

## ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ И ЛУНЫ: ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ТЕЛ

© 2021 г. М. Я. Маров<sup>a, \*</sup>, С. И. Ипатов<sup>a, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: marovmail@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 26.04.2021 г.

После доработки 04.05.2021 г.

Принята к публикации 05.05.2021 г.

Рассмотрена модель ударной бомбардировки Земли и Луны малыми телами на стадии их формирования. Показано, что суммарная масса льда воды в телах, доставленных к Земле из зоны питания планет-гигантов и внешнего астероидного пояса, могла быть соизмерима с массой земных океанов. Тела, первоначально пересекавшие орбиту Юпитера, могли приходить к орбите Земли в основном в течение первого миллиона лет. Большинство выпадений тел, первоначально находившихся на расстоянии от 4 до 5 а. е. (астрономических единиц) от Солнца, на Землю происходило в течение первых 10 млн лет. Некоторые тела из зоны Урана и Нептуна могли выпадать на Землю через время большее 20 млн лет. С начальных расстояний от Солнца примерно от 3 до 3.5 а. е. отдельные тела могли выпадать на Землю и Луну через несколько миллиардов лет для модели, учитывающей только гравитационное влияние планет. Отношение количества тел, сталкивавшихся с Землей, к числу тел, сталкивавшихся с Луной, варьировалось в основном от 20 до 40 для планетезималей из зоны питания планет земной группы. Для тел, первоначально находившихся на расстоянии от Солнца, большем 3 а. е., это отношение было в основном в диапазоне от 16.4 до 17.4. Характерные скорости столкновений планетезималей из зон питания планет земной группы с Луной варьировались от 8 до 16 км/с в зависимости от начальных значений больших полуосей и эксцентриситетов орбит планетезималей. Скорости столкновений с Луной тел, пришедших из зон питания Юпитера и Сатурна, были в основном пределах от 20 до 23 км/с.

**Ключевые слова:** Земля, Луна, планетезимали, малые тела, скорости столкновений

**DOI:** 10.31857/S0016752521110078

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно существующим модельным представлениям Земля формировалась в высокотемпературной зоне. Поэтому для исследования зарождения жизни на Земле представляет интерес изучение доставки воды к Земле из-за снеговой линии с расстояний  $R > 3$  а. е. (Marov, 2018; Маров, 2018). Вода земных океанов и отношение в ней дейтерия к водороду  $D/H$  могли быть результатом перемешивания воды из нескольких источников, с большими и низкими отношениями  $D/H$ . Экзогенные источники могли включать миграцию тел из внешней части Главного пояса астероидов (Lunine et al., 2003, 2007; Morbidelli et al., 2000, 2012; O'Brien et al., 2014; Petit et al., 2001; Raymond et al., 2004;) и миграцию планетезималей и пыли из-за орбиты Юпитера (Levison et al., 2001; Morbidelli et al., 2000; Ипатов, 2000; Маров, Ipatov, 2001, 2020; Маров, Ипатов, 2005; Ipatov, Mather, 2003, 2004, 2006, 2007; Ipatov, 2010). В (Rubie et al., 2015) рассматривалась миграция планетезималей с расстояний от Солнца от 6 до 9.5 а.е.

для модели “большого поворота” (the Grand Tack model). В (Ipatov, 1999) полагалось, что около 20% современных околоземных объектов с диаметром более 1 км могли прийти из-за орбиты Нептуна. Согласно (Drake, Campins, 2006), ключевым аргументом против астероидного источника воды как основного источника воды на Земле является то, что изотопный состав осмия (Os) первичной верхней мантии Земли ближе к безводным обычным хондритам, чем к водным углистым хондритам.

Ключевой и до настоящего времени не решенной проблемой является проблема происхождения Луны в системе Земля–Луна. Многие авторы (например, Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976; Canup, Asphaug, 2001; Canup, 2004, 2012; Cuk, Stewart, 2012; Canup et al., 2013, 2021; Cuk et al., 2016; Barr, 2016) придерживаются теории мега-импакта. Эта теория рассматривает формирование Луны в результате выброса части сформировавшейся к этому моменту силикатной мантии Земли при столкновении Земли с телом размером с Марс. Критика модели мега-импакта представлена

в работах Э.М. Галимова (Галимов и др., 2005; Галимов, 2011; Galimov, Krivtsov, 2012). В частности, Э.М. Галимовым отмечалось, что эта модель не объясняет известные изотопные отношения ряда элементов (например, сходство изотопов кислорода, железа, водорода, кремния, магния, титана, калия, вольфрама, хрома) вещества Земли и Луны, так как в этой модели большая часть вещества Луны должна происходить из ударника, а не из протоземли. В работах (Галимов и др., 2005; Галимов, 1995, 2008, 2011, 2013; Galimov, Krivtsov, 2012; Васильев и др., 2011) была предложена модель формирования зародышей Земли и Луны в результате сжатия и последующей фрагментации разреженного пылевого сгущения с массой, равной массе системы Земля-Луна, через время около 50–70 млн лет после начала формирования Солнечной системы. В этих работах предполагалось, что столь долгий период стабильности исходного газопылевого скопления мог достигаться за счет интенсивного испускания газа с поверхности частиц, а также, возможно, за счет ионизации и радиационного отталкивания, обусловленного распадом короткоживущих изотопов. В данной модели Земля и Луна формировались из общего сгущения с примерно современными массами. Предложенная Э.М. Галимовым модель позволяет объяснить следующие данные: (1) идентичность изотопного состава кислорода ( $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$ ) и отношения  $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ ,  $^{46}\text{Ti}/^{47}\text{Ti}$ ,  $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$  для Луны и Земли на фоне других небесных тел, (2) данные об изотопных системах U-Pb, Rb-Sr, Hf-W и об истощении сидерофильных элементов (W, P, Co, Ni, Re, Os, Ir, Pt) на Земле и в лунной мантии, (3) данные относительно обогащения лунных базальтов тугоплавкими пороодообразующими элементами Ca, Al, Ti, (4) измеренные в образцах лунного грунта “Луна-16-20-24” отношения стабильных изотопов железа  $^{57}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$  и  $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ , связанных между собой соотношением:  $\delta^{57}\text{Fe} = 1.48\delta^{56}\text{Fe}$ , свидетельствующие о том, что железо лунных низкотитанистых базальтов изотопно легче земных базальтов, но в целом Земля и Луна с большой вероятностью имеют одинаковый изотопный состав железа, причем изотопный состав железа Луны в целом близок к изотопному составу железа хондритов (Okabayashi et al., 2019).

Времена существования и сжатия сгущений в работах ряда авторов обычно не превышали 1000 оборотов вокруг Солнца (Cuzzi et al., 2008, 2010; Cuzzi, Hogan, 2012; Johansen et al., 2007, 2009, 2009a, 2011, 2012; Nesvorniy et al., 2010; Lyra et al., 2008, 2009; Youdin, 2011; Youdin, Kenyon, 2013). Чтобы получить большие времена сжатия сгущений нужно учитывать факторы, препятствующие быстрому сжатию разреженных сгущений. Например, в (Мясников, Титаренко, 1989, 1989a) в зависимости от оптических свойств пыли и газа, а

также от типа и концентрации короткоживущих радиоактивных изотопов в сгущениях времена сжатия сгущений до плотности твердых тел не превосходили нескольких миллионов лет.

В (Ипатов, 2018; Маров и др., 2019) рассматривалось формирование из общего сгущения зародышей Земли и Луны с массами меньшими современных масс этих небесных объектов на один–два порядка величины. В этих работах, как и для мультиимпактной модели (Ringwood, 1989; Витязев, Печерникова, 1996; Gorkavii, 2004; Горькавый, 2007; Citron et al., 2014; Rufu, Aharonson, 2015, 2017), рассматривались многократные столкновения планетезималей с зародышем Земли и выпадения части выброшенного с зародыша Земли вещества на зародыш Луны. Однако в отличие от этих работ в (Ипатов, 2018; Маров и др., 2019) считалось, что первоначальный зародыш Луны формировался из общего с зародышем Земли сгущения, а не из выброшенного с зародыша Земли вещества. Показано, что момент количества движения сгущения, необходимый для формирования двойной системы (зародышей Земли и Луны) при сжатии сгущения, мог быть приобретен при столкновении двух сгущений, породивших родительское сгущение. Такая модель формирования зародышей Земли и Луны аналогична модели формирования спутниковых систем транснептуновых объектов (Ипатов, 2017).

В настоящей работе рассматриваются вероятности и характерные скорости столкновений с Землей и Луной тел, мигрировавших с различных расстояний от Солнца в различные моменты времени, а также приведены оценки доставки воды и летучих к Земле и Луне.

#### ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ И ЛУНОЙ ТЕЛ, МИГРИРОВАВШИХ С РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЙ ОТ СОЛНЦА

В наших предыдущих расчетах вероятности  $p_E$  столкновения тела с Землей моделировалась эволюция орбит тел, первоначально находившихся на различных расстояниях от Солнца. При расчетах миграции этих тел учитывалось гравитационное влияние планет. При интегрировании уравнений движения нами использовался симплектический метод из пакета Swift (Levison, Duncan, 1994). На основе полученных массивов элементов орбит тел в течение рассмотренного интервала времени вычислялись вероятности столкновений тел с Землей и Луной. Для вариантов расчетов с 250 телами значения  $p_E$  могли отличаться в сотни раз для одинаковых начальных значений  $a_0$  больших полуосей и эксцентриситетов орбит тел при  $a_0 \leq 10$  а. е. Было показано, что вклад в вероятность столкновения с Землей для одного тела мог

быть больше, чем у сотен или тысяч других тел с первоначально близкими начальными орбитами, если это тело в ходе эволюции выходило на орбиту, пересекающую орбиту Земли в течение миллионов или десятков миллионов лет.

Для планетезималей из зоны Юпитера и Сатурна среднее значение вероятности столкновения планетезимали с Землей получено равным  $p_E = 2 \times 10^{-6}$  (Маров, Ипатов, 2018). Среднее значение вероятности  $p_E$  столкновения тел, первоначально находившихся на орбитах комет семейства Юпитера, с Землей превышало  $4 \times 10^{-6}$  (Iratov, Mather, 2003, 2004, 2006, 2007). Значения  $p_E$  в среднем были меньше для больших начальных значений больших полуосей орбит  $a_0$  (Маров, Иратов, 2020; Iratov, 2020). Для зоны питания Урана и Нептуна  $p_E$  было близко к  $10^{-6}$ . При  $3 \leq a_0 \leq 4$  а. е. для некоторых вариантов расчетов  $p_E > 10^{-4}$ , хотя для других вариантов расчетов  $p_E = 2 \times 10^{-6}$ .

При  $p_E = 2 \times 10^{-6}$  полагая общую массу планетезималей в зоне питания Юпитера и Сатурна, равной ста массам Земли, (Ипатов, 1993, 2000) получаем, что суммарная масса планетезималей, выпавших на Землю, равна  $2 \times 10^{-4} m_E$  (массы Земли). Примерно такое же количество тел могло быть доставлено к Земле из зоны внешнего астероидного пояса и из-за орбиты Сатурна. Если льды составляли половину этой массы, то общая масса льдов, доставленных на Землю из-за линии льда, равна массе земных океанов ( $\sim 2 \times 10^{-4} m_E$ ). Возможно, доля льдов в планетезималиях была немного меньше половины (например, была около 1/3). Действительно, оценки количества льда в кометах не превышают 33% (Greenberg, 1998; Davidsson et al., 2016; Fulle et al., 2017). Однако ряд авторов полагает, что первичные планетезимали могли содержать больше льда, чем современные кометы. Вывод о возможной доставке такого количества воды к Земле из зон питания планет-гигантов делался также в (Ипатов, 1995, 2000; Маров, Iratov, 2001; Iratov, 2001). В (Ипатов, 2000) для планетезималей из зоны питания Урана и Нептуна значение  $p_E$  было получено равным  $1.2 \times 10^{-6}$ . При этих оценках считалось, что доля планетезималей, достигавших орбиты Земли, равна 0.1; характерное время, в течение которого планетезималь, достигшая орбиты Земли, пересекала орбиту Земли, считалось равным  $5 \times 10^3$  лет, а вероятность столкновения такой планетезимали (вышедшей на орбиту, пересекающую орбиту Земли) с Землей за год полагалась равной  $2.5 \times 10^{-9}$ . В приведенных нами выше оценках доставки воды к Земле, как и в (Ипатов, 1993, 2000), суммарная масса тел за орбитой Юпитера оценивалась порядка 200 масс Земли. Масса диска планетезималей, вплоть до  $200 m_E$ , рассматривалась также в (Hahn, Malhotra, 1999).

В (Canup, Pierazzo, 2006) получено, что при столкновении планетезимали с Землей со скоростью, большей 1.4 параболической скорости, при угле столкновения, большем  $30^\circ$ , теряется более 50% воды ударника. Поэтому количество воды, вошедшей в состав планет земной группы и Луны, могло быть меньше количества воды, доставленной к этим небесным тела.

С различных расстояний от Солнца тела могли приходиться к Земле в разное время. Тела, первоначально пересекавшие орбиту Юпитера, могли приходиться к орбите Земли в основном в течение первого миллиона лет. Тела, содержавшие воду и летучие, мигрировали к планетам земной группы также из-за орбиты Сатурна и из зоны внешнего астероидного пояса. Время миграции тел из зон питания Урана и Нептуна зависит от того, когда в этой зоне появились крупные зародыши этих планет. Основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов в расчетах (Ипатов, 1993, 2000) происходили за время не более 10 млн лет, хотя отдельные тела могли выпадать на эти планеты через время порядка миллиардов лет. Наши расчеты миграции тел показали, что при современных орбитах и массах планет некоторые тела из зон Урана и Нептуна могли выпадать на Землю через время большее 20 млн лет. При начальном значении  $a_0$  большой полуоси орбиты тела в диапазоне от 4 до 5 а. е. большинство выпавших тел на Землю происходило в течение первых 10 млн лет. При  $a_0$ , близком к 3 а. е., и слабо эксцентричных начальных орбитах первые тела могли начинать достигать орбиту Земли через время большее 1 млрд лет. Некоторые тела с  $3 \leq a_0 \leq 3.7$  а. е. могут выпадать на Землю и через миллиарды лет. Такие тела могли участвовать в “поздней тяжелой бомбардировке” (ЛНВ) Земли и Луны.

В рассмотренных вариантах расчетов отношение  $r_{EM}$  числа тел, выпавших на Землю, к числу тел, выпавших на Луну, было меньше отношения масс этих небесных объектов. На основе расчетов миграции планетезималей в зоне питания планет земной группы, приведенных в (Ипатов, 2019), можно сделать вывод о том, что отношение  $r_{EM}$  количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, варьировалось в основном от 20 до 40. Разброс значений этого отношения был вызван рассмотрением планетезималей с различными начальными значениями больших полуосей и эксцентриситетов их орбит. Для планетезималей с большими полуосями орбит  $0.9 \leq a_0 \leq 1.1$  а. е. и с небольшими эксцентриситетами отношение  $r_{EM}$  было в основном в диапазоне от 30 до 40. Планетезимали, первоначально более удаленные от орбиты Земли, приходили к ней с более эксцентричных орбит, и такое отношение  $r_{EM}$  для них было меньше, чем для близких слабо эксцентричных орбит.

**Таблица 1.** Значения  $v_{relE}$  относительной скорости входа тела в сферу действия Земли и значения скоростей  $v_{colE}$  и  $v_{colM}$  столкновений тел с Землей и Луной для некоторых значений отношения  $r_{EM}$  количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной

$r_{EM}$	14.56	16.4	16.6	17	17.4	17.89	20	30	40
$v_{relE}$ , км/с	37.82	23.14	22.38	21.07	19.96	18.81	15.42	9.56	7.35
$v_{colM}$ , км/с	37.89	23.26	22.51	21.20	20.10	18.96	15.60	9.85	7.73
$v_{colE}$ , км/с	39.44	25.70	25.02	23.85	22.88	21.88	19.05	14.71	13.38

При рассмотрении модели, в которой массы зародышей планет земной группы и Луны были в 10 раз меньше современных масс этих небесных тел, отношение  $r_{EM01}$  количества планетезималей, сталкивающихся с зародышами Земли и Луны, варьировалось в основном от 23 до 26 для планетезималей с  $0.7 \leq a_0 \leq 1.1$  а. е. и от 17 до 20 при  $0.5 \leq a_0 \leq 0.7$  а. е. и  $1.1 \leq a_0 \leq 1.3$  а. е. В (Ипатов, 2019) при массах зародышей, равных 0.3 от современных масс небесных объектов, отношение количества планетезималей, сталкивающихся с зародышами Земли и Луны, достигало 54 при миграции планетезималей с  $0.3 \leq a_0 \leq 0.5$  а. е.

На основе наших новых расчетов миграции тел с  $3 \leq a_0 \leq 5$  а. е. можно сделать вывод о том, что примерно для 80% вариантов расчетов  $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$ . Для других вариантов расчетов  $r_{EM}$  могло принимать значения, равные 14.56 и 17.89. Согласно (Маров, Ипатов, 2018), для планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна ( $5 \leq a_0 \leq 12$  а.е.) отношение  $r_{EM}$  количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, осредненное по 2000–2500 телам в каждой серии расчетов, варьировалось в основном от 16.47 до 16.72.

Если не учитывать гравитационное влияние небесных тел, то вероятность столкновения малого тела с небесным объектом массы  $m$  пропорциональна квадрату радиуса этого объекта, а при одинаковой плотности пропорциональна  $m^{2/3}$ . Отношение масс Земли и Луны (81.3) в степени  $2/3$  равно 18.77. Реальное отношение радиусов Земли и Луны равно 3.667, а квадрат этого отношения равен 13.45. Из-за большего гравитационного влияния Земли, чем Луны, полученные значения  $r_{EM}$  больше 13.45. Квадрат эффективного радиуса  $r_{ef}$  небесного тела радиуса  $r$  равен

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

где  $v_{par}$  – параболическая скорость на поверхности этого небесного тела, а  $v_{rel}$  – относительная скорость малого тела при его входе в сферу действия небесного объекта (точная формула справедлива для относительной скорости на бесконечности).

### ХАРАКТЕРНЫЕ СКОРОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ТЕЛ С ЛУНОЙ И ЗЕМЛЕЙ

В расчетах (Nesvorný et al., 2017) средние скорости столкновений с Землей астероидов, большие полуоси первоначальных орбит которых были в диапазоне от 1.6 до 3.3 а. е., варьировались от 21 до 23.5 км/с.

На основании отношения  $r_{EM}$  количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, можно оценить характерную скорость  $v_{relE}$  (относительно Земли) планетезималей при их входе в сферу действия Земли. Учитывая, что  $r_{EM}$  равно отношению квадратов эффективных радиусов Земли и Луны, и используя формулу (1), для отношения  $v_{relE}/v_{parE}$  относительной скорости входа тела в сферу действия Земли к параболической скорости  $v_{parE} = 11.186$  км/с на поверхности Земли получаем

$$\left( v_{relE}/v_{parE} \right)^2 = \left[ r_{EM} (v_{parM}/v_{parE})^2 (r_M/r_E)^2 - 1 \right] / \left[ 1 - r_{EM} (r_M/r_E)^2 \right], \quad (2)$$

где  $r_M$  и  $r_E$  – радиусы Луны и Земли,  $v_{parM}$  и  $v_{parE}$  – параболические скорости на поверхности Луны и Земли, соответственно. Учитывая, что для скоростей  $v_{colE}$  и  $v_{colM}$  столкновений тел с Землей и Луной справедливы соотношения  $v_{colE}^2 = v_{relE}^2 + v_{parE}^2$  и  $v_{colM}^2 = v_{relM}^2 + v_{parM}^2$ , и полагая  $v_{relE} = v_{relM}$ , для некоторых значений  $r_{EM}$  в таблице 1 приводим значения  $v_{relE}$ ,  $v_{colM}$  и  $v_{colE}$ .

Учитывая приведенные в предыдущем разделе значения  $r_{EM}$ , можно сделать выводы о характерных скоростях столкновений тел с Землей и Луной современных масс для ряда случаев. Для планетезималей с большими полуосями начальных орбит  $0.9 \leq a_0 \leq 1.1$  а. е. и с небольшими начальными эксцентриситетами, (при  $30 \leq r_{EM} \leq 40$ ) характерные скорости их столкновений с Землей были в основном в диапазоне от 13 до 15 км/с, а с Луной – от 8 до 10 км/с. Для планетезималей, пришедших из других частей зоны питания планет земной группы, (при  $20 \leq r_{EM} \leq 40$ ) разброс характерных скоростей столкновений планетезималей с Землей был в основном в диапазоне от 13 до 19 км/с, а с Луной – от 8 до 16 км/с. Для большин-

**Таблица 2.** Значения  $v_{relE01}$  относительной скорости входа планетезимали в сферу действия зародыша Земли и значения скоростей  $v_{colE01}$  и  $v_{colM01}$  столкновений планетезималей с зародышами Земли и Луны для некоторых значений отношения  $r_{EM01}$  количества планетезималей, сталкивающихся с зародышами Земли и Луны. Массы зародышей в 10 раз меньше современных масс Земли и Луны. Начальные значения больших полуосей орбит планетезималей, соответствующих  $r_{EM01}$ , находились в диапазоне от  $a_{0min}$  до  $a_{0min} + 0.2$  а. е.  $T$  – рассматриваемый интервал времени в млн лет

$a_{0min}$ , а. е.	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9	0.9	1.1	1.1
$T$ , млн лет	5	20	1	20	1	20	5	20
$r_{EM01}$	19.8	18.1	25.6	23.2	24.0	23.5	17.3	17.1
$v_{relE01}$ , км/с	7.30	8.55	5.22	5.85	5.62	5.57	9.41	9.67
$v_{colE01}$ , км/с	8.96	10.01	7.36	7.82	7.65	7.61	10.75	10.97
$v_{colM01}$ , км/с	7.38	8.62	5.24	5.96	5.73	5.67	9.48	9.73

ства тел с большими полуосями начальных орбит от 3 до 5 а. е. (при  $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$ ) аналогичный разброс скоростей столкновений был от 23 до 26 км/с для Земли, и от 20 до 23 км/с - для Луны. Однако для всех тел из этой зоны (при  $14.56 \leq r_{EM} \leq 17.89$ ) диапазон скоростей был шире: от 22 до 39 км/с для Земли и от 19 до 38 км/с для Луны.

При меньших массах зародышей Земли и Луны скорости столкновений были меньше. В (Ипатов, 2019) представлены результаты расчетов миграции планетезималей, начальные значения больших полуосей орбит которых находились в диапазоне от  $a_{0min}$  до  $a_{0min} + 0.2$  а. е. (значения  $a_{0min}$  варьировались от 0.3 до 1.3 а. е.), начальные эксцентриситеты орбит которых равнялись 0.05, а начальные наклонения в радианах равнялись 0.025. Вычислялись вероятности столкновений планетезималей с зародышами планет земной группы и Луны, массы которых составляли  $k_m$  от современных масс планет и Луны ( $k_m$  бралось равным 0.1, 0.3 или 1). Для интервала  $T$  времени, равного 1, 5 или 20 млн лет, при  $k_m = 0.1$  значения отношения  $r_{EM01}$  количества планетезималей, сталкивавшихся с зародышами Земли и Луны, приведены в таблице 2. Реально эти зародыши могли существенно изменить свои массы за время не более 1 млн лет. Данные для интервала в 20 млн лет приведены для большей статистики. В (Ипатов, 2019) был сделан вывод, что Земля и Венера приобрели более половины своих масс за время не более 5 млн лет. Используя формулу, аналогичную формуле (2), для зародышей Земли и Луны мы вычислили приведенные в таблице 2 значения  $v_{relE01}$  относительной скорости входа планетезимали в сферу действия зародыша Земли. В этой таблице также приведены значения скоростей  $v_{colE01}$  и  $v_{colM01}$  столкновений планетезималей с зародышами Земли и Луны для некоторых значений отношения  $r_{EM01}$ . Данные при  $T = 20$  млн лет соответствовали большему росту средних эксцентриситетов орбит планетезималей и в основном мажорантной оценке скоростей столкновений.

Однако для рассмотренных вариантов с различными значениями  $T$  разброс скоростей столкновений был сравнительно небольшим. Из данных таблицы 2 видно, что характерные скорости столкновений планетезималей, первоначально находившихся сравнительно недалеко от орбиты зародыша Земли, с зародышами Земли и Луны с массами, в 10 раз меньшими современных масс этих небесных объектов, находились в основном в диапазоне от 7 до 8 км/с для зародыша Земли и от 5 до 6 км/с для зародыша Луны. Для планетезималей, приходивших из более удаленных от орбиты Земли областей зоны питания планет земной группы, характерные скорости были от 9 до 11 км/с для столкновений с зародышем Земли, и от 7 до 10 км/с для столкновений с зародышем Луны.

Приведенные в таблицах 1–2 значения характерных скоростей столкновений тел с Лунной или с зародышем Луны в несколько раз больше соответственно параболической скорости на поверхности Луны ( $v_{parM} = 2.38$  км/с) или на поверхности зародыша Луны, с массой в 10 раз меньшей массы Луны ( $v_{parM01} = 1.1$  км/с). Например,  $v_{colM}/v_{parM} = 8.8$  при  $v_{colM} = 21$  км/с и  $v_{colM01}/v_{parM01} = 5.2$  при  $v_{colM01} = 5.7$  км/с.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрена доставка вещества малых тел/планетезималей к Земле и Луне в процессе их роста. Показано, что суммарная масса льда воды в телах, доставленных к Земле из зоны питания планет-гигантов и внешнего астероидного пояса, могла быть соизмерима с массой земных океанов. Планетезимали, первоначально пересекавшие орбиту Юпитера, могли приходиться к орбите Земли в основном в течение первого миллиона лет со времени зарождения Солнечной системы. Большинство выпадений на Землю тел, первоначально находившихся на расстояниях от 4 до 5 а. е. от Солнца, происходило в течение первых 10 млн лет. Времена до выпадений на Землю тел из зоны Урана и Нептуна могли превышать 20 млн лет.

С расстояний от Солнца примерно от 3 до 3.5 а. е. отдельные тела могли выпадать на Землю и Луну через несколько миллиардов лет для модели, учитывающей только гравитационное влияние планет.

Отношение количества тел, сталкивающихся с Землей и Луной, варьировалось в основном от 20 до 40 для планетезималей из зоны питания планет земной группы. Для тел, пришедших с расстояний от Солнца, больших 3 а. е., это отношение было в основном в районе 16.4 и 17.4. Характерные скорости столкновений планетезималей из зон питания планет земной группы с Луной варьировались от 8 до 16 км/с в зависимости от начальных расстояний планетезималей от Солнца и их эксцентриситетов. Скорости столкновений с Луной тел, пришедших из зон питания Юпитера и Сатурна, лежали в основном от 20 до 23 км/с. Характерные скорости столкновений планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от Солнца от 0.7 до 1.1 а. е., с зародышами Земли и Луны с массами, в 10 раз меньшими современных масс этих небесных объектов, находились в основном в диапазоне от 7 до 8 км/с для зародыша Земли и от 5 до 6 км/с для зародыша Луны. Для планетезималей, приходивших из более удаленных от орбиты Земли областей зоны питания планет земной группы, характерные скорости были от 9 до 11 км/с для столкновений с зародышем Земли, и от 7 до 10 км/с для столкновений с зародышем Луны.

*Исследования выпадений тел на Землю были выполнены в рамках госзадания ГЕОХИ РАН № 0137-2019-0004. Исследования выпадения тел на Луну были выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00120, <https://rscf.ru/project/21-17-00120/>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильев С.В., Кривцов А.М., Галимов Э.М. (2011) Исследование процесса роста системы планета-спутник в результате аккумуляции вещества пылевого облака. *Астрон. вестник* **45**(5), 420-429.

Витязев А.В., Печерникова Г.В. (1996) Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава. *Физика Земли* (6), 3-16.

Галимов Э.М. (1995) Проблема происхождения системы Земля-Луна. Проблемы зарождения и эволюции биосферы (Под ред. Галимова Э.М.). М.: Наука, 8-45.

Галимов Э.М. (2008) Современное состояние проблемы происхождения системы Земля-Луна. Проблемы зарождения и эволюции биосферы (Под ред. Галимова Э.М.). М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 213-222.

Галимов Э.М. (2011) Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газо-пылевого сгущения (доклад на XIX всероссийском симпозиуме по геохимии изотопов 16 ноября 2010 г.). *Геохимия* (6), 563-580.

Galimov E. M. (2011) Formation of the Moon and the Earth from a common supraplanetary gas-dust cloud (lecture presented at the XIX all-Russia symposium on isotope

geochemistry on November 16, 2010). *Geochem. Int.* **49**(6) 537-554.

Галимов Э.М. (2013) 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 (Под ред. Галимова Э.М.) М.: КРАСАНД, 47-59.

Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. (2005) Динамическая модель образования системы Земля-Луна. *Геохимия*. (11), 1139-1150.

Galimov E.M., Sidorov Yu.I., Krivtsov A.M., Zabrodin A.V., Legkostupov M.S., Eneev T.M. (2005) Dynamic model for the formation of the Earth-Moon system. *Geochem. Int.* **43**(11), 1045-1055.

Горькавый Н.Н. (2007) Образование Луны и двойных астероидов. *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* **103**(2), 143-155.

Ипатов С.И. (1993) Миграция тел в процессе аккумуляции планет. *Астрон. вестник*. **27**(1), 83-101.

Ипатов С.И. (1995) Миграция малых тел к Земле. *Астрон. вестник*. **29**(4), 304-330.

Ипатов С.И. (2000, 2021) *Миграция небесных тел в Солнечной системе*. Изд-во УРСС, 320 с.

Ипатов С.И. (2017) Формирование транснептуновых спутниковых систем на стадии сгущения. *Астрон. вестник* **51**(4), 321-343.

Ипатов С.И. (2018) Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост. *Астрон. вестник* **52**(5), 411-426.

Ипатов С.И. (2019) Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной. *Астрон. вестник* **53** (5), 349-379.

Маров М.Я. (2017) *Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной*. М.: Физматлит, 536 с.

Маров М.Я., Ипатов С.И. (2005) Миграция пылевых частиц и доставка летучих на планеты земной группы. *Астрон. вестник* **39**(5), 1-5.

Маров М.Я., Воропаев С.А., Ипатов С.И., Бадюков Д.Д., Слюта Е.Н., Стенников А.В., Федулов В.С., Душенков Н.В., Сорокин Е.М., Кронрод Е.В. (2019) *Формирование Луны и ранняя эволюция Земли*. URSS. 2019. 320 с.

Мясников В.П., Титаренко В.И. (1989) Эволюция самогравитирующих сгустков газопылевой туманности, участвующих в аккумуляции планетных тел. *Астрон. вестник* **23**(1), 14-26.

Мясников В.П., Титаренко В.И. (1989а) Эволюция самогравитирующего газопылевого сгустка с учетом переноса излучения в диффузионном приближении. *Астрон. вестник* **23**, 207-219.

Cameron A.G.W., Ward W.R. (1976) The origin of the Moon. *Lunar and Planet. Sci. Conf.* **7**, 120-122 (abstract).

Canup R.M. (2004) Simulations of a late lunar-forming impact. *Icarus*, **168**(2), 433-456.

Canup R.M. (2012) Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science* **338**, 1052-1055.

Canup R.M., Asphaug E. (2001) Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature* **412**(6848), 708-712.

- Canup R.M., Pierazzo E. (2006) Retention of water during planet-scale collisions. *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, abstract no.2146.
- Canup R.M., Barr A.C., Crawford D.A. (2013) Lunar-forming impacts: High-resolution SPH and AMR-CTH simulations. *Icarus* **222**, 200-219.
- Canup R.M., Righter K., Dauphas N., Pahlevan K., Čuk M., Lock S.J., Stewart S.T., Salmon J., Rufu R., Nakajima M., Magna T. (2021). Origin of the Moon. In *New Views on the Moon II*; arXiv:2103.02045.
- Citron R.I., Aharonson O., Perets H., Genda H. (2014) Moon formation from multiple large impacts. *45th Lunar and Planet. Sci. Conf.* #2085 (abstract).
- Cuk M., Stewart S.T. (2012) Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning. *Science* **338**, 1047-1052.
- Cuk M., Hamilton D.P., Lock S.J., Stewart S.T. (2016) Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth. *Nature* **539**, 402-406.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C. (2012) Primary accretion by turbulent concentration: The rate of planetesimal formation and the role of vortex tubes. *43th Lunar and Planet. Sci. Conf.* #2536 (abstract).
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Sharif K. (2008) Toward planetesimals: Dense chondrule clumps in the protoplanetary nebula. *Astrophys. J.* **687**, 1432-1447.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Bottke W.F. (2010) Towards initial mass functions for asteroids and Kuiper belt objects. *Icarus* **208**, 518-538.
- Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C., Marzari F., Pajola M., Rickman H., A'Hearn M.F., Auger A.-T., El-Maarry M.R., Fornasier S., Gutiérrez P.J., Keller H.U., Massironi M., Snodgrass C., Vincent J.-B., and 33 co-authors. (2016) The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astron. and Astrophys.* **592**, A63, 30 pp.
- Drake M., Campins H. (2006) Origin of water on the terrestrial planets. *Proc. IAU Symp.* 229 "Asteroids, Comets, and Meteors". 381-394.
- Galimov E.M., Krivtsov A.M. (2012) *Origin of the Moon. New concept*. Berlin.: De Gruyter, 168 p.
- Gorkavyi N.N. (2004) The new model of the origin of the moon. *Bulletin of the American Astron. Society.* **36**, 861.
- Greenberg J.M. (1998) Making a comet nucleus. *Astron. and Astrophys.* **330**, 375-380.
- Hahn J.M., Malhotra M. (1999) Orbital evolution of planets embedded in a planetesimal disk. *Astron. J.* **117**, 3041-3053.
- Hartmann W.K., Davis D.R. (1975) Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* **24**, 504-515.
- Ipatov S.I. (1999) Migration of trans-Neptunian objects to the Earth. *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **73**, 107-116.
- Ipatov S.I. (2001) Comet hazard to the Earth. *Adv. Space Research* **28** (8), 1107-1116.
- Ipatov S.I. (2010) Collision probabilities of migrating small bodies and dust particles with planets. *Proc. IAU 5, Symp. S263. "Icy bodies in the Solar System"* (Eds. Fernandez J.A., Lazzaro D., Prrialnik D., Schulz R.). Cambridge Univ. Press, 41-44.
- Ipatov S.I. (2020) Migration of planetesimals from beyond Mars' orbit to the Earth. *14th Europlanet Science Congress 2020*, Online at <https://www.epsc2020.eu/>, id. EPSC2020-71; <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2020/EP-SC2020-71.html>.
- Ipatov S.I. (2004) Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets. *Adv. Space Research* **33**(9), 1524-1533.
- Ipatov S.I., Mather J.C. (2006) Migration of small bodies and dust to near-Earth space. *Adv. Space Research* **37**(1), 126-137.
- Ipatov S.I., Mather J.C. (2007) Migration of comets to the terrestrial planets. *Proc. IAU Symp. No. 236 "Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk"* (Eds. A. Milani, G.B. Valsecchi, D. Vokrouhlický). Cambridge Univ. Press, Cambridge, 55-64.
- Johansen A., Oishi J.S., Mac Low M.-M., Klahr H., Henning T., Youdin A. (2007) Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. *Nature* **448**, 1022-1025.
- Johansen A., Youdin A., Klahr H. (2009) Zonal flows and long-lived axisymmetric pressure bumps in magnetorotational turbulence. *Astrophys. J.* **697**, 1269-1289.
- Johansen A., Youdin A., Mac Low M.-M. (2009a) Particle clumping and planetesimal formation depend strongly on metallicity. *Astrophys. J.* **704**, L75-L79.
- Johansen A., Klahr H., Henning T. (2011) High-resolution simulations of planetary formation in turbulent protoplanetary discs. *Astron. Astrophys.* **529**, A62, 16 pp.
- Johansen A., Youdin A.N., Lithwick Y. (2012) Adding particle collisions to the formation of asteroids and Kuiper belt objects via streaming instabilities. *Astron. Astrophys.* **537**, A125. 17 pp.
- Levison H.F., Dones L., Chapman C.R., Stern S.A., Duncan M.J., Zahnle K. (2001) Could the lunar "late heavy bombardment" have been triggered by the formation of Uranus and Neptune? *Icarus* **151**, 286-306.
- Levison H.F., Duncan M.J. (1994) The long-term dynamical behavior of short-period comets. *Icarus* **108**(1), 18-36.
- Lunine J.I., Chambers J., Morbidelli A., Leshin L.A. (2003) The origin of water on Mars. *Icarus* **165**(1) 1-8.
- Lunine J., Graps A., O'Brien D.P., Morbidelli A., Leshin L., Coradini A. (2007) Asteroidal sources of Earth's water based on dynamical simulations. *38th Lunar and Planet. Sci. Conf.* #1616 (abstract).
- Lyra W., Johansen A., Klahr H., Piskunov N. (2008) 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.* **491**, L41-L44.
- Lyra W., Johansen A., Zsom A., Klahr H., Piskunov N. (2009) Planet formation bursts at the borders of the dead zone in 2D numerical simulations of circumstellar disks. *Astron. and Astrophys.* **497**, 869-888.
- Marov M. (2018) The Formation and Evolution of the Solar System. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science* (Eds. P Read et al.). Oxford: Oxford University Press, id.2.
- Marov M.Ya., Ipatov S.I. (2001) Volatile inventory and early evolution of planetary atmospheres. *Collisional processes in the solar system* (Eds. Marov M.Ya., Rickman H.) *Astrophysics and space science library* **261**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 223-247.
- Marov M.Ya., Ipatov S.I. (2020) Water inventory from beyond the Jupiter orbit to the terrestrial planets and the Moon. *Proc. IAU 14, Proc. IAU Symp. No. 345 "Origins: from*

- the Protosun to the First Steps of Life*" (Eds. Elmegreen B.G., Tóth L.V., Gudel M.), Cambridge Univ. Press, 164-167.
- Morbidelli A., Chambers J., Lunine J.I., Petit J.M., Robert F., Valsecchi G.B., Cyr K.E. (2000) Source regions and timescales for the delivery of water to the Earth. *Meteoritics and Planetary Science* **35**, 1309-1320.
- Morbidelli A., Lunine J.I., O'Brien D.P., Raymond S.N., Walsh K.J. (2012) Building terrestrial planets // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2012. **40**(1), 251-275.
- Nesvorný D., Youdin A.N., Richardson D.C. (2010) Formation of Kuiper belt binaries by gravitational collapse. *Astron. J.* **140**, 785-793.
- Nesvorný D., Roig F., Bottke W.F. (2007) Modeling the historical flux of planetary impactors. *Astron. J.* **153**(3), art. ID A103, 22 p.
- O'Brien D.P., Walsh K.J., Morbidelli A., Raymond S.N., Mandell A.M. (2014) Water delivery and giant impacts in the 'Grand Tack' scenario. *Icarus* **239**, 74-84.
- Okabayashi S., Yokoyama T., Hirata T., Terakado K., Galimov E.M. (2019) Iron isotopic composition of very low-titanium basalt deduced from the iron isotopic signature in Luna 16, 20, and 24 soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Pub Date: 2019-10-23.
- <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.020>; <https://www.x-mol.com/paper/5910114>
- Petit J.-M., Morbidelli A., Chambers J. (2001) The primordial excitation and clearing of the asteroid belt. *Icarus* **153**(2), 338-347.
- Raymond S.N., Quinn T., Lunine J.I. (2004) Making other earths: dynamical simulations of terrestrial planet formation and water delivery. *Icarus* **168**(1), 1-17.
- Ringwood A.E. (1989) Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin. *Earth and Planetary Science Letters* **95**(3-4), 208-214.
- Rufu R., Aharonson O. (2015) A multiple impact hypothesis for Moon formation. *46th Lunar Planet. Sci. Conf.* #1151 (abstract).
- Rufu R., Aharonson O. (2017) A multiple-impact origin for the Moon. *Nature Geoscience* **10**, 89-94.
- Youdin A.N. (2011) On the formation of planetesimals via secular gravitational instabilities with turbulent stirring. *Astrophys. J.* **731**, A99, 18 pp.
- Youdin A.N., Kenyon S.J. (2013) From disks to planets. *Planets, stars and stellar systems* (Eds. Oswald T.D., French L.M., Kalas P.). Solar and Stellar Planetary Systems, Springer Science + Business Media Dordrecht. **3**, 1-62.