

## **В РАЗВИТИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ. II**

***В.В. Светцов***

Рассматриваются удары крупных космических тел по ранней растущей Земле. Моделирование, основанное на численном решении уравнений гидродинамики, позволяет определить процессы, происходящие при ударах, и их последствия для обоснования статистической модели образования Луны. Работа является продолжением начатого в прошлом году исследования. Здесь подробно представлена картина ударов дифференцированных планетезималей, диаметр которых составляет 0,1 и 0,3 от диаметра Земли. Делается оценка полной массы частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, в процессе роста Земли.

### **Введение**

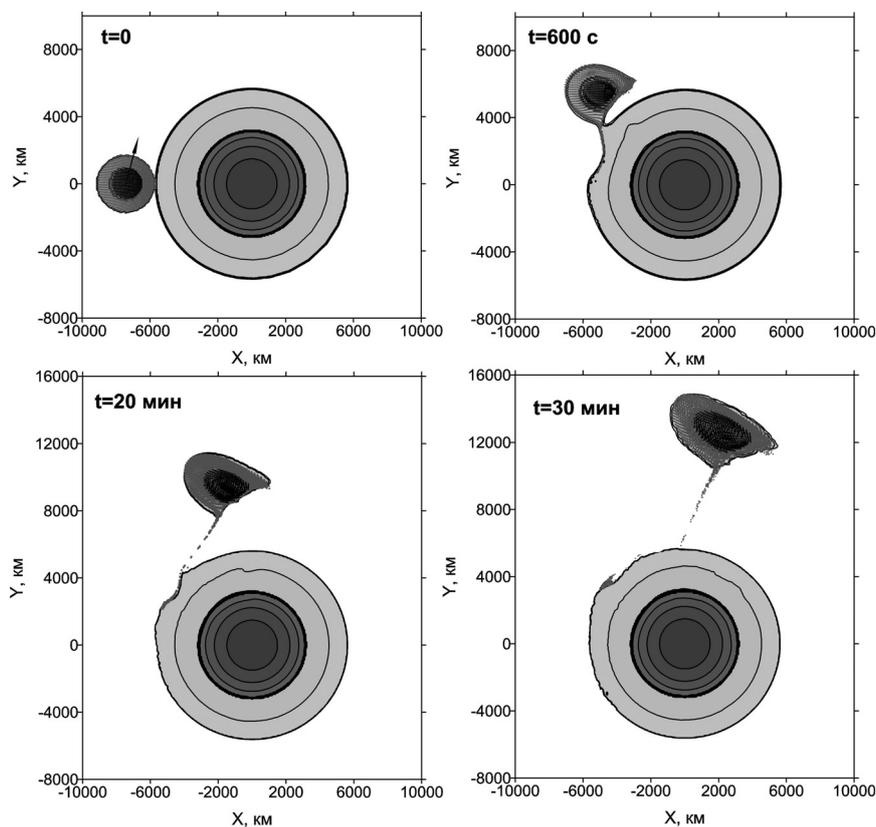
Согласно стандартной теории образования планет земной группы [Витязев и др., 1990] Земля в процессе своего роста подвергалась ударам крупных тел (макроимпактам), массы наибольших из них могли составлять от 7 до 0,2% от массы растущей Земли, в период ее роста от 0,7 до 0,99 от современной массы Земли [Печерникова, Витязев, 2005]. В статистической модели образования Луны [Печерникова, 1989; Витязев, Печерникова, 1996] предполагается, что околоземный рой (или диск) частиц, образующийся в процессе аккумуляции Земли и имеющий небольшую массу [Витязев и др., 1990], пополняется частицами, выбрасываемыми на гео- и гелиоцентрические орбиты при макроимпактах. При достижении достаточной массы роя из него образуется Луна. В работе [Светцов и др., 2012] для обоснования статистической модели было проведено численное моделирование макроимпактов по растущей Земле. Было получено, что выбрасываемая после ударов крупных тел на гелиоцентрические орбиты масса частиц превышает массу Луны и, следовательно, достаточна для образования Луны. Были вычислены параметры этих орбит. Двигаясь по гелиоцентрическим орбитам, частицы пересекают сферу Хилла Земли с интервалом в несколько сотен лет. По нашим оценкам размеры вы-

брасываемых на гелиоцентрические орбиты частиц лежат в интервале от 10 см до 10 м, поэтому негравитационные эффекты могут изменить их орбиты лишь на значительно больших временах. Таким образом, эти частицы могут пополнять рой, вращающийся вокруг Земли.

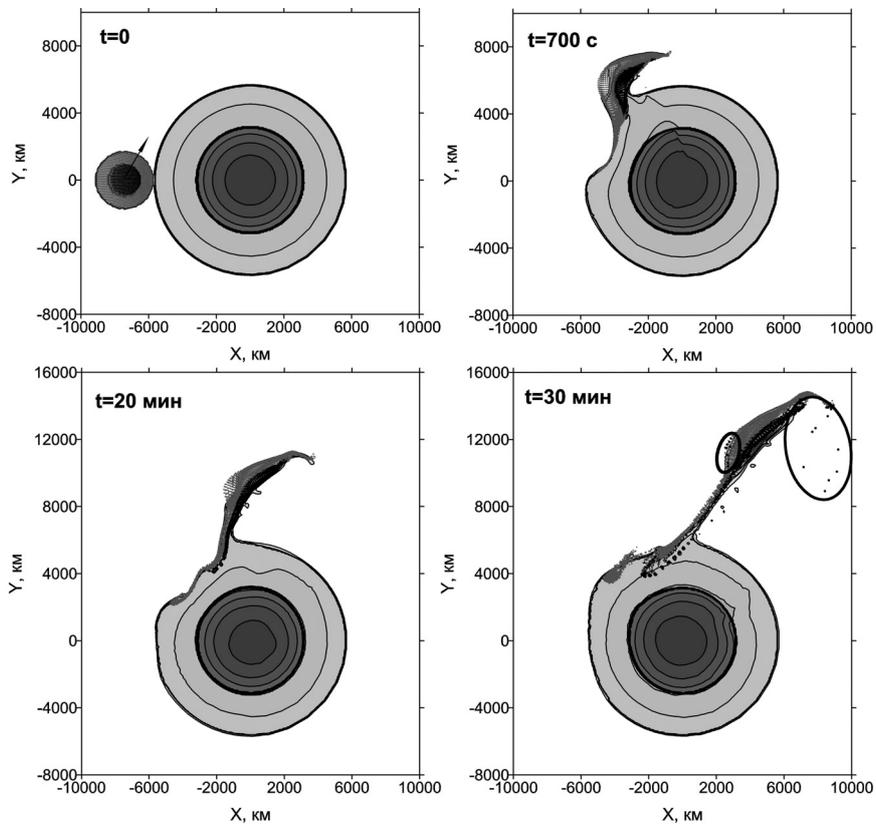
Для обоснования статистической модели образования Луны помимо вопроса о росте протолунного роя возникают и другие вопросы, например, о моменте импульса системы Земля–Луна и о составе протолунного роя. Для этого важны детали процессов, происходящих при макроимпактах. В данной статье мы рассматриваем более подробно, что происходит при ударах крупных тел по растущей Земле, продолжая исследование, начатое в [Светцов и др., 2012].

### Численное моделирование макроимпактов

В численном моделировании ударов под разными углами мы предполагали, что растущая Земля имеет те же строение и отношение массы ядра к полной массе, что



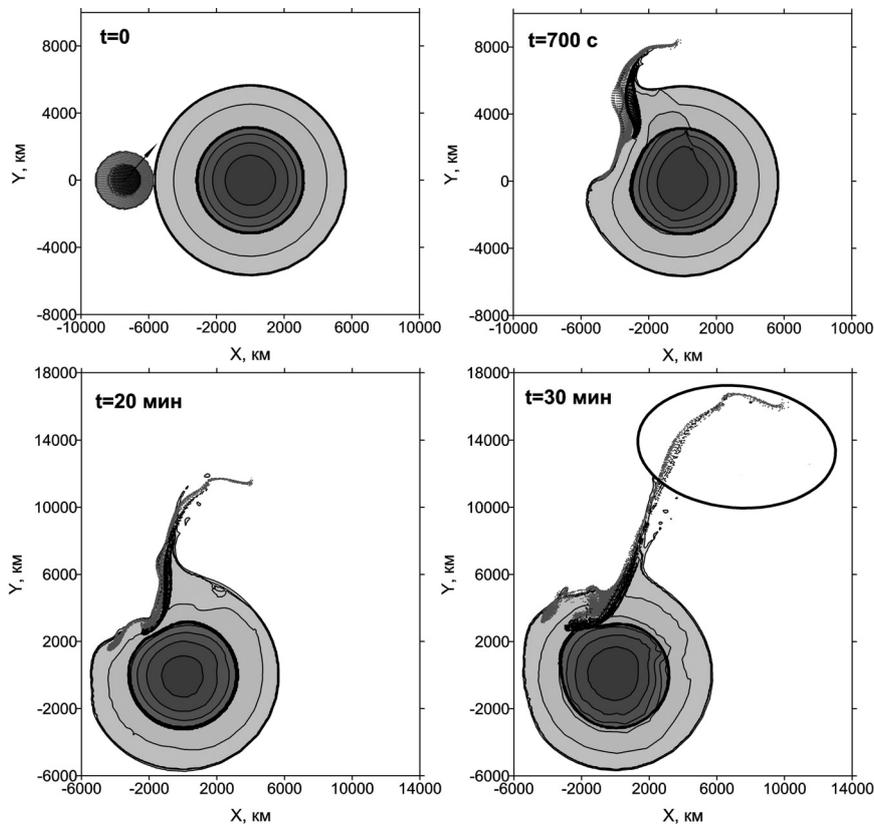
**Рис. 1.** Удар дифференцированного тела под углом  $75^\circ$  к прямой, соединяющей центры масс Земли и тела. Показаны изолинии плотности в плоскости, проходящей через эту прямую и вектор скорости. Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0,3$ . Показаны четыре момента времени после первого контакта тела с Землей. Темным цветом показано ядро Земли, черным – вещество ядра тела. Темно-серым цветом показано вещество каменной оболочки ударяющего тела



**Рис. 2.** Удар дифференцированного тела под углом  $60^\circ$ . Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0,3$ . Два эллипса отмечено положение фрагментов, которые в рассеянном виде переходят на гелиоцентрические орбиты

и современная планета. Основная часть вычислений была проведена для Земли массой  $0,7$  от ее современной массы. Ударяющие тела также считались дифференцированными с соотношением железного ядра и каменной оболочки, аналогичным Земле ( $\sim 0,3$  по массе). Относительные скорости тел до сближения с Землей составляли около  $5 \text{ км/с}$ . Это приводит к скорости удара очень близкой к скорости убегания планеты.

На рисунках 1–4 проиллюстрирована картина ударов дифференцированных планетезималей, диаметр которых составляет  $0,3$  от диаметра растущей Земли. Углом удара будем называть угол между вектором скорости тела и линией, соединяющей центры масс тела и Земли. При ударе под углом  $75^\circ$  (рис. 1) тело разрушается, но после контакта с Землей сохраняет связность и продолжает двигаться по орбите как целое. Его форма искажается за счет приливных сил. Удар под таким углом создает относительно небольшой кратер. Масса вещества, которое выбрасывается на гелиоцентрические орбиты в рассеянном виде (не падает на тело за счет его притяжения в процессе всего полета вокруг Солнца) и может пополнить протолунный рой, составляет в этом случае около  $1\%$  от массы ударяющего тела. Тело может снова столкнуться с Землей, причем более вероятно, что оно столкнется с Землей



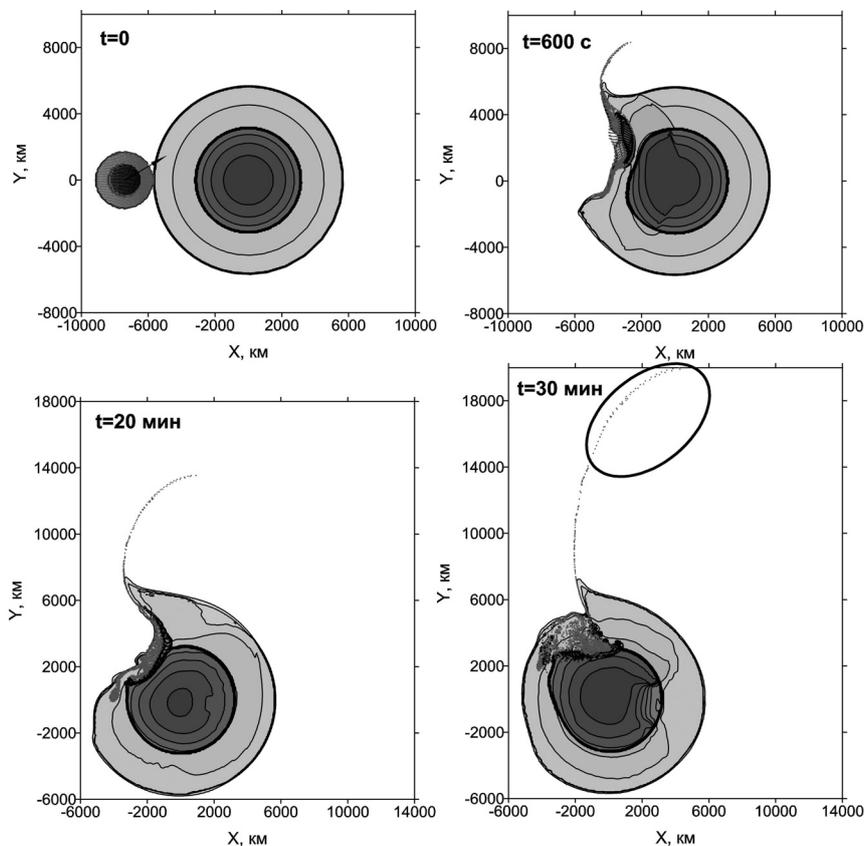
**Рис. 3.** Удар дифференцированного тела под углом  $50^\circ$ . Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0,3$ . Внутри эллипса находятся осколки, которые в рассеянном виде переходят на гелиоцентрические орбиты

под меньшим углом, так как плотность вероятности удара под углом  $\alpha$  равна  $\sin 2\alpha$  (и наиболее вероятен угол удара  $45^\circ$ ).

На рис. 2 показан удар тела под углом  $60^\circ$ . Ударяющее тело оказывается частично разрушенным, как видно в момент времени 30 минут. Но затем при движении фрагментов по близким гелиоцентрическим орбитам они вновь аккумулируются в тело меньшей массы за счет сил взаимного притяжения. Небольшая часть вещества тела остается на Земле, совсем незначительная часть осколков переходит на геоцентрические орбиты, а масса небольших фрагментов, которые уходят на гелиоцентрические орбиты и не притягиваются вновь аккумулированным телом, составляет 8,5% от первоначальной массы тела.

На рис. 3 показан удар тела под углом  $50^\circ$ , когда относительная масса частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, достигает наибольшей величины 15%. На земле образуется большой кратер, а вещество ядра планетезимали достигает ядра Земли.

На рис. 4 показан удар тела под углом  $30^\circ$ . Размер кратера в этом случае превышает радиус Земли. Относительная масса частиц, выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты, составляет около 7%. Таким образом, максимум массы выбрасыва-

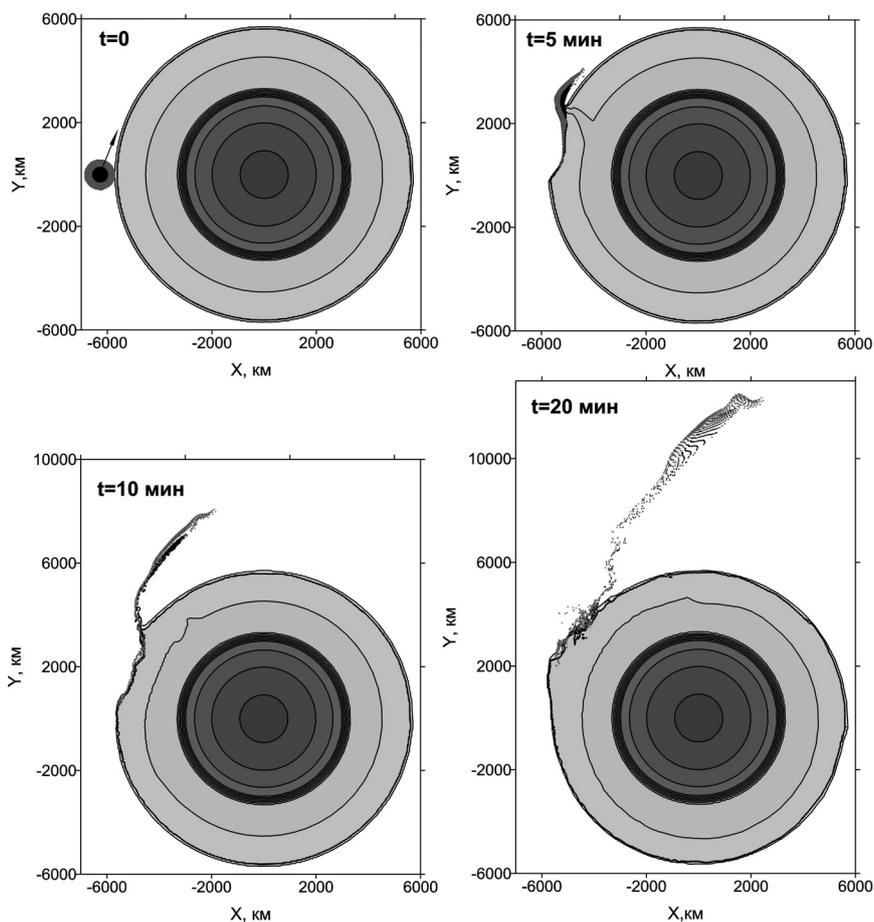


**Рис. 4.** Удар дифференцированного тела под углом  $30^\circ$ . Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0,3$ . Эллипсом отмечено положение фрагментов, которые в рассеянном виде переходят на гелиоцентрические орбиты

емых частиц достигается при ударе под углом  $50^\circ$ . При лобовом ударе (под углом  $0^\circ$ ) на орбиты выбрасывается лишь незначительная масса.

При уменьшении диаметра тела на гелиоцентрические орбиты может быть выброшена большая относительная масса, но максимум массы выброса частиц в рассеянном виде сдвигается в сторону больших углов удара. На рис. 5 проиллюстрирован удар тела с относительным диаметром  $\delta = 0,1$ . Масса выброшенных частиц составляет при этом около 50% массы тела.

Оценки, полученные в процессе моделирования ударов, показывают, что размеры выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты частиц лежат в интервале от 10 см до 10 м. Средние скорости на бесконечности у частиц, преодолевающих притяжение Земли, оказываются на  $\sim 0,5-1$  км/с выше скорости ударника на бесконечности до столкновения с Землей. Так как скорости ударов были небольшими, около второй космической скорости, то температуры выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты частиц невелики. Частицы при выбросе сразу оказываются в твердом или расплавленном состоянии. Время остывания частиц до низких температур определяется теплопроводностью и составляет от нескольких часов при диаметре частицы 10 см до нескольких лет при диаметре 10 м.



**Рис. 5.** Удар дифференцированного тела под углом  $67^\circ$  к прямой, соединяющей центры масс Земли и тела. Отношение диаметра тела к диаметру Земли  $\delta = 0,1$

Таким образом, протолунный рой оказывается состоящим из вещества планетезималей и каменной оболочки Земли. И так как в статистической модели Земля создается из крупных падающих на нее тел, то состав протолунного слоя должен быть близок к составу Земли, но обеднен железом.

### Оценки полной массы выбросов на орбиты

В результате моделирования каждого удара под разными углами мы получили массу выбрасываемых на гелиоцентрические орбиты частиц, а проинтегрировав результаты по углам с соответствующей плотностью вероятности, мы получили зависимость средней полной массы выбрасываемых частиц от размеров ударяющих тел [Светцов и др., 2012]. Используя эти данные можно оценить сколько всего вещества выбрасывается на гелиоцентрические орбиты в процессе роста Земли.

Для спектра масс используем известное упрощенное степенное выражение [Витязев и др., 1990]

$$\dot{n}(m) = \frac{(2-q)m^{-q}}{m_1^{2-q}}, \quad (1)$$

где  $1,5 < q < 2$ .

Максимальную массу ударников  $m_1(t)$  можно приближенно связать с массой, аккумулируемой планетой с момента времени  $t$  до времени окончания ее роста [Wetherill, 1975]

$$m_1 = \left( \frac{4-2q}{3-q} \right) (M_{EM} - M_E). \quad (2)$$

Здесь  $M_{EM}$  – современная масса Земли, а  $M_E(t)$  – масса растущей Земли.

Для массы частиц, выбрасываемых на орбиты,  $m_e$  можно записать уравнение

$$\frac{dm_e}{dt} = \dot{M} \int_{m_0}^{m_1} m \dot{n}(m) \eta(m, M_E) dm, \quad (3)$$

где  $\dot{M}(t)$  – поток массы падающих на планету тел, а  $\eta(m, M_E)$  – полученная в результате численного моделирования осредненная по углам доля массы ударников, выбрасываемая на орбиты в виде частиц. Для массы Земли запишем следующее уравнение

$$\frac{dM_e}{dt} = \dot{M} - \frac{dm_e}{dt}. \quad (4)$$

Здесь предполагается, что вещество, выбрасываемое после удара на орбиту в виде крупного тела, не может поглотиться протолунным роением и через какое-то время снова падает на Землю и поглощается ей.

Систему уравнений (1–4) можно решить численно. Взяв в качестве начальной массы Земли половину ее современной массы, нижний предел интегрирования в (3)  $m_0$  равный массе тела диаметром 10 км и  $q = 1,8$ , мы получили, что всего за время роста Земли, начиная с половины ее массы, на гелиоцентрические орбиты выбрасывается около 4% современной массы Земли. Масса частиц из ядер ударников составляет около 0,5%, если предположить, что все ударяющие тела дифференцированные, хотя вероятно, определенную долю составляли недифференцированные планетезимали. Следует также отметить, что численное моделирование ударов проводилось лишь в диапазоне размеров планетезималей 0,025–0,3 от массы растущей Земли. В сторону больших и меньших тел производилась экстраполяция величины  $\eta$ . В дальнейшем целесообразно провести моделирование во всем диапазоне размеров ударяющих тел.

Итак, мы ответили на очень важный вопрос о массе спутника Земли в рамках статистической модели. На гелиоцентрические орбиты выбрасывается масса частиц, более чем в три раза превышающая массу Луны. Луна образуется из того же вещества, что и Земля, но оказывается обедненной железом. Тем не менее, проведенные численные расчеты дали соотношение железа в протолунном слое в несколько раз выше, чем у современной Луны (1–3%). Это несоответствие требует дальнейшего изучения.

Автор благодарен А.В. Витязеву и Г.В. Печерниковой за поддержку и полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-05-00694-а).

### **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.

*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.

*Светцов В.В., Печерникова Г.В., Витязев А.В.* В развитие статистической модели образования Луны // Динамические процессы в геосферах. Вып. 3.: Сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва. ГЕОС. 2012 С. 23–29.

*Wetherill G.W.* Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets // Proc. Lunar Sci. Conf. 6<sup>th</sup>. 1975. P. 1539–1561.