

Следствия столкновения, породившего Луну: эволюция осколков на орбитах Солнечной системы

А.В.Бялко¹, М.И.Кузьмин²

¹Институт теоретической физики имени Л.Д.Ландау РАН (Москва, Россия)

²Институт геохимии имени А.П.Виноградова СО РАН (Иркутск, Россия)

Мы продолжаем описание осколков образования Луны, которые после Гигантского столкновения оказались на орбитах Солнечной системы. В предыдущей статье мы рассмотрели их траектории, теперь речь пойдет об эволюции осколков. В результате радиационного охлаждения температуры их поверхности быстро снижаются до уровня, допускающего конденсацию паров воды. При многократных пролетах осколков через ту точку Солнечной системы, где произошло Гигантское столкновение, происходят их столкновения между собой, которые вызывают сублимацию льда и локальный разогрев. Эти процессы, возможно, ответственны за формирование тех грануляционных структур, которые наблюдаются у хондритов.

Ключевые слова: радиационное охлаждение, сублимация и конденсация, распределение по массам, образование хондритов.

При Гигантском столкновении протопланет (ГС), в результате которого образовалась родилась Луна, значительная часть осколков оказывается вне области земного притяжения и движется по эллиптическим орбитам в Солнечной системе [1]. В предыдущей статье* были описаны возможные траектории этих осколков. Важно, что в первые десятки тысяч лет после ГС все траектории проходили через очень узкую область, расположенную вблизи точки столкновения. Ее ежегодно пересекала и сама Земля. Через нее также пролетают и газы, улетающие в космос вследствие сильного разогрева Земли при

* Бялко А.В., Кузьмин М.И. Следствия столкновения, породившего Луну: траектории осколков // Природа. 2020. №10. С.31–39.



Алексей Владимирович Бялко, доктор физико-математических наук, ассоциированный сотрудник Института теоретической физики имени Л.Д.Ландау РАН, заместитель главного редактора журнала «Природа». Область научных интересов — теоретическая физика, науки о Земле.
e-mail: alexey@byalko.ru



Михаил Иванович Кузьмин, академик, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геохимии имени А.П.Виноградова СО РАН с 1988 по 2012 г. В настоящее время главный научный сотрудник этого института и советник РАН. Ведущий специалист в области геохимии, геодинамики, петрологии. Один из создателей нового направления в геологии — химической геодинимики. Лауреат Государственной РФ (1997) и Демидовской (2007) премий.
e-mail: mikuzmin@igc.irk.ru

слиянии железоникелевых ядер протопланет. В этой области газопылевого потока происходят многочисленные столкновения осколков как с Землей, так и между собой.

Нами рассматривалось гравитационное взаимодействие осколков с Солнцем и Землей, полученное решением задачи трех тел. Однако существует много негравитационных процессов, воздействующих как на структуру осколков, так (в меньшей степени) и на их траектории. Перечислим некоторые из них. Это конденсация газов на далеких расстояниях от Солнца, где происходит охлаждение осколков, а также испарение газов под действием солнечного ветра и излучения на близких расстояниях от светила. Столкновения осколков между собой происходят с относительными скоростями порядка нескольких километров в секунду; они вызывают как дробление, так и объединение столкнувшихся тел. Кроме того, такие столкновения вызывают значительную ионизацию материи, что приводит к возможному проявлению электромагнитного взаимодействия осколков между собой. В частности, нельзя исключить, что в области газопылевого потока происходили и мощные грозовые разряды.

Отметим, наконец, еще одну возможную причину, способствующую консолидации осколков. Большинство небесных тел, состав которых известен по метеоритам, в заметной концентрации содержат железо в виде магнетита. Это означает, что в космосе такие тела могут взаимно притягиваться не только гравитацией, но и магнитными силами.

Построить полную картину эволюции осколков образования Луны на основе перечисленных явлений с достаточной убедительностью пока не представляется возможным. Физически точное описание испарения и конденсации газов не удается выполнить даже для длительно наблюдаемых комет. Моделирование электрических явлений в газопылевом потоке затруднительно, поскольку на сегодняшний день теория даже обычных гроз в облаках и при извержениях вулканов разработана недостаточно. Однако некоторые эксперименты, моделирующие электрическое взаимодействие в космосе, представляют большой интерес [2].

Здесь мы рассмотрим только те аспекты эволюции осколков, где теория позволяет сделать достаточно надежные выводы. Попутно будет высказано несколько гипотез, которые когда-нибудь смогут или получить более надежное теоретическое обоснование, или же пройти проверку наблюдениями.

Радиационное охлаждение осколков

При разлете от раскаленной Земли осколки имели высокую начальную температуру по всей своей массе, достигающую нескольких тысяч кельвинов. Рассмотрим, как падают температуры таких горячих осколков в результате радиационного охлаждения.

Тепловые характеристики силикатных осколков в течение первых оборотов вокруг Солнца можно считать близкими плотности ρ , теплоемкости c_p и теплопроводности k обыкновенных хондритов:

$$\rho = (3.2-3.9) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; c_p = 680-900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}; \\ k = 2.3-3.9 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}.$$

Нижние пределы этих параметров относятся к хондритам типа L с низким содержанием железа, а верхние — к хондритам типа H, с высоким. Их коэффициенты температуропроводности χ ограничены достаточно узким диапазоном значений:

$$\chi = k/\rho c_p = (1.03-1.20) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} = 35 \pm 3 \text{ м}^2/\text{год}.$$

Как хорошо известно, расстояние выравнивания температуры, а в нашем случае глубина остывания раскаленной поверхности растет со временем как

$$D(t) = 2(\chi t)^{1/2}.$$

Если размеры тела достаточно велики, то глубина остывания за год составит примерно 12 м, за четыре года — более 20 м, за десять лет — примерно 50 м. Тела с размерами, меньшими этих величин, остывают за эти времена практически полностью.

Охлаждение изначально горячего тела прекращается в тот момент, когда температура его поверхности становится равной равновесной температуре, обусловленной солнечным излучением и отражательной способностью тела. Эта равновесная температура описывается хорошо известной формулой

$$T_{\text{rad}} = T_s(R_s/2a)^{1/2}(1-A)^{1/4}.$$

Здесь R_s — радиус Солнца, T_s — его температура в данную эпоху, a — большая полуось орбиты тела, A — альbedo тела.

Напомним, что светимость Солнца в рассматриваемую эпоху была существенно, на 75–80%, ниже современной; соответственно ниже была и температура его поверхности T_s . График зависимости T_{rad} от альbedo A приведен на рис.1. Вообще говоря, полуоси орбиты у осколков разнятся, но при построении этого графика среднее расстояние до Солнца считалось равным астрономической единице. Большинство хондритов имеют темную поверхность, их альbedo мало. Так, при $A = 0.05$ радиационная температура оказывается близкой к 250 К.

Теперь рассмотрим раскаленное тело, вылетевшее в космос после ГС, его форма при доста-

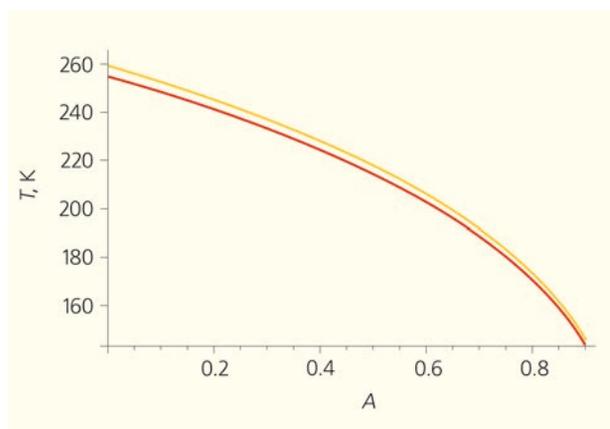


Рис.1. Зависимость радиационной температуры сферического тела от его альbedo A в эпоху малого Солнца. Расстояние тела от Солнца около 1 а.е. Желтая кривая соответствует светимости, равной 80% от современной, красная — 75%.

точно крупных размерах близка к сферической. Поверхность горячего осколка излучает энергию в вакуум по закону Стефана—Больцмана пропорционально T^4 . Временно забудем о внешнем солнечном освещении. Внутренняя температура тела в течение первых оборотов вокруг Солнца остается выше наружной, а подвод тепла к поверхности происходит в основном с глубины $D(t)$ (рис.2,а).

Как было показано в нашей работе [1], в условиях, когда начальная температура однородно разо-

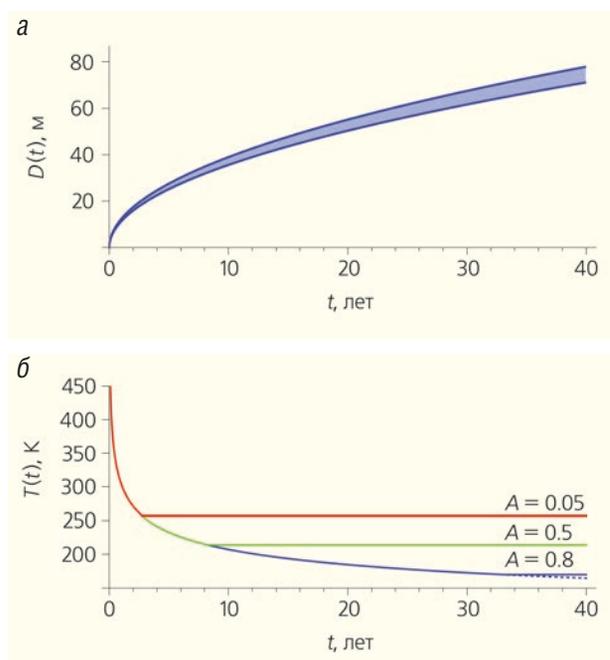


Рис.2. Зависимость от времени глубины остывания крупного ($R > 50$ м) сферического тела (а) и падение температуры его поверхности при различных альbedo A (б).

гретого тела значительно выше радиационной температуры, зависимость его поверхностной температуры от времени описывается простой формулой

$$T(t) = \left(\frac{9\sigma^2}{k\rho c_p} \cdot \frac{1}{t} \right)^{1/6} = (300 \pm 15) \text{ K} (1 \text{ год}/t)^{1/6}.$$

Здесь σ — постоянная Стефана—Больцмана. Эта формула получена решением приближенного дифференциального уравнения, а не уравнения в частных производных. Однако возможная ошибка в численном коэффициенте 9 компенсируется значительным разбросом произведения термодинамических коэффициентов $k\rho c_p$ для обыкновенных хондритов. Кроме того, ошибка результата из-за неопределенности этого произведения уменьшается вшестеро вследствие того, что коэффициент возводится в степень 1/6.

График зависимости остывания поверхности тела от времени приведен на рис.2,б вместе с переходом к радиационным температурам для трех значений альbedo. Таким образом, как бы сильно ни был изначально разогрет осколок, улетевший от Земли, уже через один оборот вокруг Солнца (время порядка года) его температура опустится ниже $300 \text{ K} = 27^\circ\text{C}$, а после нескольких оборотов опустится существенно ниже.

Вместе с силикатными осколками при ГС на орбиты вокруг Солнца вылетают и все газы, в частности пары воды. Это означает, что уже после нескольких оборотов орбиты на поверхности даже крупных осколков очень скоро может начаться конденсация паров, образование ледяной корки. Тела меньшего размера успевают остыть по всей своей массе и переходят к радиационным температурам раньше крупных. У ледяной поверхности альbedo мало, поэтому дальнейшее охлаждение тела только усиливается.

Остывание поверхности Земли

Применима ли закономерность остывания крупных тел к самой Земле? Однозначный количественный ответ дать достаточно трудно. Если бы поверхность Земли остывала только радиационным охлаждением, то за год глубина остывания земной поверхности составила бы порядка 10 м. Однако есть два процесса, которые существенно замедляют охлаждение.

Первый из них — продолжающаяся гравитационная дифференциация вещества недр. Слияние железоникелевых ядер протопланет происходит очень быстро, за время порядка суток после столкновения, однако вызванная этим разогревом конвекция силикатных недр могла продолжаться су-

щественно дольше. Ее количественный расчет не прост. Вместе с потоками горячей магмы из недр к поверхности просачиваются остатки газов, в частности кристаллизационной воды, которая была связана в минералах. Они могут накапливаться под затвердевшим слоем коры в течение десятков лет.

Однако практически в это же время начинается второй процесс, замедляющий охлаждение поверхности, — ежегодное выпадение на Землю осколков образования Луны при пересечении Земли точки ГС. Падение осколков вызывает значительный местный нагрев породы в кратерах. Кроме того, крупные падающие тела прорывают еще тонкий слой затвердевшего базальта, вызывая интенсивные вулканические извержения тех флюидов, которые накопились под коркой застывшей магмы. В отдалении от многочисленных вулканов в течение большей части годичного оборота по орбите происходит быстрое радиационное охлаждение земной поверхности, но вблизи вулканов изливающаяся раскаленная лава поддерживает высокую среднюю температуру поверхности.

Поэтому фаза перехода от атмосферы водяного пара к конденсации в океан была отодвинута нами на тысячу лет после ГС [1]. Возможно, момент конденсации наступает раньше.

Взаимодействие осколков при пролете через газопылевой поток

Все осколки пролетают через ту точку Солнечной системы, где произошло ГС. Чаще всех, со скоростью, меньшей скорости Земли, пролетают те осколки, чьи большие оси и периоды обращения меньше года; со скоростью, большей скорости Земли, пролетают осколки с большими периодами. Через десяток лет после ГС область газопылевого потока приобретает характер, близкий к стационарному. Эффективная ширина этой области, как было показано в предыдущей статье*, невелика: она составляет около 0.003 а.е., или 500 тыс. км. Столкновения между крупными осколками происходят достаточно редко, но столкновения молекул газов и пылевидных силикатных осколков с более крупными имеют достаточно большую вероятность.

* См.: Природа. 2020. №10. С.31–39.

Разность скоростей быстрых и медленных осколков, газов и пыли имеет порядок в несколько километров в секунду. Столкновения тел на таких скоростях приводят к значительному перераспределению масс. Первичное распределение разлетающихся осколков по массам m было установлено в многочисленных расчетах ГС. Его зависимость имеет степенной характер: $dN/dm \sim m^{-q}$, где показатель q находится в диапазоне от 1.5 до 1.8 [3]. Соответственно, интегральное распределение по массам имеет вид $N(m) \sim m^{1-q}$. Заметим, что распределение астероидов по массам имеет показатели степени q около 1.6–1.7 (рис.3), что достаточно близко к величинам q , полученным для осколков ГС. Распределение лунных кратеров по диаметрам, пересчитанное на массы падавших тел, имеет примерно тот же наклон.

Из сравнения распределений на рис.3 не следует, что астероиды являются осколками образования Луны. Однако эта близость статистики не случайна, по-видимому, она есть следствие некоторого баланса между гравитационным и молекулярным взаимодействием. Многочисленные натурные и модельные эксперименты показывают, что физические процессы многократных столкновений, дроблений и слияний приводят к распределению тел по массам степенного вида именно с такими показателями.

Наконец, для пылевидных частиц, взрывающихся в виде болидов в земной атмосфере, функция распределения при малых массах становится существенно более пологой. В области масс, меньших 10^{-6} г, показатель степени q начинает уменьшаться [4]. Недавно была сделана попытка теоре-

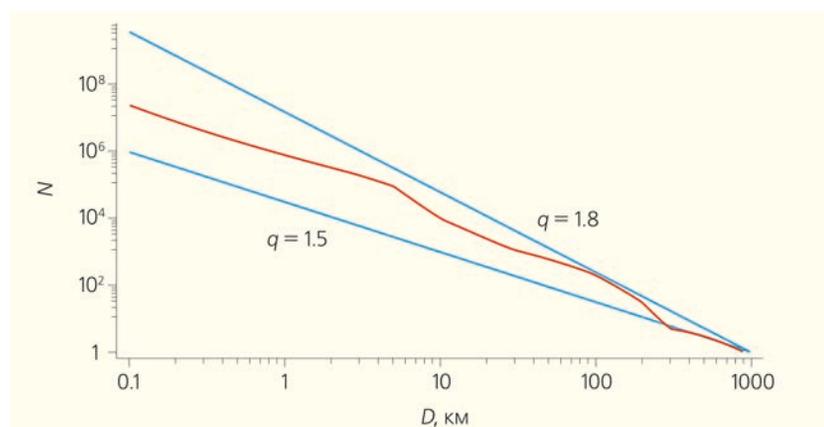


Рис.3. Интегральные распределения по диаметрам тел. Красная ломаная — фактическое распределение по размерам астероидов Солнечной системы. Синие прямые — распределения по размерам осколков ГС, пересчитанные из их распределений по массам с разными коэффициентами q . Близость этих зависимостей не означает, что астероиды являются осколками образования Луны.

тического обобщения степенных зависимостей разных геофизических распределений [5], но едва ли ее можно признать успешной и полезной для статистики небесных тел.

Попробуем рассмотреть на качественном уровне следствия столкновений тел в газопылевом потоке вблизи точки ГС. При ударе пылевидной частицы о более крупное тело на скорости в несколько километров в секунду происходит образование небольшого кратера и локальное расплавление силикатов. Затем после выхода из области столкновений в газопылевом потоке тело возвращается на свою орбиту и охлаждается в течение остального периода обращения. Происходят также более редкие столкновения, приводящие к дроблению крупных тел, что приводит к росту пылевидной компоненты, уже обогащенной гранулами расплавов от предыдущих ударов. Кроме того, оба типа столкновений вызывают ионизацию, образование свободных электронов. Их концентрация приводит

к появлению значительных электрических полей, а разряды способствуют конгломерации малых частиц [2]. Возможно, что так и формировалась гранулярная структура, свойственная хондритам. Они составляют большинство метеоритов, выпадающих на Землю. Общеизвестного ответа на вопрос, как они образовались, не существует, поэтому мы считаем возможным дальнейшее изучение представленной гипотезы.

Мы пока не описали процессы, происходящие с телами на подковообразных орбитах, которые, возможно ответственны за явление зодиакального света*. Эти тела отличает существенно иной диапазон взаимных скоростей, а также вероятный переход на орбиты, приводящие к поздним столкновениям с Землей. Надеемся рассказать об эволюции таких тел позднее. ■

* Бялко А.В. Зодиакальный свет: старая проблема и новые гипотезы // Природа. 2020. №6. С.22–31.

Литература / References

1. Бялко А.В., Кузьмин М.И. Осколки образования Луны: геофизические следствия Гигантского столкновения. ЖЭТФ. 2019; 156(4): 603–614. [Byalko A.V., Kuzmin M.I. Fragments of the Moon formation: geophysical consequences of the Giant Impact. J. Exp. Theor. Phys. 2019; 129: 511–520. DOI:10.1134/S1063776119100182.]
2. Steinpilz T., Joeris K., Jungmann F. et al. Electrical Charging overcomes the bouncing barrier in planet formation. Nature Physics. 2020; 16: 225–229. DOI:10.1038/s41567-019-0728-9.
3. Canup R.M., Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. Nature. 2001; 412: 208–812. DOI:10.1038/35089010.
4. Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M. et al. Comparison of Meteoroid Flux Models for Near Earth Space Earth Moon Planet. 2008; 102: 191–197. DOI 10.1007/s11038-007-9199-6.
5. Corral A., González A. Power law size distributions in geoscience revisited. Earth Space Sci. 2019; 6: 673–697. DOI:10.1029/2018EA000479.

Consequences of the Collision that Spawned Moon: Evolution of Debris in the Orbits of the Solar System

A.V.Byalko¹, M.I.Kuzmin²

¹Landau Institute for Theoretical Physics, RAS (Moscow, Russia)

²Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russia)

We continue to describe the debris of the Moon formation, which after the Giant collision appeared to be in the orbits of the Solar System. In the previous article, their trajectories were considered; in this one we will talk about the evolution of these fragments. The radiation cooling resulted in quick decrease of their surface temperatures to a level acceptable for water vapor condensation. During multiple passes of debris through the point of the Giant collision, they also came into collisions with each other, which caused ice sublimation and local heating. These processes are possibly responsible for the formation of those granulation structures that are observed in chondrites.

Keywords: radiation cooling, sublimation and condensation, mass distribution, formation of chondrites.