

УДК 523.3-52

ВОПРОСЫ КО-АККРЕЦИОННОЙ МУЛЬТИИМПАКТНОЙ ГИПОТЕЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ

© 2025 г. В. В. Светцов*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: svetsov@idg.ras.ru

Гипотеза о том, что Луна образовалась из околопланетного роя, сформировавшегося путем гравитационного захвата тел из зоны питания Земли в период ее аккумуляции и пополнявшегося веществом, выброшенным при ударах крупных тел, появилась достаточно давно. Но обоснование гипотезы далеко от завершения, хотя это весьма актуально ввиду отсутствия непротиворечивой теории происхождения Луны. В данной работе проведено численное моделирование ударов крупных тел по Земле с разными скоростями, и определены массы и скорости вещества, выбрасываемого на баллистические и гелиоцентрические орбиты, а также концентрация железа в этих выбросах. Суммарная масса выбросов за время роста Земли, начиная с момента, когда она аккумулировала половину ее современной массы, составляет более десяти лунных масс при скоростях ударов, немного превышающих скорость убегания, и растет с увеличением скорости ударов. Рассмотрены вероятности многократных пролетов осколков, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, через сферу Хилла, сложности ко-аккремционной мультиимпактной модели и перспективы ее развития.

Ключевые слова: происхождение Луны, аккреция, околопланетный диск, удары, выбросы на орбиты.

Для цитирования: Светцов В.В. Вопросы ко-аккремционной мультиимпактной гипотезы образования Луны // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 82–93.
https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_82

Введение

Разработанные до сих пор гипотезы образования Луны имеют существенные недостатки, и вопрос о ее происхождении продолжает оставаться открытым. Теория образования Луны должна учитывать по крайней мере следующие данные: угловой момент системы Земля–Луна, массу и плотность Луны, небольшую массу лунного ядра, дефицит летучих элементов на Луне и сходство изотопного состава Луны и Земли. Главенствующая в настоящее время гипотеза образования Луны в результате гигантского удара по Земле была предложена достаточно давно [Hartmann, Davis, 1975] и получила дальнейшее обоснование путем большого количества численных экспериментов [Canup et al., 2023; Zhou et al., 2024]. В канонической модели [Canup, Asphaug, 2001] импактор имеет массу около 0.1 от массы Земли, скорость близкую к скорости убегания V_{esc} и угол удара 45° . Эта модель успешно объясняет угловой момент системы Земля–Луна, массу Луны и ее ядра, но наталкивается на трудности при объяснении изотопного сходства Земли и Луны, поскольку большая часть массы Луны образуется из вещества ударяющего тела. Маловероятно, что столь крупное тело с относительной массой 0.1 существовало в зоне питания Земли к концу ее роста и могло иметь схожий с Землей состав. Различные модификации этой модели не решили проблему, и в последнее время высказываются сомнения в ее правильности [Canup et al., 2023; Fischer et al., 2024; Sossi et al., 2025].

Была предложена другая модель образования Луны в результате большого количества ударов крупных тел с массами от ~ 0.01 до ~ 0.1 от массы Земли и скоростями от 1 до $4V_{esc}$ под разными углами [Rufu et al., 2017]. В ней предполагается, что в результате ряда отдельных ударов, аналогично модели

гигантского удара, вблизи предела Роша, с внешней его стороны образуются спутники Земли с массой значительно меньше лунной. Они мигрируют к периферии за счет приливных сил и соединяются, постепенно образуя Луну. В результате Луна определяется случайной последовательностью 20–30 ударов. Но, как показали расчеты [Rufu et al., 2017], эффективное образование околоземных дисков из осколков происходит при ударах с углами α менее 30° (относительно линии, соединяющей центры сталкивающихся тел) и со скоростями (2–4) V_{esc} . Такие большие скорости и небольшие углы очевидно необходимы для получения пара и высоких давлений, чтобы выбросить вещество на околоземные орбиты. Но эти скорости ударов плохо согласуются с существующими сценариями образования Солнечной системы. Во многих вариантах расчетов [Rufu et al., 2017] в образующихся околопланетных дисках содержится более 10% железа, в то время как масса ядра Луны меньше и, вероятно, не превышает 1.5% [Sossi et al., 2025]. В расчетах предполагалось, что удары происходят на последней стадии аккумуляции Земли, когда ее масса близка к современной, но при этом учитывались импакторы очень большого размера вплоть до размера Марса. Причем считалось, что импакторы состоят из ядра (30% массы) и мантии и находятся в состоянии изотермического равновесия с температурой поверхности 2000 К. Проводились лишь расчеты ударов в экваториальной плоскости и принималось, что период вращения Земли составляет от ~ 3 до ~ 15 часов. Кроме того, не исследовались процессы образования небольших спутников из околопланетных дисков, миграция спутников с небольшими массами и процессы слияния спутников на периферии. Таким образом, мультиимпактная гипотеза [Rufu et al., 2017] имеет существенные недостатки и нуждается в более тщательном обосновании.

В ко-аккреционной теории образования Луны [Рускол, 1975] предполагалось, что столкновения допланетных тел внутри сферы Хилла приводят к образованию околопланетного роя тел, вращающихся вокруг растущей Земли. По мере накопления массы роя за счет столкновений с телами из зоны питания планеты происходит объединение тел этого околопланетного (или в данном случае протоспутникового) роя в спутник или несколько спутников. Вследствие перемешивания вещества в зоне питания планеты составы Земли и падающих на нее тел близки [Печерникова, 2014], и поэтому образующийся спутник должен иметь состав, близкий к составу Земли. Существенная проблема этой гипотезы состоит в недостатке массы. Как показано в [Печерникова и др., 1984; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996; Афанасьев, Печерникова, 2022], масса долунного роя в ко-аккреционной модели составляет лишь 10^{-4} – 10^{-5} от массы планеты.

Есть предположение, что увеличение массы роя может происходить при многочисленных ударах крупных допланетных тел по растущей Земле. Околопланетный рой частиц может пополняться веществом, выбрасываемым на баллистические и гелиоцентрические орбиты [Печерникова, 1989; Витязев и др., 1990; Витязев, Печерникова, 1996; Печерникова, 2015; Gorkavyi, 2023]. Соответствующую модель можно назвать ко-аккреционной мультиимпактной. Но ее обоснование связано с большими трудностями. Если для обоснования мультиимпактной модели [Rufu et al., 2017] проводилось численное моделирование последствий ударов для промежутка времени 24 часа, то в ко-аккреционной мультиимпактной модели помимо моделирования ударов необходимо учитывать движение выбросов на гелиоцентрических орbitах, столкновение выбросов с частицами околопланетного роя и эволюцию роя в течение сотни миллионов лет, когда образовывалась Земля.

Отметим, что выбрасываемое вещество может пополнять не только околопланетный рой частиц, но и выпадать на зародыш спутника, который может образоваться как в результате объединения частиц роя, так и, например, в результате одного крупного удара с высокой скоростью по Земле, как в модели [Rufu et al., 2017]. В модели Ипатова [Ипатов, 2018] считается, что зародыши Земли и Луны образовались в одно время из общего газопылевого сгущения. Рост лунного зародыша преимущественно за счет выбросов после ударов по растущей Земле может объяснить в рамках этой модели небольшую долю железа на Луне.

Масса выбросов на гелиоцентрические орбиты имеет важное значение. В работах [Светцов и др., 2012; Светцов, 2013] были рассчитаны массы выбросов при ударах дифференцированных тел

диаметром до 0.3 от диаметра планеты под разными углами со скоростью $V_i = 1.1V_{esc}$. Но скорости ударов могут быть выше, а размеры импакторов больше. Поэтому в данной работе были рассчитаны удары крупных дифференцированных тел в более широком диапазоне параметров. Кроме того, рассмотрены сложности и перспективы развития ко-аккремационной мультиимпактной модели.

Моделирование ударов и выбросов на гелиоцентрические орбиты

Скорости ударов по растущей Земле различаются в отдельных сценариях образования Солнечной системы. В рамках классической теории образования планет [Сафонов, 1969] средние относительные скорости тел в зоне питания растущей Земли можно оценить интервалом 0.6–0.65 от V_{esc} [Витязев и др., 1990]. Тогда средние скорости ударов по планете составляют соответственно около $1.2V_{esc}$. Моделирование поздней стадии аккумуляции планет при различных положениях Юпитера и Сатурна [Raymond et al., 2009], включая модель Ниццы [Tsiganis et al., 2005], дало средние скорости ударов крупных тел по Земле меньше $1.5V_{esc}$. Очень популярная в настоящее время модель большого поворота (Grand Tack) предполагает при образовании Солнечной системы глубокую миграцию Юпитера [Walsh et al., 2011]. В статье [Sossi et al., 2025] приведены результаты моделирования орбитальной динамики тел в рамках этой модели [Rubie et al., 2015], которые показывают, что скорости столкновений с растущей планетой V_i за редкими исключениями меньше $1.8V_{esc}$, а наибольшее количество столкновений происходит при скоростях $V_i \sim 1.2V_{esc}$. В более поздней модели [Woo et al., 2024], где предполагается, что планеты земного типа образовались из кольца планетезималей, расположенного на расстоянии ~ 1 а.е., где создалось повышенное отношение пыли к газу, скорости также меньше $1.8V_{esc}$, причем максимальное число столкновений происходит при $V_i \sim V_{esc}$ [Sossi et al., 2025]. Таким образом, скорости ударов в процессе роста Земли существенно меньше, чем нужно для образования достаточно массивных околоземных дисков в модели [Rufu et al., 2017], но могут быть выше, чем было принято в расчетах [Светцов и др., 2012; Светцов, 2013].

Моделирование ударов по планете проводилось гидродинамическим методом СОВА [Shuvalov, 1999], адаптированным к трехмерным сферическим координатам. Детали метода приведены в [Светцов и др., 2012]. Отметим, что помимо газодинамических переменных вводилось около 600000 пассивных (движущихся со скоростью среды) маркерных частиц, которые первоначально распределены в ударнике и подвергающейся удару области мишени и имеют массу, соответствующую занимаемому ими объему до удара. На ударяющее тело приходилось 11000 маркеров. Моделирование на основе уравнений гидродинамики проводилось для ограниченного промежутка времени менее часа, а затем маркерные частицы, которые приобретали скорости выше скорости убегания, считались действительными фрагментами и рассчитывалось их движение в поле притяжения Солнца и вращающейся по своей орбите Земли. Число этих фрагментов при самых высоких скоростях ударов достигало 25000 и могло снижаться до нескольких сотен при низких скоростях ударов. Вводилась сила гравитационного притяжения между каждой парой частиц, и если они подходили друг к другу на расстояние меньше суммы их радиусов, то заменялись одним фрагментом с суммарной массой и импульсом. Это позволяло при моделировании касательных ударов под большими углами, когда импактор полностью не разрушается и, потеряв лишь небольшую часть массы, улетает за пределы земного притяжения, отделить его от более мелких выбросов, которые могут пополнить околопланетный рой. Таким образом, при вычислении выбрасываемой массы не учитывалась часть вещества, которая собирается в крупные фрагменты с массой больше 0.01 от массы импактора. Масса Земли в основной части расчетов равнялась 0.7 от ее современного значения. Расчеты нескольких вариантов с другими массами показали, что уменьшение относительной массы протоземли до 0.5 при неизменных значениях γ и V_i/V_{esc} дает изменение в относительной массе выбросов не более 7%, а увеличение ее до современной – не более 2%. Достаточно небольшие отклонения объясняются тем, что размеры и скорости убегания пропорциональны массе и не сильно изменяются при вариации массы – лишь примерно на 10%.

На рис. 1 проиллюстрированы удары дифференцированного тела (с железным ядром 30% по массе) с отношением массы к массе планеты $\gamma = 0.02$ и со скоростью $V_i = 1.5V_{esc}$. При ударе под углом $\alpha = 30^\circ$

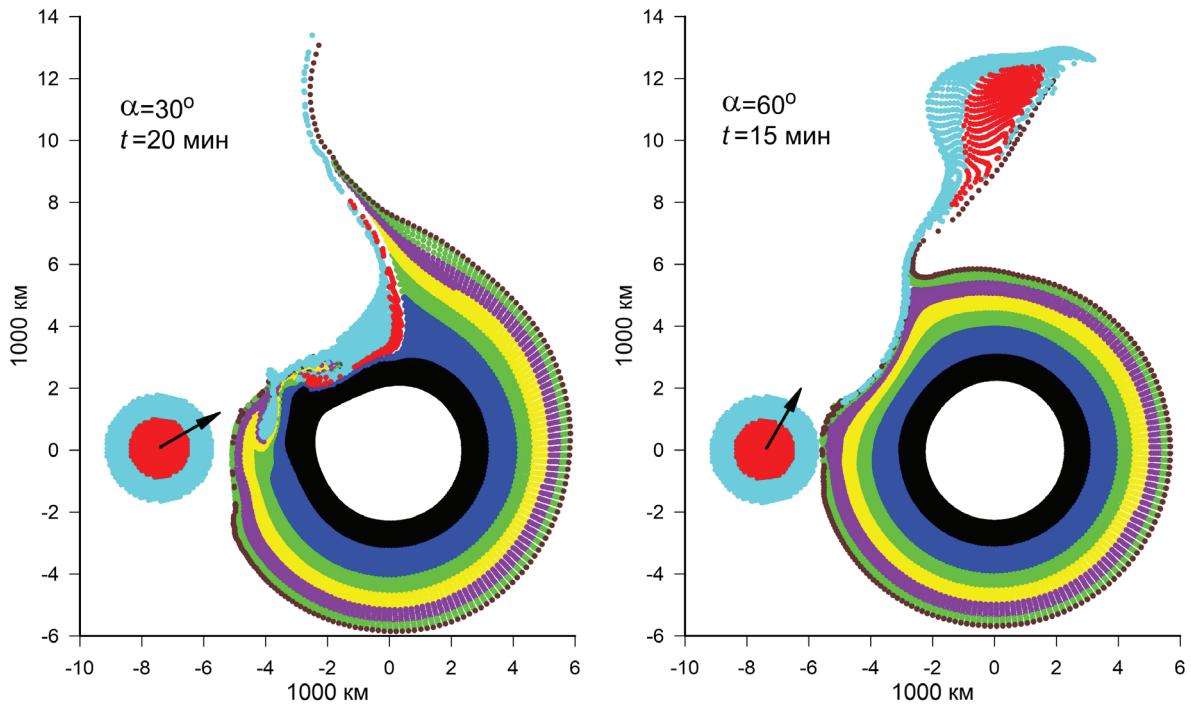


Рис. 1. Удары дифференцированных тел под углами $\alpha = 30^\circ$ и 60° к прямой, соединяющей центры масс Земли и тела. Показаны положения маркеров, отражающих движение вещества в окрестности плоскости, проходящей через центр планеты и вектор скорости. Отношение массы ударяющего тела к массе протоземли $\gamma = 0.021$. Одновременно с моментами времени t после первого контакта тела с планетой показаны начальные положения импактора, ядро которого выделено красным цветом. Черный цвет соответствует внешней части ядра планеты. Масса протоземли составляла 0.7 от современной массы

импактор внедряется в планету, и после этого вещество выбрасывается из кратера. Масса выбросов на гелиоцентрические орбиты m_e составляет около 20% от массы импактора m_i . После удара под углом 60° большая часть ударяющего тела пролетает мимо планеты, оставляя выемку в ее мантии, и около половины вещества тела оказывается на гелиоцентрических орбитах в виде осколков с массой меньше $0.01m_i$. Предполагается, что более крупные фрагменты при возвращении в область притяжения Земли не могут поглотиться проспутниковым роем, хотя это довольно приближенная оценка.

На рис. 2 для тел с $\gamma = 0.02$ и $\gamma = 7.7 \times 10^{-4}$ (радиусом $\sim 10\%$ от радиуса планеты R_e) показаны зависимости относительной массы выбросов $\mu = m_e/m_i$ от угла удара α . Для тела с большей массой $\gamma = 0.02$ максимум μ достигается при значениях α в интервале 45° – 60° . При больших α масса выбросов уменьшается, так как на гелиоцентрические орбиты улетают в основном либо почти целый импактор, либо его крупные фрагменты. При уменьшении γ максимум μ сдвигается в сторону больших углов, так как ударная волна разрушает импактор сильнее, чем при ударах тел большего диаметра. Основную часть выбросов составляет вещество ударяющего тела.

Интегрируя μ по углам с весом $\sin 2\alpha$ (плотность вероятности удара под углом α), можно получить среднюю относительную массу выбросов μ_{av} на гелиоцентрические орбиты. Зависимости μ_{av} от относительной скорости ударов $v_i = V_i/V_{esc}$ показаны на рис. 3 на левом графике. На этом графике показаны также зависимости μ_{av} , полученные в расчетах ударов под разными углами по плоской поверхности [Shuvalov, 2009; Svetsov, 2011], то есть при относительно небольших размерах импакторов. Отношение плотностей импактора и мишени составляло 1.3 (дунит по граниту) [Shuvalov, 2009] и 1 (дунит – дунит) [Svetsov, 2011]. При скоростях, приведенных на рисунке, основную массу μ_{av} составляет вещество астероида. Результаты расчетов ударов тел с относительной массой $\gamma = 1.2 \times 10^{-5}$ (с радиусом $0.025R_e$) приближаются к результатам ударов по плоской поверхности. При небольших относительных скоростях ударов крупных тел $v_i = 1.1$ выбросы μ_{av} составляют 0.12–0.17 и превышают 0.2 при $v_i = 1.3$.

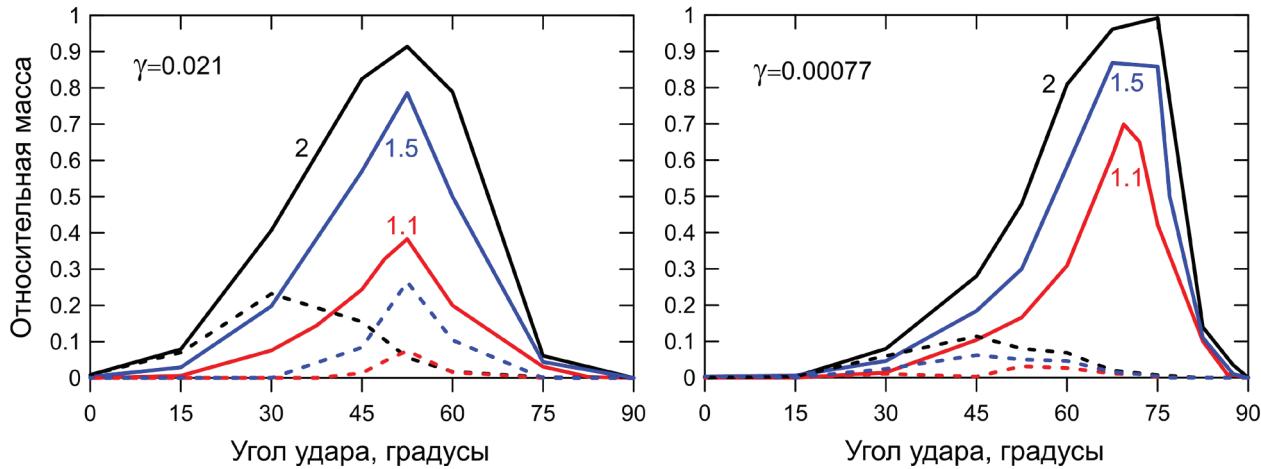


Рис. 2. Отношение массы частиц, выбрасываемых после ударов на гелиоцентрические орбиты, к массе ударяющего тела в зависимости от угла удара α для двух относительных масс тел $\gamma = 0.021$ и $\gamma = 7.7 \times 10^{-4}$. Сплошными линиями показана полная масса выбросов, штриховыми – масса выбрасываемого вещества протопланеты. Числами у кривых указаны значения относительной скорости ударов V_i/V_{esc}

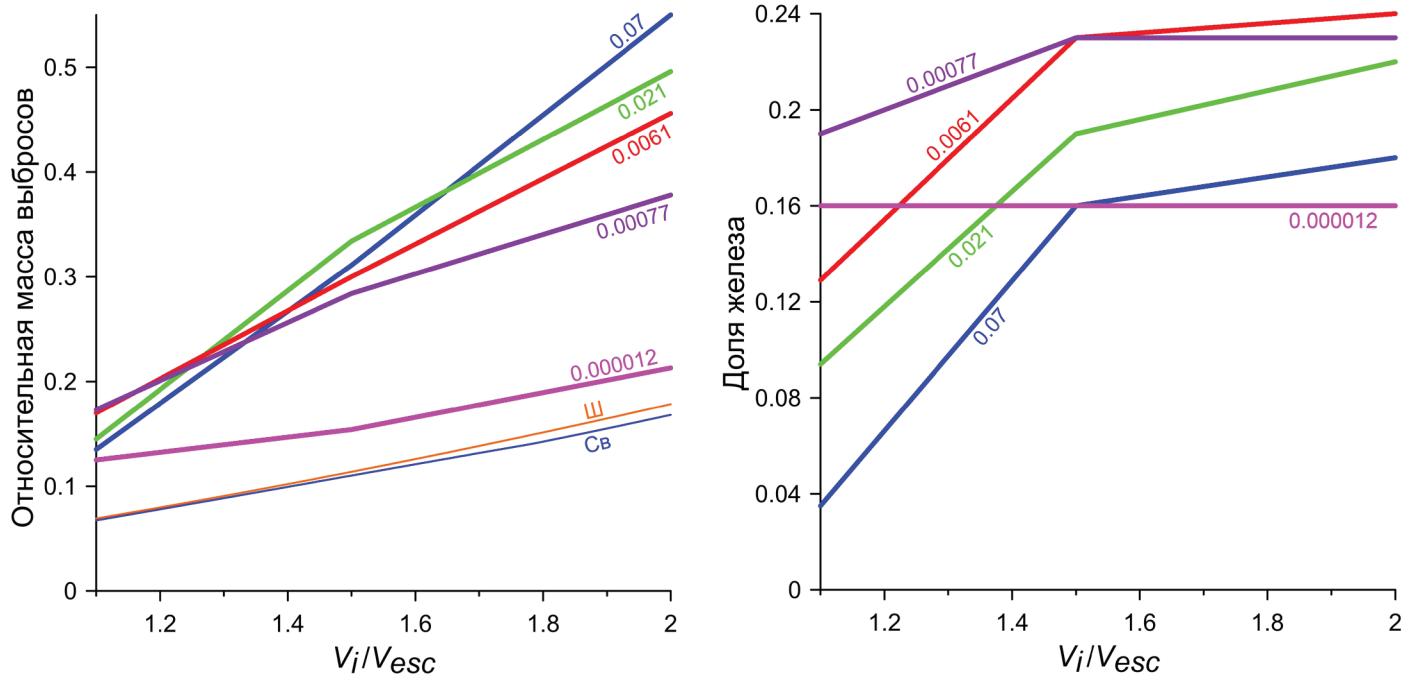


Рис. 3. На левом графике – осредненная по углам относительная масса μ_{av} , выбрасываемая из зоны притяжения планеты, в зависимости от отношения скорости удара к скорости убегания V_i/V_{esc} . Числами у кривых указаны значения относительной массы импакторов γ . Буквами Ш и Св отмечены зависимости, полученные в расчетах ударов по плоской поверхности [Shuvalov, 2009] и [Svetsov, 2011]. На правом графике – доля вещества ядра импактора в выбросах

На правом графике рис. 3 показаны зависимости содержания вещества ядер ударников в выбросах. С увеличением масс ударников, начиная со значения $\gamma = 7.7 \times 10^{-4}$, и с уменьшением скорости ударов доля железа в выбросах уменьшается и составляет 4% при $\gamma = 0.07$ и $V_i = 1.1$.

В модели большого поворота [Walsh et al., 2011] наибольшее число ударов по протоземле производят импакторы с отношением масс γ от 0.03 до 0.08 и со скоростями $v_i = V_i/V_{esc}$ от 1 до 1.7 [Sossi et al., 2025].

В этом случае относительная масса выбросов составляет от 0.14 до 0.4 от массы падающих тел, а содержание железа – от ~4% до ~20%.

В рамках классического сценария образования Солнечной системы, предположив степенную зависимость спектра масс аккумулируемых тел и связь максимальной массы этих тел с массой растущей планеты [Печерникова, Витязев, 2005], можно оценить сколько всего вещества выбрасывается на гелиоцентрические орбиты в процессе роста Земли аналогично работе [Светцов, 2013]. Результаты такой оценки показаны на рис. 4. Показаны полные массы выбросов в зависимости от относительной массы планеты Δ в тот момент, когда начинается подсчет выбросов, и от относительной скорости ударов v_i , которая в процессе роста планеты предполагается постоянной. Так при $v_i = 1.2$ с момента времени, когда $\Delta = 0.5$, то есть масса Земли равна половине ее современной массы M_E , всего на гелиоцентрические орбиты выбрасывается масса, составляющая $0.12M_E$ с концентрацией железа 5%. А за время роста Земли, начиная с $\Delta = 0.9$, на гелиоцентрические орбиты выбрасывается лишь около $0.025M_E$. Этого мало для образования Луны, поскольку ее масса составляет 0.012 от массы Земли, а значительная часть протолунного роя может быть потеряна в процессе его эволюции.

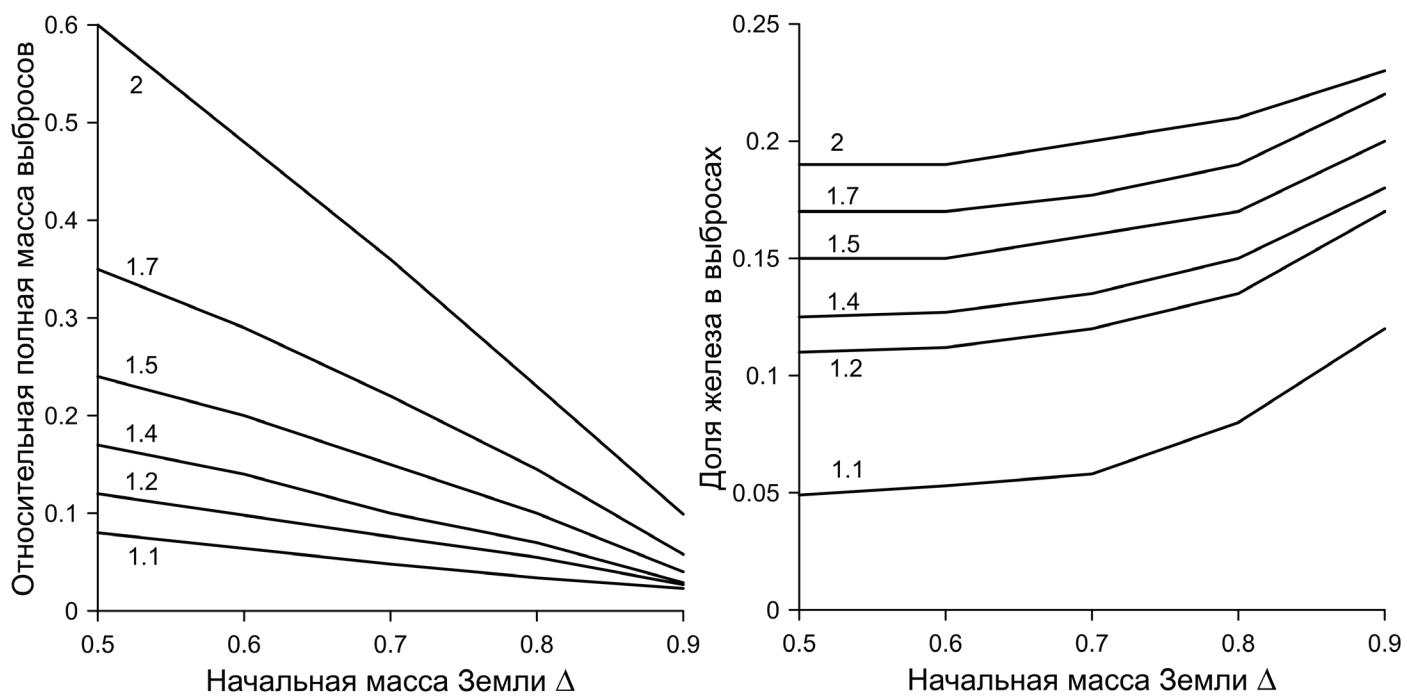


Рис. 4. На левом графике – зависимости полной массы выбросов за время роста Земли, начиная с момента, когда она аккумулировала массу, которая составляет определенную долю Δ от современной. На правом графике – доля вещества ядер импакторов в выбросах. Числами у кривых указаны значения относительной скорости ударов V_i/V_{esc} , которая предполагается постоянной во время роста планеты

Вероятность многократных пролетов выбросов через сферу Хилла

Помимо выбросов на гелиоцентрические орбиты в среднем от 5 до 8% вещества выбрасывается на расстояния больше трех радиусов планеты от ее центра и, оставаясь в области ее притяжения, падает обратно на поверхность. Эти медленные баллистические выбросы могут взаимодействовать с протолунным роем. Но у быстрых выбросов большая вероятность быть захваченными роем при многократном пролете через сферу Хилла в течение длительного времени. Осколки, выброшенные после удара за пределы земного притяжения с разными скоростями и под разными углами, движутся по различным гелиоцентрическим траекториям, лежащим внутри торообразной поверхности и пересекающимся в том месте, где произошел их выброс [Орлов, Холшевников, 2008]. Они могут вновь

попадать в зону притяжения Земли и взаимодействовать с протоспутниковым роем, но возмущения траекторий препятствуют этому процессу.

В работах [Ипатов, 2024; Ipatov, 2025] рассчитывались вероятности столкновения Земли и других планет с телами, которые покидают современную Землю со скоростями $V_{ej} > V_{esc}$, с учетом гравитационного влияния Солнца и планет. Результаты приведены для ряда скоростей V_{ej} от 11.3 до 20 км/с, что соответствует относительным скоростям выбросов $v_{ej} = V_{ej}/V_{esc}$ от 1.01 до 1.8. При столкновениях Земли с крупными телами большая часть выбросов имеет скорости существенно больше скорости убегания. Как показало моделирование ударов, при относительных скоростях ударов v_i от 1.1 до 1.5 в среднем меньше 10% осколков выбрасываются со скоростями $1 < v_{ej} < 1.1$. Порядка 40% имеют скорости v_{ej} в интервале 1.1–1.45 и примерно 50% выбрасываются со скоростями v_{ej} больше 1.45.

В расчетах траекторий [Ипатов, 2024; Ipatov, 2025] было получено, что за период порядка 10^8 лет после удара вероятность столкновения выбрасываемых тел с Землей, то есть количество тел, возвращающихся на Землю, по отношению ко всем выбрасываемым под разными углами в разных точках поверхности телам, составляет в среднем 20–25% при скоростях $V_{ej} = 12\text{--}20$ км/с ($v_{ej} = 1.1\text{--}1.8$). Несколько больше (25–30%) сталкивается с Венерой и еще больше (40–50%) сталкивается с Солнцем или выбрасывается из Солнечной системы. Существенно меньше (~ 5%) сталкивается с Меркурием и еще меньше (~ 1%) Марсом.

Отношение вероятности столкновения тела с планетой радиусом R_E к вероятности входа в сферу Хилла радиусом R_H можно оценить как $(R_{eff}/R_H)^2$, где R_{eff} – эффективный радиус планеты, который в свою очередь можно оценить как $R_{eff}^2 \approx R_E^2 v_{ej}^2 / (v_{ej}^2 - 1)$. С увеличением скорости вероятность столкновения с планетой падает из-за уменьшения эффективного радиуса. Взяв $R_H = 200R_E$, можно получить, что при значениях v_{ej} от 1.1 до 1.45 вероятность входа тела в сферу Хилла в 10000–20000 раз больше вероятности столкновения с Землей.

За время 10^5 лет при $v_{ej} = 1.1$ доля столкнувшихся с Землей выброшенных осколков меньше 2%. С Венерой сталкивается чуть меньше, а основная часть остальных тел продолжает двигаться по гелиоцентрическим орбитам. Пока орбиты не сильно возмущены планетами и Солнцем остается большая вероятность входа тел в сферу Хилла Земли. При умеренных скоростях ударов $v_i \sim 1.2$ за время роста Земли, начиная с половины ее массы, через сферу Хилла многократно проходит около 15% от современной массы Земли. Это может обеспечить необходимый рост околопланетного роя, но остается неясным его строение и как он эволюционирует. При попадании в околопланетный рой захват тела зависит от его размера и углового момента и от конфигурации и структуры роя.

Особенности образования и эволюции околоземного роя

Основные механизмы образования и эволюции протоспутниковых роев рассматривались в нескольких работах. Переход тел с гелиоцентрических на планетоцентрические орбиты изучался как при столкновениях тел, не связанных с планетой (свободно-свободных), так и при столкновениях с телами околопланетного роя (свободно-связанных), которые преобладают, когда плотность роя превышает плотность тел в зоне, окружающей планету [Рускол, 1975; Печерникова и др., 1984; Витязев и др., 1990]. Оценки показали, что эффективнее происходит захват в рой мелких частиц, а поток массы, захватываемой в рой, пропорционален плотности тел в окружающей планету зоне. Поэтому концентрация траекторий выбросов в окрестности планеты и небольшие размеры осколков, выбрасываемых при ударах, должны способствовать росту массы околопланетного роя. По оценкам [Рускол, 1975] образование околоземного роя за счет свободно-свободных столкновений происходит по мере роста планеты быстрее всего в интервале массы растущей Земли от 1/3 до 1/2 от современной. По мере роста планеты вследствие закона сохранения момента импульса радиусы орбит тел роя уменьшаются обратно пропорционально массе планеты, и происходит выпадение вещества на ее поверхность. Поэтому рой, из которого могли образоваться спутники, вероятно, формировался после того, как Земля аккумулировала половину своей массы.

Процессы столкновительного захвата тел в рой тел очень сложны, также как и процессы столкновений тел внутри роя, при которых может происходить как объединение, так и дробление тел. Ряд важных оценок эффективности захвата, скорости роста роя и его сокращения содержится в работе [Витязев и др., 1990]. На основании оценок скоростей в рое было получено, что рой должен быть уплощенным вблизи планеты на расстояниях меньше десяти ее радиусов, а на периферии – близким к сферичному.

Малый удельный момент импульса тел, поступающих в рой, уменьшает его удельный момент, и вещество внутренней части роя выпадает на планету [Витязев и др., 1990]. Вещество роя перемещается к центру также при дифференциальном вращении, когда момент импульса переносится касательными напряжениями. Вычисления показывают, что дефицит удельного момента влияет на эволюцию роя очень сильно. По оценкам [Витязев и др., 1990], скорость перемещения вещества роя к планете пропорциональна потоку вещества, присоединяющегося к рою, с коэффициентом, зависящим от удельного момента этого вещества. Поэтому увеличение потока вещества, поглощаемого роем, вызывает рост потока вещества, выпадающего на планету. По этим оценкам, возможно недостаточно точным, в модели околоземного диска, эволюционирующего под действием аккреции тел из зоны питания планеты, из-за низкого удельного момента поступающего вещества не получается образование достаточно массивного протоспутникового роя [Печерникова и др., 1984; Витязев и др., 1990]. Для его образования нужны дополнительные механизмы.

В работе [Витязев и др., 1990] предполагалось, что вещество, выбрасываемое после ударов на гелиоцентрические орбиты, имеет низкие скорости и рассеяно внутри тора с радиусом близким к радиусу планеты и радиусом сечения, не превышающим радиус сферы Хилла. Поэтому считалось, что захват выбросов в рой должен происходить главным образом с почти касательных орбит с максимально возможным моментом импульса. Но моделирование ударов показывает, что скорости выбросов существенно выше скорости убегания, их орбиты вытянуты и, кроме того, возмущаются планетами и Солнцем. Тем не менее, увеличение скорости выбросов может повысить удельный момент захватываемого в рой выброшенного вещества и способствовать уменьшению сжатия околопланетного роя.

В работе [Горьковый, 2007] была рассмотрена плоская задача, в которой частицы плоского околоземного диска, движущиеся по круговым орбитам, сталкиваются с частицами, которые выбрасываются с поверхности Земли по баллистическим траекториям, лежащим в плоскости диска. Предполагалось, что одинаковое число частиц выбрасывается на прямые и обратные орбиты и что массы этих частиц составляют от 0.1 до 10 от массы частиц диска. Оказалось, что почти на всем протяжении диска, за исключением его внутренней области на расстоянии меньше половины радиуса планеты от ее поверхности, происходит увеличение массы диска. Результат обнадеживающий, но насколько его можно распространить на другие орбиты выбросов, в том числе на выбросы со скоростями выше V_{esc} и другие соотношения масс частиц остается неясным.

Заключение

Результаты моделирования ударов показывают, что массы выбросов на баллистические и гелиоцентрические орбиты достаточно велики для пополнения околоземного роя частиц и образования Луны. Кроме того, оказывается, что выбросы обеднены железом. Обеднению роя железом может также способствовать и то, что в процессе эрозии тел, пролетающих через рой, в него должно отбираться более хрупкое вещество [Витязев и др., 1990]. Выбросы состоят из разрушенного измельченного материала, что увеличивает возможность его захвата роем. Это важно, так как увеличение массы Земли происходит в основном за счет аккреции крупных тел, которые не могут поглотиться роем [Печерникова, Витязев, 2005]. Скорость ударных выбросов в среднем выше, чем скорость ударов, и это может повлиять на эволюцию роя по сравнению со сценарием захвата вещества из зоны питания планеты. Образующиеся зародыши спутника при столкновении с выбросами могут не только пополняться веществом, но и

подвергаться эрозии. Так, например, у астероида Веста размером около 500 км эрозия преобладает над пополнением его массы веществом ударяющего тела при скоростях ударов лишь 1.25 км/с, а при скорости 5 км/с потери массы астероида более чем в 10 раз превышают массу импактора [Svetsov, 2011].

Помимо сходства составов Луны и Земли, небольшой массы лунного ядра и, соответственно, небольшой плотности Луны по сравнению с Землей ко-аккремационная мультиимпактная гипотеза может объяснить угловой момент системы Земля–Луна лучше, чем модель одного гигантского удара. При моделировании аккреции планет земного типа было получено, что их угловой момент является результатом нескольких ударов [Agnor et al., 1999]. Оценки накопления момента осевого вращения Земли, полученные в дискретной стохастической модели роста Земли, когда на каждом шаге по времени случайнным образом выбирались ударяющее тело из десяти крупнейших тел в зоне питания планеты, точка удара на поверхности планеты и скорость удара подтверждают возможность образования протолунного роя с соответствующим орбитальным моментом [Печерникова, 2013]. Дефицит летучих элементов на Луне – сложная проблема и в рамках ко-аккреционной мультиимпактной гипотезы не исследовался. Трудности с объяснением содержания летучих возникают в разных моделях образования Луны [Sossi et al., 2025]. Необходимы дальнейшие теоретические исследования, а также получение и анализ новых лунных образцов, которые могут более точно отразить состав Луны на глубине [Canup et al., 2023].

Пока остается неясным образовалась ли Луна как предложено в ко-аккреционной мультиимпактной гипотезе. Один из основных вопросов – может ли вообще захват выбросов обеспечить более быстрый рост роя, чем его уменьшение. Необходимы полноценные количественные оценки. Несколько на каком расстоянии образуется протоспутниковый рой, какова его структура и как происходит образование спутника или многих спутников. Растущий спутник будет довольно быстро расчищать рой. Тогда должен появляться новый рой и новые спутники, которые затем мигрируют и соединяются в одну Луну [Рускол, 1975]. Качественно образование Луны в сценарии, предлагаемом ко-аккреционной мультиимпактной теорией, можно объяснить, тем не менее состоятельность гипотезы нуждается не только в оценках отдельных процессов, но и в создании математической модели, включающей все особенности этого сценария.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

Список литературы

Афанасьев В.Н., Печерникова Г.В. О вероятности захвата планетезималей в протолунный рой в процессе формирования системы Земля–Луна // Астрономический вестник. 2022. Т. 56. № 6. С. 389–409. <https://doi.org/10.31857/S0320930X22060019>

Витязев А.В., Печерникова Г.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–16.

Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафонов В.С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М. : Наука. 1990. – 296 с.

Горьковый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // Известия крымской астрофизической обсерватории. 2007. Т. 103. № 2. С. 143–155.

Ипатов С.И. Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост // Астрономический вестник. 2018. Т. 52. № 5. С. 411–426. <https://doi.org/10.1134/S0320930X18050043>

Ипатов С.И. Рост Луны за счет тел, выброшенных с Земли // Астрономический вестник. 2024. Т. 58. № 1. С. 99–117. <https://doi.org/10.31857/S0320930X24010081>

Орлов С.А., Холиевников К.В. Орбитальный пылевой тор как огибающая поверхность семейства траекторий изотропно выброшенных частиц // Астрономический вестник. 2008. Т. 42. № 2. С. 99–118. <https://www.elibrary.ru/ijjvtx>

Печерникова Г.В. К формированию и эволюции околопланетных роев // Планетная космогония и науки о Земле / Под ред. В. А. Магницкого. М. : Наука, 1989. С. 106–139.

Печерникова Г.В. Приобретение момента импульса в статистической ко-аккреционной модели формирования системы Земля–Луна // Динамические процессы в геосферах. № 4. М. : ГЕОС. 2013. С. 61–66. <https://www.elibrary.ru/tnejmr>

Печерникова Г.В. О зоне питания растущей планеты и проблеме образования Луны // Динамические процессы в геосферах. № 6. М. : ГЕОС. 2014. С. 154–162. <https://www.elibrary.ru/tmlhhx>

Печерникова Г.В. Масса вещества, выброшенного при макроударах с растущей планеты, и проблема образования Земли // Динамические процессы в геосферах. № 7. М. : ГЕОС. 2015. С. 200–207. <https://www.elibrary.ru/xdtbnz>

Печерникова Г.В., Витязев А.В. Импакты и эволюция ранней Земли // Катастрофические воздействия космических тел. М. : ИКЦ «Академкнига». 2005. С. 251–265.

Печерникова Г.В., Маева С.В., Витязев А.В. К динамике околопланетных роев // Письма в Астрономический журнал. 1984. Т. 10. № 9. С. 703–709.

Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М. : Наука. 1975. – 188 с.

Сафонов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М. : Наука. 1969. – 244 с.

Светцов В.В. В развитие статистической модели образования Луны. II // Динамические процессы в геосферах. № 4. М. : ГЕОС. 2013. С. 66–73. <https://www.elibrary.ru/tnejnb>

Светцов В.В., Печерникова Г.В., Витязев А.В. В развитие статистической модели образования Луны // Динамические процессы в геосферах. № 3. М. : ГЕОС. 2012. С. 23–30. <https://www.elibrary.ru/tmwtsj>

Agnor C.B., Canup R.M., Levison H.F. On the character and consequences of large impacts in the late stage of terrestrial planet formation // Icarus. 1999. Vol. 142. P. 219–237. <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6201>

Canup R.M., Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation // Nature. 2001. Vol. 412. Iss. 6848. P. 708–712. <https://doi.org/10.1038/35089010>

Canup R.M., Righter K., Dauphas N., Pahlevan K., Cuk M., Lock S.J., Stewart S.T., Salmon J., Rufu R., Nakajima M., Magna T. Origin of the Moon // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2023. Vol. 89. P. 53–102. <https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.02>

Fischer M., Peters S.T.M., Herwartz D., Hartogh P., Di Rocco T.D., Pack A. Oxygen isotope identity of the Earth and Moon with implications for the formation of the Moon and source of volatiles // PNAS. 2024. Vol. 121 (52). P. e2321070121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2321070121>

Gorkavyi N. Origin of the Moon and lunar water // Earth and Planetary Science. 2023. Vol. 2 (2). P. 86–99. <https://doi.org/10.36956/eps.v2i2.940>

Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // Icarus. 1975. Vol. 24. P. 504–514. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(75\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(75)90070-6)

Ipatov S.I. Probabilities of collisions of bodies ejected from forming Earth with the terrestrial planets // Icarus. 2025. Vol. 425. Id. 116341. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116341>

Raymond S.N., O'Brien D.P., Morbidelli A., Kaib N.A. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System // Icarus. 2009. Vol. 203. P. 644–662. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.016>

Rubie D.C., Jacobson S.A., Morbidelli A., O'Brien D.P., Young E.D., de Vries J., Nimmo F., Palme H., Frost D.J. Accretion and differentiation of the terrestrial planets with implications for the compositions of early-formed Solar System bodies and accretion of water // Icarus. 2015. Vol. 248. P. 89–108. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.015>

Rufu R., Aharonson O., Perets H. A multiple-impact origin for the Moon // Nature Geoscience. 2017. Vol. 10 (2). P. 89–94. <https://doi.org/10.1038/ngeo2866>

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. 1999. Vol. 9 (6). P. 381–390. <https://doi.org/10.1007/s001930050168>

Shuvalov V. Atmospheric erosion induced by oblique impacts // Meteoritics and Planetary Science. 2009. Vol. 44. P. 109–1105. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb01209.x>

Sossi P.A., Nakajima M., Khan A. Composition, structure and origin of the Moon // Treatise on geochemistry (third edition). 2025. Vol. 7. P. 417–479. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00138-8>

Svetsov V. Cratering erosion of planetary embryos // Icarus. 2011. Vol. 214. P. 216–326. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.026>

Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., Levison H.F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System // Nature. 2005. Vol. 435 (7041). P. 459–461. <https://doi.org/10.1038/nature03539>

Walsh K.J., Morbidelli A., Raymon, S.N., O'Brien D.P., Mandell A.M. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration // Nature. 2011. Vol. 475 (7355). P. 206–209. <https://doi.org/10.1038/nature10201>

Woo J., Nesvorn'y D., Scora J., Morbidelli A. Terrestrial planet formation from a ring: Long-term simulations accounting for the giant planet instability // Icarus. 2024. Vol. 417 (116109). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116109>

Zhou Y., Bi R., Liu Y. Research advances in the giant impact hypothesis of Moon formation // Space Science and Technology. 2024. Vol. 4. Article 0153. <https://doi.org/10.34133/space.0153>

PROBLEMS OF CO-ACCRETION MULTIPLE-IMPACT HYPOTHESIS OF MOON FORMATION

© 2025 V. V. Svetsov*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail:* svetsov@idg.ras.ru

The hypothesis that the Moon formed from a near-Earth swarm, formed by the gravitational capture of bodies from the planet's feeding zone during planetary accumulation period and replenished with material ejected by the impacts of large bodies, was proposed long ago. However, the substantiation of this hypothesis is far from complete, although it is highly relevant given the lack of a comprehensive theory of the Moon's origin. In this work, a numerical simulation of the impacts of large bodies on the Earth at different velocities was carried out and the masses and velocities of material ejected into ballistic and heliocentric orbits, as well as the concentration of iron in these ejections, were determined. The total mass of ejecta during the growth of Earth, starting from the moment when it accumulated half of its present mass, is more than ten lunar masses at impact velocities slightly exceeding escape velocity, and increases with increasing impact velocity. The probabilities of multiple passes of fragments ejected into heliocentric orbits through the Hill sphere, the complexities of the co-accretion multiple-impact model and the prospects for its development are considered.

Keywords: Moon formation, accretion, circumplanetary disk, impacts, ejecta into orbits.