-4} | 0.006 | 0.016 | 0.033 | 0 | 1.1×10^{-4} |
| p_{Ma03} | 2.6×10^{-6} | 2×10^{-5} | 2×10^{-5} | 0.001 | 0.003 | 0.008 | 0 | 6×10^{-7} |
| p_{Me03-0} | 0 | 0 | 0 | 0.002 | 0.005 | 0.014 | 0 | 0 |
| p_{Me03} | 0 | 0 | 0 | 9×10^{-4} | 0.002 | 0.003 | 0 | 0 |
| p_{Sun} | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.008 | 0.024 | 0 | 0 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{V03}/p_{E03} | 0.0057 | 0.030 | 0.064 | 0.15 | 0.24 | 0.33 | 0.1 | 0.072 |
| p_{Ma03-0}/p_{E03} | 1.3×10^{-4} | 3.3×10^{-4} | 6×10^{-4} | 0.002 | 0.004 | 0.0054 | 0 | 0.023 |
| p_{Ma03}/p_{E03} | 7.7×10^{-6} | 2.5×10^{-5} | 2×10^{-5} | 4×10^{-4} | 0.0008 | 0.0013 | 0 | 1.2×10^{-4} |
| p_{Me03-0}/p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 8×10^{-4} | 0.0012 | 0.0023 | 0 | 0 |
| p_{Me03}/p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 3×10^{-4} | 0.0004 | 0.0005 | 0 | 0 |
| p_J/p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0 | 0 |
| p_{E03}/p_{M03} | 44.1 | 49.9 | 48.7 | 45.7 | 42.3 | 38.4 | 20 | 23.4 |
| p_M/p_{M03} | 2.41 | 2.79 | 2.78 | 2.71 | 2.66 | 2.37 | 2.3 | 2.67 |
| $a_{0\min}$, а. е. | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 |
| T | 5 | 10 | 20 | 50 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| p_{E03} | 0.028 | 0.050 | 0.135 | 0.210 | 0 | 0 | 0.0012 | 0.0072 |
| p_{V03} | 0.0029 | 0.012 | 0.047 | 0.099 | 0 | 0 | 0 | 0.0005 |
| p_{Ma03-0} | 7.7×10^{-4} | 0.002 | 0.006 | 0.010 | 0.014 | 0.017 | 0.030 | 0.050 |
| p_{Ma03} | 5.3×10^{-5} | 1.7×10^{-4} | 8×10^{-4} | 0.002 | 0.009 | 0.013 | 0.025 | 0.042 |
| p_{Me03-0} | 0 | 0 | 2×10^{-4} | 0.001 | 0 | 0 | 0 | 3×10^{-5} |
| p_{Me03} | 0 | 0 | 2×10^{-5} | 2×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 2×10^{-5} |
| p_{Sun} | 0 | 0 | 0.004 | 0.048 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p_{V03}/p_{E03} | 0.103 | 0.23 | 0.347 | 0.47 | Inf | Inf | 0 | 0.073 |
| p_{Ma03-0}/p_{E03} | 0.028 | 0.042 | 0.044 | 0.048 | Inf | Inf | 25 | 7.0 |
| p_{Ma03}/p_{E03} | 0.0019 | 0.0034 | 0.006 | 0.008 | Inf | Inf | 20.5 | 5.8 |
| p_{Me03-0}/p_{E03} | 0 | 0 | 0.0016 | 0.006 | Inf | Inf | 0 | 0.004 |
| p_{Me03}/p_{E03} | 0 | 0 | 2×10^{-4} | 0.001 | Inf | Inf | 0 | 0.003 |
| p_J/p_{E03} | 0 | 0 | 0 | 0 | Inf | Inf | 0 | 0 |
| p_{Sun}/p_{E03} | 0 | 0 | 0.03 | 0.023 | Inf | Inf | 0 | 0 |
| p_{E03}/p_{M03} | 22.8 | 19.6 | 16.4 | 18.1 | Inf | Inf | 19.1 | 21.1 |
| p_M/p_{M03} | 2.62 | 2.49 | 2.3 | 2.3 | Inf | Inf | 2.3 | 2.3 |

Таблица 3. Окончание

| | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|----------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|----------------------|--------------------|
| a_{0min} , а. е. | 1.3 | 1.3 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| T | 20 | 50 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| P_{E03} | 0.016 | 0.040 | 0 | 5×10^{-4} | 0.0029 | 0.0094 | 0.024 | 0.047 |
| P_{V03} | 0.0030 | 0.0057 | 0 | 0 | 0 | 1×10^{-7} | 9×10^{-4} | 0.0012 |
| P_{Ma03-0} | 0.063 | 0.081 | 0.0017 | 0.0024 | 0.0057 | 0.012 | 0.021 | 0.038 |
| P_{Ma03} | 0.051 | 0.062 | 0.0006 | 0.0009 | 0.0025 | 0.005 | 0.009 | 0.018 |
| P_{Me03-0} | 5×10^{-5} | 1.5×10^{-4} | 0 | 0 | 0 | 3×10^{-8} | 3.5×10^{-8} | 2×10^{-6} |
| P_{Me03} | 9×10^{-5} | 9.0×10^{-5} | 0 | 0 | 0 | 3×10^{-8} | 3×10^{-8} | 3×10^{-8} |
| P_{Sun} | 0 | 0.032 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.004 | 0.032 |
| P_{ej} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.008 |
| P_{V03}/P_{E03} | 0.18 | 0.14 | Inf | 0 | 0 | 1×10^{-5} | 0.046 | 0.026 |
| P_{Ma03-0}/P_{E03} | 3.84 | 2.02 | Inf | 4.6 | 1.98 | 1.25 | 0.87 | 0.81 |
| P_{Ma03}/P_{E03} | 3.11 | 1.53 | Inf | 1.7 | 0.88 | 0.54 | 0.39 | 0.38 |
| P_{Me03-0}/P_{E03} | 0.003 | 0.0037 | Inf | 0 | 0 | 3×10^{-6} | 1.5×10^{-6} | 5×10^{-5} |
| P_{Me03}/P_{E03} | 0.005 | 0.0022 | Inf | 0 | 0 | 3×10^{-6} | 1.3×10^{-6} | 6×10^{-7} |
| P_J/P_{E03} | 0 | 0 | Inf | 0 | 0 | 0 | 0.035 | 0.009 |
| P_{Sun}/P_{E03} | 0 | 0.8 | Inf | 0 | 0 | 0.43 | 0.17 | 0.68 |
| P_{E03}/P_{M03} | 17.9 | 17.6 | Inf | 17.2 | 20.8 | 22.7 | 19.0 | 18.4 |
| P_M/P_{M03} | 2.3 | 2.3 | Inf | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 |

быть больше четырех, в то время как при расчетах массы зародышей планет отличались от современных масс планет земной группы в одинаковое число раз. Однако при массах зародышей, в 10 раз меньших современных масс планет земной группы, в рассмотренных вариантах расчетов зародыши аккумулировали вещество в основном только из окрестности своей орбиты, и поэтому при рассмотрении аккумуляции сравнительно небольших зародышей (с массами порядка 10% от современных масс планет) не обязательно точно знать массы других зародышей планет, если они тоже были небольшими.

Чем больше массы зародышей планет, тем быстрее их рост при прочих равных условиях (однако почти сформировавшаяся планета могла уже вычерпать почти все вещество из окрестности своей орбиты, а в окрестности орбиты меньшего зародыша еще могло оставаться много планетезималей). При суммарной массе планетезималей в зоне питания зародыша на порядок большей массы зародыша, зародыш с массой, равной 0.1 от массы планеты, аккумулировав 10% этих планетезималей, увеличивал свою массу вдвое и тем самым увеличивал и вероятность своего столкновения с планетезималиями, находившимися на аналогичных орбитах. Рост эксцентриситетов и наклонений орбит планетезималей уменьшал вероятность столкновения одной планетезимали с зародышем, но мог увеличивать число планетезималей – кандидатов на столкно-

вение с зародышем планеты. Если данные расчетов показывают некоторую вероятность столкновений с планетезималиями для массы зародыша, равной 0.1 от массы планеты, то в большинстве случаев эта вероятность будет не меньше для большей массы зародыша. Если считать, что в зоне питания планет земной группы число планетезималей с большими полуосями a было пропорционально $a^{1/2}$ (т.е. число планетезималей на единице площади было пропорционально $a^{-1/2}$), то учитывая, что интеграл от $a^{1/2}$ пропорционален $a^{3/2}$, получаем, что отношение числа планетезималей в семи зонах с граничными значениями больших полуосей 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5 и 2 а. е. будет пропорционально 0.28, 0.35, 0.40, 0.45, 0.49, 0.53 и 1.49 соответственно. Сумма первых пяти величин равна 1.97, т.е. близка к отношению суммы масс планет земной группы к массе Земли, а сумма двух последних величин равна 2.02. В действительности доля двух внутренних зон в общей массе диска, расположенного на расстоянии 0.3–1.3 а. е. от Солнца, могла быть меньше этих величин, а с учетом выпадений планетезималей на Солнце и их выброса за орбиту Марса общая масса начальных планетезималей такого диска могла превышать $2m_E$. При этом относительно небольшой прирост массы планет земной группы происходил за счет планетезималей, первоначально находившихся на расстояниях, больших 2 а. е.

Таблица 4. Вероятности столкновений планетезимали с планетами, Луной и Солнцем за время T (в млн лет) для дисков, состоявших из 250 начальных планетезималей с большими полуосями орбит от $a_{0\min}$ а. е. до $a_{0\min} + d_a$ а. е., эксцентриситетами e_0 и наклонениями $i_0 = e_0/2$ рад. Значение $d_a = 0.2$ а. е. во всех вариантах серии *MeN* расчетов кроме $a_{0\min} = 1.5$ а. е., при котором $d_a = 0.5$ а. е. **Массы и элементы орбит планет равны их современным значениям.** **Обозначения:** $p_E, p_V, p_{Ma}, p_{Me}, p_J, p_S,$ и p_M – вероятности столкновений планетезимали с Землей, Венерой, Марсом, Меркурием, Юпитером, Сатурном и Луной современных масс, соответственно. p_{Ma0} и p_{Me0} – вероятности столкновений планетезимали с Марсом и Меркурием в случае, когда орбиты этих планет имели бы нулевые эксцентриситеты. Все вероятности вычислялись за рассматриваемое время T . Значок Abs означает, что данное значение не вычислялось. Остальные обозначения такие же, как для табл. 2

| | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5* | 0.5* |
| e_0 | 0.05 | 0.05 | 0.3 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| T | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 |
| p_E | 0.0044 | 0.008 | 5.2×10^{-5} | 0.0032 | 0.22 | 0.31 | 0.084 | 0.10 |
| p_V | 0.198 | 0.30 | 0.071 | 0.25 | 1.26 | 1.70 | 0.54 | 0.62 |
| p_{Ma0} | 0.0002 | 0.0003 | 1.5×10^{-6} | 4.5×10^{-5} | 0.0037 | 0.0085 | 0.001 | 0.0017 |
| p_{Ma} | Abs | 0.0007 | Abs | 1.7×10^{-5} | Abs | 0.0005 | 0.003 | 0.0005 |
| p_{Me0} | Abs | 0.62 | Abs | 0.136 | Abs | 0.13 | 0.038 | 0.0052 |
| p_{Me} | 0.478 | 0.50 | 0.060 | 0.087 | 0.0237 | 0.053 | 0.014 | 0.022 |
| p_{Sun} | 0.124 | 0.54 | 0.144 | 0.53 | 0.008 | 0.24 | 0.052 | 0.36 |
| p_{ej} | 0.012 | 0.032 | 0.004 | 0.016 | 0 | 0 | 0.008 | 0.024 |
| p_V/p_E | 44.9 | 38.5 | 134.7 | 78.1 | 5.66 | 5.50 | 6.39 | 6.2 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.045 | 0.043 | 0.003 | 0.014 | 0.016 | 0.027 | 0.012 | 0.017 |
| p_{Ma}/p_E | Abs | 0.009 | Abs | 0.0054 | Abs | 0.016 | 0.004 | 0.005 |
| p_{Me0}/p_E | Abs | 80.8 | Abs | 43.0 | Abs | 0.42 | 0.46 | 0.52 |
| p_{Me}/p_E | 108.6 | 65.1 | 94.1 | 27.5 | 0.106 | 0.17 | 0.17 | 0.22 |
| p_J/p_E | 0 | 4.3 | 0 | 0.007 | 0 | 0 | 0.0002 | 0.0003 |
| p_S/p_E | 0 | 2.4 | 0 | 0.004 | 0 | 0 | 7.7×10^{-5} | 0.0001 |
| p_{Sun}/p_E | 28.2 | 70.8 | 2769 | 167 | 0.036 | 0.78 | 0.62 | 3.6 |
| p_E/p_M | 19.7 | 18.7 | 21.4 | 18.5 | 32.9 | 28.6 | 26.5 | 22.8 |
| p_E/p_{E01} | 6.51 | 6.24 | 6.62 | 5.99 | 8.26 | 7.77 | 7.55 | 6.91 |
| p_M/p_{M01} | 4.37 | 4.38 | 4.33 | 4.66 | 4.86 | 4.72 | 4.89 | 4.72 |
| $a_{0\min}$, а. е. | 0.5 | 0.5 | 0.5* | 0.5* | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| e_0 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.3 | 0.3 |
| T | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 |
| p_E | 0.065 | 0.094 | 0.108 | 0.234 | 0.645 | 0.978 | 0.36 | 0.60 |
| p_V | 0.572 | 0.784 | 0.992 | 1.397 | 1.22 | 2.05 | 0.52 | 1.22 |
| p_{Ma0} | 0.029 | 0.0027 | 0.001 | 0.006 | 0.0097 | 0.023 | 0.005 | 0.015 |
| p_{Ma} | 0.0004 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 0.023 | 0.0075 | 0.0016 | 0.0046 |
| p_{Me0} | 0.039 | 0.12 | 0.114 | 0.171 | 0.015 | 0.066 | 0.026 | 0.096 |
| p_{Me} | 0.028 | 0.049 | 0.033 | 0.065 | 0.0031 | 0.022 | 0.0067 | 0.044 |
| p_{Sun} | 0.048 | 0.36 | 0.152 | 0.512 | 0.024 | 0.228 | 0.032 | 0.256 |
| p_{ej} | 0.012 | 0.056 | 0.008 | 0.024 | 0.02 | 0.064 | 0.004 | 0.032 |
| p_V/p_E | 8.78 | 8.34 | 9.22 | 5.68 | 1.90 | 2.09 | 1.54 | 1.22 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.020 | 0.029 | 0.010 | 0.026 | 0.015 | 0.024 | 0.014 | 0.025 |
| p_{Ma}/p_E | 0.006 | 0.01 | 0.003 | 0.009 | 0.0036 | 0.0076 | 0.0045 | 0.0076 |
| p_{Me0}/p_E | 0.59 | 1.32 | 1.06 | 0.730 | 0.001 | 0.068 | 0.072 | 0.16 |
| p_{Me}/p_E | 0.43 | 0.52 | 0.31 | 0.278 | 0.0048 | 0.023 | 0.019 | 0.073 |
| p_J/p_E | 0.0003 | 0.002 | 0 | 0.0001 | 0.0008 | 0.0047 | 0.0001 | 0.0003 |
| p_S/p_E | 0.0018 | 0.0015 | 0 | 5×10^{-6} | 3.0×10^{-5} | 4×10^{-5} | 5×10^{-5} | 4×10^{-5} |
| p_{Sun}/p_E | 0.738 | 3.8 | 1.4 | 2.2 | 0.037 | 0.23 | 0.089 | 0.43 |
| p_E/p_M | 21.8 | 19.4 | 24.6 | 24.0 | 32.7 | 29.6 | 26.2 | 25.7 |
| p_E/p_{E01} | 6.73 | 6.24 | 7.34 | 7.19 | 8.21 | 7.91 | 7.46 | 7.42 |
| p_M/p_{M01} | 4.67 | 4.53 | 4.82 | 4.96 | 4.82 | 4.77 | 4.62 | 4.63 |

Таблица 4. Продолжение

| | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| a_{0min} , а. е. | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9* | 0.9* | 0.9* |
| e_0 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| T | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 20 | 1 | 5 | 20 |
| p_E | 0.465 | 0.838 | 1.32 | 2.00 | 4.806 | 0.668 | 1.78 | 4.35 |
| p_V | 0.167 | 0.393 | 0.749 | 1.41 | 4.267 | 0.278 | 1.25 | 2.37 |
| p_{Ma0} | 0.0019 | 0.0062 | 0.012 | 0.027 | 0.087 | 0.0043 | 0.021 | 0.055 |
| p_{Ma} | 0.0002 | 0.0008 | 0.0021 | 0.0075 | 0.038 | 0.0006 | 0.052 | 0.017 |
| p_{Me0} | 8×10^{-6} | 0.0019 | 0.005 | 0.029 | 0.30 | 0.0008 | 0.045 | 0.139 |
| p_{Me} | 10^{-6} | 0.0001 | 0.001 | 0.0076 | 0.108 | 0.0002 | 0.042 | 0.124 |
| p_{Sun} | 0 | 0 | 0.004 | 0.016 | 0.228 | 0.004 | 0.04 | 0.244 |
| p_{ej} | 0 | 0 | 0.004 | 0.012 | 0.056 | 0 | 0.02 | 0.052 |
| p_V/p_E | 0.36 | 0.47 | 0.57 | 0.70 | 0.89 | 0.42 | 0.70 | 0.54 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.0041 | 0.0074 | 0.009 | 0.014 | 0.018 | 0.0064 | 0.012 | 0.038 |
| p_{Ma}/p_E | 0.0005 | 0.001 | 0.0016 | 0.0038 | 0.025 | 0.0008 | 0.0029 | 0.013 |
| p_{Me0}/p_E | 1.6×10^{-5} | 0.0023 | 0.0038 | 0.014 | 0.008 | 0.0012 | 0.025 | 0.032 |
| p_{Me}/p_E | 2×10^{-6} | 0.00014 | 0.0008 | 0.0038 | 0.062 | 0.0003 | 0.023 | 0.030 |
| p_J/p_E | 0 | 1×10^{-5} | 1×10^{-5} | 0.001 | 0.003 | 0 | 0.0004 | 0.0005 |
| p_S/p_E | 0 | 4×10^{-5} | 4×10^{-5} | 4×10^{-5} | 0.0003 | 0 | 3×10^{-5} | 0.0001 |
| p_{Sun}/p_E | 0 | 0 | 0.003 | 0.008 | 0.047 | 0.006 | 0.022 | 0.056 |
| p_E/p_M | 39.2 | 38.3 | 37.0 | 35.6 | 35.0 | 38.5 | 36.2 | 43.1 |
| p_E/p_{E01} | 9.12 | 9.03 | 8.98 | 8.86 | 8.98 | 9.04 | 8.96 | 8.75 |
| p_M/p_{M01} | 5.09 | 5.02 | 5.0 | 4.93 | 4.90 | 4.89 | 4.86 | 5.42 |
| a_{0min} , а. е. | 0.9 | 0.9 | 0.9* | 0.9* | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| e_0 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.3 | 0.3 |
| T | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 |
| p_E | 0.488 | 0.579 | 0.205 | 0.748 | 0.193 | 0.56 | 0.058 | 0.090 |
| p_V | 0.45 | 0.62 | 0.230 | 0.928 | 0.104 | 0.49 | 0.037 | 0.092 |
| p_{Ma0} | 0.019 | 0.025 | 0.010 | 0.039 | 0.016 | 0.039 | 0.0083 | 0.011 |
| p_{Ma} | 0.0057 | 0.008 | 0.0029 | 0.013 | 0.003 | 0.010 | 0.0026 | 0.0035 |
| p_{Me0} | 0.015 | 0.046 | 0.0021 | 0.039 | 0.0013 | 0.03 | 0.0007 | 0.0079 |
| p_{Me} | 0.0053 | 0.022 | 0.0013 | 0.056 | 3×10^{-4} | 0.012 | 0.0002 | 0.0031 |
| p_{Sun} | 0.044 | 0.236 | 0.072 | 0.28 | 0 | 0.132 | 0.052 | 0.26 |
| p_{ej} | 0.012 | 0.064 | 0.012 | 0.064 | 0 | 0.032 | 0.02 | 0.064 |
| p_V/p_E | 0.92 | 1.07 | 1.12 | 1.24 | 0.54 | 0.87 | 0.64 | 1.02 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.039 | 0.043 | 0.049 | 0.052 | 0.084 | 0.069 | 0.143 | 0.12 |
| p_{Ma}/p_E | 0.012 | 0.014 | 0.014 | 0.017 | 0.016 | 0.018 | 0.044 | 0.039 |
| p_{Me0}/p_E | 0.031 | 0.080 | 0.010 | 0.052 | 0.0065 | 0.053 | 0.012 | 0.0088 |
| p_{Me}/p_E | 0.011 | 0.037 | 0.0065 | 0.074 | 0.0013 | 0.021 | 0.0033 | 0.034 |
| p_J/p_E | 0.0023 | 0.004 | 0.003 | 0.011 | 0 | 0.003 | 0.0022 | 0.0040 |
| p_S/p_E | 4×10^{-5} | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 0 | 2×10^{-5} | 0.0006 | 0.0006 |
| p_{Sun}/p_E | 0.09 | 0.41 | 0.35 | 0.37 | 0 | 0.23 | 0.90 | 2.9 |
| p_E/p_M | 29.0 | 26.6 | 16.3 | 27.5 | 27.5 | 26.0 | 19.5 | 16.9 |
| p_E/p_{E01} | 6.47 | 5.44 | 7.49 | 7.81 | 7.44 | 7.30 | 6.30 | 5.72 |
| p_M/p_{M01} | 3.63 | 4.70 | 4.76 | 4.76 | 4.56 | 4.59 | 4.53 | 4.46 |

Таблица 4. Окончание

| | | | | | | | | |
|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| a_{0min} , а. е. | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 1.3* | 1.3* | 1.3 | 1.3 | 1.3* |
| e_0 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| T | 50 | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 | 20 | 5 |
| p_E | 0.101 | 0.468 | 0.562 | 0.21 | 0.43 | 0.099 | 0.257 | 0.135 |
| p_V | 0.121 | 0.226 | 0.335 | 0.087 | 0.27 | 0.038 | 0.201 | 0.051 |
| p_{Ma0} | 0.012 | 0.077 | 0.086 | 0.049 | 0.078 | 0.0072 | 0.019 | 0.0094 |
| p_{Ma} | 0.004 | 0.013 | 0.047 | 0.036 | 0.053 | 0.0024 | 0.0065 | 0.0034 |
| p_{Me0} | 0.015 | 0.004 | 0.014 | 0.0007 | 0.015 | 0.0012 | 0.012 | 0.0012 |
| p_{Me} | 0.0065 | 0.0008 | 0.0055 | 0.0019 | 0.0045 | 0.0004 | 0.005 | 0.00045 |
| p_{Sun} | 0.536 | 0.02 | 0.20 | 0.052 | 0.264 | 0.08 | 0.32 | 0.092 |
| p_{ej} | 0.088 | 0.008 | 0.048 | 0.024 | 0.068 | 0.012 | 0.04 | 0.016 |
| p_V/p_E | 1.20 | 0.483 | 0.596 | 0.41 | 0.62 | 0.38 | 0.78 | 0.38 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.117 | 0.164 | 0.153 | 0.23 | 0.18 | 0.072 | 0.075 | 0.070 |
| p_{Ma}/p_E | 0.040 | 0.029 | 0.084 | 0.17 | 0.12 | 0.024 | 0.025 | 0.025 |
| p_{Me0}/p_E | 0.143 | 0.086 | 0.024 | 0.0032 | 0.033 | 0.012 | 0.046 | 0.0088 |
| p_{Me}/p_E | 0.064 | 0.0017 | 0.010 | 0.0089 | 0.010 | 0.0044 | 0.020 | 0.0034 |
| p_j/p_E | 0.0036 | 0.0007 | 0.0018 | 0.0007 | 0.018 | 0.0033 | 0.005 | 0.0062 |
| p_S/p_E | 0.0005 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0001 | 0.003 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0005 |
| p_{Sun}/p_E | 5.3 | 0.043 | 0.36 | 0.04 | 0.61 | 0.81 | 1.245 | 0.68 |
| p_E/p_M | 16.1 | 29.3 | 26.6 | 26.0 | 26.35 | 22.2 | 22.5 | 23.40 |
| p_E/p_{E01} | 5.23 | 7.70 | 7.36 | 7.29 | 7.42 | 6.76 | 6.85 | 7.04 |
| p_M/p_{M01} | 4.46 | 4.82 | 4.75 | 4.69 | 4.68 | 4.59 | 4.59 | 4.58 |
| a_{0min} , а. е. | 1.3* | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| e_0 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| T | 20 | 5 | 20 | 50 | 5 | 20 | 50 | 50 |
| p_E | 0.195 | 0.0113 | 0.031 | 0.052 | 0.0082 | 0.023 | 0.043 | 0.043 |
| p_V | 0.112 | 0.0008 | 0.017 | 0.037 | 0.0013 | 0.0166 | 0.041 | 0.041 |
| p_{Ma0} | 0.014 | 0.0061 | 0.011 | 0.020 | 0.0047 | 0.011 | 0.017 | 0.017 |
| p_{Ma} | 0.0056 | Abs | 0.0092 | 0.0099 | Abs | 0.009 | 0.014 | 0.014 |
| p_{Me0} | 0.006 | Abs | 0.0016 | 0.0026 | Abs | 0.0037 | 0.0075 | 0.0075 |
| p_{Me} | 0.003 | 4×10^{-5} | 0.0011 | 0.0023 | 2×10^{-5} | 0.0012 | 0.0032 | 0.0032 |
| p_{Sun} | 0.344 | 0.016 | 0.108 | 0.30 | 0.02 | 0.204 | 0.428 | 0.428 |
| p_{ej} | 0.072 | 0 | 0.024 | 0.064 | 0.008 | 0.052 | 0.072 | 0.072 |
| p_V/p_E | 0.576 | 0.068 | 0.549 | 0.72 | 0.154 | 0.72 | 0.96 | 0.96 |
| p_{Ma0}/p_E | 0.074 | 0.539 | 0.38 | 0.39 | 0.568 | 0.48 | 0.40 | 0.40 |
| p_{Ma}/p_E | 0.029 | Abs | 0.20 | 0.19 | Abs | 0.40 | 0.31 | 0.31 |
| p_{Me0}/p_E | 0.031 | Abs | 0.052 | 0.049 | Abs | 0.163 | 0.175 | 0.175 |
| p_{Me}/p_E | 0.015 | 0.0039 | 0.036 | 0.045 | 0.0022 | 0.052 | 0.075 | 0.075 |
| p_j/p_E | 0.013 | 0 | 0.0043 | 0.008 | 0.036 | 0.081 | 0.05 | 0.05 |
| p_S/p_E | 0.0077 | 0 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0013 | 0.0024 | 0.0014 | 0.0014 |
| p_{Sun}/p_E | 1.76 | 1.42 | 3.48 | 5.77 | 0.98 | 8.9 | 9.95 | 9.95 |
| p_E/p_M | 21.25 | 17.2 | 16.8 | 16.9 | 18.7 | 17.4 | 16.6 | 16.6 |
| p_E/p_{E01} | 6.64 | 5.84 | 5.68 | 5.69 | 6.06 | 5.77 | 5.60 | 5.60 |
| p_M/p_{M01} | 4.54 | 4.30 | 4.47 | 4.53 | 4.62 | 4.56 | 4.53 | 4.53 |

Результаты серии MeS_{01} расчетов показали, что при массах зародышей планет земной группы, равных примерно 0.1 от масс планет, зародыш рос в основном за счет планетезималей из его окрестности, а зародыши Земли и Венеры росли быст-

рее, чем зародыши Меркурия и Марса. Для серии MeS_{01} расчетов планетезимали из каждой рассматриваемой зоны могли сталкиваться в основном только с одним зародышем, и вероятности столкновений планетезималей с другими зароды-

шами были нулевыми или были намного меньше, чем с этим зародышем.

Для серии MeS_{01} расчетов и планетезималей с большими полуосями начальных орбит от 0.9 до 1.1 а. е. (общая масса таких планетезималей могла составлять $\geq 0.5m_E$) вероятность p_{E01} столкновения планетезимали с зародышем Земли с массой, равной $0.1m_E$, равнялась 0.2, 0.5, и 1 при T , равном 1, 2 и 5 млн лет соответственно. Для планетезималей с большими полуосями начальных орбит от 0.7 до 0.9 а. е. (общая масса таких планетезималей могла составлять не менее $0.4m_E$) и серии MeS_{01} расчетов, значение p_{V01} равнялось 0.2, 0.4 и 0.8 при T , равном 1, 2 и 5 млн лет соответственно. Из этих оценок можно сделать вывод о том, что за 1 млн лет массы рассматриваемых зародышей Земли и Венеры могли увеличиться вдвое, т.е. масса зародыша Земли могла возрасти с $0.1m_E$ до $0.2m_E$. Для зоны, расположенной на расстоянии 0.5–0.7 а. е. от Солнца, значение p_{V01} равнялось 0.36 и 1 при T , равном 5 и 20 млн лет соответственно. Для серии MeN_{03} расчетов и зоны на расстоянии от 0.9 до 1.1 а. е. от Солнца, значение p_{E03} вероятности столкновения планетезимали с зародышем Земли с массой, равной $0.3m_E$, равнялось 0.8 и 1.4 при T , равном 1 и 2 млн лет соответственно. Для зоны, располагавшейся на расстоянии 0.7–0.9 а. е. от Солнца, и серии MeN_{03} расчетов значение p_{V03} вероятности столкновения планетезимали с зародышем Венеры с массой, составляющей 0.3 от современной массы Венеры, равнялось 0.2, 0.4–0.5 и 1–1.6 при T , равном 1, 2 и 5 млн лет соответственно (разброс значений p_{V03} приведен для вариантов расчетов с аналогичными исходными данными, отличавшимися только шагом интегрирования и ориентациями исходных орбит планетезималей). Для зоны, находившейся на расстоянии 0.5–0.7 а. е. от Солнца, значения p_{V03} равнялись 0.4, 0.6, 1 и 2 при T , равном 1, 2, 5 и 20 млн лет соответственно.

Эти оценки показывают, что зародыши Венеры и Земли росли с примерно одинаковой скоростью (но зародыш Земли рос немного быстрее) и могли аккумулировать большинство планетезималей с начальными значениями больших полуосей орбит от 0.7 до 1.1 а. е. менее, чем за 5 млн лет, а Венера могла аккумулировать большинство планетезималей с большими полуосями начальных орбит от 0.5 до 0.7 а. е. не более, чем за 5–10 млн лет. При $T \leq 5$ млн лет отношение p_{V01}/p_{E01} вероятностей столкновений планетезималей с зародышами Венеры и Земли, массы которых в 10 раз меньше масс современных планет, не превышало 0.01 для планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.9 до 1.1 а. е. от Солнца, и превышало 35 для планетезималей из зоны 0.7–0.9 а. е. Аналогичные данные для других зон

показывают, что при массах зародышей Земли и Венеры около $0.1m_E$ эти зародыши аккумулировали в основном вещество из зон, первоначально находившихся от Солнца на расстояниях 0.9–1.1 а. е. и 0.5–0.9 а. е. соответственно. Не учитываемый в рассматриваемой модели выброс вещества при столкновениях тел с планетами может несколько увеличить оценки времени аккумуляции планет.

Отношение p_{V03}/p_{E03} вероятностей столкновений планетезималей с зародышами Венеры и Земли, массы которых составляли 0.3 от масс современных планет, равнялось примерно 3–4, 2, 1.2–1.4 и 1 для планетезималей с начальными значениями больших полуосей от 0.7 до 0.9 а. е. при T , равном 1, 2, 5 и 10 млн лет соответственно. Отношение p_{V03}/p_{E03} составило примерно 0.03, 0.06, 0.15 и 0.24 для планетезималей с начальными значениями больших полуосей орбит от 0.9 до 1.2 а. е. при T , равном 1, 2, 5 и 10 млн лет соответственно. Таким образом, самые внутренние слои Земли или Венеры были в основном сформированы путем аккумуляции вещества из окрестностей планеты, но уже при массах этих зародышей, составлявших около 0.3 от конечных масс планет, до нескольких десятков процентов притока вещества к этим двум зародышам могло прийти из одной и той же зоны (особенно из зоны на расстоянии 0.7–0.9 а. е. от Солнца).

Зародыш Меркурия с массой, составлявшей около 0.1 массы Меркурия, за 1 млн лет он мог аккумулировать 2–3% планетезималей, начальные значения больших полуосей орбит которых были в диапазоне от 0.3 до 0.5 а. е. Однако за следующие 4 млн лет прирост был меньше, чем за первый млн лет. В серии MeN_{03} расчетов значение p_{Me03} было около 0.03–0.05 для зоны от 0.3 до 0.5 а. е., причем отличалось всего в 1.3 раза при T , равном 1 и 20 млн лет. При общей массе M_b планетезималей в этой зоне, равной $0.1m_E$, произведение $M_b p_{Me01}$ равняется $0.003m_E$ и почти в 20 раз меньше массы Меркурия ($0.055m_E$). Оно больше при больших значениях M_b . Зародыш Меркурия с массой около 0.3 от массы Меркурия аккумулировал также планетезимали, большие полуоси начальных орбит которых находились в интервале от 0.5 до 0.7 а. е., причем при круговой орбите зародыша этот вклад мог достигать половины текущего вклада из зоны, располагавшейся на расстоянии 0.3–0.5 а. е. от Солнца. Для рассматриваемой модели роста зародышей для более быстрого роста Меркурия можно, наряду с изменением рассматриваемого начального распределения планетезималей, рассматривать начальный зародыш Меркурия, образовавшийся при сжатии разреженного сгущения, с массой не менее $0.02m_E$.

Жарков (2003) полагает, что суммарная масса планетезималей в зоне питания Марса первоначально превышала массу Марса в 20 раз, а затем

большинство этих планетезималей были выметены из этой зоны планетезималами, проникавшими в эту зону из зоны питания Юпитера и Сатурна. Если считать, что Юпитер достиг большой массы и стал активно переводить соседние планетезималы на орбиты, проникавшие в зону питания Марса, через 1 млн лет после образования начала образования планет, а время образования зародыша Марса было гораздо меньше, то можно использовать данные табл. 2 и 3 для оценки роста зародыша Марса за 1 млн лет. Вероятность столкновения за 1 млн лет планетезималей, первоначально находившейся на расстоянии 1.3–1.5 а. е. от Солнца, с зародышем Марса с массой, равной 0.1 и 0.3 от массы Марса, получена равной 0.004 и 0.01 соответственно. Для зоны с $a_{0\min} = 1.5$ а. е. эти вероятности в несколько раз меньше, чем при $a_{0\min} = 1.3$ а. е. и не превышали 0.002. Выше отмечалось, что отношение числа планетезималей в зонах 1.3–1.5 и 1.5–2.0 а. е. приблизительно равно 1 : 3, если число планетезималей с большими полуосями a было пропорционально $a^{1/2}$. Поэтому прирост массы зародыша Марса с исходной массой, не большей $0.03m_E$, за 1 млн лет мог не превышать $0.01m_E$ даже при суммарной массе планетезималей на расстоянии от 1.3 до 2.0 а. е. от Солнца, равной $2m_E$.

Рассмотрим рост зародыша Марса при сравнительно небольшой массе вещества в его зоне питания (например, когда эта зона была уже частично очищена планетезималами из зоны Юпитера). Для серии MeS_{01} расчетов и зоны с $a_{0\min} = 1.3$ а. е. значения p_{Ma01} и p_{Ma01-0} равнялись 0.011–0.015 и 0.035–0.053 при T , равном 5 и 20 млн лет соответственно. Если общая масса M_b планетезималей в этой зоне равна $0.2m_E$, то для таких значений T и вероятности столкновения планетезималей с зародышем Марса с массой, составлявшей 0.1 от современной массы Марса, равной 0.011 или 0.035, имеем $M_b p_{Ma01} = 0.002m_E$ или $M_b p_{Ma01} = 0.007m_E$ соответственно. Для серии MeS_{01} расчетов и зоны с $a_{0\min} = 1.5$ а. е., значение p_{Ma01-0} равнялось 0.0075 и 0.032 при T , равном 5 и 20 млн лет соответственно, а значения p_{Ma01} были по крайней мере в 6 раз меньше значений p_{Ma01-0} . До очистки Юпитером зоны питания Марса для зон с $a_{0\min} = 1.3$ а. е. и $a_{0\min} = 1.5$ а. е. значения M_b могли в несколько раз превышать $0.2m_E$. Однако и при $M_b = 0.5m_E$ и $M_b = 1.5m_E$ для этих двух зон в рамках рассматриваемой модели масса зародыша Марса вряд ли увеличивается с $0.01m_E$ больше, чем на $0.01m_E$ за 5 млн лет.

Значения p_{Ma03} и p_{Ma03-0} при $T = 5$, $T = 20$ и $T = 50$ млн лет не превышали соответственно 0.03, 0.06 и 0.08 для зоны с $a_{0\min} = 1.3$ а. е., а для зоны с $a_{0\min} = 1.5$ были в несколько раз меньше (не превышали, соответственно, 0.006, 0.02 и 0.04). При

суммарной массе планетезималей в зонах с $a_{0\min} = 1.3$ а. е. и $a_{0\min} = 1.5$ а. е., равных $0.5m_E$ и $1.5m_E$, получаем прирост массы зародыша с исходной массой в $0.03m_E$ не более, чем $0.025m_E$, за 5 млн лет. Значения p_{Ma} и p_{Ma-0} при $T = 5$ и $T = 20$ млн лет не превышали 0.04 и 0.05 для зоны с $a_{0\min} = 1.3$ а. е., а для зоны с $a_{0\min} = 1.5$ а. е. не превышали 0.006 и 0.01 соответственно. То есть эти значения не были заметно больше, чем для в три раза меньшего по массе зародыша Марса. При суммарной массе планетезималей в зонах с $a_{0\min} = 1.3$ а. е. и $a_{0\min} = 1.5$ а. е., равной соответственно $0.5m_E$ и $1.5m_E$, получаем, что даже при массе зародыша, равной массе Марса, прирост его массы не превышает $0.04m_E$ за 20 млн лет. Поэтому даже для суммарной массы планетезималей в этих зонах, равной $2m_E$, рост основной массы Марса мог бы затянуться на десятки миллионов лет, и в такой доле до современной массы Марс рос бы медленнее других планет земной группы. Реально из-за влияния Юпитера масса планетезималей в зоне питания Марса могла уменьшиться в несколько раз за время, не превышавшее нескольких миллионов лет. Данные о составе Марса свидетельствуют о формировании основной массы Марса за время, не превышавшее 10–20 млн лет (Elkins-Tanton, 2008; Mezger и др., 2013; Bouvier и др., 2018), а в (Elkins-Tanton, 2018) за время не более 5 млн лет. Поэтому можно предположить, что достаточно крупный зародыш Марса с массой в несколько раз меньшей массы Марса (например, с массой $\geq 0.03m_E$) мог образоваться непосредственно при сжатии разреженного сгущения.

Вполне возможно, что исходная масса вещества в зоне питания Марса была не меньше массы в зоне питания Земли, и зародыш Марса, образовавшийся при сжатии родительского сгущения, был не меньше аналогичного зародыша Земли. Современные работы по образованию разреженных сгущений (см. обзор в (Ипатов, 2017)) допускают формирование массивных сгущений. Например, Луга и др. (2008) рассматривали формирование сгущений с массами $\sim(0.1-0.6)m_E$. Из-за очистки зоны питания Марса, вызванной влиянием Юпитера, формирование основной массы Марса могло закончиться раньше формирования основной массы Земли, но небольшая бомбардировка почти сформировавшегося Марса планетезималами, образовавшимися в его зоне питания, могла происходить позже бомбардировки Земли планетезималами, образовавшимися в ее зоне питания.

Отношение массы зародыша планеты, образовавшегося при сжатии сгущения, к массе планеты для Меркурия также могло быть больше, чем для Земли. Однако возможно меньшая абсолютная масса зародыша Меркурия, образовавшегося при сжатии, и меньшая масса вещества в его зоне пи-

тания, по сравнению с Землей, способствовали значительно меньшей конечной массе Меркурия по сравнению с массой Земли.

ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПАДЕНИЙ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ НА ПОЧТИ СФОРМИРОВАВШИЕСЯ ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Приведенные в данном разделе оценки относятся к последним стадиям формирования планет. Они основаны на расчетах серии *MeN*, в которых при изучении миграции планетезималей учитывалось гравитационное влияние современных планет. Ко времени формирования основных масс планет средние эксцентриситеты планетезималей могли превышать 0.2. Поэтому расчеты проводились при $e_0 = 0.05$ и $e_0 = 0.3$. На эволюцию орбит планетезималей из зон со значениями a_{0min} , равными 0.5, 0.7 и 0.9 а. е., оказывали большое влияние Земля и Венера. Для таких значений a_{0min} вероятности столкновений планетезималей с этими планетами при $e_0 = 0.05$ отличались от вероятностей при $e_0 = 0.3$ обычно не более, чем в 2–3 раза. Поэтому можно ожидать, что в этом случае относительно близкие значения вероятностей могут быть получены и при других значениях e_0 между 0.05 и 0.3. При меньших массах планет перемешивание вещества могло быть меньше, но учет взаимного гравитационного влияния планетезималей увеличил бы перемешивание планетезималей из различных зон. Сумма $p_E + p_V$ обычно была не меньше 1 при $T \geq 5$ млн лет и a_{0min} , равном 0.7 и 0.9 а. е., как в серии *MeN* расчетов, так и в серии *MeS₀₁*. Это свидетельствует о том, что большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а. е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру в течение 5 млн лет.

Отношение p_V/p_E вероятностей столкновений планетезималей с Венерой и Землей лежало в основном в интервале от 0.5 до 1.9 при $T \geq 2$ млн лет и a_{0min} в диапазоне от 0.7 до 1.1 а. е. При $a_{0min} = 1.3$ а. е. это отношение также было близко к этому интервалу. Поэтому доли вещества из различных частей зоны, располагавшейся на расстоянии от 0.7 до 1.5 а. е. до Солнца, вошедшие в Землю и Венеру на конечных стадиях формирования этих планет, отличались, вероятно, не более, чем в 2 раза. Для начальных планетезималей с $a_{0min} = 0.3$ а. е. и $a_{0min} = 0.5$ а. е. доля планетезималей, выпавших на Венеру, по крайней мере в несколько раз превышала долю планетезималей, выпавших на Землю.

Отношения масс Меркурия и Марса к массе Земли равны 0.055 и 0.107, соответственно. Отношение p_{Ma0}/p_E находилось в диапазоне от 0.0535 до 0.214 (т.е. отличалось менее, чем вдвое, от от-

ношения масс Марса и Земли) в ряде вариантов при a_{0min} , равном 1.1 или 1.3 а. е., а отношение p_{Ma}/p_E было в этом же диапазоне в ряде вариантов при a_{0min} , равном 1.3 или 1.5 а. е. Значения p_{Ma} и p_{Ma0} были максимальны при $a_{0min} = 1.3$ а. е. То есть на конечных стадиях формирования планет планетезимали, первоначально находившиеся на расстоянии 1.1–2.0 а. е. от Солнца, могли входить в состав Земли и Марса в отношении, не сильно отличавшемся от отношения масс этих планет.

Отношение p_{Me}/p_E было близко к 100 при $a_{0min} = 0.3$ а. е., причем p_{Me} приблизительно равнялось 0.5 при $a_{0min} = 0.3$ а. е., $e_0 = 0.05$ и $T = 5$ млн лет, и было почти таким же при $T = 20$ млн лет. При $a_{0min} \geq 0.5$ а. е. значение p_{Me}/p_E было существенно меньше, чем при $a_{0min} = 0.3$ а. е. При $a_{0min} \geq 0.7$ а. е. в ряде вариантов значения p_{Me}/p_E и p_{Me0}/p_E находились в диапазоне 0.027–0.11 (т.е. в диапазоне от 0.5 до 2 от отношения масс Меркурия и Земли). Однако, как отмечалось в предыдущем разделе, до формирования крупных зародышей планет Меркурий и Марс аккумулировали в основном только вещество из окрестностей их орбит. Результаты расчетов свидетельствуют в пользу вхождения в планеты земной группы и в Луну на конечных стадиях их аккумуляции вещества, первоначально располагавшегося около орбит других планет.

ВЫПАДЕНИЕ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ НА СОЛНЦЕ, ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ И ВЫБРОС ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ НА ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ

Некоторые планетезимали, в основном первоначально находившиеся на расстоянии от 0.3 до 0.5 а. е. от Солнца, выпадали на Солнце. В серии *MeS₀₁* расчетов вероятность p_{Sun} выпадения планетезимали на Солнце равнялась примерно 0.03 при $T = 5$ млн лет и $a_{0min} = 0.3$ а. е. При больших значениях a_{0min} в этой серии расчетов значения p_{Sun} были меньше.

Для планетезималей с $a_{0min} = 0.3$ а. е. в серии *MeN₀₃* расчетов значение p_{Sun} равнялось 0.04, 0.12 и 0.21 при T , равном 5, 10 и 20 млн лет соответственно. Причем, при $T \geq 10$ млн лет и $a_{0min} = 0.3$ а. е. вероятность столкновения планетезимали с Солнцем превышала суммарную вероятность столкновений этой планетезимали со всеми зародышами планет. Для начальных планетезималей, более удаленных от Солнца, вероятность p_{Sun} столкновения планетезимали с Солнцем была меньше. В частности, при $T = 20$ млн лет в серии *MeN₀₃* расчетов значения p_{Sun} равнялись 0.056, 0.024, 0.004 и 0.004 для значений a_{0min} , равных 0.5, 0.9, 1.1 и 1.5 а. е. соответственно.

При современных массах планет (серия *MeN* расчетов) и T , равном 20 млн лет, для всех рассмотренных значений $a_{0\min}$ значения p_{Sun} превышали 0.1, причем кроме двух вариантов расчетов они были не меньше 0.2. Однако в ряде вариантов при таком T вероятности столкновений планетезималей с планетами превышали 1. Если в рассматриваемой модели удалять планетезимали, столкнувшиеся с планетами и Солнцем, то в вариантах *MeN* при $e_0 = 0.05$ за 5 млн лет около 12% планетезималей, первоначально находившихся в зоне с $a_{0\min} = 0.3$ а. е., столкнулись бы с Солнцем, а около 70% остальных планетезималей выпали бы на Меркурий и Венеру. На основании расчетов для зародышей планет можно ожидать, что не менее 10% планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от Солнца, меньшем 0.5 а. е., могло выпасть на Солнце. При $e_0 = 0.3$, $a_{0\min} = 0.3$ а. е. и $T = 20$ млн лет значение $p_{\text{Sun}} = 0.5$ превышало сумму вероятностей столкновений планетезимали с планетами. То есть при увеличении эксцентриситетов орбит планетезималей (например, из-за взаимного гравитационного влияния и влияния тел, залетавших в эту зону с больших расстояний от Солнца) вероятность столкновения планетезимали с Солнцем могла в несколько раз превышать 0.1. Сравнительно быстрое вычерпывание зародышами планет планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.3 до 0.5 а. е. от Солнца, в рассмотренных вариантах происходило, когда массы зародышей приближались к современным массам планет.

В зоне с $a_{0\min} = 0.5$ а. е. при $e_0 = 0.05$ за примерно 5 млн лет большая часть планетезималей выпала бы на Венеру и Землю (примерно в отношении 6 к 1) прежде, чем появилась бы заметная доля планетезималей, выпадавших на Солнце. Для $a_{0\min} = 0.5$ а. е. и $e_0 = 0.3$ аналогичное выпадение большей части планетезималей на Венеру и Землю произошло бы при $p_{\text{Sun}} \approx 0.1$. При $a_{0\min} = 0.7$ а. е. и $a_{0\min} = 0.9$ а. е. значение p_{Sun} не превысило бы 0.04 к тому времени, когда $p_E + p_V$ достигло 1. В случае $a_{0\min} = 1.1$ а. е., $e_0 = 0.05$ и $T = 20$ млн лет значение p_{Sun} было около 0.1, а $p_E + p_V \approx 1$. При $a_{0\min} = 1.1$ а. е., $e_0 = 0.3$ и $T = 50$ млн лет только около 0.25 начальных планетезималей выпало бы на планеты, около половины планетезималей столкнулись бы с Солнцем, а 0.09 всех начальных планетезималей было бы выброшено на гиперболические орбиты. При $a_{0\min} = 1.3$ а. е., $e_0 = 0.05$ и $T = 20$ млн лет значение p_{Sun} было около 0.2–0.25, а $p_E + p_V + p_{\text{Sun}} \approx 1$. Для $a_{0\min} = 1.3$ а. е., $e_0 = 0.3$ и $T = 20$ млн лет значение p_{Sun} находилось в диапазоне 0.3–0.35, а $p_E + p_V$ составляло около 0.3–0.45 (разброс значений для двух вариантов расчетов), т.е. большинство начальных планетезималей вы-

пало бы на планеты и Солнце за время немногим более 20 млн лет. Суммируя приведенные выше результаты, можем ожидать, что доля планетезималей, выпавших на Солнце, могла превышать 10% для их начальных расстояний от Солнца в диапазонах 0.3–0.5 и 1.1–2.0 а. е.

Доля планетезималей, выброшенных на гиперболические орбиты, не превышала 10%. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся в зоне питания планет земной группы, с Юпитером составляла не более нескольких процентов от вероятности ее столкновения с Землей (см. строки p_J/p_{E01} , p_J/p_{E03} и p_J/p_E в табл. 2–4), а вероятности столкновений планетезималей с Сатурном (строка p_S/p_E в табл. 4) были в среднем на порядок меньше, чем с Юпитером.

ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ С ЗАРОДЫШЕМ ЛУНЫ

Проведенные Ипатовым (2018) исследования свидетельствуют в пользу развиваемой рядом ученых модели мегаимпактов, согласно которой зародыши Земли и Луны росли при многочисленных столкновениях планетезималей с этими зародышами, причем основной прирост массы зародыша Луны происходил за счет вещества, выброшенного с зародыша Земли. В отличие от других работ, посвященных этой модели (и обсуждаемых в (Ипатов, 2018)), мною считалось, что зародыши Земли и Луны образовались в результате сжатия общего разреженного сгущения. В настоящем разделе обсуждается отношение вероятностей столкновений планетезималей с зародышами Земли и Луны. Из-за меньшего гравитационного поля зародыша, при высокоскоростных столкновениях с планетезималами зародыш Луны может терять гораздо большую массу, чем зародыш Земли. Результаты столкновений планетезималей с зародышами ниже не рассматриваются и могут быть темой отдельных исследований.

При сравнении роста двух небесных тел прирост массы тела пропорционален квадрату эффективного радиуса r_{ef} (площади круга с радиусом, равным r_{ef}). Эффективный радиус r_{ef} — это величина прицельной дальности, при которой планета (небесное тело) достигается. Он вычисляется по формуле

$$r_{\text{ef}} = r \left(1 + (v_{\text{par}}/v_{\text{rel}})^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где v_{par} — параболическая скорость на поверхности планеты радиуса r , а v_{rel} — относительная скорость на бесконечности (Охочимский, 1968, стр. 36–37). Если $v_{\text{rel}} > v_{\text{par}}$ (например, для комет, выпадающих на Землю с сильно эксцентричных орбит), то r_{ef} близко к r . В этом случае отношение вероятностей столкновений двух небесных тел близко к $(m_r/\rho_{\text{rel}})^{2/3}$, где m_r — отношение масс тел,

а ρ_{rel} – отношение их плотностей. Для Земли и Луны $m_r/\rho_{rel} \approx 49.2$ и $(m_r/\rho_{rel})^{2/3} \approx 13.4$. Если плотности небесных тел одинаковы ($\rho_{rel} = 1$), а массы отличаются в 10 раз, то $(m_r/\rho_{rel})^{2/3} \approx 10^{2/3} \approx 4.64$. При $\rho_{rel} = 1$ и отношении масс небесных тел, равном 0.3, имеем $(m_r/\rho_{rel})^{2/3} \approx 3.33^{2/3} \approx 2.23$.

Если относительные скорости v_{rel} малы и $(v_{par}/v_{rel})^2$ гораздо больше 1, то r_{ef} близко к $r(v_{par}/v_{rel})$, где $v_{par} = (2Gm/r)^{1/2}$, m – масса планеты радиуса r . Тогда r_{ef} близко к $r(v_{par}/v_{rel}) = r(2Gm/r)^{1/2}/v_{rel} = (8G\rho/3)^{1/2}r^2/v_{rel}$, где $m = (4/3)\pi r^3\rho$, ρ – плотность планеты. В этом случае при одинаковых значениях v_r отношение квадратов r_{ef} для масс и плотностей зародышей Земли и Луны равно $m_r^{4/3}\rho_{rel}^{-1/3} \approx 297$.

На основе вероятностей всех столкновений планетезималей с Землей и Луной или с их зародышами за время T вычислялось отношение вероятностей для компонентов этой спутниковой системы. Если массы зародышей планет земной группы и Луны были в 10 раз меньше современных масс этих планет и Луны (серия MeS_{01} расчетов), то значения p_{E01}/p_{M01} были в диапазоне 15–24 при $0.3 \leq a_{0min} \leq 1.1$ а. е. В табл. 2 для $a_{0min} = 1.3$ а. е. ненулевым было только очень маленькое значение p_{E01} при $T = 50$ млн лет. При $a_{0min} = 1.5$ а. е. отношение p_{E01}/p_{M01} лежало в диапазоне 14–20. Максимальные значения этого отношения, равные примерно 24, были получены при $a_{0min} = 0.9$ а. е., так как в этом случае планетезимали выпадали на зародыш Земли в основном с близких орбит с меньшими эксцентриситетами (и соответственно с меньшими относительными скоростями), чем планетезимали, пришедшие с краев зоны питания планет земной группы. Даже максимальные значения, близкие к 24, отличаются менее, чем в 2 раза, от значения 13.4, соответствующего отношению квадратов радиусов.

В табл. 2 приведены также значения отношения p_M/p_{M01} вероятностей столкновений планетезималей с Луной и с зародышем Луны с массой в 10 раз меньшей массы Луны, а также отношения p_E/p_{E01} вероятностей столкновений планетезимали с Землей и с зародышем Земли с массой, в 10 раз меньшей массы Земли. При вычислении этих вероятностей рассматривались массивы элементов орбит планетезималей и зародышей планет, полученные в серии MeS_{01} расчетов. Из-за того, что масса зародыша Земли больше массы зародыша Луны (и соответственно больше параболическая скорость на поверхности зародыша Земли), значения p_E/p_{E01} были больше p_M/p_{M01} , (в ряде вариантов почти в 2 раза), хотя для обоих отношений вероятностей соответствующие массы отличались в 10 раз.

В серии MeN_{03} расчетов отношение p_{E03}/p_{M03} было больше, чем отношение p_{E01}/p_{M01} в серии MeS_{01} , хотя в обоих вариантах соответствующие отношения масс и плотностей зародышей Земли и Луны были одинаковыми. В серии MeN_{03} расчетов массы зародышей были в 3 раза больше, чем в серии MeS_{01} . Максимальное значение p_{E03}/p_{M03} равнялось 54. Для сравнения максимальное значение p_{E01}/p_{M01} равнялось 24. Эти цифры характеризуют увеличение относительного роста зародыша Земли по сравнению с зародышем Луны за счет выпадения на них планетезималей (зародыш Луны мог также расти за счет вещества, выброшенного с зародыша Земли) при рассматриваемом увеличении масс этих зародышей. При $a_{0min} \geq 1.1$ а. е. значения p_{E03}/p_{M03} были меньше, чем при $a_{0min} \leq 0.9$ а. е. в связи с большими характеристическими эксцентриситетами орбит планетезималей, пересекавших орбиту Земли, для планетезималей с $a_0 \geq 1.1$ а. е. То есть отношение вероятностей выпадений на зародыши Земли и Луны было больше для планетезималей с $a_0 \leq 1.1$ а. е. Отношение p_M/p_{M03} в серии MeN_{03} расчетов не превышало 3 (для сравнения, отношение квадратов соответствующих радиусов равно 2.23). В этой серии расчетов отношение p_{E03}/p_{M03} было больше, чем отношение p_{E01}/p_{M01} в серии MeS_{01} , хотя в обеих сериях соответствующие отношения масс и плотностей зародышей Земли и Луны были одинаковыми.

При расчете эволюции орбит планетезималей при современных массах планет на основе полученных массивов элементов орбит планетезималей в ходе эволюции вычислялись также значения p_{E01} вероятности столкновения планетезимали с зародышем массы $0.1m_E$, находившемся на орбите Земли, и вероятности p_{M03} столкновения планетезимали с зародышем Луны с массой, равной 0.3 от массы Луны. Отношение p_E/p_{E01} в табл. 4 было в диапазоне от 5.23 до 9.12 (в том числе в диапазоне от 5.68 до 9.12 при $e_0 = 0.05$ и в диапазоне от 5.23 до 7.81 при $e_0 = 0.3$). При исследовании миграции планетезималей из зон питания Юпитера и Сатурна (Маров, Ипатов, 2018) было получено, что отношение вероятностей p_E/p_{E01} находилось в диапазоне от $5.5 \approx 10^{0.74}$ до $5.8 \approx 10^{0.76}$. Учитывая соотношение (1), из соотношения $p_E/p_{E01} = (r_{efE}/r_{efE01})^2$ (где r_{efE} и r_{efE01} – эффективные радиусы Земли и зародыша Земли с массой, равной $0.1m_E$ соответственно) для значения относительной скорости входа планетезимали в сферу действия Земли получаем $v_{rel} \approx 11.19 \times (1 - 10^{-4/3} \times (p_E/p_{E01}))^{1/2} / (10^{-2/3}(p_E/p_{E01}) - 1)^{1/2}$ км/с. Ниже в табл. 5 для нескольких значений p_E/p_{E01} представлены значения v_{rel} и v_{rel}/v_c (где v_{rel}/v_c – отношение

Таблица 5. Значения характерных относительных скоростей v_{rel} входа планетезималей в сферу действия Земли и отношения v_{rel}/v_c (где v_c — скорость движения Земли по своей гелиоцентрической орбите) для нескольких значений отношения p_E/p_{E01} вероятностей столкновений планетезималей с Землей и с зародышем Земли с массой в 10 раз меньшей массы Земли

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_E/p_{E01} | 9.12 | 9 | 8.5 | 8 | 7.5 | 7 | 6.5 | 6 | 5.5 | 5.23 |
| v_{rel} , км/с | 8.65 | 8.81 | 9.55 | 10.43 | 11.51 | 12.90 | 14.78 | 17.57 | 22.46 | 27.36 |
| v_{rel}/v_c | 0.290 | 0.296 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.43 | 0.50 | 0.59 | 0.75 | 0.92 |

v_{rel} к скорости $v_c \approx 29.78$ км/с движения Земли по своей гелиоцентрической орбите).

Из данных табл. 5 следует, что эксцентриситеты орбит планетезималей, выпадавших на Землю, в основном превышали 0.3. Для сравнения Nesvorný и др. (2017) получили средние скорости столкновений астероидов, первоначально имевших большие полуоси орбит в диапазоне от 1.6 до 3.3 а. е., с Землей равными от 21 до 23.5 км/с для ряда рассмотренных ими моделей.

В серии *MeN* расчетов отношение p_M/p_{M03} вероятностей столкновений планетезималей с Луной и зародышем Луны, масса которого составляла 0.3 от массы Луны, не превышало 5.1, т.е. почти не отличалось от отношения квадратов радиусов, равного 4.64. Отношение вероятностей p_E/p_M , соответствующее отношению массы планетезималей, которые выпадали на Землю, к массе планетезималей, которые сталкивались с Луной, в рассмотренных вариантах *MeN* расчетов варьировалось от 16 (для $a_{0min} = 1.1$ а. е., $e_0 = 0.3$ и $T = 50$ млн лет) до 43 (при $a_{0min} = 0.9$ а. е., $e_0 = 0.05$ и $T = 20$ млн лет). Это отношение p_E/p_M было в среднем немного меньше отношения p_{E03}/p_{M03} для серии *MeN*₀₃ расчетов. Это отличие, видимо, связано с большими (чем для зародышей) средними эксцентриситетами орбит планетезималей, пересекавших орбиту Земли, из-за больших масс планет, чем масс их зародышей. В (Маров, Ипатов, 2018) при исследовании миграции планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна отношение p_E/p_M вероятности столкновения планетезимали с Землей к вероятности ее столкновения с Луной находилось в пределах от 16 до 17.

Во всех рассмотренных вариантах расчетов отношение вероятности столкновения планетезимали с зародышем Земли (или с Землей) к вероятности ее столкновения с зародышем Луны (или с Луной) было меньше (иногда в несколько раз), чем 81 (отношение массы Земли к массе Луны и отношение масс зародышей Земли и Луны в рассмотренных вариантах расчетов). Если бы все столкновения планетезималей с Землей и Луной оканчивались объединением, то относительный рост Луны за счет таких столкновений был бы больше, чем Земли. При сравнении относительного роста зародышей Земли и Луны нужно использовать результаты моделирования столкно-

вений планетезималей с этими зародышами. Из-за меньшей (по сравнению с зародышем Земли) массы и гравитационного поля зародыша Луны некоторые высокоскоростные столкновения планетезималей с Луной могли приводить к выбросу вещества с поверхности зародыша Луны и даже к уменьшению его массы. Чтобы объяснить обедненный железом состав Луны, большая часть прироста ее массы должна была происходить за счет тел, выброшенных с поверхности Земли, при столкновениях планетезималей с Землей (Ипатов, 2018). В отличие от модели мегаимпакта (Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976; Canup, Asphaug, 2001; Canup, 2004; 2012; Canup и др., 2013; Cuk, Stewart, 2012; Cuk и др., 2016; Barr, 2016) Ипатов (2018) рассматривал большое число столкновений планетезималей с зародышами Земли и Луны, образовавшихся в результате сжатия общего разреженного сгущения.

Как и в состав Земли, в состав Луны вошло то же самое вещество почти из всей зоны питания планет земной группы. Обедненность Луны железом связана со значительным вкладом в ее состав вещества, выброшенного с поверхности зародыша Земли. Этот выброс должен был происходить в основном, когда у зародыша Земли уже сформировалось железное ядро.

Доля вещества, пришедшего из-за орбиты Юпитера, в составе Земли и Луны сравнительно невелика. При вероятности столкновения с Землей планетезимали из зоны питания Юпитера и Сатурна, не превышающей 10^{-5} (Маров, Ипатов, 2018; Ipatov, 2019) суммарная масса тел, выпавших на Землю, не превышает $0.001m_E$ для суммарной массы планетезималей в этой зоне, равной $100m_E$. Некоторое уменьшение этой оценки может быть вызвано тем, что значительная часть этих планетезималей выпадала на зародыш с массой, меньшей массы Земли. При вероятности столкновения с Землей планетезимали из зоны питания Урана и Нептуна, равной 10^{-6} (Ipatov, 2019) суммарная масса тел, выпавших на Землю, равна $0.0001m_E$ для общей массы планетезималей в этой зоне, равной $100m_E$. Выпадение планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши Земли и Луны происходило в основном в течение первых миллионов лет существования Солнечной системы, когда Земля и Луна еще форми-

ровались, и вещество этих планетезималей могло войти во внутренние зоны Земли и Луны, хотя при больших относительных скоростях столкновений и небольших массах зародышей значительная часть вещества этих планетезималей, особенно с зародыша Луны, могла выбрасываться после столкновений. Значительная часть тел из зон питания Урана и Нептуна, столкнувшихся с Землей и Луной, выпадала на уже почти сформировавшиеся Землю и Луну, а не на их небольшие зародыши.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Основываясь на расчетах для приведенных выше моделей и на результатах, представленных во введении, обсудим один из возможных процессов формирования планет земной группы. Рассмотрим предложенную еще Сафроновым (1969) модель формирования планет. Дополнительно к модели Сафронова (1969) рассмотрим предложенное Жарковым и Козенко (1990) формирование зародышей Урана и Нептуна около орбиты Сатурна и относительно плавную миграцию этих зародышей под влиянием их взаимодействий с планетезималиями на современные орбиты Урана и Нептуна (Ипатов, 1991; 1993а; 2000; Ipatov, 1991). По-моему, в рамках такой модели можно объяснить особенности формирования планет земной группы. Для такого объяснения не обязательно рассматривать миграцию Юпитера к орбите Марса, которая происходила в “модели большого поворота” (the Grand Tack model), и можно обойтись без резких изменений орбиты Юпитера при попадании планет-гигантов в резонанс в модели Ниццы (the Nice model).

Согласно (Chambers, 2006), зародыш Юпитера с массой $10m_E$ сформировался за время около 1 млн лет, а зародыш Земли с массой $0.1m_E$ сформировался за 0.1 млн лет. Достигнув массы, равной $10m_E$, зародыш Юпитера мог сравнительно быстро увеличить свою массу путем аккреции газа. Из моих оценок выше был сделан вывод о том, что за 1 млн лет массы зародышей Земли и Венеры могли увеличиться соответственно с $0.1m_E$ и $0.08m_E$ вдвое, т.е. масса зародыша Земли могла стать около $0.2m_E$. В это время тела из зоны питания Юпитера могли начать в перигелии проникать в зону питания планет земной группы. Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн лет. В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а. е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру.

Как показывают расчеты миграции планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна, ос-

новная масса планетезималей покидала эту зону за несколько миллионов лет. В (Маров, Ипатов, 2018) эволюция дисков планетезималей, соответствующих этой зоне, при рассмотрении гравитационного влияния Юпитера, Сатурна и планет земной группы заканчивалась за время, меньшее 4 млн лет. Проведенные расчеты (Ipatov, 2019) показывают, что в модели со всеми планетами времена эволюции орбит планетезималей могут быть гораздо больше, чем при отсутствии Урана и Нептуна. Однако основной вклад в вероятности столкновений планетезималей из зон питания Юпитера и Сатурна с зародышами планет земной группы в этих расчетах также приходился на первый миллион лет после формирования значительной массы Юпитера (которое могло произойти через 1–2 млн лет после начала формирования Солнечной системы). Отдельные планетезимали из зон питания Урана и Нептуна выпадали на Землю и через сотни миллионов лет, и даже могли остаться в Солнечной системе до настоящего времени. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели современных масс планет, и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог аккумулироваться во внутренние слои планет земной группы и Луны.

Как отмечается во введении, очистку астероидного пояса можно вполне объяснить гравитационным влиянием планетезималей, залетавших в этот пояс из зон питания Юпитера и Сатурна, и смещением резонансов из-за уменьшения большой полуоси орбиты Юпитера, выбрасывавшего планетезимали на гиперболические орбиты. Большие эксцентриситеты орбит Меркурия и Марса можно объяснить в частности гравитационным влиянием массивных планетезималей, залетавших к орбитам этих планет из зон питания Юпитера и Сатурна. Высокое содержание железа в ядре Меркурия обычно объясняют потерей большей части массы силикатной оболочки при высокоскоростных ударах. Отметим, что приводимые в настоящей статье расчеты указывают на то, что часть планетезималей из окрестности орбиты Меркурия проходила до столкновений с зародышем Меркурия сравнительно недалеко от Солнца и могла потерять какую-то часть силикатного состава при таких проходах.

Ипатов (2018) рассматривал модель, в которой зародыши Земли и Луны сформировались из общего разреженного сгущения с массой, большей $0.01m_E$. При столкновении двух сгущений, породивших это сгущение, образовавшееся сгущение приобрело угловой момент, достаточный для формирования большого спутника (зародыша Луны). Большой обзор публикаций по формированию сгущений приведен в работе (Ипатов,

2017), в которой рассматривается формирование спутниковых систем малых тел из разреженных сгущений. Формирование спутниковых систем малых тел из разреженных сгущений, получивших необходимый для этого угловой момент при их столкновениях, обсуждалось также в (Ipatov, 2010b). Рассматриваемые в (Ипатов, 2017; 2018) модели формирования спутниковых систем малых тел и системы Земля–Луна аналогичны.

Elkins-Tanton (2018) считает, что Марс вырос до примерно современных размеров за менее чем 5 млн лет. Оценки, приведенные в табл. 2–4, указывают, что для рассмотренной мною модели Марс рос медленнее, чем Земля и Венера, а отдельные планетезимали в его зоне питания могли оставаться и после 50 млн лет. Поэтому можно предположить, что путем сжатия сгущения мог образоваться достаточно крупный зародыш Марса (например, с массой, не меньшей $0.02m_E$), а планетезимали из зоны питания Юпитера и Сатурна способствовали более быстрому удалению планетезималей из зоны питания Марса. Можно предположить также формирование зародыша Меркурия с массой около $0.02m_E$ при сжатии сгущения.

В отличие от сгущения, породившего зародыши Земли и Луны, сгущение, породившее зародыш Марса, не имело большого углового момента и смогло при сжатии породить только небольшие спутники (Фобос и Деймос). Угловые моменты сгущений, породивших зародыши Меркурия и Венеры, были недостаточны даже для формирования малых спутников. Как отмечалось в (Ипатов, 2017; 2018), угловые моменты первоначальных сгущений, образовавшихся из протопланетного диска, были недостаточными для формирования спутниковой системы, а для получения углового момента сгущения, необходимого для образования спутниковой системы, это сгущение должно было столкнуться с другим близким по массе сгущением. Отношение массы зародыша планеты, образовавшегося при сжатии сгущения, к конечной массе планеты для Марса и Меркурия могло быть больше, чем для Земли.

Доля планетезималей, выпавших на Солнце, могла превышать 10% для их начальных расстояний от Солнца в диапазонах от 0.3 до 0.5 а. е. и от 1.1 до 2.0 а. е. Менее 10% планетезималей из зоны питания планет земной группы выбрасывалось на гиперболические орбиты, а отношение числа планетезималей, столкнувшихся с Юпитером или Сатурном, к числу тел, столкнувшихся с Землей, не превышало нескольких процентов.

При массах зародышей планет, в 10 раз меньших масс современных планет земной группы, эти зародыши аккумулировали планетезимали, большие полуоси которых отличались от большой полуоси зародыша планеты не больше, чем

на 0.1 а. е. При массах зародышей планет, меньших масс современных планет земной группы в 3 раза, вероятности столкновений планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а. е. от Солнца, с Землей и Венерой отличались для этих планет не более, чем вдвое, при рассматриваемом интервале времени $T > 2$ млн лет. Для других рассмотренных начальных расстояний планетезималей от Солнца такой близости источников планетезималей, выпадавших на такие зародыши, не было, хотя каждый из зародышей мог аккумулировать планетезимали из разных областей внутри зоны питания планет земной группы.

Планетезимали, приходившие из-за орбиты Юпитера в зону питания планет земной группы, увеличивали эксцентриситеты и наклонения орбит планетезималей в этой зоне питания. Эта раскачка орбит планетезималей в зоне питания планет земной группы происходила в основном, когда массы зародышей этих планет еще не достигли масс современных планет, так как она более эффективна для меньших масс зародышей. Взаимное гравитационное влияние планетезималей в зоне питания планет земной группы также могло существенно увеличивать рост эксцентриситетов их орбит и перемешивание вещества в этой зоне по сравнению с расчетами, приведенными в табл. 2–4.

ВЫВОДЫ

В отличие от проводившегося ранее моделирования эволюции дисков тел, объединявшихся при столкновениях, при изучении аккумуляции планет земной группы использовались данные других расчетов. Проведены расчеты миграции планетезималей из зоны питания планет земной группы, разделенной в зависимости от расстояния от Солнца на семь областей. Учитывалось гравитационное влияние всех планет. В ряде вариантов расчетов вместо планет земной группы рассматривались зародыши этих планет с массами, составлявшими 0.1 или 0.3 от масс современных планет. При расчетах планетезимали и планеты рассматривались как материальные точки и их столкновения не моделировались. Полученные при расчетах массивы элементов орбит мигрировавших планетезималей с шагом в 500 лет использовались при вычислении вероятностей их столкновений с планетами, с Луной, или с их зародышами. Такой подход позволяет для ряда стадий эволюции более точно вычислять вероятности столкновений планетезималей с зародышами планет. При изучении состава зародышей планет из планетезималей, первоначально находившихся на различных удалениях от Солнца, рассматривались более узкие, чем ранее, зоны, из которых приходили планетезимали, и изучались изме-

нения состава зародышей планет со временем, а не только конечный состав планет.

Зародыши планет земной группы, массы которых были порядка одной десятой от масс современных планет или меньше, аккумуляровали в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. Внутренние слои планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты этой планеты. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели масс современных планет и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог попадать во внутренние слои планет земной группы и влиять на их состав.

При массах зародышей Земли и Венеры порядка трети масс современных планет вероятности выпадений планетезималей, сформировавшихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а. е. от Солнца, на эти зародыши отличались не более чем вдвое.

В рассмотренной модели, в которой тела объединялись с планетами при любых столкновениях, Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн лет. В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а. е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру. Учет выброса вещества при столкновениях тел с планетами может увеличить время аккумуляции планет.

Суммарная масса планетезималей, мигрировавших из каждой из частей области, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а. е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в два раза. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулялировать одинаковый для этих планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы. На конечных стадиях формирования планет земной группы планетезимали, первоначально находившиеся на расстоянии от 1.1 до 2.0 а. е. от Солнца, могли входить в состав Земли и Марса в отношении, не сильно отличавшемся от отношения масс этих планет.

Формирование зародыша Марса с начальной массой, в несколько раз меньшей массы Марса, в результате сжатия разреженного сгущения может объяснить относительно быстрый рост основной массы Марса. Можно предположить также формирование зародыша Меркурия с массой около 0.02 от массы Земли при сжатии сгущения. Ранее предположения о таких массах зародышей Марса и Меркурия, образовавшихся при сжатии сгущений, не делались.

Доля планетезималей, выпавших на Солнце, могла превышать 10% для начальных расстояний планетезималей от Солнца в диапазонах от 0.3 до

0.5 а. е. и от 1.1 до 2.0 а. е. Доля планетезималей, выброшенных из зоны питания планет земной группы на гиперболические орбиты, не превышала 10%. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся в зоне питания планет земной группы, с Юпитером составляла не более нескольких процентов от вероятности ее столкновения с Землей, а вероятность столкновений планетезималей с Сатурном были в среднем на порядок меньше, чем с Юпитером.

Приведенные выше оценки формирования зародышей планет земной группы основывались на расчетах для модели, учитывающей гравитационное влияние планет-гигантов и зародышей планет земной группы. Учет взаимного гравитационного влияния планетезималей может увеличить перемешивание вещества в зоне питания планет земной группы, а также вероятность столкновений планетезималей с Солнцем и их выброс на гиперболические орбиты.

При отношении масс зародышей Земли и Луны, равном 81 (отношению масс Земли и Луны), отношение вероятностей выпадений планетезималей на зародыши Земли и Луны в рассмотренных вариантах не превышало 54 и было максимально при массах зародышей примерно в три раза меньших современных масс этих небесных тел.

Особенности формирования планет земной группы можно объяснить даже при относительно плавном уменьшении большой полуоси орбиты Юпитера за счет выброса им планетезималей на гиперболические орбиты, без рассмотрения миграции Юпитера к орбите Марса и обратно (“модель большого поворота”, the Grand Tack model) и без резких изменений орбит планет-гигантов, попадавших в резонанс, в модели Ниццы (the Nice model). В последние годы формирование планет земной группы рассматривалось в основном в рамках этих двух моделей.

Автор выражает глубокую признательность А.Б. Макалкину и И.Н. Зиглиной за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Исследования аккумуляции Венеры, Марса и Меркурия были частично поддержаны Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 12. Исследования формирования системы Земля—Луна были поддержаны грантом Российского научного фонда № 17-17-01279.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витязев А.В.* Развитие теории образования планет // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 8. С. 52–58.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Предельные массы, расстояния и времена аккумуляции планет земной группы // Астрон. журн. 1978. Т. 55. № 1. С. 107–112.

- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Галимов Э.М.* Анализ изотопных систем (Hf–W, Rb–Sr, J–Pu–Xe, U–Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: КРАСАНД, 2013. С. 47–59.
- Гуревич Л.Э., Лебединский А.И.* Об образовании планет // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1950. Т. 11. № 6. С. 765–799.
- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: “Едиториал УРСС”, 2004. 264 с.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение планет-гигантов // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. С. 627–649. (*Zharkov V.N.* The internal structure of the giant planets // Sol. Syst. Res. 1991. V. 25. № 6. P. 465).
- Жарков В.Н.* От Юпитера к Марсу // Современные проблемы механики и физики космоса / Ред. Авдусевский В.С., Колесниченко А.В. М.: Физматлит. Наука, 2003. С. 369–380.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО “Наука и образование”, 2013. 414 с.
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В.* Сравнительная планетология в ИФЗ РАН // Физика Земли. 2019. № 1. С. 61–77.
- Жарков В.Н., Козенко А.В.* О роли Юпитера в формировании планет-гигантов // Письма в Астрон. журн. 1990. Т. 16. № 2. С. 169–173.
- Зиглина И.Н.* Стохастическое поведение орбит планет в процессе их аккумуляции // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. № 6. С. 703–721. (*Ziglina I.N.* Stochastic behavior of the orbits of planets during their accretion // Sol. Syst. Res. 1991. V. 25. № 6. P. 526).
- Зиглина И.Н.* Гравитационная релаксация скоростей допланетных тел // Астрон. вестн. 1995. Т. 29. № 1. С. 3–10. (*Ziglina I.N.* Gravitational relaxation of velocities of planetesimals // Sol. Syst. Res. 1995. V. 29. № 1. P. 1–8).
- Зиглина И.Н., Макалкин А.Б.* Гравитационная неустойчивость в пылевом слое протопланетного диска: взаимодействие твердых частиц с турбулентным газом в слое // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 6. С. 431–449. (*Ziglina I.N., Makalkin A.B.* Gravitational instability in the layer of a protoplanetary disk: Interaction of solid particles with turbulent gas in the layer // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. P. 408–425).
- Зиглина И.Н., Сафронов В.С.* Осреднение эксцентриситетов орбит тел, объединяющихся в планету // Астрон. журн. 1976. Т. 53. № 2. С. 429–435.
- Ипатов С.И.* Эволюция плоского кольца гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях // Препр. Ин-та прикладной математики АН СССР. 1978. № 101. 66 с.
- Ипатов С.И.* Моделирование на ЭВМ эволюции плоских колец гравитирующих частиц, движущихся вокруг Солнца // Астрон. журн. 1981. Т. 58. № 5. С. 1085–1094.
- Ипатов С.И.* Численные исследования аккумуляции планет земной группы // Препр. Ин-та прикладной математики АН СССР. 1982. № 144. 28 с.
- Ипатов С.И.* Твердотельная аккумуляция планет земной группы // Астрон. вестн. 1987. Т. 21. № 3. С. 207–215. (*Ipatov S.I.* Solid body accumulation of terrestrial planets // Sol. Syst. Res. 1987. V. 21. № 3. P. 129–135).
- Ипатов С.И.* Времена эволюции дисков планетезималей // Астрон. журн. 1988. Т. 65. № 5. С. 1075–1085.
- Ипатов С.И.* Эволюция орбит растущих зародышей планет-гигантов, первоначально двигавшихся по сильно эксцентричным орбитам // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. № 3. С. 269–281.
- Ипатов С.И.* Миграция тел в процессе аккумуляции планет // Астрон. вестн. 1993а. Т. 27. № 1. С. 83–101. (*Ipatov S.I.* Migration of bodies in the accretion of planets // Sol. Syst. Res. 1993а. V. 27. № 1. P. 65–79).
- Ипатов С.И.* Методы выбора пар контактирующих объектов при исследовании эволюции дискретных систем с бинарными взаимодействиями // Математическое моделирование. 1993б. Т. 5. № 1. С. 35–59.
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС. 2000. 320 с. (http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_29239, <http://booksee.org/book/1472075>).
- Ипатов С.И.* Формирование транснептуновых спутниковых систем на стадии сгущений // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 4. С. 321–343. (*Ipatov S.I.* Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of condensations // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 4. P. 294–314, <https://arxiv.org/abs/1801.05217>).
- Ипатов С.И.* Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 411–426. (*Ipatov S.I.* Formation of embryos of the Earth and the Moon from the common rarefied condensation and the subsequent growth // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 401–416).
- Козлов Н.Н., Энеев Т.М.* Численное моделирование процесса образования планет из протопланетного облака // Препр. Ин-та прикладной математики АН СССР. 1977. № 134.
- Левин Б.Ю.* Происхождение Земли и планет. М.: Наука, 1964. 116 с.
- Левин Б.Ю.* Некоторые вопросы аккумуляции планет // Письма в Астрон. журн. 1978. Т. 4. № 2. С. 102–107.
- 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. (*Makalkin A.B., Artyushkova M.E.* On the formation of planetesimals. Radial contraction of the dust layer interacting with the protoplanetary disk // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 6. P. 491–526).
- Маров М.Я.* Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. М.: Физматлит, 2017. 536 с.
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 402–410. (*Marov M.Ya., Ipatov S.I.* Delivery of water and volatiles to the terrestrial plan-

- ets and the Moon // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 5. P. 392–400).
- Охоцимский Д.Е. Динамика космических полетов. Изд-во МГУ, 1968. 158 с.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В. Массы крупнейших тел и дисперсия скоростей при аккумуляции планет // *Письма в Астрон. журн.* 1979. Т. 5. № 1. С. 54–59.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В. Эволюция эксцентриситетов орбит планет в процессе их формирования // *Астрон. журн.* 1980. Т. 57. № 4. С. 799–811.
- Рузмайкина Т.В., Маева С.В. Исследование процесса формирования протопланетного диска // *Астрон. вестн.* 1986. Т. 20. № 3. С. 212–227.
- Сафронов В.С. О росте планет в протопланетном облаке // *Астрон. журн.* 1954. Т. 31. № 6. С. 499–510.
- Сафронов В.С. О росте планет земной группы // *Вопросы космогонии.* 1958. Т. 6. С. 63–77.
- Сафронов В.С. Аккумуляция планет земной группы // *Вопросы космогонии.* 1960. Т. 7. С. 59–65.
- Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с. (English translation: *Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets.* NASA TTF-677, 1972, 212 p.).
- Сафронов В.С. Длительность процесса формирования Земли и планет и ее роль в их геохимической эволюции Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 624–629.
- Сафронов В.С., Витязев А.В. Происхождение солнечной системы // *Итоги науки и техники. Сер. астрон.* М.: ВИНТИ, 1983. Т. 24. С. 5–93.
- Сафронов В.С., Зиглина И.Н. Происхождение пояса астероидов // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25. № 2. С. 190–199. (Safronov V.S., Ziglina I.N. Origin of the Asteroid Belt // *Sol. Syst. Res.* 1991. V. 25. № 2. P. 139).
- Шмидт О.Ю. Астрономический возраст Земли // *Докл. АН СССР.* 1945. Т. 46. № 9. С. 392–395.
- Энеев Т.М., Козлов Н.Н. О новой модели процесса аккумуляции планетной системы. Результаты численных экспериментов // *Письма в Астрон. журн.* 1979. Т. 5. № 9. С. 470–476.
- Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса планетных систем. I. Численные эксперименты // *Астрон. вестн.* 1981. Т. 15. № 2. С. 80–94. (Eneev T.M., Kozlov N.N. A model of the accumulation process in the formation of planetary systems. I – Numerical experiments // *Sol. Syst. Res.* 1981. V. 15. № 2. P. 59–70.).
- Barr A.C. On the origin of Earth’s Moon // *J. Geophys. Res. Planets.* 2016. V. 121. P. 1573–1601 (<https://arxiv.org/pdf/1608.08959.pdf>).
- Beauge C., Aarseth S.J. N-body simulations of planetary formation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1990. V. 245. № 1. P. 30–39.
- Bouvier L.C., Costa M.M., Connelly J.N., Jensen N.K., Wielandt D., Storey M., Nemchin A.A., Whitehouse M.J., Snape J.F., Bellucci J.J., Moynier F., Agranier A., Gueguen B., Schönbächler M., Bizzarro M. Evidence for extremely rapid magma ocean crystallization and crust formation on Mars // *Nature.* 2018. V. 558. P. 586–589.
- Bulirsch R., Stoer J. Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods // *Numerische Mathematik.* 1966. V. 8. № 1. P. 1–13.
- Cameron A.G.W., Pine M.R. Numerical models of the primitive solar nebula // *Icarus.* 1973. V. 18. № 3. P. 377–406.
- Cameron A.G.W., Ward W.R. The origin of the Moon // *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1976. V. 7. P. 120–122 (abstract).
- Canup R.M. Simulations of a late lunar-forming impact // *Icarus.* 2004. V. 168. № 2. P. 433–456.
- Canup R.M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // *Science.* 2012. V. 338. P. 1052–1055.
- Canup R.M., Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth’s formation // *Nature.* 2001. V. 412. № 6848. P. 708–712.
- Canup R.M., Barr A.C., Crawford D.A. Lunar-forming impacts: High-resolution SPH and AMR-CTH simulations // *Icarus.* 2013. V. 222. P. 200–219.
- Chambers J.E. Making more terrestrial planets // *Icarus.* 2001. V. 152. P. 205–224.
- Chambers J. A semi-analytic model for oligarchic growth // *Icarus.* 2006. V. 180. P. 496–513.
- Chambers J. Late-stage planetary accretion including hit-and-run collisions and fragmentation // *Icarus.* 2013. V. 224. P. 43–56.
- Chambers J.E., Wetherill G.W. Making the terrestrial planets: N-body integrations of planetary embryos in three dimensions // *Icarus.* 1998. V. 136. P. 304–327.
- Clement M.S., Kaib N.A., Raymond S.N., Walsh K.J. Mars’ growth stunted by an early giant planet instability // *Icarus.* 2018. V. 311. P. 340–356.
- Clement M.S., Kaib N.A., Raymond S.N., Chambers J.E., Walsh K.J. The early instability scenario: Terrestrial planet formation during the giant planet instability, and the effect of collisional fragmentation // *Icarus.* 2019. V. 321. P. 778–790.
- Cox L.P. Numerical simulation of the final stages of terrestrial planet formation // *PhD Thesis, MIT.* 1978. Cambridge, MA.
- Cox L.P., Lewis J.S. Numerical simulation of the final stages of terrestrial planet formation // *Icarus.* 1980. V. 44. № 3. P. 706–721.
- Cox L.P., Lewis J.S., Lecar M. A model for close encounters in the planetary problem // *Icarus.* 1978. V. 34. № 2. P. 415–427.
- Cuk M., Stewart S.T. Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning // *Science.* 2012. V. 338. P. 1047–1052.
- Cuk M., Hamilton D.P., Lock S.J., Stewart S.T. Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular momentum Earth // *Nature.* 2016. V. 539. P. 402–406.
- D’Angelo G., Lissauer J.J. Formation of giant planets // *Handbook of Exoplanets / Eds. Deeg H.J., Belmonte J.A.* Springer Int. Publ. AG, part of Springer Nature, 2018, id. 140 (<https://arxiv.org/abs/1806.05649>)
- Dole S.H. Computer simulation of the formation of planetary systems // *Icarus.* 1970. V. 13. № 3. P. 494–508.
- Drolshagena G., Koschnya D., Drolshagenc S., Kretschmer J., Poppec B. Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 143. P. 21–27.

- Elkins-Tanton L.T.* Linked magma ocean solidification and atmospheric growth for Earth and Mars // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 271. P. 181–191.
- Elkins-Tanton L.T.* Rapid formation of Mars // *Nature*. 2018. V. 558. P. 522–523.
- Eneev T.M., Kozlov N.N.* The problems of simulation of planetary systems accumulation processes // *Adv. Space Res.* 1981. V.1. P. 201–215.
- Fernandez J.A., Ip W.-H.* Some dynamical aspects of the accretion of Uranus and Neptune: The exchange of angular momentum with planetesimals // *Icarus*. 1984. V. 58. № 1. P. 109–120.
- Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K., Morbidelli A.* Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets // *Nature*. 2005. V. 435. № 7041. P. 466–469.
- Greenberg R., Bottke W., Carusi A., Valsecchi G.B.* Planetary accretion rates: Analytical derivation // *Icarus*. 1991. V. 94. № 1. P. 98–111.
- Gudkova T.V., Zharkov V.N.* Models of Jupiter and Saturn after Galileo mission // *Planet. and Space Sci.* 1999. V. 47. № 10–11. P. 1201–1210.
- Hansen B.M.S.* Formation of the terrestrial planets from a narrow annulus // *Astrophys. J.* 2009. V. 703. P. 131–1140.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
- Hoffmann V., Grimm S.L., Moore B., Stadel J.* Stochasticity and predictability in terrestrial planet formation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 465. P. 2170–2188.
- Ipatov S.I.* Possible migration of the giant planets embryos // 22nd Lunar and Planet. Sci. Conf. 1991. P. 607–608.
- Ipatov S.I.* Migration of bodies during the accumulation of terrestrial planets // 23rd Lunar and Planet. Sci. Conf. 1992. P. 567–568.
- Ipatov S.I.* Collision probabilities of migrating small bodies and dust particles with planets // *Proc. Intern. Astron. Union, Symp. S263. “Icy bodies in the Solar System” (Rio de Janeiro, Brazil, 3–7 August, 2009)* / Eds Fernandez J.A., Lazzaro D., Prialnik D., Schulz R. Cambridge Univ. Press, 2010a. P. 41–44. (<http://arxiv.org/abs/0910.3017>).
- Ipatov S.I.* The angular momentum of colliding rarefied preplanetesimals and the formation of binaries // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010b. V. 403. P. 405–414. (<http://arxiv.org/abs/0904.3529>).
- Ipatov S.I.* Migration of planetesimals to the Earth and the Moon from different distances from the Sun // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2019. #2594 (abstract). <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/2594.pdf>
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets // *Earth, Moon, and Planets*. 2003. V. 92. P. 89–98. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // *Adv. Space Research*. 2004a. V. 33. № 9. P. 1524–1533. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-Earth space // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2004b. V. 1017. P. 46–65. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0308448>).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of small bodies and dust to near-Earth space // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. № 1. P. 126–137. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0411004>).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of comets to the terrestrial planets // *Proc. of the IAU Symp. № 236 “Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk” (14–18 August 2006, Prague, Czech Republic)* / Eds. Milani A., Valsecchi G.B., Vokrouhlický D. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 2007. P. 55–64. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0609721>).
- 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. A31. 20 p.
- Jacobson S.A., Morbidelli A.* Lunar and terrestrial planet formation in the Grand Tack scenario // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2014. V. 372. 20130174.
- Kleine T., Munker C., Mezger K., Palme H.* Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf–W chronometry // *Nature*. 2002. V. 418. P. 952–955.
- Kokubo E., Genda H.* Formation of terrestrial planets from protoplanets under a realistic accretion condition // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 714. P. L21–L25.
- Kokubo E., Ida S.* Oligarchic growth of protoplanets // *Icarus*. 1998. V. 131. P. 171–178.
- Kokubo E., Ida S.* Formation of protoplanets from planetesimals in the solar nebular // *Icarus*. 2000. V. 143. P. 15–27.
- Lecar M., Aarseth S.J.* A numerical simulation of the formation of the terrestrial planets // *Astrophys. J.* 1986. V. 305. № 1. P. 564–576.
- Levin B.J.* Relative velocities of planetesimals and the early accumulation of planets // *The Moon and the planets*. 1978. V. 19. № 2. P. 289–296.
- Levison H.F., Duncan M.J.* The long-term dynamical behavior of short-period comets // *Icarus*. 1994. V. 108. № 1. P. 18–36.
- Lissauer J.J.* Timescales for planetary accretion and the structure of the protoplanetary disk // *Icarus*. 1987. V. 69. № 2. P. 249–265.
- Lissauer J.J.* Planet formation // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 1993. V. 31. P. 129–174.
- Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. 1220–1247.
- Lykawka P.S., Ito T.* Terrestrial planet formation: Constraining the formation of Mercury // *Astrophys. J.* 2017. V. 838. A106. 10 p.
- Lyra W., Johansen A., Klahr H., Piskunov N.* Embryos grown in the dead zone. Assembling the first protoplanetary cores in low mass self-gravitating circumstellar disks of gas and solids // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 491. P. L41–L44.
- Mezger K., Debaille V., Kleine T.* Core formation and mantle differentiation on Mars // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 174. P. 27–48.
- Morbidelli A., Levison H.F., Tsiganis K., Gomes R.* Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System // *Nature*. 2005. V. 435. № 7041. P. 462–465.
- Morbidelli A., Brasser R., Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K.* Evidence from the asteroid belt for a violent past evo-

- lution of Jupiter's orbit // *Astron. J.* 2010. V. 140. P. 1391–1401.
- Morbidelli A., Lunine J.I., O'Brien D.P., Raymond S.N., Walsh K. J.* Building terrestrial planets // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2012. V. 40. № 1. P. 251–275. (<http://arxiv.org/abs/arXiv:1208.4694>).
- Morishima R., Stadel J., Moore B.* From planetesimals to terrestrial planets: N-body simulations including the effects of nebular gas and giant planets // *Icarus.* 2010. V. 207. P. 517–535.
- Nesvorný D., Roig F., Bottke W.F.* Modeling the historical flux of planetary impactors // *Astron. J.* 2017. V. 153. № 3. A103. 22 p.
- Nimmo F., Kleine T.* How rapidly did Mars accrete? Uncertainties in the Hf–W timing of core formation // *Icarus.* 2007. V. 191. № 2. P. 497–504.
- O'Brien D.P., Morbidelli A., Levison H.F.* Terrestrial planet formation with strong dynamical friction // *Icarus.* 2006. V. 184. P. 39–58.
- O'Brien D.P., Walsh K.J., Morbidelli A., Raymond S.N., Mandell A.M.* Water delivery and giant impacts in the 'Grand Tack' scenario // *Icarus.* 2014. V. 239. P. 74–84.
- Ohtsuki K., Nakagawa Y., Nakazawa K.* Growth of the Earth in nebular gas // *Icarus.* 1988. V. 75. № 3. P. 552–565.
- Raymond S.N., Izidoro A.* The empty primordial asteroid belt // *Sci. Adv.* 2017. V. 3. № 9. P. e1701138.
- Raymond S.N., Quinn T., Lunine J.I.* Making other earths: dynamical simulations of terrestrial planet formation and water delivery // *Icarus.* 2004. V. 168. P. 1–17.
- Raymond S.N., Quinn T., Lunine J.I.* High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets. I. Terrestrial accretion and dynamics // *Icarus.* 2006. V. 183. P. 265–282.
- Raymond S.N., O'Brien D.P., Morbidelli A., Kaib N.A.* Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System // *Icarus.* 2009. V. 203. P. 644–662.
- Rubie D.C., Jacobson S.A., Morbidelli A., O'Brien D.P., Young E.D., de Vries J., Nimmo F., Palme H., Frost D.J.* Accretion and differentiation of the terrestrial planets with implications for the compositions of early-formed Solar System bodies and accretion of water // *Icarus.* 2015. V. 248. P. 89–108.
- Safronov V.S.* Kuiper prize lecture: Some problems in the formation of the planets // *Icarus.* 1991. V. 94. P. 260–271.
- Safronov V.S., Ruskol E.L., Ziglina I.N.* Accumulation of the earth and its initial state // *Precambrian Res.* 1986. V. 33. № 1–3. P. 1–10.
- Safronov V.S., Vitjazev A.V.* The origin and early evolution of the terrestrial planets // *Chemistry and Physics of Terrestrial Planets, also Advances in Physical Geochemistry.* V. 6 / Ed. Saxena S.H. Berlin Heidelberg N.Y.: Springer-Verlag, 1986. P. 1–29.
- Thommes E.W., Duncan M.J., Levison H.F.* The formation of Uranus and Neptune in the Jupiter-Saturn region of the solar system // *Nature.* 1999. V. 402. P. 635–638.
- Torbett M., Smoluchowski R.* Sweeping of the Jovian resonances and the evolution of the asteroids // *Icarus.* 1980. V. 44. № 3. P. 722–729.
- Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., Levison H.F.* Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System // *Nature.* 2005. V. 435. № 7041. P. 459–461.
- Walsh K.J., Morbidelli A., Raymond S.N., 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.
- Weidenschilling S.J.* A model for accretion of the terrestrial planets // *Icarus.* 1974. V. 22. № 4. P. 426–435.
- Weidenschilling S. J., Spaute D., Davis D.R., Marzari F., Ohtsuki K.* Accretional evolution of a planetesimals swarm // *Icarus.* 1997. V. 128. P. 429–455.
- Wetherill G.W.* Formation of the terrestrial planets // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 1980. V. 18. P. 77–113.
- Wetherill G.W.* Occurrence of giant impacts during the growth of the terrestrial planets // *Science.* 1985. V. 228. P. 877–879.
- Wetherill G.W.* Accumulation of Mercury from planetesimals // *Mercury* / Eds. Vilas F., Chapman C., Matthews M.S. Univ. Arizona Press, 1988a. P. 670–691.
- Wetherill G.W.* Formation of the Earth // *Origins and Extinctions* / Eds. Osterbrock D.O., Raven P.H. New Haven: Yale Univ. Press, 1988b. P. 43–82.
- Wetherill G.W.* Origin of the asteroid belt // *Asteroids II* / Ed. Binzel R. Univ. Arizona Press, 1989. P. 661–680.
- Wetherill G.W., Stewart G.* Accumulation of a swarm of small planetesimals // *Icarus.* 1989. V. 77. № 2. P. 330–357.
- Williams C.D., Sujoy M.* Capture of nebular gases during Earth's accretion is preserved in deep-mantle neon // *Nature.* 2019. V. 565. № 7737. P. 78–81.
- Yin Q., Jacobsen S.B., Yamashita K., Blichert-Toft J., Telouk P., Albarede F.* A short timescale for terrestrial planet formation from Hf–W chronometry of meteorites // *Nature.* 2002. V. 418. P. 949–952.
- Zharkov V.N.* The role of Jupiter in the formation of planets // *Evolution of the Earth and planets. Geophysical Monograph 74,* 1993. IUGG V. 14. P. 7–17.