УДК 523.3-52

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ СПУТНИКА ПЛАНЕТЫ

Э. Р. Прууэл\*, И. А. Рубцов\*\*, В. Ф. Анисичкин\*

\*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090. Новосибирск

\*\*Новосибирский государственный университет, 630090. Новосибирск

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Взрыв в недрах планеты и выброс части ее внешних слоев на орбиту с образованием спутника позволяет объяснить особенности элементного и изотопного состава Луны. Задача компьютерного моделирования образования спутника решалась в двумерной постановке методами молекулярной динамики с числом частиц до сотен тыс. При этом роль частиц играют тела астероидного размера порядка 100 км, взаимодействующие по ньютоновскому закону. Свойства вещества в компактном состоянии задавались короткодействующим потенциалом. Ряд расчетов с варьированием начальных условий позволил подтвердить реалистичность сценария взрывного происхождения Луны и показать его преимущества перед другими гипотезами.

Ключевые слова: происхождение Луны, природный ядерный взрыв, фрагментация Земли, компьютерное моделирование.

**Введение.** Гипотезы, согласно которым Земля и Луна образовались из одной области протопланетного газопылевого диска, прилетающая извне Луна была захвачена гравитационным полем Земли, или Луна отделилась от быстро вращающейся Земли без дополнительного воздействия, не объясняют особенности элементного и изотопного состава Земли и Луны, и не согласуются с результатами компьютерного моделирования [1]. Более современная гипотеза, впервые предложенная в работе [2], по которой система Земля - Луна образовалась в результате столкновения планет, испытывает трудности в объяснении идентичности изотопного состава земных и лунных пород [3].

Адекватно происхождение и состав Луны может объяснить ее образование из земного вещества в результате взрыва в недрах планеты. Взрыв был способен выбросить с большой скоростью в космическое пространство значительную массу верхних оболочек Земли с относительно низким содержанием железа с сохранением изотопного состава элементов. Необходимую для такого взрыва мощность могла дать цепная ядерная реакция [4, 5]. Другим источником энергии для взрывного сценария предполагается газификация флюидов при выходе из недр [6]. Однако эффективность газификации по сравнению с ядерной реакцией низка, так что требуется выброс невероятного масштаба (сомнение вызывает также возможность достижения космической скорости выброса).

Традиционное отнесение урана и тория к литофильным элементам не допускало их существенной концентрации глубоко в недрах Земли и, следовательно, возможность взрыва. Однако новейшие данные по регистрации геонейтрино, испускаемых реагирующими актиноидами, доказывают, что порядка половины актиноидов и в настоящее находится глубоко в недрах Земли [7, 8].

По оценкам энергия выброса Луны порядка 1029-1030 Дж [5]. Это соответствует цепной реакции до 1016 кг U-235, или 5×1016 кг природного урана в эпоху образования Земли, когда доля U-235 достигала 20 %, что составляет до нескольких процентов от предполагаемого содержания актиноидов в недрах Земли [9]. Однако возможность концентрации и взрыва актиноидов глубоко в земных недрах пока остается дискуссионной [10].

Другая нерешенная составляющая задачи взрывного происхождения Луны это механика взрыва, c выбросом масс на орбиту и образованием спутника. В простейшем случае выброса малой точечной массы она либо уходит от Земли, при скорости, большей второй космической, либо возвращается на Землю из-за замкнутости орбит в поле тяготения. Однако взаимодействия больших масс выброшенных осколков приведут к обмену энергией и моментом импульса, так что в результате часть вещества может остаться на орбите. Кроме того, существенно влияние Солнца и других планет, что также может уводить далеко выброшенные тела с замкнутой орбиты.

Быстро вращающаяся прото-Земля могла иметь момент импульса, достаточный для объяснения современного момента импульса системы Земля – Луна. Для этого скорость вращения должна была превышать современную примерно в 5 раз [5], что также существенно облегчает выброс и снижает необходимую мощность взрыва. Такая скорость суточного вращения планеты не представляется невероятной. Например, современный Юпитер, в несколько раз более крупный, несмотря на возможное замедление вращения за миллиарды лет, делает один оборот за 10 часов.

Таким образом, априорной невозможности взрыва и выброса Луны в настоящий момент не просматривается.

Сложность задачи исключает надежные аналитические подходы. Поэтому цель работы – на основе компьютерного моделирования механической составляющей процесса показать принципиальную возможность взрывного образования большого спутника у планеты земного типа.

**Постановка задачи.**

Задача глубинного взрыва решалась в двумерной постановке. Считалось, что тело имеет плотное ядро (масса частиц ядра в 3 раза больше массы остальных частиц). Задавалось вращение тела так, чтобы скорость на поверхности равнялась 1-й космической $V\_{1}=\sqrt{G\frac{M}{R}}$. Затем продуктам взрыва (частицам в светлой на рис. 1.a) области) мгновенно сообщается высокая температура, увеличивается их кинетическая энергия (т.е. происходит взрыв).

**Метод решения.**

Задача двумерного компьютерного моделирования процесса образования спутника планеты, как и в гипотезе мегаимпакта [2], решалась методом молекулярной динамики с числом частиц порядка 105. При этом роль атомов играли тела астероидного размера порядка 100 км. Свойства вещества в компактном состоянии задавались короткодействующим потенциалом Леннарда-Джонса, взаимодействие на расстоянии по ньютоновскому закону:

$$U\left(r\right)=4E\left[\left(\frac{b}{r}\right)^{12}-\left(\frac{b}{r}\right)^{6}\right]-G\frac{m\_{1}m\_{2}}{r}$$

Основная проблема расчетов состояла в подборе необходимой мощности и месте взрыва, скорости суточного вращения планеты до взрыва и других характеристик.

Вся расчётная область разбивалась на ячейки. Ячейки имеют несколько уровней, в каждой ячейке не нижнего уровня хранятся ссылки на 4 дочерние ячейки и родителя, а все частицы хранятся только в ячейках нижнего уровня.

В расчетах использовалась система единиц, в которой $E=b=G=1$. Вся сетка разбивается на ячейки: минимальный размер ячейки равен 3*b*, расчётная область не имеет границ и увеличивается по мере отдаления частиц от центра (всегда считаются все частицы не зависимо от того насколько далеко они удалились от центра).

Использовался fast multipole метод [11], являющийся аналогом метода Верле в скоростной форме. Ближнее взаимодействие (частиц в ячейках на нижнем уровне) вычислялось полностью, а дальнее взаимодействие вычислялось как дипольное взаимодействие ячеек на остальных уровнях (по центру масс ячейки и его координатам).

 При расчётах производится проверка законов сохранения: энергии, импульса и момента импульса. При расчёте сил происходит распараллеливание на несколько ядер с помощью протокола OMP.

**Результаты расчетов.** В зависимости от геометрии, мощности взрыва, скорости вращения планеты получены разные результаты. Так при относительно малой мощности взрыва основная масса фрагментов падает обратно. Чем больше мощность, тем больше фрагментов остается на орбите, но и больше фрагментов безвозвратно покидает планету. На рис. 1 показаны последовательные стадии одного из вариантов расчета, когда на орбитах остаются массы в сумме (в плоской геометрии) близкие к массе современной Луны. Видимые на рисунке два наиболее крупных фрагмента, имеют размер около 1 тыс. км каждый. Множество более мелких фрагментов, в сумме превышающих массы крупных фрагментов, не различимы в масштабах рисунка.

**Обсуждение.** Как видно из расчета, приведенного на рис.1, выходу части фрагментов на орбиту способствует обмен моментом импульса больших масс, разбрасываемых в разных направлениях расширяющимися продуктами взрыва. (Учет гравитационного влияния Солнца может существенно снизить мощность взрыва, необходимую для вывода спутников на устойчивую орбиту.)

Твердые ядра планет Солнечной системы, предположительно, имеют близкий по содержанию элементов состав, в том числе и актиноидов. Поэтому и в других планетах, кроме Земли, были возможны взрывы. Но, как показали расчеты, из-за разной массы планет, разного количества скопившихся локально актиноидов, геометрии взрыва результат мог быть разным. Так у планеты Венера мощности взрыва, если он был, могло не хватить для образования спутника. У больших планет Юпитера и Сатурна взрывы могли привести к выбросу множества наблюдаемых спутников.

Под воздействием ударной волны среда сжимается, нагревается, и поэтому выброшенные в разреженное пространство массы частично теряют летучие химические элементы, обогащаясь тугоплавкими. Этим может объясняться обнаруженное обеднение Луны пород летучими, но обогащение тугоплавкими химическими элементами по сравнению с земными породами.

**Заключение.** На рис. 2 для сравнения приведены результаты решения задачи взрывного происхождения спутника в рамках гидродинамического приближения также в двумерной постановке [12]. (При этом считалось, что перевод скопления актиноидов в сверхкритическое состояние и взрыв были инициированы падением астероида на планету.) Видно, что механики взрывов и образования спутников существенно отличаются, поэтому пока нельзя считать поставленную задачу о происхождения спутника Земли решенной. Однако полученные результаты позволяют утверждать, что взрывное происхождение Луны может более адекватно и непротиворечиво объяснять элементный и изотопный состав Луны и, возможно, спутниковые системы других планет Солнечной системы [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lissauer, J. J.** It’s not easy to make the moon // Nature. 1997**. V. 389**(6649). P. 353-357.
2. **Hartmann W. K., Davis D. R.** Satellite-sized planetesimals and lunar origin // Icarus. 1975. V. 24. P. 504-515.
3. **Clery D.** Impact Theory Gets Whacked // Science. 2013. V. 342, iss. 6155. P. 183-185.
4. **Анисичкин В. Ф.** Взрываются ли планеты? // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 138-142.
5. **de Meijer R. J., Anisichkin V. F., van Westrenen W.** Forming the Moon from terrestrial silicate-rich material // Chemical Geology. 2013. V. 345. P. 40-49.
6. **Маракушев А. А., Грановский Л. Б., Зиновьева Н. Г. и др. /** Космическая петрология. М.: Наука, 2003.
7. **Скорохватов М. Д.** Нейтринная геофизика – первые шаги // Природа. 2012. № 3. С. 13-17.
8. **Agostini M., Appel S., Bellini G. *et al.*** (Borexino Collaboration) Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data // Physical Review D. 2015. **92**, 031101(R).
9. **Фор Г.** / Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. Пер. с англ.: **Faure G.** / Principles 0f isotope geology. John Wiley & Sons, Inc. 1986.
10. **Митрофанов В. В., Анисичкин В. Ф., Воронин Д. В. и др.** О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет // V Забабахинские научные чтения. Труды. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1999. С. 67-76.
11. **Greengard L., Rokhlin V.** A fast algorithm for particle simulations // J. of Computational Physics. 1987. V. 73, N. 2. P. 325–348.
12. **Voronin D. V., Anisichkin V. F.** Generation of the Moon and some other celestial bodies due to explosion in planet interiors // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2007. ISSN: 1790-5087. V. 2, iss. 2. P. 27-43.
13. **Анисичкин В. Ф., Воронин Д. В.** Расчет фрагментации планет при взрыве // V Забабахинские научные чтения. Труды. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1999. С. 89-91.

**Подписи к рисункам:**

Рис. 1. Результат расчета методами молекулярной динамики взрыва в недрах планеты и образования спутников. Стрелками показаны два более крупных тела, из стабилизировавшихся на орбите вокруг планеты.

Рис. 2. 1 – астероид и испарившиеся после его падения продукты; 2 – железное ядро планеты; 3 – каменная мантия; 4 – место взрыва; 5, 6 - продукты взрыва; 7 – фрагмент, падающий на планету; 8 – фрагмент, образующий спутник; 9 – фрагменты, покидающие планету. Степень черноты соответствует плотности, сильно разреженные газовые массы не показаны.

****

****