

В РАЗВИТИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ

В.В. Светцов, Г.В. Печерникова, А.В. Витязев

Статистическая модель образования Луны предполагает, что в процессе аккумуляции Земли после многочисленных ударов космических тел по ее поверхности образуется рой осколков на геоцентрических орбитах. С целью обоснования такой модели мы провели численное моделирование ударов по Земле и определили, что существенная часть осколков крупных ударников и некоторая часть вещества Земли выбрасываются на гелиоцентрические орбиты. Размер осколков составляет от 10 см до 10 м. Вращаясь вокруг Солнца, они достаточно быстро входят в сферу Хилла Земли, что может приводить к росту массы роя частиц в сфере Хилла и последующему образованию Луны из этого роя.

Введение

Образование Луны – старая и очень важная проблема планетологии и геофизики, которая до сих пор не имеет окончательного решения. Любая теория происхождения Луны должна удовлетворять основным характеристикам системы Земля-Луна. Это определенная масса Луны (0,012 от массы Земли), угловой момент системы, низкая плотность Луны по сравнению с Землей, недостаток железа на Луне, схожесть и различие Земли и Луны по ряду геохимических показателей (например, сходство в относительном содержании изотопов кислорода и обедненность Луны летучими элементами). Было предложено несколько теорий образования Луны. Ранние гипотезы центробежного отделения и захвата на околоземную орбиту имеют очень существенные недостатки. Отделение требует чрезвычайно быстрого вращения ранней Земли, а захват космического тела крайне маловероятен. Гипотеза коаккреции Шмидта-Сафронова-Рускол [Рускол, 1960, 1975] предполагает, что Земля и Луна образовывались одновременно в процессе аккумуляции планеты. Частицы протопланетного диска, сталкиваясь внутри сферы Хилла, переходили на геоцентрические орбиты и образовали протолунный рой. Однако такая модель дает слишком малую массу этого роя [Витязев и др., 1990] и наталкивается на трудности при объяснении различий в химическом составе Земли и Луны. Сравнительно недавно была предложена другая гипотеза одновременного образования Земли и Луны из облака частиц [Галимов и др., 2005; Галимов, 2011]. Если помимо силы гравитационного притяжения, действующей между частицами, ввести еще определенную силу отталкивания, то из коллапсирующего вращающегося облака может образоваться два объекта. Недостатком модели является необходимость введения силы отталкивания, которая должна быть, как и сила гравитации, обратно пропорциональна квадрату расстояния между частицами (по утверждению авторов такая сила может быть вызвана испарением частиц). Кроме того, необходим пересмотр стандартной модели образования Солнечной системы [Витязев и др., 1990], в которой обоснованы другие механизмы образования планет земной

группы, исключая возможность их происхождения из отдельных коллапсирующих облаков частиц.

Наиболее популярной в настоящее время остается гипотеза происхождения Луны в результате гигантского удара [Hartmann, Davis, 1975; Cameron, Ward, 1976]. Эта гипотеза мегаимпакта была обоснована путем численного моделирования [Benz et al., 1989; Cameron, 2001; Canup, Asphaug 2001]. Наилучшее согласие с параметрами системы Земля-Луна дают варианты дифференцированного ударника с массой 0,1–0,15 от массы Земли (порядка массы Марса), со скоростью ниже 1,1 от скорости убегания и углом удара около 45° [Canup, 2004; Canup, 2008]. В результате такого мегаимпакта образуется диск жидких и твердых частиц, которые через ~ 100 лет образуют Луну [Salmon, Canup, 2012]. Наличие пара может разрушить этот диск, и поэтому, как показывает моделирование [Wada et al., 2006], скорость удара должна быть достаточно низкой. Эффективность объединения частиц в спутник Земли составляет 10–55% [Ida et al., 1997; Kokubo et al., 2000]. Численное моделирование дает соответствующую массу Луны, ее основной состав, угловой момент системы. Но согласование геохимических параметров требует дальнейших исследований.

Заметим, что теория гигантских ударов применялась и для объяснения других особенностей планет – системы Плутон-Харон, массивного ядра Меркурия, дихотомии Марса, обратного вращения Венеры. В каждом случае авторами гипотез подбираются специальные параметры ударяющих тел. Возникает вопрос о том, насколько вероятны такие специфические удары. В то же время, в стандартной теории образования планет земной группы [Витязев и др., 1990] показано, что Земля в процессе своего роста неоднократно подвергалась ударам крупных тел (макроимпактам), массы наибольших из них могли составлять от 7 до 0,2% от массы растущей Земли, в период ее роста от 0,7 до 0,99 от современной массы Земли [Печерникова, Витязев, 2005]. Макроимпакты могли привести к образованию протолунного роя частиц и существенно увеличить угловой момент системы Земля-Луна. Была предложена статистическая модель образования Луны [Печерникова, 1989; Витязев, Печерникова, 1996], в которой предполагается, что рой частиц, образованный в соответствии с коаккреционной моделью, пополняется осколками ударника и выбросами из мишени после многочисленных ударов тел по растущей Земле. В модели коаккреции масса роя частиц составляет лишь 10^{-4} – 10^{-5} от массы Земли. Но для образования Луны нужно иметь рой массой 10^{-1} – 10^{-2} от массы Земли. Для обоснования статистической модели необходимо ответить на несколько вопросов. Какова суммарная масса осколков, выбрасываемая после ударов на геоцентрические и гелиоцентрические орбиты? Каковы размеры осколков? Могут ли они взаимодействовать с затравочным роем частиц, увеличивая его массу? В данной работе мы получили оценки с помощью численного моделирования ударов по растущей Земле.

Постановка задачи

Мы предполагали, что растущая Земля имеет то же строение и отношение массы ядра к полной массе, что и современная планета. Распределение плотности и давления по радиусу строится на основе уравнений гидродинамического равновесия с использованием соответствующих уравнений состояния. Предполагался рост температуры от 300 К на поверхности до ~ 2500 К на границе ядра с мантией.

Скорости ударов по растущей планете невелики. Выбирая параметр Сафронова равным 2 [Витязев и др., 1990], мы получаем скорости сталкивающихся с ра-

стущей Землей тел на бесконечности около 5 км/с. Это приводит к скорости удара очень близкой к скорости убегания планеты. Из простых оценок следовало, что масса вещества, выброшенного из сферы влияния планеты, может составлять до 0,1 от массы ударника [Печерникова, 1989]. Но численное моделирование ударов по плоской мишени под разными углами показывает, что при таких скоростях преодолеть притяжение планеты и быть выброшенной на гелиоцентрические орбиты может лишь очень незначительная масса [Svetsov, 2011]. Моделирование лобовых ударов крупных тел с большими скоростями также дает незначительную массу таких выбросов [Svetsov, 2005]. Поэтому в качестве единственной возможности выброса хотя бы нескольких процентов вещества ударяющего тела представлялись удары крупных тел под большими углами. Углом удара мы называем угол между скоростью ударника и вектором, направленным из центра ударника в центр Земли в момент контакта.

Так как множество данных свидетельствует о дифференциации в крупных допланетных телах в ходе формирования планет [Витязев и др., 1990], то ударники можно считать дифференцированными с соотношением железного ядра и каменной оболочки, аналогичным Земле. В пренебрежении прочностью моделирование ударов крупных тел по планете под разными углами представляет собой трехмерную гидродинамическую задачу.

Метод математического моделирования

Для математического моделирования макроимпактов была разработана программа численного решения гидродинамических уравнений в сферической системе координат, центр которой помещается в центр Земли. Схема решения аналогична методу СОБА [Shuvalov, 1999], который использовался раньше в декартовых и осесимметричных координатах. В сферических координатах в уравнениях появляется несколько дополнительных членов, но методика перетока массы, импульса и энергии между ячейками и разделения уравнений по направлениям остается той же самой. Ударяющее тело располагалось у поверхности Земли в области экватора, причем предполагалось, что течение симметрично относительно экваториальной плоскости. Это позволяло моделировать только полупространство с зенитными углами от 0 до 90°. По азимутальному углу, который изменяется от 0 до 360°, ставилось периодическое граничное условие. Центр Земли остается неподвижным, что ограничивает применимость метода относительно небольшими (не гигантскими) телами, но для них сферическая система координат оказывается более удобной. Для мантии Земли и ударника использовалось уравнение состояния дунита АНЕОС, уравнение состояния железа использовалось в виде Тиллотсона [см. Мелош, 1994].

Сферически симметричное гравитационное поле Земли искажается за счет массы ударника и перераспределения массы Земли в процессе кратерообразования. Для отклонения гравитационного потенциала от сферически симметричного вводилось уравнение Пуассона с нулевыми граничными условиями в начале координат и на периферии. Оно решалось методом переменных направлений. Неявные разностные уравнения для потенциала решались методом прогонки.

Разностная сетка состояла из 250×100×225 узлов по азимуту, зенитному углу и расстоянию до центра координат соответственно. Размеры ячеек составляли 1/40 диаметра ударника в области удара и увеличивались к границам расчетной области и к антиподной зоне. Помимо определения газодинамических переменных вво-

дилось около 600 000 пассивных (движущихся со скоростью среды) маркерных частиц, которые первоначально распределены в ударнике и подвергающейся удару области мишени по одной в каждой ячейке. Каждая частица имеет массу, соответствующую занимаемому ей объему до удара, и несет информацию о состоянии представляемого ею вещества.

Для оценки размеров осколков при разлете вещества применялся подход, который использовался в расчетах гигантских ударов [Benz et al., 2007], а именно модель динамической фрагментации [Grady, 1982]. В каждый момент времени определялось состояние вещества по температуре и давлению с использованием формул [McKenzie, Bickle, 1988]. По формулам [Grady, 1982] для жидкости размер капель зависит от скорости уменьшения плотности, которая определялась при решении гидродинамических уравнений, и коэффициентов поверхностного натяжения (0,35 Н/м для дунита и 1,4 Н/м для железа). В случае разлета твердого вещества использовалась модифицированная модель [Glenn, Chudnovsky, 1986], в которой размер фрагментов определяется рядом коэффициентов (прочность на растяжение, вязкость разрушения, скорость продольных волн, модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Выбирались типичные значения этих коэффициентов из литературы.

После удара под большим углом ударяющее тело может продолжить движение по траектории в раздробленном состоянии. Под действием гравитационных сил оно может через какое-то, возможно очень длительное, время снова собраться в единое тело или несколько крупных тел. Моделирование на основе уравнений гидродинамики проводилось в течение ограниченного промежутка времени, когда тело и его фрагменты после удара находятся в пределах Роша или достигают их. Затем маркерные частицы считались действительными фрагментами, причем сферической формы, и их движение рассчитывалось по механическим уравнениям в поле притяжения Солнца и вращающейся по своей орбите Земли. Вводилась сила притяжения между каждой парой фрагментов. Если фрагменты соприкасались, то они заменялись одним фрагментом с суммарной массой и импульсом и нормальной плотностью. Так как количество мелких осколков в действительности оказывается огромным, то невозможно рассчитывать движение всех их. Маркерные частицы в нашем случае являются лишь представителями некоторого большого количества осколков, занимающих определенную область пространства.

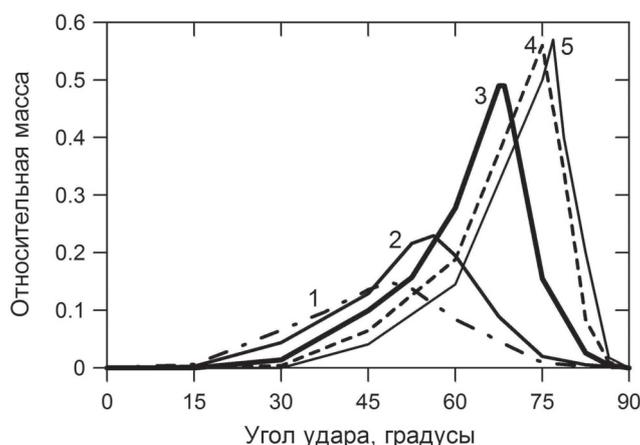
Такой расчет движения фрагментов по орбитам проводился для промежутка времени порядка года. В результате определялась масса тех фрагментов, которые не испытали слияний. Она и считалась той массой мелких частиц, которая может пополнить протолунный рой. Предполагается, что крупные фрагменты не тормозятся протолунным роем при встрече с ним и, продолжая двигаться по своим орбитам вокруг Солнца, в конце концов, вновь сталкиваются с Землей.

Результаты расчетов

Основная часть вычислений была проведена для Земли массой 0,7 от ее современной массы M_{\oplus} . Несколько вариантов были рассчитаны для массы планеты, равной 0,5 и 0,9 M_{\oplus} . Оказалось, при равных отношениях диаметра ударника к диаметру Земли результаты отличаются достаточно слабо. Скорость ударника на бесконечности изменялась от 4,4 до 5,4 км/с при изменении массы Земли от 0,5 до 0,9 M_{\oplus} . Результаты вычислений для различных углов удара и отношений диаметра ударника к диаметру Земли δ от 0,025 до 0,3 показаны на рис. 1.

Рис. 1. Отношение массы частиц, выбрасываемых после ударов на гелиоцентрические орбиты, к массе ударяющего тела μ в зависимости от угла удара для нескольких относительных диаметров тел.

1 – отношение диаметра тела к диаметру Земли $\delta = 0,3$; 2 – $\delta = 0,2$; 3 – $\delta = 0,1$; 4 – $\delta = 0,05$; 5 – $\delta = 0,025$. Масса Земли составляла 0,7 от современной.

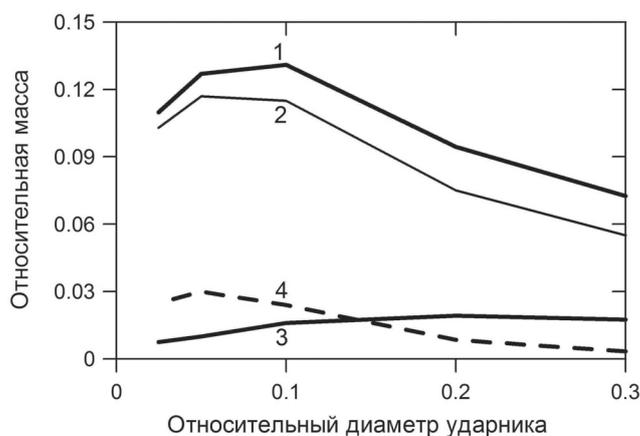


При лобовых ударах под углами α от 0 до 15° во всех случаях не происходило заметных выбросов на гелиоцентрические орбиты. Для крупных ударников с относительным диаметром $\delta = 0,3$ максимальная масса выбросов достигается при $\alpha \approx 45^\circ$. С ростом угла до 90° отношение массы выбросов на гелиоцентрические орбиты к массе ударника μ уменьшается, так как после контакта с Землей тело, выйдя за предел Роша, почти полностью собирается в единый объект своими гравитационными силами. С уменьшением δ относительное время контакта с поверхностью Земли (выраженное в диаметре ударника, деленном на скорость удара) становится все больше. Поэтому при больших α относительно мелкие ударники разрушаются сильнее, и значительная часть фрагментов отрывается от основной массы ударника.

Плотность вероятности удара под углом α равна $\sin 2\alpha$ [Gilbert, 1893; Shoemaker, 1962]. Поэтому, интегрируя μ по углам с весом $\sin 2\alpha$, мы получаем осредненные величины массы частиц, уходящих со скоростью выше второй космической. Они представлены на рис. 2. Как видно, эта относительная масса существенно превышает относительную массу Луны (более чем в 10 раз при $\delta = 0,1$). Небольшая часть вещества ударника, в среднем около 0,5%, остается на геоцентрических орбитах. Это немного, но существенно больше, чем дает модель коаккреции для до-спутникового роя.

Рис. 2. Осредненная по углам относительная масса частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты в зависимости от относительного диаметра ударяющего тела δ .

1 – полная масса, 2 – масса частиц, состоящих из вещества ударника, 3 – масса частиц мишени, 4 – масса частиц из ядра ударника.



Оценки, полученные в процессе моделирования ударов, показывают, что размеры выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты частиц лежат в интервале от 10 см до 10 м. (Эти размеры существенно больше размеров выбрасываемых частиц, порядка 1 см, которые были определены в работе [Benz et al., 2007] для мегаимпактов по Меркурию со значительно более высокими скоростями 25–30 км/с). Средние скорости на бесконечности у частиц, преодолевающих притяжение Земли, оказываются на ~0,5–1 км/с выше скорости ударника на бесконечности до столкновения с Землей. Через некоторое время большинство этих частиц вновь попадает в сферу Хилла Земли. Для оценки этого времени мы провели расчеты движения частиц, выбрасываемых с поверхности Земли под всеми возможными углами со скоростями, соответствующими скоростям на бесконечном удалении от Земли от 1 до 10 км/с. Оказалось, что их траектории пересекаются со сферой Хилла через 200–400 лет. Отклонение большой полуоси орбиты метрового фрагмента на 0,01 а.е. за счет эффекта Ярковского происходит в среднем за время порядка 1 млн лет [Bottke et al., 2006]. Эффект Пойнтинга-Робертсона приводит к изменению большой полуоси дециметрового фрагмента на 0,01 а.е. также за ~1 млн лет, а десятиметрового фрагмента за время в 100 раз больше [Wyatt, Whipple, 1950]. Таким образом, выбрасываемые частицы вполне могут взаимодействовать с протолунным роем частиц, движущихся в сфере Хилла.

Обсуждение и выводы

Мы получили, что достаточная для образования Луны масса частиц выбрасывается после ударов крупных тел на гелиоцентрические орбиты. Двигаясь по этим орбитам, частицы пересекают сферу Хилла Земли с интервалом в несколько сотен лет. Размеры частиц таковы, что негравитационные эффекты могут изменить их орбиты лишь за значительно большие времена. Время жизни современных малых тел на околоземных орбитах за счет динамических механизмов составляет около 10 млн лет [Gladman et al., 2000]. Но частицы после макроимпактов выбрасываются на малоэксцентричные гелиоцентрические орбиты, которые распределяются в более узкой зоне вдоль земной орбиты.

Выбрасываемые частицы могут сталкиваться с околоземным роем частиц, образованным в сфере Хилла, и приводить к росту его массы, но эти процессы требуют дальнейших исследований. Так как частицы являются осколками тех самых тел, которые образуют Землю, то состав Земли и роя частиц должен быть схожим. Однако мы получили, что железные частицы составляют от 5 до 20% от массы всех частиц при изменении относительного диаметра ударника от 0,3 до 0,025. Это заметно больше относительной массы ядра Луны, которая составляет 1–3%. Можно предположить, что вязкость и трение, которые не учитывались при моделировании ударов, способствуют меньшей степени дробления ядер ударников, которые, сохраняя крупные размеры, не могли быть захвачены протолунным роем, и через какое-то время выпадали на Землю. С другой стороны, можно представить, что если ядро ударника нагрето до высокой температуры, то оно может частично испариться при падении давления после удара и сконденсироваться в мелкие частицы, которые тормозятся за счет эффекта Пойнтинга-Робертсона. Мы предполагаем в дальнейшем продолжить обоснование статистической модели образования Луны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 10-05-00484-а и Программы Президиума РАН № 28.

Литература

- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // *Физика Земли*. 1996. № 6. С. 3–16.
- Галимов Э.М., Кривцов А.М., Забродин А.В. и др.* Динамическая модель образования системы Земля–Луна // *Геохимия*. 2005. № 11. С. 1137–1149.
- Галимов Э.М.* Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газо-пылевого сгущения (доклад на XIX всероссийском симпозиуме по геохимии изотопов 16 ноября 2010 г.) // *Геохимия*. 2011. № 6. С. 563–580.
- Мелosh Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир. 1994. 336 с.
- Печерникова Г.В.* К формированию и эволюции допланетных роев // *Планетная космогония и науки о Земле*. М: Наука. 1989. С. 106–139.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В.* Импаkты и эволюция ранней Земли // *Катастрофические воздействия космических тел*. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 251–265.
- Рускол Е.Л.* О происхождении Луны. I. Образование околоземного роя тел // *Астрономический журнал*. М.:1960. Т. 37. С. 690–702.
- Рускол Е.Л.* Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
- Benz W., Cameron A.G.W., Melosh H.J.* The origin of the Moon and the single impact hypothesis III // *Icarus*. 1989. V. 81. P. 113–131.
- Benz W., Anic A., Horner J., Whitby J.A.* The origin of Mercury // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 132. P. 189–202.
- Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Rubincam D.P., Nesvorny D.* The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2006. V. 34. P. 157–191.
- Cameron A.G.W., Ward W.R.* The origin of the Moon // *Lunar and Planetary Science Conference VII*. 1976. P. 120–122.
- Cameron A.G.W.* From interstellar gas to the Earth-Moon system // *Meteoritics & Planetary Science*. 2001. V. 36. P. 9–22.
- Canup R., Asphaug E.* Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation // *Nature*. 2001. V. 412. P. 708–712.
- Canup R.M.* Simulations of a late lunar-forming impact // *Icarus*. 2004. V. 168. P. 433–456.
- Canup R.M.* Lunar-forming collisions with pre-impact rotation // *Icarus*. 2008. V. 196. P. 518–538.
- Gilbert G.K.* The moon's face, a study of the origin of its features // *Bull. Philos. Soc. Washington*. 1893. V. 12. P. 241–292.
- Gladman B., Michel P., Froeschle C.* The near-Earth object population // *Icarus*. 2000. V. 146. P. 176–189.
- Glenn L.A., Chudnovsky A.* Strain-energy effects on dynamic fragmentation // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59. P. 1379–1380.
- Grady D.E.* Local inertial effects in dynamic fragmentation // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. P. 322–325.
- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
- Ida S., Canup R. M., Stewart G. R.* Lunar accretion from an impact-generated disk // *Nature*. 1997. V. 389. P. 353–357.
- Kokubo E., Ida S., Makino J.* Evolution of a circumterrestrial disk and formation of a single moon // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 419–436.
- McKenzie D., Bickle M.J.* The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere // *Journal of Petrology*. 1988. V. 29. P. 625–679.

Salmon J.J., Canup R.M. Three-stage lunar accretion: slow growth of the Moon and implications for Earth-Moon isotopic similarities // LPSC 43. 2012. Abstract # 2540.

Shoemaker E.M. Interpretation of lunar craters // Physics and Astronomy of the Moon. New York: Academic Press, 1962. P. 283–359.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. V. 9. No. 6. P. 381–390.

Svetsov V.V. Numerical simulations of very large impacts on the Earth // Planetary and Space Science. 2005. V. 53. P. 1205–1220.

Svetsov V. Cratering erosion of planetary embryos // Icarus. 2011. V. 214. P. 316–326.

Wyatt S.P., Whipple F.L. The Poynting-Robertson effect on meteor orbits // Astrophysical Journal. 1950. V. 111. P. 134–141.