

РОСТ ЛУНЫ ЗА СЧЕТ ТЕЛ, ВЫБРОШЕННЫХ С ЗЕМЛИ

© 2024 г. С. И. Ипатов^а, *^а Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: siipatov@hotmail.com

Поступила в редакцию 13.08.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Изучена эволюция орбит тел, выброшенных с Земли на стадии ее аккумуляции и ранней эволюции при ударах крупных планетезималей. В рассмотренных вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Их динамическое время жизни достигало нескольких сотен миллионов лет. При более высоких скоростях выброса v_{ej} вероятности столкновений тел с Землей и Луной в основном были ниже. На всем рассматриваемом интервале времени при скорости выброса v_{ej} , равной 11.5, 12 и 14 км/с, значения вероятности столкновения тела с Землей составляли примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел выпадала обратно на Землю. Вероятность столкновения выброшенного с Земли тела с Луной, движущейся по ее современной орбите, была примерно в 15–35 раз меньше, чем с Землей при $v_{ej} \geq 11.5$ км/с. Вероятность столкновения таких тел с Луной составляла в основном около 0.004–0.008 при скоростях выброса не менее 14 км/с и около 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с. Она была больше при меньших скоростях выброса и была в диапазоне 0.01–0.02 при $v_{ej} = 11.3$ км/с. На Луне может находиться вещество, выброшенное с Земли при аккумуляции Земли и при поздней тяжелой бомбардировке. При этом, как получено в наших расчетах, тел, выброшенных с Земли и упавших на зародыш Луны, было бы недостаточно для того, чтобы Луна выросла до своей современной массы из маленького зародыша, двигавшегося по современной орбите Луны. Этот результат свидетельствует в пользу образования лунного зародыша и дальнейшего его роста до большей части современной массы Луны вблизи Земли. Нам кажется более вероятным, что первоначальный зародыш Луны с массой не более 0.1 от массы Луны образовался одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила на орбиты вокруг Земли, как в модели мультиимпактов. Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей тем больше, чем больше скорость выброса. Значения этих скоростей столкновений составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной были также выше при больших скоростях выброса и находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16 и 11–20 км/с при v_{ej} , равной 11.3, 12, 14 и 16.4 км/с соответственно.

Ключевые слова: Земля, Луна, выброс тел, эволюция орбит, вероятности столкновений, скорости столкновений

DOI: 10.31857/S0320930X24010081, **EDN:** OHGFCE

ВВЕДЕНИЕ

В ходе формирования Земли и Луны на них выпадали различные тела-планетезимали. При столкновениях таких тел с Землей с нее могло выбрасываться вещество, часть из которого выпадала на Землю и Луну. Armstrong и др. (2002) предлагали изучать лунные породы, чтобы найти в них вещество, выброшенное с Земли во время поздней тяжелой бомбардировки и лучше понимать историю Земли. Считается (Bottke, Norman, 2017), что поздняя тяжелая бомбардировка было

примерно 4.2–3.5 млрд лет назад и могла быть вызвана окончанием процесса аккумуляции планет и миграцией планет-гигантов. В последнее время выпадения крупных тел, способных вызвать выброс вещества с Земли за пределы ее сферы Хилла, редки. В работе (Gattaccesa и др., 2023) утверждается, что найденный метеорит Northwest Africa 13188 является земным метеоритом, выпавшим обратно на Землю. В настоящей работе обсуждается вероятность выпадения выброшенных с Земли тел на Луну, скорости столкновений

выброшенных тел с Землей и Луной, а также рост зародыша Луны при выпадении на него тел, выброшенных с Земли. Ниже сначала приведем обзор некоторых работ по теме статьи.

Модели формирования Луны

Существуют различные модели образования Луны. Обзоры этих моделей приведены нами в статье (Ипатов, 2018), в разделе 2.1 монографии (Маров и др., 2019), и в разделе 3.2 большого обзора (Маров, Ипатов, 2023). Большую популярность имеет теория мегаимпакта (например, Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976; Canup, Asphaug, 2001; Canup, 2004; 2012; Canup и др., 2013; 2021; Cuk, Stewart, 2012; Cuk и др., 2016; Barr, 2016). В рамках этой модели считается, что Луна образовалась в результате выброса силикатной мантии Земли при ее столкновении с телом размером с Марс. Рассматривались многочисленные варианты столкновений с различными массами ударников и скоростями столкновений. Модель мегаимпакта сталкивается с определенными трудностями, прежде всего, геохимического характера. В частности, критика этой модели приводилась в многочисленных работах Галимова и его соавторов (Галимов и др., 2005; Галимов, 1995; 2008; 2011; 2013; Galimov, Krivtsov, 2012; Васильев и др., 2011). Например, Галимов (2011) полагал, что теория мегаимпакта не может объяснить то, что не обнаружен сдвиг изотопного состава между лунным и земным веществом, так как выброшенный при мегаимпакте материал должен состоять на 80–90% из пара, а при испарении расплава изотопные составы K, Mg, Si могут заметно меняться.

В модели мультиимпактов (Ringwood, 1989; Витязев, Печерникова, 1996; Gorkavyy, 2004; Горькавый, 2007; Svetsov и др., 2012; Citron и др., 2014; Rufu, Aharonson, 2015; Rufu и др., 2017; 2021) рассматривалось формирование и рост зародыша Луны в основном за счет вещества земной коры, выброшенного с зародыша Земли при его нескольких столкновениях с телами протопланетного диска. Rufu и др. (2017) считали, что было около 20 ударников. В их расчетах рассматривались массы ударников от 1% до 9% от массы Земли и скорости столкновений от v_{esc} до $4v_{esc}$, где v_{esc} — параболическая скорость на поверхности Земли. Используемый в их расчетах алгоритм осуществлял гидродинамическое моделирование. В различных вариантах моделей мегаимпакта и мультиимпактов выброшенное вещество (частично в виде пара) образовывало диск, из которого формировался зародыш Луны. В мультиимпактной модели после каждого столкновения из диска образовывалось новое тело,

которое, удаляясь от Земли, сталкивалось и объединялось с предыдущим зародышем Луны. Rufu и др. (2017) отмечали, что зародыш Луны образовывался на расстоянии, большем предела Роша (трех радиусов Земли).

Теория коаккреции рассматривает образование Луны из роя малых тел. Этой модели посвящена монография и ряд статей Рускол (1960; 1963; 1971; 1975). Основным источником околоземного роя тел в этой модели является захват частиц допланетного диска во время их столкновений (“свободной со свободной” и “свободной со связанной”). В работе (Афанасьев, Печерникова, 2022) найдено, что в результате парных столкновений допланетных тел формируется околоземный рой с массой порядка 10^{-5} массы современной Луны. Авторы предположили, что этот рой мог служить триггером для дальнейшей аккреции за счет столкновений тел протолунного роя с телами из зоны питания планеты и с выбросами от ударов крупных тел по растущей Земле.

Галимов с соавторами (Галимов и др., 2005; Галимов, 1995; 2008; 2011; 2013; Galimov, Krivtsov, 2012; Васильев и др., 2011) разрабатывали модель формирования зародышей Земли и Луны из единого первоначального газопылевого разреженного сгущения в протопланетном диске, с последующим образованием и сжатием двух фрагментов. Данная модель удовлетворяет геохимическим ограничениям и позволяет также объяснить известные различия в химическом составе Луны и Земли, в том числе дефицит железа, обеднение летучими и обогащение тугоплавкими окислами Al, Ca, Ti вещества Луны по сравнению с Землей. Галимов и др. предположили, что во внутренней части сгущения около 40% летучего вещества (в том числе FeO) пылевых частиц, образовавших зародыши, испарилось, и изначально высокотемпературные зародыши Луны и Земли были одинаково истощены в железе. Зародыши росли, аккумулируя частицы, богатые железом, и находившиеся на момент образования зародышей во внешней части сгущения. Рост зародыша Земли был быстрее роста зародыша Луны.

Согласно модели, представленной в (Galimov, Krivtsov, 2012), разреженное сгущение с массой, равной массе системы Земля–Луна, через время около 50–70 млн лет после начала формирования Солнечной системы сжалось за 10^4 – 10^5 лет, образовав зародыши Земли и Луны. Такое длительное время существования сгущений после начала формирования Солнечной системы не было получено в работах специалистов, занимающихся изучением формирования и эволюции сгущений. В большинстве работ, посвященных образованию планетезималей (Cuzzi и др., 2008; 2010; Cuzzi, Hogan, 2012; Johansen и др., 2007; 2009a;

2009b; 2011; 2012; Lyra и др., 2008; 2009; Youdin, 2011; Youdin, Kenyon, 2013), непосредственное время формирования (после начала формирования из уплотненного газопылевого диска) и сжатия разреженных сгущений не превышало 1000 оборотов вокруг Солнца, а в некоторых моделях происходило всего за несколько десятков оборотов вокруг Солнца. По нашему мнению, нельзя объяснить то, что в модели Галимова падение частиц из внешней части сгущения в центр сгущения (на зародыши Земли и Луны) началось через 50 млн лет, а не сразу после образования сгущения. Ведь в их модели внешняя часть сгущения была холодной, и пылинки имели нулевые скорости. Подробнее критика модели Галимова рассматривалась в работе (Ипатов, 2018).

Ипатов (2018) показал, что угловой момент сгущения, необходимый для формирования зародышей системы Земля–Луна, мог быть приобретен при столкновении двух сгущений с общей массой, большей $0.01m_E$ (m_E — масса Земли). Большая часть вещества, вошедшего в формирующуюся Луну, была выброшена с Земли при многочисленных столкновениях с ней планетезималей и тел меньшего размера. Аналогичный механизм был предложен Ипатовым (2017a; 2017b) для модели формирования транснептуновых спутниковых систем. В отличие от сгущения, породившего зародыши Земли и Луны, сгущение, породившее зародыш Марса, не обладало большим угловым моментом 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. В отличие от модели Галимова, в модели Ипатова (2018) зародыш Земли рос за счет выпадения на него планетезималей, а не пыли из внешней части сгущения с массой порядка массы Земли. В отличие от модели мультиимпактов, в модели Ипатова первоначальный зародыш Луны образовался из того же сгущения, что и зародыш Земли. Объекты, выброшенные с зародыша Земли при столкновениях с другими объектами, имели больше шансов войти в состав крупного зародыша Луны, чем объединиться с аналогичными объектами малой массы. Зародыш Луны, образовавшийся при сжатии сгущения, мог быть триггером для его роста до современной массы Луны в основном за счет вещества, выброшенного с Земли при ее бомбардировке планетезималами. По нашему мнению, для модели мультиимпактов все планеты земной группы должны были бы обладать крупными спутниками, так как на них выпадали такие же тела, как и на зародыш Земли. Для объяснения современного содержания железа в Луне Ипатов (2018) оценил, что доля вещества, выброшенного

с зародыша Земли и выпавшего на зародыш Луны, должна была почти на порядок превышать сумму общей массы планетезималей, выпавших непосредственно на зародыш Луны, и начальной массы зародыша Луны, образовавшегося из родительского сгущения, при условии, что этот начальный лунный зародыш содержал такую же долю железа, что и планетезимали.

Согласно (Salmon, Canup, 2012; Cuk, Stewart, 2012), большая полуось орбиты образовавшегося зародыша Луны равнялась $6r_E - 7r_E$, где r_E — радиус Земли. Из-за приливных взаимодействий расстояние между Землей и Луной могло сравнительно быстро достигнуть $30r_E$ (Touma, Wisdom, 1994; Pahlevan, Morbidelli, 2015). Например, Pahlevan и Morbidelli (2015) получили, что расстояние между Землей и Луной увеличилось до $20r_E - 40r_E$ за $10^6 - 10^7$ лет. Современное расстояние между Землей и Луной равно $60.4r_E$. В модели мультиимпактов считается (Rufu и др., 2017), что из-за приливных взаимодействий образовавшийся спутник Земли меньшей массы со временем удалялся от Земли и догонял образовавшийся ранее более массивный и первоначально более удаленный от Земли спутник.

Выпадение тел, выброшенных с Земли, на другие планеты и Луну

В работах (Gladman и др., 2005) и (Reyes-Ruiz и др., 2012) моделировалась эволюция орбит тел, выброшенных с Земли, в течение 30000 лет, причем в работе (Reyes-Ruiz и др., 2012) число рассмотренных тел было в 50 раз больше, чем в (Gladman и др., 2005). Эти авторы проводили расчеты эволюции орбит вещества, выброшенного с Земли, с несколькими значениями v_{ej} скорости выброса от 11.22 до 16.4 км/с. В работе (Gladman и др., 2005) вероятность столкновения выброшенного тела с Землей за 30 тыс. лет варьировалась от 0.09 при $v_{ej} = 11.22$ км/с до 0.001–0.003 при $13.2 \leq v_{ej} \leq 16.4$ км/с. При расчетах определялись вероятности столкновений выброшенных тел с Землей, Венерой и Марсом. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) использовался пакет интегрирования Mercury (Chambers, 1999). Как и в (Gladman и др., 2005), начальные тела стартовали вертикально и точки старта были распределены равномерно по поверхности Земли. Тела стартовали с высоты $h = 100$ км над Землей. Интегрирование заканчивалось, когда выброшенное тело сталкивалось с Луной, планетой или Солнцем, или удалялось от Солнца на 40 а. е., или если рассматриваемый интервал времени достигал 30 тыс. лет. Вычислялись вероятности столкновений тел с Землей, Луной, Венерой, Марсом, Юпитером, Сатурном и Солнцем.

Armstrong и др. (2002) рассматривали выпадение вещества, выброшенного с Земли во время поздней тяжелой бомбардировки. Они полагают, что, согласно Жаркову (2000), большая полуось орбиты Луны равнялась $21.6r_E$ около 3.9 млрд лет назад. Считалось, что при скорости ударника, равной 14 км/с, масса вещества, выброшенного с Земли, равнялась 0.14 массы ударника. Рассматриваемый интервал времени после выброса вещества не превышал 1000 лет, при этом большинство столкновений (90%) происходило за время не более 100 лет. Выпадения тел обратно на Землю и на Луну происходили в основном при скорости выброса, близкой к параболической скорости на поверхности Земли. Из таблицы 2 в (Armstrong и др., 2002) следует, что при скорости v_∞ выброшенных тел на бесконечности, равной 0, доли тел, выпавших на Землю и Луну, равнялись 0.61 и 0.004 соответственно. При этом отношение этих долей равнялось 152.5. При $v_\infty = 1$ км/с эти доли равнялись 0.06 и 0 соответственно.

Выброс вещества из кратера

На рис. 12.3 монографии (Мелош, 1994) приведено отношение потерянной массы к массе ударника в зависимости от скорости удара v_{col} и второй космической скорости v_{esc} небесного объекта. Чем меньше v_{col} , тем меньше это отношение масс. Из этого рисунка видно, что для Земли это отношение близко к 0.1 и 0.01 при v_{col} , равном 45 и 30 км/с соответственно. Для Луны такое отношение меньше 0.1 и 0.01 при v_{col} , равном 7.5 и 5 км/с соответственно. Оно близко к 1 для v_{col} , близком к 20 км/с.

Артемьева и Шувалов (2008) численно моделировали удары по Луне астероидов со скоростью 18 км/с и ледяных тел со скоростями 25 и 55 км/с под углами от 15° до 90° к поверхности. Максимальные выбросы со скоростями, выше скорости убегания Луны, достигались при углах 45° – 60° и составляли от 4 до 12 масс ударяющего тела при ударе астероида и параболической кометы соответственно. Эти оценки выброса были в несколько раз больше, чем приближенные оценки на рис. 12.3 в (Мелош, 1994). Были оценены потери массы Луной за счет ударов космических тел.

Artemieva (2014) путем численного моделирования сравнивала удары астероидов размером 1–500 м со скоростью 18 км/с под углом 45° по пористой среде, имитирующей лунный реголит, с ударами по сплошной непористой мишени. Оказалось, что пористость может на порядок уменьшить выброс твердых фрагментов, являющихся источником лунных метеоритов. Число тел, выпадающих на переднюю полусферу поверхности Луны, немного больше числа тел, вы-

падающих на заднюю полусферу (Gallant и др., 2009; Wang, Zhou, 2016).

Согласно формуле (4) из (Armstrong и др., 2002), масса тел, выброшенных со скоростями, большими v_{ej} , равна $m_{ej} = 0.11(\rho/\rho_i)^{0.2}(v_i/v_{ej})^{1.2}m_i$, где ρ и ρ_i – плотности ударника и цели, v_i – скорость столкновения, m_i – масса ударника. При одинаковых плотностях, $v_i = 14$ км/с и $v_{ej} = v_{esc}$ Armstrong и др. (2002) получили массу тел, выброшенных с Земли, равной $0.14m_i$. Они отмечали, что скорости выброса в основном меньше $0.85v_i$.

Svetsov (2011) получил ряд других зависимостей m_{ej} от v_i/v_{ej} : (1) $m_{ej} = 0.03(\rho/\rho_i)^{0.2}(v_i/v_{ej})^{1.65}m_i$ на основе экспериментов с базальтами при скоростях 6 км/с, приведенных в (Holsapple, Housen, 2007) и (2) $m_{ej} = 0.03(v_i/v_{ej})^{2.3}m_i$ на основе своих численных расчетов при $v_i < 10$ км/с. По этим формулам при v_i/v_{ej} , равном 1, получаем $m_{ej} = 0.03m_i$, а при $v_i/v_{ej} = 2$ имеем $m_{ej} = 0.094m_i$ и $m_{ej} = 0.148m_i$ соответственно для первой и второй вышеприведенных формул. Согласно (Svetsov, 2011), масса m_{ej} выбрасываемого материала больше массы ударника, если скорость столкновения не менее чем в 3–5 раз превышает параболическую скорость на поверхности цели. В работе (Svetsov и др., 2012) отмечалось, что масса вещества, выброшенного с Земли, была максимальна при углах столкновения около 30° – 45° и не превышала 0.04, 0.06 и 0.13 от массы ударника при скорости столкновения, равной 12, 15 и 20 км/с соответственно.

По формуле (7.12.3) из (Мелош, 1994), m_{ej} пропорционально $v_{ej}^{-1.7}$ и $v_{ej}^{-1.2}$ для воды и песка соответственно. Согласно рисунку 12.3 из этой работы, масса вещества, выброшенного с Земли, составляла примерно 0.01 и 0.1 от массы ударника при скоростях столкновения, равных 30 и 45 км/с соответственно. Для Луны масса выброшенного вещества превышала массу ударника примерно при скоростях, больших 20 км/с. На основании рисунков 3 и 5 из (Шувалов, Трубецкая, 2011) можно сделать вывод о том, что при скорости столкновения, равной 18 км/с, отношение массы выброшенного вещества (со скоростями, большими параболической скорости на поверхности Земли) к массе ударника было порядка 0.002 и 0.2 при вертикальном и косом (при 45°) ударах соответственно. В этих расчетах ударник и мишень были гранитными.

Результаты вышеприведенных работ свидетельствуют в пользу того, что при скорости столкновения тела с Землей со скоростью не более 20 км/с масса выброшенного вещества не превышает 0.15 массы ударника.

Согласно (Шувалов, Трубецкая, 2011), значения угла i_{ej} выброса вещества в основном находятся между 20° и 55° , особенно между 40° и 50° . Близкие значения углов были получены в (Raducan

и др., 2022) при выпадении тел на астероиды. В экспериментах с микронными частицами со скоростями столкновений до 2.5 км/с в (Barnouin и др., 2019) были получены углы выброса от 40° до 80° при скоростях около 1 км/с и от 40° до 70° при больших скоростях. При максимальной рассмотренной скорости (2.5 км/с) этот диапазон был еще более узким: от 43° до 59°.

Veesh и др. (2019) отмечали, что из-за атмосферы Землю могут покинуть только тела диаметром не менее 0.7 м. Они могли быть выброшены при образовании кратера диаметром не менее 10 км. Наиболее молодые земные кратеры такого размера образовались около миллиона лет назад.

В работе (Маров, Ипатов, 2021) обсуждались скорости столкновений тел с Землей и Луной. Скорости столкновений планетезималей, образовавшихся в зоне питания Земли, с Землей и Луной современных масс были равны примерно 13–15 и 8–10 км/с соответственно. Для планетезималей из других зон питания планет земной группы эти диапазоны скоростей равнялись 13–19 и 8–16 км/с. Как отмечалось выше, при скоростях столкновений, меньших 20 км/с, доля выброшенного с Земли вещества, вероятно, не превышала 0.15. Для большинства тел, приходящих к Земле из зоны внешнего астероидного пояса и зоны планет-гигантов, эти диапазоны составили 23–26 и 20–23 км/с для Земли и Луны соответственно. Однако для отдельных тел эти скорости могли быть близки к 40 км/с. Как отмечалось выше, скорости большинства тел, выброшенных с Земли, были меньше скоростей столкновений.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ МОДЕЛИ, ВАРИАНТЫ РАСЧЕТОВ И НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе рассматривается эволюция орбит тел, выброшенных с Земли. В каждом варианте расчетов изучалось движение 250 выброшенных с Земли тел при фиксированных значениях угла выброса i_{ej} (отсчитываемого от плоскости поверхности или от другой параллельной плоскости), скорости выброса v_{ej} и шага интегрирования по времени t_s . В разных вариантах значения угла выброса i_{ej} составляли 15°, 30°, 45°, 60°, 89° или 90°. Скорость v_{ej} тел, выброшенных из Земли, в основном равнялась 11.22, 11.5, 12, 14, 16.4 или 20 км/с. Выбросы тел с $v_{ej} = 20$ км/с довольно редкие, но возможны при высокоскоростных столкновениях с Землей тел, приходящих из-за орбиты Юпитера. Рассматривались также и другие значения скоростей в диапазоне от 11.22 до 11.5 км/с, так как в этом диапазоне зависимость вероятностей столкновений тел с Лу-

ной и планетами от v_{ej} сильнее, чем при больших значениях v_{ej} . Скорость вращения земной поверхности вокруг оси Земли (0.46 км/с) и скорость движения Луны вокруг Земли (1.02 км/с) не учитывались. Они невелики по сравнению с рассматриваемыми скоростями выброса.

Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм из пакета SWIFT (Levison, Duncan, 1994). Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. Начальные положения планет на их орбитах брались из тестового файла этого пакета. Из интегрирования исключались тела, которые столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца. В рассмотренных вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Движение тел, выброшенных с Земли, изучалось в течение максимального динамического времени жизни T_{end} всех рассмотренных в варианте тел, которое в вариантах расчетов составляло часто около 200–700 млн лет. Такой выброс часто был на стадиях аккумуляции Земли и поздней тяжелой бомбардировки. Ранее (Gladman и др., 2005; Reyes-Ruiz и др., 2012) при моделировании выброса тел со всей поверхности Земли рассматривались начальные скорости, перпендикулярные поверхности Земли, и интервал времени в 30 тыс. лет. Реально, как отмечалось во Введении, углы выброса в основном не превышают 55°, а подавляющее число тел, выброшенных на гиперболические орбиты, остается на орбитах после 30 тыс. лет. Вероятность выпадения тела на Землю различна для различных точек на поверхности Земли (например, из пространства за орбитой Земли больше, чем из пространства внутри орбиты Земли).

Рассматриваемый шаг интегрирования по времени t_s в некоторых вариантах равнялся 1, 2, 5 или 10 сут., и сравнивались результаты расчетов, полученные при разных t_s . Эти расчеты дали близкие результаты. Если не оговорено особо, то в статье приведены данные для расчетов с t_s , равном пяти суткам. В (Frantseva и др., 2022) отмечалось, что в рассматриваемом симплектическом алгоритме из пакета SWIFT шаг интегрирования по времени существенно уменьшается при расстоянии между объектами, меньшими 3.5 радиуса Хилла. Результаты расчетов, приведенные в (Ipatov, Mather, 2004a; 2004b), показали, что симплектический алгоритм и алгоритм BULSTO (Bulirsh, Stoer, 1966) дают похожие результаты при изучении движения тел в Солнечной системе.

Рассматривался выброс тел из шести противоположных точек земной поверхности для ряда значений скоростей и углов выброса тел. В сери-

ях расчетов v_f и v_c движение тел начиналось соответственно от наиболее и наименее удаленных от Солнца точек F (far) и C (close) земной поверхности на линии от Солнца к Земле. В сериях w и vb тела стартовали соответственно с точек W (forward) и B (back) поверхности Земли по ходу движения Земли и с противоположной стороны Земли. В сериях u и vd тела стартовали соответственно с точек U (up) и D (down) поверхности Земли с максимальным и минимальным значениями z (при оси oz , перпендикулярной плоскости орбиты Земли). В серии v_f для нескольких начальных данных тела стартовали с высоты h над поверхностью Земли. Если не оговорено особо, то ниже речь идет о телах, стартовавших с поверхности Земли (при $h=0$).

Вероятности столкновений выброшенных тел с Землей и другими планетами вычислялись при интегрировании уравнений движения как число тел, столкнувшихся с планетой, к начальному числу тел. Кроме того, вероятности столкновений тел с Землей и Луной рассчитывались на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел (хранящихся с шагом 500 лет за все время эволюции орбит) аналогично (Ipatov, Mather, 2003; 2004a; 2004b; Ипатов, 2000; 2019). Основной алгоритм вычисления вероятности был описан Ипатовым (1988; 2000), а дополнение к алгоритму, которое учитывает изменение скорости объекта, движущегося по эксцентричной орбите, приведено в (Ipatov, Mather, 2004b). В этом алгоритме считалось, что тела движутся вокруг Солнца по невозмущенным кеплеровским орбитам вне сферы действия большего тела. Движение внутри сферы действия рассматривалось в рамках задачи двух тел. Используемый алгоритм сложнее, чем обычно используемый подход Эпика (Örik, 1951), и вычисляемая вероятность сближения до сферы действия зависит также от синодического периода обращения двух тел вокруг Солнца.

Вычислялись также значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей p_E^* и p_M^* столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. Это отношение вычислялось только для тел, первоначально покинувших сферу действия Земли. При малых скоростях выброса большинство выброшенных с Земли тел могли выпадать обратно на Землю, не покидая сферу действия Земли. Ниже вероятность столкновения тела с Луной вычислялась по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, где p_E — это вероятность столкновения тела с Землей, вычисленная при интегрировании уравнений движения (независимо от того, покидало ли тело сферу действия Земли).

Значения p_E^* и p_M^* вычислялись в предположении, что Земля и Луна движутся независимо вокруг Солнца по одинаковой гелиоцентрической

орбите, т. е. Луна находится вне сферы Хилла Земли. Реально отношение вероятностей столкновений тел с Землей и Луной может быть меньше $k_{pE/pM}$ и тем меньше, чем ближе орбита Луны к Земле. Как отмечается в следующем разделе, в расчетах значение $k_{pE/pM}$ часто могло быть порядка 30. Если бы гипотетически Луна находилась у самой поверхности Земли, то это отношение вероятностей столкновений равнялось бы отношению квадратов радиусов Земли и Луны, т. е. 13.39. Поэтому, в зависимости от большой полуоси орбиты Луны вокруг Земли, это отношение может находиться от 13.4 до $k_{pE/pM}$. Для тел, которые вошли в сферу Хилла и затем могли выпасть на Землю, был шанс столкнуться с Луной, если бы она попала в тот конус траекторий, которые достигали поверхности Земли. Этот конус ограничен параболическими траекториями, достигавшими Земли. Поэтому можно приближенно предположить, что отношение вероятностей столкновений с Землей и Луной зависит от большой полуоси a_M (в радиусах Земли r_E) орбиты Луны как $k = b \cdot a_M^{1/2} + c$. Полагая, что $k = k_{pE/pM}$ при $a_M = a_{Ms} = 230.7$ (на границе сферы Хилла Земли) и $k = 13.4$ при $a_M = 1$, получаем $b = 0.07k_{pE/pM} - 0.944$ и $c = 13.4 - b = 14.344 - 0.07k_{pE/pM}$. При вычислении $k_{pE/pM}$ использовался метод сфер действия. Радиус сферы действия Земли равен 929000 км, т. е. в $a_M = a_{Ms} = 145.8$ раз больше радиуса r_E Земли. При таком $a_M = 145.8$ имеем $b = 0.09k_{pE/pM} - 1.21$ и $c = 14.61 - 0.09k_{pE/pM}$.

В табл. 1 приведены значения отношения k вероятностей столкновений тел с Землей и Луной при отношении a_M большой полуоси орбиты Луны к радиусу Земли r_E , равном 60 или 5, и при этом начальном отношении $k_{pE/pM}$ на расстоянии, равном радиусу a_{Ms} r_E сферы Хилла ($a_{Ms} = 230.7$) или сферы действия Земли ($a_{Ms} = 145.8$). Для двух рассмотренных значений a_{Ms} (230.7 и 145.8) значения k довольно близки. Значения k меньше для меньших значений большой полуоси орбиты Луны. При $a_M = 5$ значения k слабо зависели от $k_{pE/pM}$ и были около 14–16. При $a_M = 60$ отношение $k/k_{pE/pM}$ было в диапазонах 0.825–0.87, 0.71–0.78 и 0.65–0.74 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно. При больших наклонениях орбит тел, входящих в сферу действия Земли, орбита Луны может не пересекать вышеупомянутый конус траекторий движения тел к Земле или она может пересекать конус не по его центру. Поэтому реальное отношение вероятности столкновений тел с Землей и Луной может быть больше значений k , приведенных в табл. 1. Однако оно не превышает $k_{pE/pM}$.

Таблица 1. Отношение k вероятностей столкновений тел с Землей и Луной при большой полуоси a_M (равной 60 или 5 радиусам Земли r_E) орбиты Луны и начальном отношении $k_{pE/pM}$ этих вероятностей (равном 20, 30 или 40) на расстоянии, равном радиусу $a_{Ms}r_E$ сферы Хилла ($a_{Ms} = 230.7$) или сферы действия Земли ($a_{Ms} = 145.8$) для рассматриваемой модели

	$a_{Ms} = 230.7$	$a_{Ms} = 145.8$	$a_{Ms} = 230.7$	$a_{Ms} = 145.8$
	$a_M = 60$	$a_M = 60$	$a_M = 5$	$a_M = 5$
$k_{pE/pM} = 20$	16.5	17.4	13.96	14.1
$k_{pE/pM} = 30$	21.2	23.45	14.8	15.2
$k_{pE/pM} = 40$	25.9	29.5	15.7	16.35

Ниже в следующем разделе отмечается, что скорости входа тел в сферу действия Земли после их первоначального выброса из нее в основном находятся в диапазоне 10–25 км/с. Эта скорость увеличивается по мере приближения тела к Земле. Параболическая скорость на поверхности Луны равна 2.38 км/с. Для относительной скорости, равной 10 км/с, эффективный радиус Луны больше ее физического радиуса всего в 1.028 раза, то есть оба радиуса практически одинаковы. При больших относительных скоростях эффективный радиус Луны меньше. Квадрат эффективного радиуса r_{eff} небесного тела радиуса r равен $r_{eff}^2 = r^2[1 + (v_{par}/v_{rel})^2]$, 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).

На основе отношения $k_{pE/pM}$ числа планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, можно оценить (Маров, Ипатов, 2021) характерные скорости v_{relE} (относительно Земли) планетезималей при входе в сферу действия Земли по формуле:

$$(v_{relE}/v_{parE})^2 = [k_{pE/pM} (v_{parM}/v_{parE})^2 (r_M/r_E)^2 - 1] / [1 - k_{pE/pM} (r_M/r_E)^2],$$

где r_M и r_E – радиусы Луны и Земли, а $v_{parM} = 2.38$ км/с и $v_{parE} = 11.186$ км/с – параболические скорости у поверхности Луны и Земли соответственно. Отношение $k_{pE/pM}$ вычислялось на основе элементов орбит тел в течение большого интервала времени, за который могло происходить много сближений тел с Землей до радиуса ее сферы действия. Поэтому вышеприведенная формула позволяет получить характерные скорости тел, входивших в сферу действия. Скорости различных сближений могли быть разными и могли отличаться от этих характерных скоростей. Для скоростей v_{colE} и v_{colM} столкновений тел с Землей и Луной справедливы соотно-

шения $v_{colE}^2 = v_{relE}^2 + v_{parE}^2$ и $v_{colM}^2 = v_{relM}^2 + v_{parM}^2$. При $v_{relE} = v_{relM}$ на основе значений v_{relE} вычислялись также значения v_{colM} и v_{colE} .

Результаты проведенных расчетов (при $h=0$ и $t_s=5^d$) представлены на рис. 1–3. На рис. 1 приведены значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. На рис. 2 представлены значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$. На рис. 3 приведены значения скоростей столкновений тел с Луной и Землей. Рассматриваемые на рис. 1–3 величины приводятся в зависимости от угла выброса i_{ej} для различных значений v_{ej} скорости выброса и для шести точек выброса с поверхности Земли. Для небольшого числа вариантов (с фиксированными значениями v_{esc} , i_{ej} и точки выброса) было проведено два варианта расчетов, каждый с 250 начальными телами. В этом случае на рисунках приведены два одинаковых знача при том же значении i_{ej} .

ВЕРОЯТНОСТИ И СКОРОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ВЫБРОШЕННЫХ ТЕЛ С ЛУНОЙ

При скоростях выброса v_{ej} , не меньших 11.3 км/с, большинство выброшенных тел покидали сферу Хилла Земли и начинали двигаться вокруг Солнца. В ходе эволюции они могли столкнуться с планетами или Солнцем или быть выброшенными на гиперболические орбиты (Ipatov, 2023). В настоящей работе основное внимание мы уделяем изучению выпадений выброшенных тел на Луну.

В предыдущем разделе отмечалось, что вероятность столкновения тел с Луной, вычислялась по формуле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, где p_E – это вероятность столкновения с Землей, полученная при интегрировании уравнений движения, а $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ – отношение вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит. Поэтому сначала остановимся на значениях p_E и $k_{pE/pM}$.

Полученные результаты показывают, что при более высоких скоростях выброса v_{ej} вероятности p_E и p_M столкновений тел с Землей и Луной в основном были ниже. Вероятности p_E столкновений тел с Землей были примерно одинаковыми для расчетов с разными рассмотренными значениями t_s шага интегрирования. При скоростях $11.5 \leq v_{ej} \leq 14$ км/с вероятность p_E не сильно зависела от точки выброса на поверхности Земли. Ниже приводятся значения p_E , полученные в вариантах с фиксированными значениями v_{ej} и i_{ej} .

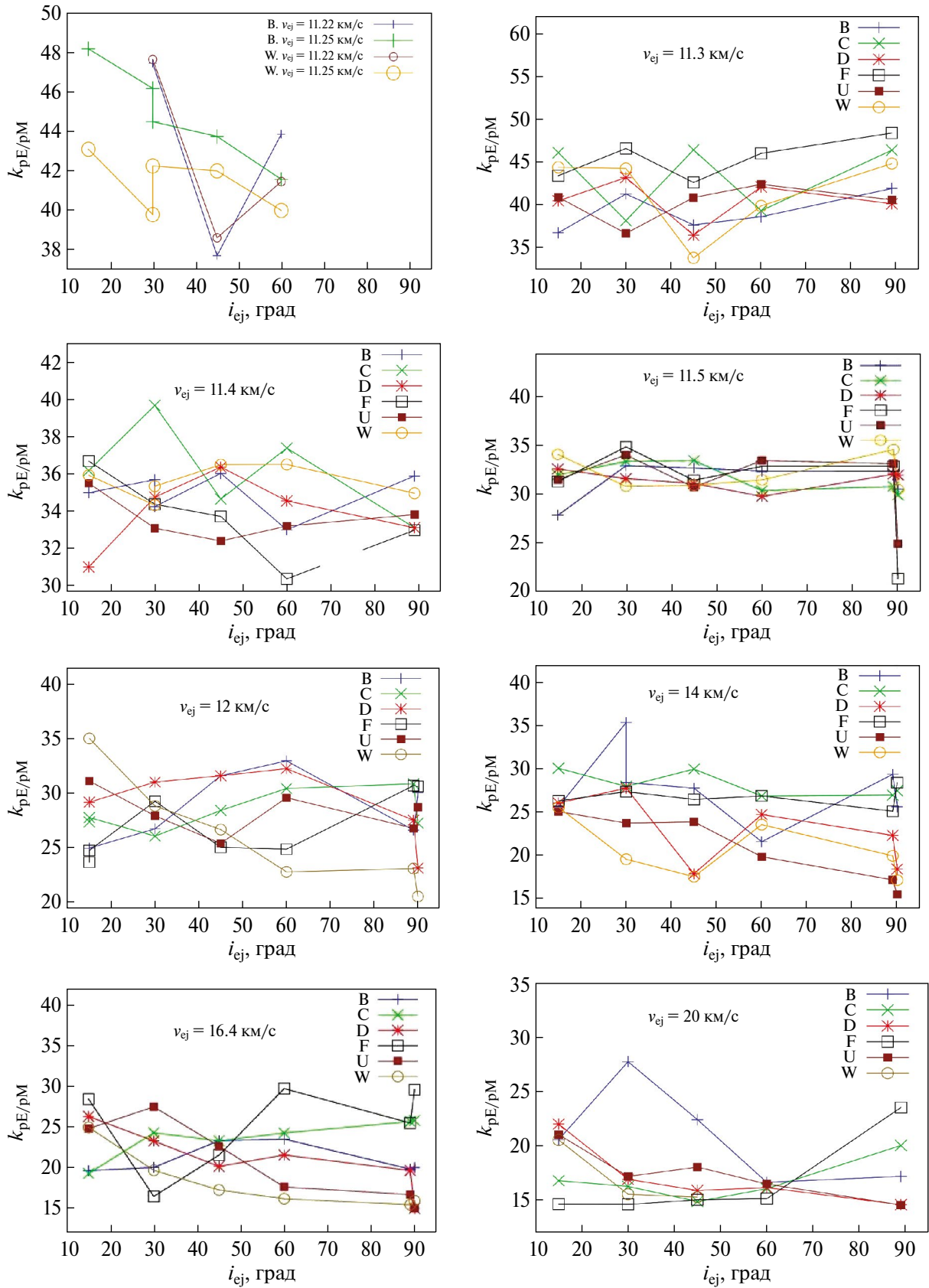


Рис. 1. Значения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ отношения вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученных на основе массивов элементов орбит, в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

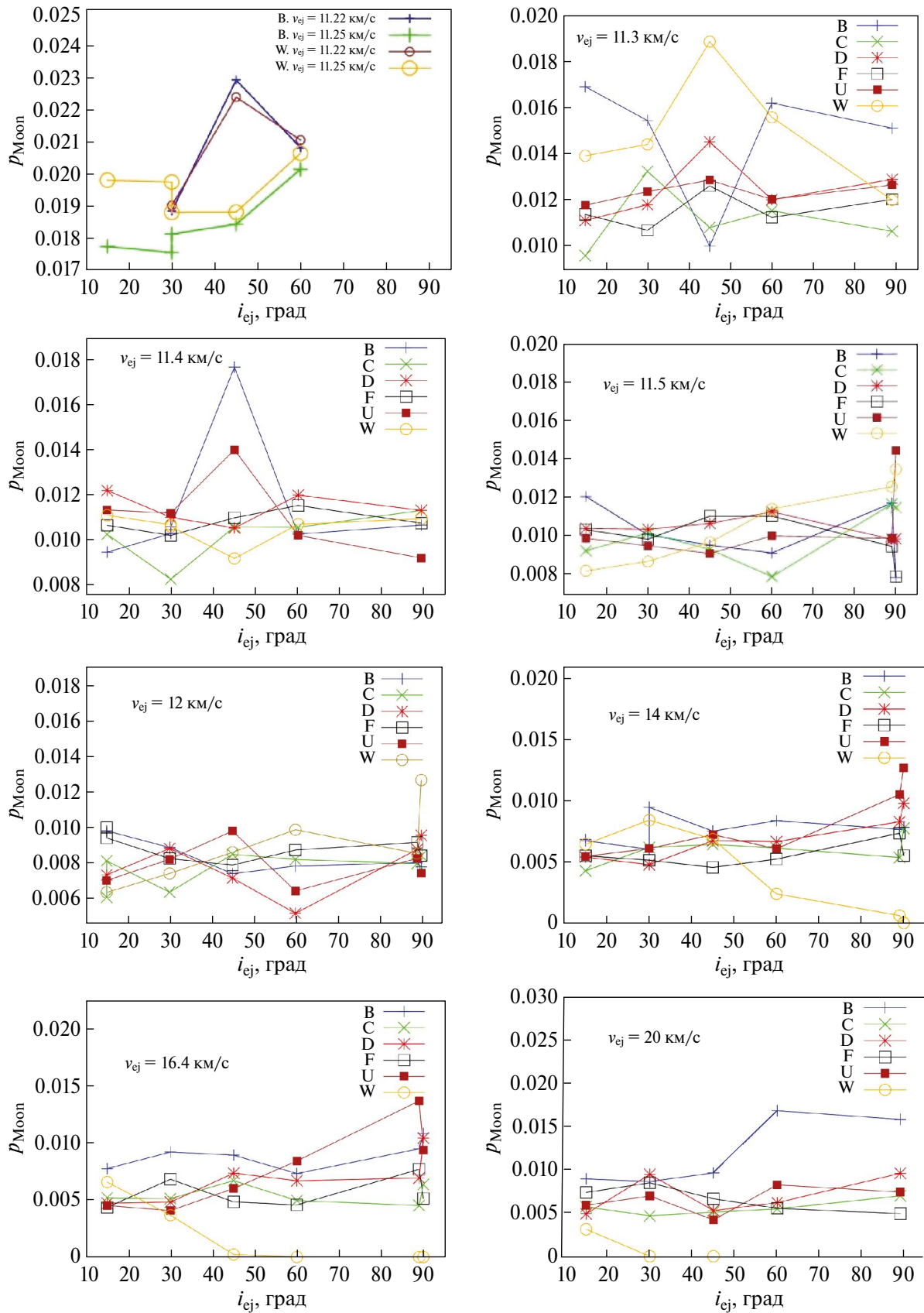


Рис. 2. Значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по формуле $p_{\text{М}} = p_{\text{Е}}/k_{\text{рЕ/рМ}}$, в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

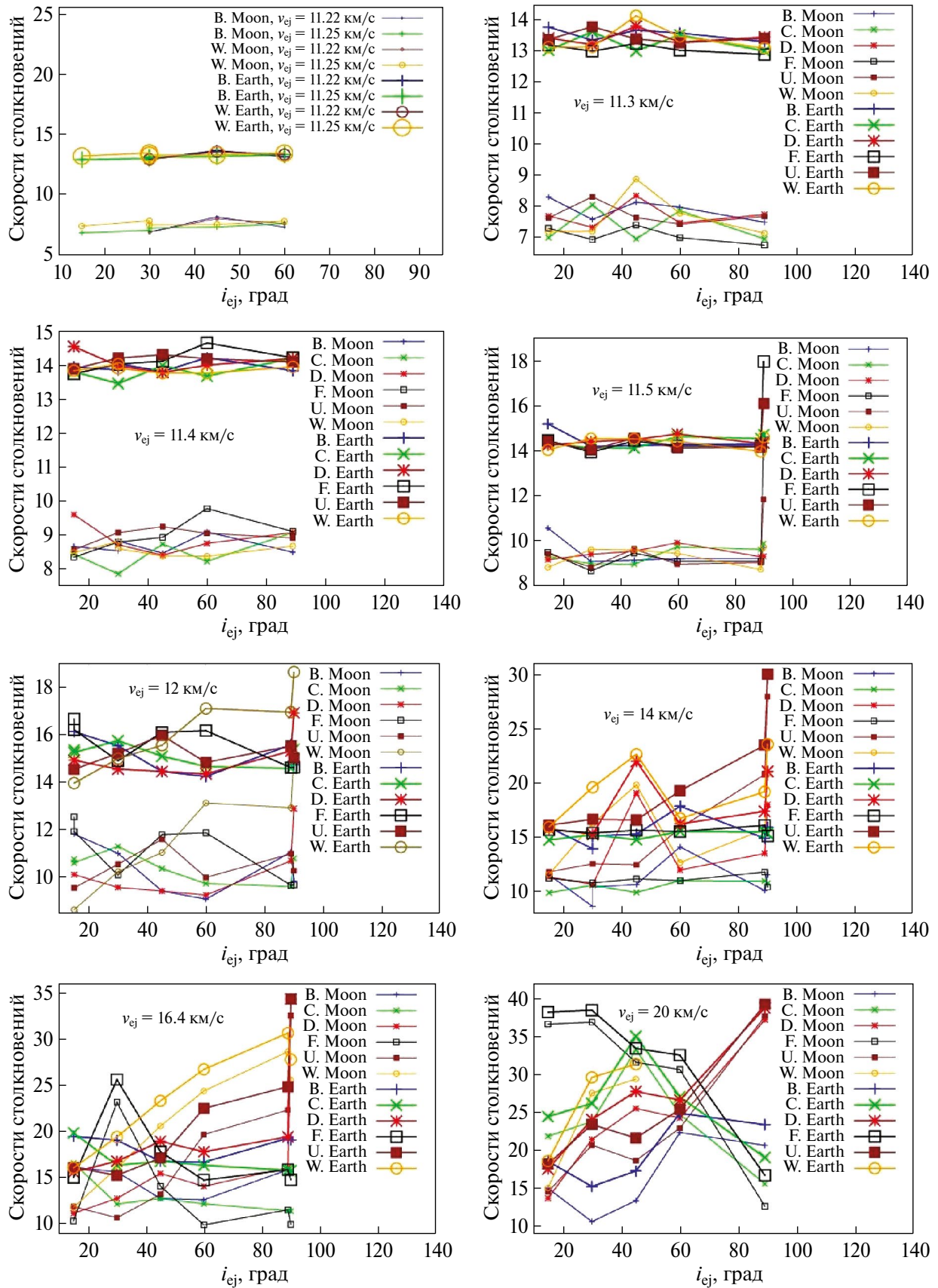


Рис. 3. Значения скоростей столкновений (в км/с) тел с Луной и Землей в зависимости от угла выброса i_{ej} (в градусах) для ряда значений v_{ej} скорости выброса (в км/с) и различных точек выброса.

Среднее по всем выброшенным телам значение p_E зависит от распределения тел по v_{ej} и i_{ej} .

При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел быстро выпадала обратно на Землю. При $v_{ej} = 11.22$ и $v_{ej} = 11.25$ км/с некоторая часть выброшенных тел покидала сферу Хилла Земли только для двух точек выброса (W и B) на противоположных направлениях линии движения Земли по гелиоцентрической орбите. Для этих двух точек выброса данные на рис. 1–3 не приводятся для значений i_{ej} , при которых все тела выпадали на Землю, не покидая ее сферу действия. Выброс тел из сферы действия Земли при таких скоростях ($v_{ej} = 11.22$ и $v_{ej} = 11.25$ км/с) для других точек выброса возможен только если начальная точка старта находится выше поверхности Земли. Например, в серии vf при $v_{ej} = 11.22$ км/с и $i_{ej} \geq 45^\circ$ времена эволюции орбит выброшенных тел составляли 15 дней, 25 дней, 20 лет и около 400 млн лет при высоте старта над поверхностью Земли h , равной 0, 20, 50 и 100 км соответственно. В этих расчетах при $h = 100$ км и $i_{ej} = 45^\circ$ около 38%, 44% и 49% начальных тел столкнулись с Землей за время, равное 1, 10 и $T_{end} = 393$ млн лет соответственно.

На рис. 1, 2, 3 данные приведены для конечных рассмотренных интервалов времени $T = T_{end}$ (когда все тела уже столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца), которые при $v_{ej} \geq 11.3$ км/с в основном находились в интервале от 200 до 700 млн лет и достигали 1356 млн лет. Для таких v_{ej} значения $T_{end} < 100$ млн лет были получены только в серии расчетов vw при $v_{ej} = 16.4$ км/с и $i_{ej} \geq 60^\circ$, а также при $v_{ej} = 20$ км/с и $i_{ej} \geq 45^\circ$.

В табл. 2 при $i_{ej} = 45^\circ$ приведены значения отношения вероятностей столкновений тел с Землей за пять интервалов времени от 0.01 до 100 млн лет к аналогичным вероятностям в конце эволюции для нескольких серий N_v расчетов (для разных точек выброса) и нескольких скоростей v_{ej} выброса. Для оценок вероятностей столкновений тел с Землей и Луной за эти времена эти отношения нужно умножить на вероятности p_E и p_M столкновений тел с соответственно Землей и Луной за весь рассмотренный интервал времени. Эти вероятности также приведены в табл. 2. В табл. 3 приведены интервалы значений вероятности p_E столкновений тел с Землей за несколько интервалов времени T для нескольких серий N_v расчетов и нескольких значений скоростей выброса v_{ej} (в км/с) при угле выброса i_{ej} , равном 45° .

При $v_{ej} \geq 12$ км/с **вероятности столкновений тел с Землей** в течении первых 30 тыс. лет не превышали 0.004, как и в (Gladman, 2005; Reyes-

Ruiz и др., 2012). Вероятности столкновений тел с Землей в основном меньше для больших значений v_{ej} . Зависимость вероятности столкновений тел с Луной от v_{ej} немного меньше, чем с Землей, так как при больших скоростях входа тела в сферу действия Земли разница между вероятностями столкновений тел с Землей и Луной меньше. Разница между вероятностями p_E столкновений тел с Землей при различных точках выброса больше для больших значений v_{ej} . За время $T = 1$ млн лет p_E в табл. 3 могло принимать значения больше 0.5 при $v_{ej} = 11.3$ км/с и равняться нулю при $v_{ej} \geq 16.4$ км/с.

В рассмотренных вариантах для $i_{ej} = 45^\circ$ отношение значений p_E при $T = 10$ млн лет и при $T = 1$ млн лет не превышало двух для $v_{ej} \leq 11.5$ км/с и могло достигать четырех при больших значениях v_{ej} . При $T \geq 10$ млн лет и $v_{ej} \leq 12$ км/с значения p_E для разных точек и углов выброса $i_{ej} \leq 89^\circ$ отличались обычно не более чем в два раза. При $T = T_{end}$ и v_{ej} , равном 11.5, 12 и 14 км/с, значения p_E равнялись примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. Единственное существенное отличие было в варианте vw (при выбросе с передней точки движения Земли) при $v_{ej} \geq 16.4$ км/с. Для точки выброса W при $v_{ej} = 16.4$ км/с и $30^\circ \leq i_{ej} \leq 60^\circ$ не менее 80% тел были выброшены на гиперболические орбиты и не менее 17% тел столкнулись с Солнцем. Все тела, выброшенные из точки W с $v_{ej} = 20$ км/с, столкнулись с Землей при $i_{ej} \geq 45^\circ$ (причем при $i_{ej} \geq 60^\circ$ – за время, меньшее 700 лет), а значения p_E равнялись 0.016 и 0.064 при i_{ej} , равном 30° и 15° соответственно. При этом более 90% тел выбрасывались на гиперболические орбиты при $i_{ej} = 30^\circ$, а 70% тел выпадали на Солнце при $i_{ej} = 15^\circ$. В некоторых вариантах значения p_E при $i_{ej} = 90^\circ$ могли отличаться даже от значений p_E при $i_{ej} = 89^\circ$. Например, для серии vf и $v_{ej} = 11.5$ км/с значения p_E равнялись 0.31 и 0.17 при $i_{ej} = 89^\circ$ и $i_{ej} = 90^\circ$ соответственно. Эти различия могут быть связаны с тем, что исходные данные при $i_{ej} = 90^\circ$ были очень близки для различных тел в одном и том же варианте, и не было такого осреднения по направлениям выброса, как при меньших значениях i_{ej} . Значения скоростей выброса при $i_{ej} = 90^\circ$ могли отличаться только в девятой значащей цифре, а координаты были полностью одинаковы.

В табл. 2 для $v_{ej} = 11.3$ км/с отношение числа столкнувшихся с Землей тел при некотором времени T к аналогичному числу при $T = T_{end}$ меньше отличалось для пар вариантов vw и vb , vf и vc , vi и vd . Хотя почти во всех вариантах табл. 2 при $v_{ej} \geq 11.3$ км/с динамические времена жизни последних долгоживущих тел превышали 100 млн лет, больше половины выпавших на Землю тел выпадали на нее за время $T < 1$ млн лет при $v_{ej} = 11.3$ км/с и за время $T < 10$ млн лет при

Таблица 2. Вероятности столкновений тел с Землей и Луной в различные моменты времени

p	N_v	v_{ej} , км/с					N_v	v_{ej} , км/с				
		11.3	11.5	12	14	16.4		11.3	11.5	12	14	16.4
p_{001}	vw	0.642	0.053	0.018	0	0	vb	0.647	0.026	0.017	0.0	0.0
p_{01}	vw	0.774	0.224	0.035	0.033	0	vb	0.760	0.269	0.052	0.019	0.019
p_1	vw	0.899	0.547	0.298	0.167	0	vb	0.856	0.526	0.276	0.173	0.115
p_{10}	vw	0.937	0.827	0.667	0.333	0	vb	0.916	0.782	0.707	0.558	0.519
p_{100}	vw	1.0	0.987	1.0	0.90	1.0	vb	1.0	0.987	0.931	0.962	0.962
p_E	vw	0.636	0.30	0.228	0.156	0.004	vb	0.668	0.312	0.232	0.208	0.208
p_M	vw	0.019	0.010	0.009	0.007	0.0002	vb	0.018	0.010	0.007	0.007	0.009
p_{001}	vf	0.209	0.046	0.041	0.033	0.038	vc	0.144	0.064	0.017	0.021	0.0
p_{01}	vf	0.425	0.218	0.041	0.033	0.038	vc	0.496	0.141	0.083	0.042	0.026
p_1	vf	0.724	0.552	0.306	0.133	0.192	vc	0.728	0.462	0.30	0.146	0.077
p_{10}	vf	0.918	0.816	0.816	0.60	0.577	vc	0.912	0.679	0.633	0.562	0.590
p_{100}	vf	0.985	0.977	0.918	0.966	1.0	vc	0.992	0.949	0.950	0.938	0.923
p_E	vf	0.536	0.348	0.196	0.120	0.104	vc	0.50	0.312	0.240	0.192	0.156
p_M	vf	0.013	0.011	0.008	0.005	0.005	vc	0.011	0.009	0.008	0.006	0.007
p_{001}	vu	0.328	0.029	0.016	0.0	0.0	vd	0.303	0.060	0.032	0.0	0.0
p_{01}	vu	0.580	0.186	0.048	0.047	0.0	vd	0.636	0.277	0.032	0.033	0.0
p_1	vu	0.815	0.471	0.274	0.116	0.088	vd	0.856	0.518	0.238	0.066	0.054
p_{10}	vu	0.885	0.714	0.613	0.558	0.559	vd	0.947	0.783	0.635	0.533	0.297
p_{100}	vu	0.992	0.929	0.968	0.907	0.971	vd	1.0	0.952	0.968	0.933	0.919
p_E	vu	0.524	0.280	0.248	0.172	0.136	vd	0.528	0.332	0.224	0.120	0.148
p_M	vu	0.013	0.009	0.010	0.007	0.006	vd	0.007	0.011	0.007	0.007	0.007

Примечания —

1) Отношения $p_{001}, p_{01}, p_1, p_{10}$ и p_{100} вероятностей столкновений тел с Землей за времена T , равные соответственно 0.01, 0.1, 1, 10 и 100 млн лет, к аналогичным вероятностям в конце эволюции для нескольких серий N_v расчетов (vw, vb, vf, vc, vu и vd) и нескольких скоростей v_{ej} (в км/с) выброса (приведенных в первой строке таблицы) при угле выброса i_{ej} , равном 45° .

2) p_E и p_M — это вероятности столкновений тел с соответственно Землей и Луной за весь рассмотренный интервал времени.

3) Значения $p_{001}, p_{01}, p_1, p_{10}, p_{100}, p_E$ и p_M приведены в строках таблицы, начиная с второй строки, причем в каждой строке приведены данные для двух точек выброса (для двух значений N_v). Данные для разных точек выброса разделены двойными линиями.

Таблица 3. Интервал значений вероятности p_E столкновений тел с Землей за несколько интервалов времени T (в млн лет) для нескольких серий N_v расчетов и нескольких значений скоростей выброса v_{ej} (в км/с) при угле выброса i_{ej} , равном 45°

T	$v_{ej} = 11.3$	$v_{ej} = 11.5$	$v_{ej} = 12$	$v_{ej} = 14$	$v_{ej} = 16.4$	$v_{ej} = 20$
0.01	0.072–0.432	0.008–0.02	0.004–0.008	0.0–0.004	0.0–0.004	0.0
0.1	0.228–0.508	0.044–0.092	0.008–0.02	0.004–0.008	0.0–0.004	0.0
1	0.364–0.572	0.132–0.192	0.06–0.072	0.008–0.036	0.0–0.024	0.0–0.02
10	0.456–0.612	0.2–0.284	0.152–0.164	0.04–0.116	0.0–0.092	0.0–0.096
100	0.496–0.668	0.26–0.34	0.18–0.244	0.108–0.20	0.004–0.2	0.0–0.192
T_{end}	0.50–0.668	0.28–0.348	0.196–0.248	0.12–0.208	0.004–0.208	0.0–0.216

$v_{ej} \leq 12$ км/с. При $T = 100$ млн лет значения p_E превышали 90% от значений p_E при $T = T_{\text{end}}$. Среднее значение p_E зависит от распределения тел по v_{esc} и i_{ej} . При $T = T_{\text{end}}$ оно, вероятно, около 0.2. Отношение вероятности столкновений тел с Землей к вероятностям столкновений тел с другими планетами и Солнцем со временем обычно уменьшалось. Общее количество тел, доставленных на Землю и Венеру, вероятно, не сильно отличалось.

Значения отношения $k_{pE/pM} = p_E^*/p_M^*$ вероятностей столкновений тел с Землей и Луной, полученные на основе массивов элементов орбит, приведены на рис. 1 для конечных рассмотренных интервалов времени. Из этого рисунка видно, что значения $k_{pE/pM}$ находятся в основном в диапазонах 35–48, 30–40, 30–35, 25–32, 17–30, 15–30 и 15–25 при v_{ej} , равном 11.3, 11.4, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Более узкий диапазон был получен при $v_{ej} = 11.5$ км/с. В среднем по разным вариантам не было существенного отличия в значениях $k_{pE/pM}$ при различных значениях i_{ej} от 15° до 89° . Существенное отличие значений $k_{pE/pM}$ иногда было при i_{ej} равном 89° и 90° . Оно было связано с тем, что при $i_{ej} = 90^\circ$ вектора начальных скоростей рассмотренных тел были практически одинаковыми. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) для $h = 100$ км значения $k_{pE/pM}$ были в диапазоне от 30 до 33 при v_{ej} , равном 12.7, 14.7 и 16.4 км/с, и равнялись 79 и 144 при v_{ej} , равном 11.71 и 11.22 км/с. Как отмечалось в предыдущем разделе, значения отношения вероятности столкновений тел с Землей и Луной могут быть немного меньше значений $k_{pE/pM}$.

На рис. 1–3 данные приведены для конечного момента времени (обычно равного нескольким сотням миллионов лет), когда все тела выпали на планеты или Солнце или достигли 2000 а. е. от Солнца. Значения $k_{pE/pM}$ были в основном больше при рассмотрении меньших интервалов времени. При $T = 10$ млн лет примерно в 90% вариантов значения $k_{pE/pM}$ были больше, чем при $T = T_{\text{end}}$, причем положительная разность между этими значениями не превышала 2 в более половине вариантов и была от 2 до 4 примерно в четверти вариантов.

Примерно такое же (20–40) характерное отношение количества тел, сталкивавшихся с Землей, к числу тел, сталкивавшихся с Луной, было получено в (Маров, Ипатов, 2023) для планетезималей, пришедших к Земле 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.

На рис. 2 приведены значения вероятности столкновений тел с Луной, вычисленной по форму-

ле $p_M = p_E/k_{pE/pM}$, в зависимости от угла выброса i_{ej} для ряда значений v_{ej} , скорости выброса и различных точек выброса. Эти значения вероятностей приведены для всего рассмотренного интервала времени. Вероятность p_M столкновения тела с Луной находилась в основном в районе 0.01–0.017 при $v_{ej} = 11.3$ км/с, 0.008–0.014 при $v_{ej} = 11.4$ км/с, 0.008–0.014 при $v_{ej} = 11.5$ км/с, 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с и 0.004–0.008 при $v_{ej} \geq 14$ км/с. Заметная зависимость p_M от i_{ej} была только для точки выброса W на передней полусфере при $v_{ej} \geq 14$ км/с. Для этой точки выброса значения p_M были заметно меньше вышеприведенных значений при $i_{ej} \geq 60^\circ$ и $v_{ej} = 14$ км/с, при $i_{ej} \geq 45^\circ$ и $v_{ej} = 16.4$ км/с, а также при $v_{ej} = 20$ км/с. В (Reyes-Ruiz и др., 2012) для $h = 100$ км и $v_{ej} = 12.7$ км/с большее число тел сталкивалось с планетами при выбросе тел из задней полусферы Земли, чем из передней полусферы. Из-за движения Земли по орбите тела, стартовавшие из ее задней полусферы, имеют меньшую скорость движения относительно Солнца, получают менее эксцентричные гелиоцентрические орбиты и, соответственно, имеют большую вероятность столкновений с планетами.

Как отмечалось в предыдущем разделе, на рис. 2 приведены значения p_M для орбиты Луны на границе сферы действия Земли. Для современной орбиты Луны (при $a_M = 60$) эти оценки p_M будут немного больше (так как значения отношения k вероятностей столкновений с Землей и Луной могут быть немного меньше $k_{pE/pM}$), но практически такие же. В табл. 1 при $a_M = 60$ отношение $k/k_{pE/pM}$ было в диапазонах 0.825–0.87, 0.71–0.78 и 0.65–0.74 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно. Реальное отношение $k/k_{pE/pM}$ может быть больше этих значений, но не превышает 1.

Выше приведены значения вероятностей столкновений выброшенных тел с Луной за весь рассмотренный интервал времени (около нескольких сотен миллионов лет). Разность между значениями $k_{pE/pM}$ при $T = 10$ млн лет и $T = T_{\text{end}}$ в основном не превышала 10%. Поэтому для приближенных оценок можно пользоваться значениями $k_{pE/pM}$ из рис. 1. Доли тел, выпавших на Луну за разные моменты времени относительно их конечных значений, примерно такие же, как данные табл. 2, приведенные для Земли.

Отношение вероятностей столкновений тел с Луной за первые 10 млн лет к этим вероятностям за весь интервал времени в основном находилось в интервалах 0.7–0.8, 0.55–0.65 и 0.45–0.6 при v_{ej} ,

равном 11.5, 12 и 16.4 км/с соответственно (см. табл. 2). Это отношение имело тенденцию к убыванию при больших значениях v_{ej} .

Значения **скоростей столкновений тел с Луной и Землей** в зависимости от угла выброса i_{ej} для ряда значений v_{ej} скорости выброса и различных точек выброса представлены на рис. 3. Параболическая скорость на поверхности Луны в несколько раз меньше характерной скорости входа тела в сферу действия Земли. Поэтому значения скорости столкновения тела с Луной лишь немного превышали скорость входа тела в сферу действия Земли. Отношение этих скоростей равно 1.05, 1.03 и 1.01 при $k_{pE/pM}$, равном 20, 30 и 40 соответственно.

Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей и Луной тем больше, чем больше скорость выброса v_{ej} . Значения скоростей столкновений тел с Землей составили в основном около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 и 15–35 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16, 11–23 и 12–33 км/с при v_{ej} , равном 11.3, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Чем больше v_{ej} , тем шире диапазон значений средних скоростей столкновений с Землей или Луной, полученных для различных углов и точек выброса.

РОСТ ЗАРОДЫША ЛУНЫ ПРИ ВЫПАДЕНИИ НА НЕГО ВЕЩЕСТВА, ВЫБРОШЕННОГО С ЗАРОДЫША ЗЕМЛИ

Тела, выброшенные с Земли, могли участвовать в формировании Луны, как при аккумуляции Земли и Луны, так и при поздней тяжелой бомбардировке (late heavy bombardment). Для того, чтобы содержать нынешнюю долю железа, Луна должна была аккумулировать основную часть своей массы из мантии Земли (Ипатов, 2018). Приведенные выше расчеты показывают, что при современной орбите и массе Луны на нее выпадало бы около 1% тел, выброшенных с Земли. Эта доля меньше при меньшей массе зародыша Луны. Из полученных оценок вероятностей столкновений тел, выброшенных с Земли, с Луной, двигавшейся по ее современной орбите, (рис. 2) можно сделать вывод о том, что для того, чтобы Луна приобрела большую часть своей массы за счет вещества, выброшенного с Земли при ее неоднократной бомбардировке, масса вещества, выброшенного с Земли во время ее аккумуляции, должна быть сравнима с массой Земли. Анализируя приведенные во введении данные о характерных скоростях столкновений планетезималей с Землей и зависимости массы вещества, выброшенно-

го при столкновении тела с Землей, от скорости столкновения, можно ожидать, что при большинстве столкновений ударников с Землей масса выброшенного вещества была в несколько раз (чаще на порядок) меньше массы ударника. Сопоставимый с массой ударника выброс вещества мог быть только при сравнительно редких столкновениях с Землей тел, приходивших из-за орбиты Марса. Эти оценки свидетельствуют в пользу того, что тел, выброшенных с Земли и упавших на зародыш Луны, вероятно, было недостаточно для роста Луны из маленького зародыша на ее современной орбите. Этот результат свидетельствует в пользу образования лунного зародыша и дальнейшего его роста до большей части современной массы Луны вблизи Земли. Ипатов (2018) предположил, что первоначальный зародыш Луны с массой не более 0.1 от массы Луны образовался одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения.

Отношение доли тел, столкнувшихся с Землей, к доле тел, столкнувшихся с Луной, для планетезималей из зон питания планет земной группы близко к аналогичному рассмотренному выше отношению $k_{pE/pM}$ для тел, выброшенных с Земли и покинувших ее сферу действия. В (Маров, Ипатов, 2021) отмечалось, что отношение k_{EM} количества планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, варьировалось в основном от 20 до 40. При этом для планетезималей с большими полуосями начальных орбит $0.9 \leq a_0 \leq 1.1$ а. е. и с небольшими начальными эксцентриситетами k_{EM} было в основном в диапазоне от 30 до 40, а планетезимали, первоначально более удаленные от орбиты Земли, приходили к ней с более эксцентричных орбит, и такое отношение k_{EM} для них было меньше, чем для близких слабо эксцентричных орбит. На рис. 1 значения $k_{pE/pM}$ варьировались в основном от 35–47 при $v_{ej} = 11.3$ км/с до 17–30 при $v_{ej} = 16.4$ км/с и 15–25 при $v_{ej} = 20$ км/с.

Суммарная масса тел, выброшенных с Земли и до выхода из ее сферы действия столкнувшихся с Луной на ее современной орбите, вероятно, была невелика. В проведенных расчетах, за исключением выброса тел со скоростями, чуть превышавшими параболическую скорость Земли, выброшенные тела сразу покидали сферу действия Земли и до выхода из этой сферы могли пересекать орбиту Луны не более одного раза. Многие наклоненные орбиты выброшенных тел могли не пересекать орбиту Луны. Отношение двух радиусов Луны к длине ее орбиты равно 0.00144 и указывает на максимальное значение вероятности столкновения тела с Луной для рассматриваемой модели. Это отношение на порядок меньше представленных на рис. 2 веро-

ятностей столкновений выброшенных тел, которые покидали сферу действия Земли, но потом в течение миллионов лет неоднократно входили в эту сферу. Для возможности многократных сближений выброшенного тела с Луной нужно, чтобы апогей его орбиты вокруг Земли находился за орбитой Луны, но внутри сферы действия Земли (а перицентрическое расстояние было больше радиуса Земли). Такая возможность больше для меньшего расстояния Луны от Земли.

Рассмотрим следующую модель. Пусть при столкновениях планетезималей с Землей в среднем масса выброшенного вещества равнялась k_{ej} от массы вещества, вошедшего в Землю. При росте массы Земли на $k_E \times m_E$ суммарная масса планетезималей, вошедших в сферу действия Земли и столкнувшихся с Луной, равна $k_E m_E (1 + k_{ej}) / r_{EM}$. Масса тел, выброшенных с Земли и выпавших на Луну после выхода из сферы действия Земли (при, возможно, многократных последующих попадании в сферу действия Земли), равна $k_{ej} \times k_E \times m_E \times p_E / k_{pE/pM}$. Отношение k_{plb} массы планетезималей, выпавших на Луну, к массе тел, выброшенных с Земли и выпавших на Луну, равно $(k_{pE/pM} / r_{EM}) (1 + k_{ej}) / (k_{ej} \times p_E)$. Как отмечалось выше, $k_{pE/pM} / r_{EM}$ близко к 1. Поэтому k_{plb} близко к $(1 + k_{ej}) / (k_{ej} \times p_E)$. Так как $k_{ej} < 1$ (иначе Земля бы не выросла), то $(1 + k_{ej}) / k_{ej} > 2$. Доля p_E тел, выброшенных с Земли и выпавших позднее обратно на нее, порядка 0.2–0.3 (табл. 2–3). Из результатов, представленных во введении, можно сделать вывод о том, что для большинства столкновений планетезималей с Землей k_{ej} не превышало 0.15. При $k_{ej} = 0.15$ и $p_E = 0.3$ k_{plb} близко к 25. Эти оценки показывают, что суммарная масса планетезималей (с большим содержанием железа, чем в мантии Земли), столкнувшихся с Луной на ее современной орбите, была по крайней мере в несколько раз больше массы тел, выброшенных с Земли и затем столкнувшихся с Луной. Учет выпадений планетезималей, более богатых железом, непосредственно на Луну, как и оценки в начале данного раздела, свидетельствует в пользу приобретения Луной основной массы вещества более близко к Земле, чем современная орбита Луны.

При орбите Луны, близкой к Земле, доля тел, выброшенных с Земли и покинувших сферу действия Земли, при выпадении на Луну могла быть всего немного больше 13 (отношения квадратов радиусов Земли и Луны). Однако модели роста массы зародыша Луны в основном за счет таких тел препятствует то, что еще большее число тел (не выброшенных с Земли) с примерно такими же (в среднем немного большими) скоростями могло выпадать непосредственно на Луну (не будучи выброшенными с Земли) и приносить на

Луну материал более богатый железом, чем мантия Земли.

Нам кажется более вероятным, что, как было предложено в (Ипатов, 2018), первоначальный зародыш Луны (с массой на порядок меньшей современной массы Луны) образовался одновременно с зародышем Земли при сжатии общего разреженного сгущения. Это сгущение получило угловой момент, необходимый для образования двойной системы, при столкновении двух сгущений. Такие столкновения сгущений не часты, что объясняет отсутствие крупных спутников у других планет земной группы. Рост зародыша Луны, вероятно, происходил в рамках модели мультиимпактов, когда вещество, выброшенное с Земли, образовывало диск около Земли, из которого аккумулировались тела. В (Rufu и др., 2017) массы ударников были не меньше массы современной Луны. Проведенные нами расчеты эволюции орбит выброшенных тел были для столкновений более мелких планетезималей с Землей, при которых большинство выброшенного вещества, не выпавшего сразу обратно на Землю, покидало сферу действия Земли. Наличие первоначально крупного зародыша Луны способствовало более эффективному захвату выброшенного с Земли вещества зародышем Луны. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила бы на орбиты вокруг Земли.

ВЫВОДЫ

Рассматривалась эволюция орбит тел, выброшенных с Земли при ударах крупных тел-планетезималей. Такие столкновения происходили во время аккумуляции Земли и во время поздней тяжелой бомбардировки. В каждом варианте расчетов исследовалось движение 250 тел, выброшенных с Земли, при фиксированных значениях угла выброса i_{ej} (отсчитываемого от плоскости поверхности), скорости выброса v_{ej} и шага интегрирования по времени. В разных вариантах значения угла выброса i_{ej} составляли 15°, 30°, 45°, 60°, 89° или 90°. Скорость v_{ej} тел, выброшенных из Земли, в основном равнялась 11.22, 11.5, 12, 14, 16.4 или 20 км/с, но рассматривались и другие значения в диапазоне от 11.22 до 11.5 км/с. Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. Из интегрирования исключались тела, которые столкнулись с планетами или Солнцем или достигли 2000 а. е. от Солнца. Рассматривался выброс тел из шести противоположных точек земной поверхности для ряда значений скоростей и углов выброса тел. В рассмотренных

вариантах расчетов движения тел, выброшенных с Земли, большая часть тел покидала сферу Хилла Земли и двигалась по гелиоцентрическим орбитам. Их динамическое время жизни достигало нескольких сотен миллионов лет.

Средние скорости столкновений выброшенных тел с Землей и Луной тем больше, чем больше скорость выброса. Значения скоростей столкновений тел с Землей составили около 13, 14–15, 14–16, 14–20, 14–25 и 15–35 км/с при скорости выброса, равной 11.3, 11.5, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно. Скорости столкновений тел с Луной находились в основном в пределах 7–8, 10–12, 10–16, 11–23 и 12–33 км/с при v_{ej} , равном 11.3, 12, 14, 16.4 и 20 км/с соответственно.

Вероятности p_E и p_M столкновений тел с Землей и Луной в среднем были ниже при более высоких скоростях выброса v_{ej} . На всем рассматриваемом интервале времени при значениях v_{ej} , равных 11.5, 12 и 14 км/с, значения p_E составляли примерно 0.3, 0.2 и 0.15–0.2 соответственно. При скоростях выброса $v_{ej} \leq 11.25$ км/с, т. е. немного превышающих параболическую скорость, большая часть выброшенных тел выпадала обратно на Землю. Вероятность p_M столкновения выброшенного с Земли тела с Луной была примерно в 15–35 раз меньше, чем с Землей при скорости выброса $v_{ej} \geq 11.5$ км/с. Вероятность столкновения таких тел с Луной на ее современной орбите составляла в основном около 0.004–0.008 при скоростях выброса не менее 14 км/с и около 0.006–0.01 при $v_{ej} = 12$ км/с. Эта вероятность была больше при меньших скоростях выброса и была в диапазоне 0.01–0.02 при скорости выброса, равной 11.3 км/с.

Полученные результаты показывают, что тел, выброшенных с Земли и выпавших на зародыш Луны, было бы недостаточно для того, чтобы Луна выросла до своей современной массы из небольшого зародыша, двигавшегося по современной орбите Луны. Этот вывод свидетельствует в пользу того, что зародыш Луны образовался (например, одновременно с зародышем Земли из общего разреженного сгущения) и в дальнейшем приобрел большую часть массы Луны на небольшом расстоянии от Земли. Для более эффективного роста зародыша Луны желательно, чтобы при некоторых соударениях тел-ударников с Землей выброшенные тела не просто вылетали из кратера, а часть вещества выходила на орбиты вокруг Земли, как в модели мультиимпактов.

Автор выражает глубокую признательность А.Б. Макалкину за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект 21–17–00120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемяева Н.А., Шувалов В.В. Численное моделирование высокоскоростных ударных выбросов при падении на Луну комет и астероидов // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 4. С. 351–356. (Artemieva N.A., Shuvalov V.V. Numerical simulation of high-velocity impact ejecta following falls of comets and asteroids onto the Moon // Sol. Syst. Res. 2008. V. 42. № 4. P. 329–334).
- Афанасьев В.Н., Печерникова Г.В. О вероятности захвата допланетных тел в протолунный рой при формировании системы Земля–Луна // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 6. С. 389–409. (Afanas'ev V.N., Pechernikova G.V. On the probability of capturing preplanetary bodies into the protolunar swarm during the formation of the Earth–Moon system // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 6. P. 382–402).
- Васильев С.В., Кривцов А.М., Галимов Э.М. Исследование процесса роста системы планета-спутник в результате аккумуляции вещества пылевого облака // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. С. 420–429. (Vasil'ev S.V., Krivtsov A.M., Galimov E.M. Study of the planet-satellite system growth process as a result of the accumulation of dust cloud material // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 5. P. 410–419).
- Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–16.
- Галимов Э.М. Проблема происхождения системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: Наука, 1995. С. 8–45.
- Галимов Э.М. Современное состояние проблемы происхождения системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Ред. Галимов Э.М. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2008. С. 213–222.
- Галимов Э.М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газо-пылевого сгущения // Геохимия. 2011. Т. 6. № 6. С. 563–580.
- 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.
- Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля–Луна // Геохимия. 2005. № 11. С. 1139–1150.
- Горькавый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // Изв. Крым. Астрофиз. Obs. 2007. Т. 103. № 2. С. 143–155.
- Жарков В.Н. Об истории лунной орбиты // Астрон. вестн. 2000. Т. 34. С. 1–11. (Zharkov V.N. On the history of the lunar orbit // Sol. Syst. Res. 2000. V. 34. P. 1–11).

- Ипатов С.И.* Времена эволюции дисков планетезималей // Астрон. журн. 1988. Т. 65. № 5. С. 1075–1085.
- Ипатов С.И.* Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС, 2000. 320 с. (также Изд. стереотип. URSS. 2021. 320 с.)
<https://doi.org/10.17513/np.451>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46237738>. http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_29239
- Ипатов С.И.* Формирование транснептуновых спутниковых систем на стадии сгущений // Астрон. вестн. 2017а. Т. 51. № 4. С. 321–343. (*Ipatov S.I.* Formation of trans-Neptunian satellite systems at the stage of condensations // Sol. Syst. Res. 2017a. V. 51. № 4. P. 294–314.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617040013>,
<https://arxiv.org/abs/1801.05217>
- Ипатов С.И.* Формирование орбит меньших компонент в обнаруженных двойных объектах транснептунового пояса // Астрон. вестн. 2017б. Т. 51. № 5. С. 441–449. (*Ipatov S.I.* Origin of orbits of secondaries in the discovered trans-Neptunian binaries // Sol. Syst. Res. 2017b. V. 51. № 5. P. 409–416.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094617050045>,
<https://arxiv.org/abs/1801.05254>
- 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.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094618050040>.
<http://arxiv.org/abs/2003.09925>.
<https://www.academia.edu/38545653/>
- Ипатов С.И.* Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 5. С. 349–379. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39180392>, DOI: 10.1134/S0320930X19050049. (*Ipatov S.I.* Probabilities of collisions of planetesimals from different regions of the feeding zone of the terrestrial planets with forming planets and the Moon // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 332–361.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094619050046>.
<http://arxiv.org/abs/2003.11301>. <https://rdcu.be/bRVA8>. <https://www.academia.edu/42216860>)
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Формирование Земли и Луны: влияние малых тел // Геохимия. 2021. Т. 66. № 11. С. 964–971.
 DOI: 10.31857/S0016752521110078.
<http://arxiv.org/abs/2112.06047>
- Маров М.Я., Ипатов С.И.* Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // Успехи физ. наук 2023. Т. 193. № 1. С. 2–32.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039044>.
<http://arxiv.org/abs/2309.00716>
- Маров М.Я., Воронаев С.А., Ипатов С.И., Бадюков Д.Д., Слюта Е.Н., Стенников А.В., Федюлов В.С., Душен-*
ко Н.В., Сорокин Е.М., Кронрод Е.В. Формирование Луны и ранняя эволюция Земли. М.: URSS, 2019. 320 с.
- Мелош Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. Пер. с англ. М.: Мир, 1994. 336 с.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. I: Образование околоземного роя тел // Астрон. журн. 1960. Т. 37. № 4. С. 690–702.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. II: Рост Луны в околоземном спутниковом рое // Астрон. журн. 1963. Т. 40. № 2. С. 288–296.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. III: Некоторые вопросы динамики околоземного роя // Астрон. журн. 1971. Т. 48. № 4. С. 819–829.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Численное моделирование высокоскоростных выбросов при ударах комет и астероидов: предварительные результаты // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 5. С. 402–411. (*Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Numerical simulation of high-velocity ejecta following comet and asteroid impacts: preliminary results // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. P. 392–401).
- Armstrong J.C., Wells L.E., Guillermo G.* Rummaging through Earth's attic for remains of ancient life // Icarus. 2002. V. 160. P. 183–196.
- Artemieva N.* From the Moon to the Earth without Jules Verne – lunar meteorites and lunar dust delivery // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #1659. (Abstract).
- Barnouin O.S., Dalya R.T., Cintala M.J., Crawford D.A.* Impacts into coarse-grained spheres at moderate impact velocities: Implications for cratering on asteroids and planets // Icarus. 2019. V. 325. P. 67–83.
- 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>.
- Beech M., Comte M., Coulson I.* The production of terrestrial meteorites – Moon accretion and lithopanspermia // Am. J. Astron. and Astrophys. 2019. V. 7. № 1. P. 1–9.
- Bottke W.F., Norman M.D.* The late heavy bombardment // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 2017. V. 45. P. 619–647.
- Bulirsh R., Stoer J.* Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods // Num. Math. 1966. № 8. P. 1–13.
- 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.
- Canup R.M., Richter K., Dauphas N., Pahlevan K., Čuk M., Lock S.J., Stewart S.T., Salmon J., Ruffy R., Nakajima M., Magna T.* Origin of the Moon // *New views of the Moon II*. Book chapter. 2021. 71 p. <https://arxiv.org/abs/2103.02045>
- Chambers J.E.* A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1999. V. 304. P. 793–799.
- Citron R.I., Aharonson O., Perets H., Genda H.* Moon formation from multiple large impacts // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. #2085 (Abstract).
- 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.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C.* Primary accretion by turbulent concentration: The rate of planetesimal formation and the role of vortex tubes // 43th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2012. #2536 (Abstract).
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Sharif K.* Toward planetesimals: Dense chondrule clumps in the protoplanetary nebula // *Astrophys. J.* 2008. V. 687. P. 1432–1447.
- Cuzzi J.N., Hogan R.C., Bottke W.F.* Towards initial mass functions for asteroids and Kuiper belt objects // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 518–538.
- Frantseva K., Nesvorný D., Mueller M., van der Tak F.F.S., ten Kate I.L., Pokorný P.* Exogenous delivery of water to Mercury // *Icarus*. 2022. V. 383. id. 114980 (11 pp.).
- Gallant J., Gladman B., Cuk M.* Current bombardment of the Earth-Moon system: Emphasis on cratering asymmetries // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 371–382.
- Gattacceca J., Debaille V., Devouard B., Leya I., Jourdan F., Braucher R., Roland J., Pourkhorsandi H., Goderis S., Jambon A.* Northwest Africa 13188: a possible meteorite ... from Earth! // *Abstracts of Goldschmidt Conf.* 2023. <https://conf.goldschmidt.info/goldschmidt/2023/meetingapp.cgi/Paper/20218>
- Gladman B., Dones L., Levison H.F., Burns J.A.* Impact seeding and reseeded in the inner Solar System // *Astrobiology*. 2005. V. 5. P. 483–496. <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ast.2005.5.483>
- Galimov E.M., Krivtsov A.M.* Origin of the Moon. New concept. Berlin.: De Gruyter, 2012. 168 p.
- Gorkavyy N.N.* The new model of the origin of the Moon // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2004. V. 36. Abstr. P. 861.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
- Holsapple K.A., Housen K.R.* A crater and its ejecta: An interpretation of deep impact // *Icarus*. 2007. V. 187. P. 345–356.
- Ipatov S.I.* Collisions of bodies ejected from several places on the Earth and the Moon with the terrestrial planets and the Moon // *Abstracts of 54th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2023. #1508. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/1508.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. <https://doi.org/10.1023/B:MOON.0000031928.45965.7b>. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // *Adv. Space Res.* 2004a. V. 33. P. 1524–1533. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00451-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00451-4). <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 // *Ann. NY. Acad. Sci.* 2004b. V. 1017. P. 46–65. <https://doi.org/10.1196/annals.1311.004>. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0308448>.
- Johansen A., Oishi J.S., Mac Low M.-M., Klahr H., Henning T., Youdin A.* Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks // *Nature*. 2007. V. 448. P. 1022–1025.
- Johansen A., Youdin A., Klahr H.* Zonal flows and long-lived axisymmetric pressure bumps in magnetorotational turbulence // *Astrophys. J.* 2009a. V. 697. P. 1269–1289.
- Johansen A., Youdin A., Mac Low M.-M.* Particle clumping and planetesimal formation depend strongly on metallicity // *Astrophys. J.* 2009b. V. 704. P. L75–L79.
- Johansen A., Klahr H., Henning T.* High-resolution simulations of planetary formation in turbulent protoplanetary discs // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 529. id. A62 (16 p.).
- Johansen A., Youdin A.N., Lithwick Y.* Adding particle collisions to the formation of asteroids and Kuiper belt objects via streaming instabilities // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 537. id. A125 (17 p.).
- Levison H.F., Duncan M.J.* The long-term dynamical behavior of short-period comets // *Icarus*. 1994. V. 108. P. 18–36.
- 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.
- Lyra W., Johansen A., Zsom A., Klahr H., Piskunov N.* Planet formation bursts at the borders of the dead zone in 2D numerical simulations of circumstellar disks // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 497. P. 869–888.

- Melosh H.* Ejection of rock fragments from planetary bodies // *Geology*. 1985. V. 13. P. 144–148.
- Ópik E.J.* Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // *Proc. Roy. Irish Acad. Sect. A*. 1951. V. 54. P. 165–199.
- Pahlevan K., Morbidelli A.* Collisionless encounters and the origin of the lunar inclination // *Nature*. 2015. V. 527. № 7579. P. 492–494.
(<https://arxiv.org/abs/1603.06515>)
- Raducan S.D., Davison T.M., Collins G.S.* Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on asteroid surfaces // *Icarus*. 2022. V. 374. article id. 114793 (16 p.).
(<https://arxiv.org/abs/2105.01474>)
- Reyes-Ruiz M., Chavez C.E., Aceves H., Hernandez M.S., Vazquez R., Nuñez P.G.* Dynamics of escaping Earth ejecta and their collision probabilities with different Solar System bodies // *Icarus*. 2012. V. 220. P. 777–786.
- Ringwood A.E.* Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1989. V. 95. № 3–4. P. 208–214.
- Rufu R., Aharonson O.* A multiple impact hypothesis for Moon formation // 46th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2015. #1151 (Abstract).
- Rufu R., Aharonson O., Perets H.B.* A multiple-impact origin for the Moon // *Nature Geosci.* 2017. V. 10. P. 89–94.
- Rufu R., Salmon J., Pahlevan K., Visscher C., Nakajima M., Righter K.* The origin of the Earth-Moon system as revealed by the Moon // *Bull. Am. Astron. Soc.* 2021. V. 53. № 4 (Planet. Sci. and Astrobiology Decadal Surv. 2023–2032, white paper). e-id. 238.
DOI: 10.3847/25c2cf6b.6e7d4ab6
- Salmon J., Canup R.M.* Lunar accretion from a Roche-interior fluid disk // *Astrophys. J.* 2012. V. 760. id. A83. (18 p.).
- Svetsov V.* Cratering erosion of planetary embryos // *Icarus*. 2011. V. 214. P. 316–326.
- Svetsov V.V., Pechernikova G.V., Vityazev A.V.* A model of Moon formation from ejecta of macroimpacts on the Earth // 43th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2012. #1808 (Abstract).
- Touma J., Wisdom J.* Evolution of the Earth-Moon system // *Astron. J.* 1994. V. 108. № 5. P. 1943–1961.
- Wang N., Zhou J.-L.* Analytical formulation of lunar cratering asymmetries // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 594. id. A52. (25 p.).
- Youdin A.N.* On the formation of planetesimals via secular gravitational instabilities with turbulent stirring // *Astrophys. J.* 2011. V. 731. id. A99 (18 p.).
- Youdin A.N., Kenyon S.J.* From disks to planets // *Planets, Stars and Stellar Systems. Solar and Stellar Planetary Systems* / Eds: Oswalt T.D., French L.M., Kalas P. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2013. V. 3. P. 1–62.
http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5606-9_1