

**В. Н. Анфилов<sup>1</sup>, Ю. В. Хачай<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс  
anfilov@mineralogy.ru*

<sup>2</sup> – *Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург*

## **Происхождение Луны**

Вопрос о происхождении Луны имеет первостепенное значение для объяснения механизма образования Земли, спутником которой она является. До появления гипотезы мегаимпакта в литературе обсуждались три основных механизма образования Луны: 1) гипотеза отделения Луны от Земли; 2) гипотеза захвата и 3) гипотеза совместного образования или коаккреции Земли и Луны. Недостатки этих гипотез рассмотрены в работе [Левин, Маева, 1975]. Идея отделения вещества Луны от Земли была высказана Дж. Дарвиным еще в 1880 г. Ее несоответствие законам небесной механики также обсуждается в работе [Левин, Маева, 1975]. Как отмечают авторы этой работы, в случае возникновения ротационной неустойчивости, которая является причиной отделения части вещества от вращающегося тела, невозможно плавное отделение спутника от основного тела. Выброшенное в результате ротационной неустойчивости вещество либо улетает прочь, либо возвращается обратно.

Гипотеза совместного образования Земли и Луны рассматривается в работах [Шмидт, 1950; Рускол, 1975]. О. Ю. Шмидт предполагал, что Луна аккумулировалась в окрестностях растущей Земли из околосемного роя тел, непрерывно пополнявшегося из протопланетного облака. Как отмечают Б. Ю. Левин и С. В. Маева [1975], «гипотеза О. Ю. Шмидта опирается на процессы, которые неизбежно должны протекать в ходе аккумуляции Земли и, с механической точки зрения, она представляется наиболее перспективной». Однако в рамках этой гипотезы следует ожидать, что Луна и Земля имеют одинаковый состав и попытка доказать, что этот процесс может привести к различному составу этих тел, по мнению авторов, является сомнительной.

Существенный прогресс в изучении Луны был достигнут при изучении материалов, доставленных на Землю беспилотными станциями Луна-16, Луна-20 и экспедициями Аполлон. Детальный анализ этих результатов и проблем, которые появились в связи с получением новых данных, сделан в работах [Левин, Маева, 1975; Каула, 1975; Warren, 1989]. Отметим наиболее важные из них. Установлено, что Луна претерпела магматическую дифференциацию, которая происходила одновременно с ее ростом, и что в настоящее время ее недра находятся в частично расплавленном состоянии. Следствием этого открытия является необходимость высокой начальной температуры Луны. Пока никто не смог предложить источник энергии, необходимой для реализации этого состояния. У. М. Каула [1975] считает, что астеносфера Луны радиусом 700 км свидетельствует о том, что эта область была слишком холодна, чтобы принять участие в ранней дифференциации. Попытки объяснить высокую температуру в недрах Луны повышенным содержанием радиоактивных элементов выглядят не совсем убедительными и создают новую проблему источника повышенных содержаний этих элементов. Установлен резкий дефицит железа по сравнению с Землей. Третьей особенностью Луны является ее обогащение минералами с высоким содержанием Са и Al [Левин, Маева, 1975]. Наличие на Луне мощной анортозитовой коры и частично расплавленной центральной части заставляют предполагать, что весь ее объем прошел через расплавленное состояние, и что на завершающей стадии

формирования у ее поверхности существовал слой расплава мощностью не менее 400 км [Рускол, 1975].

Неадекватность трех основных гипотез образования Луны и перечисленные выше проблемы, главная из которых разогрев вещества Луны до температуры плавления, привели к появлению гипотезы мегаимпакта [Cameron, 1976; Taylor, 1987]. Гипотеза мегаимпакта предполагает, что материал, из которого была сформирована Луна, был выбит из мантии Земли при ударе о Землю космического тела размером с Марс или более. Таким образом, по мнению авторов, решаются две проблемы: дефицит железа в Луне и разогрев выброшенного материала выше температуры плавления. Гипотеза мегаимпакта не решает проблему, а заменяет ее решение умозрительной схемой. Произвольно варьируя составом и размером импактора, эта гипотеза позволяет объяснить любые установленные различия в составе Земли и Луны, но какие либо алгоритмы ее проверки отсутствуют.

Прежде чем объяснять природу различия химического состава Земли и Луны и механизм разогрева вещества Луны на начальном этапе ее формирования, мы должны выбрать определенную модель образования Луны. Наиболее корректной является модель, предложенная О. Ю. Шмидтом [1950], которая в дальнейшем была развита в работах Е. Л. Рускол [1975]. Е. Л. Рускол и У. М. Каула считают, что динамически вероятным является способ, в котором Луна является побочным (сопутствующим) продуктом образования Земли. Однако этот тезис может иметь двоякое толкование. В варианте, принятом Е. Л. Рускол и У. М. Каулой, Луна формируется из спутникового роя, частицы которого, до того как стать спутниками растущей Земли, обращались по гелиоцентрическим орбитам. В этом варианте предполагается, что Земля и Луна формировались из одного и того же вещества. Это создает непреодолимые трудности при объяснении различия химического состава Земли и Луны.

Принимая за основу гипотезу О. Ю. Шмидта, мы считаем, что на начальном этапе Луна формировалась из фрагментов, которые образовались при разрушении первичных зародышей Земли. Этот вариант логически вытекает из предложенной нами модели гетерогенной аккумуляции Земли, в основе которой лежит двухстадийный механизм формирования зародышей планеты [Cameron, 1976; Stolper, 1982]. Согласно нашей модели, на первой стадии образуются первичные зародыши, центральная часть которых сложена наиболее высокотемпературными конденсатами, близкими по составу к САI – обогащенными Са и АI включениям, которые присутствуют в метеорите Алленде. Средняя оболочка этих зародышей сложена железоникелевым материалом, который конденсируется из газовой фазы вслед за высокоглиноземистыми конденсатами. В процессе роста первичных зародышей происходил их разогрев, в результате распада коротко живущих радиоактивных изотопов, главным из которых является  $^{26}\text{Al}$  с периодом полураспада  $\tau = 7.38 \cdot 10^5$  лет. Отношение  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  в протопланетном веществе оценивается в  $5 \cdot 10^{-5}$  [Cameron, 1976]. При таком содержании  $^{26}\text{Al}$  по мере роста массы зародышей температура их центральных областей увеличивается и в центре зародыша радиусом более 200 км может достигать 2200 К [Cameron, 1976; Анфилогов, Хачай, 2005]. Этого вполне достаточно для плавления Са–АI материала в центральной части зародыша, температура плавления которого равна 1830 К [Stolper, 1982], и железо-никелевой смеси в его средней оболочке. Внешняя оболочка зародыша, отдающая тепло в пространство, останется твердой.

Дальнейшее развитие процесса формирования планет идет по следующей схеме. В соответствие с моделью аккумуляции В. Сафронова, число зародышей образованных на начальном этапе процесса агломерации продуктов конденсации велико, и

они будут часто сталкиваться друг с другом. Столкновение двух зародышей, имеющих близкие размеры, расплавленное алюмосиликатное ядро, среднюю железную и твердую силикатную внешнюю оболочки, приведет к их разрушению. Средние, расплавленные оболочки при столкновении сольются, образуя новый зародыш, ядро которого состоит из железо-никелевого сплава. Вещество алюмосиликатных ядер первичных зародышей будет выдавлено из их центров и выброшено за пределы нового зародыша, образованного в результате столкновения. Частично вместе с ним будет выброшен расплавленный железо-никелевый материал. Внешние твердые оболочки, нижняя часть которых могла состоять из вещества близкого к составу палласитов или обыкновенных хондритов, будут разрушены и часть обломков также будет выброшена за пределы области питания растущей планеты. Таким способом формируется металлическое ядро Земли и происходит разделение химических резервуаров ядра и силикатной мантии.

Рассмотренный выше двухстадийный механизм формирования Земли позволяет предложить согласованный с ним вариант образования Луны, объясняющий существующий дефицит железа в составе Луны и высокую первичную температуру в ее недрах. Как мы отметили выше, принципиальное отличие нашей модели от модели Шмидта–Рускол заключается в том, что материал, из которого на начальном этапе формируется Луна, представлен не частицами, находящимися на гелиоцентрических орбитах, а, главным образом, фрагментами первичных зародышей Земли, выброшенных при их разрушении на спутниковые орбиты. Это вещество состоит из расплавленного материала, близкого по составу к CAI и частично из расплавленного железа и обломков внешних твердых оболочек.

Неравномерное распределение железа между Землей и Луной возникает на начальном этапе формирования Луны. При формировании вторичных зародышей Земли основная масса железа переходит в их центральные части, из которых затем формируется ядро Земли. На Луну попадают только фрагменты первичных зародышей, в которых значительная часть представлена материалом CAI. После завершения формирования основной части ядра Земли на его поверхности и на поверхности растущей Луны отлагается силикатный хондритовый материал с относительно невысоким содержанием железа.

Второй проблемой, которую должна решить адекватная модель формирования Луны, является дефицит Na, K, Rb, Cs и Mn и практически полное отсутствие в составе лунных пород воды и углекислоты. Согласно предложенной модели гетерогенной аккумуляции Земли [Анфилов, Хачай, 2012], в последнюю очередь на ее поверхности должно отлагаться вещество близкое по составу к углистым хондритам CI, которое содержит наиболее низкотемпературные, обогащенные летучими компонентами, продукты конденсации протопланетного вещества. Могут быть две причины, по которым следы этого материала отсутствуют на Луне. По мере роста гравитационного радиуса Земли, поток осколков, выходящих из зоны питания Земли, будет уменьшаться. Поэтому поздние, низкотемпературные конденсаты могли не выходить за пределы области притяжения Земли, и Луна оказалась обедненной этими компонентами. Более вероятным представляется другой вариант, который предполагает, что вещество углистых хондритов выпадало не только на Землю, но и на поверхность Луны, и его доля, выпавшая на Луну, была пропорциональна отношению масс Луны и Земли, равному 0.012. В период магматической активности Луны и бомбардировки ее поверхности метеоритами, этот материал мог быть полностью переработан, и входящие в его состав летучие компоненты диссипировали в пространство. Возмож-

ность реализации второго варианта подтверждается наличием на Луне пород щелочной серии, в том числе гранитов, которые могли образоваться только в присутствии воды в первичном веществе.

### Литература

- Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В.* Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. 2005. Т. 403. № 6. С. 803–806.
- Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В.* Дифференциация вещества мантии в процессе аккумуляции Земли и формирование первичной земной коры // Литосфера. 2012. № 6. С. 3–13.
- Левин Б. Ю., Маева С. В.* Загадки происхождения и термической истории Луны // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 283–298.
- Каула У. М.* Механические процессы, влияющие на дифференциацию протолунного вещества // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 630–637.
- Рускол Е. Л.* Происхождение Луны // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 638–644.
- Шмидт О. Ю.* Возникновение планет и их спутников // Изв. АН СССР. Серия физ. 1950. Т. 14. № 1. С. 29–45.
- Cameron A. G. V., Ward W.* The origin of the Moon // Sci. Proc. Lunar. Conf. 7<sup>th</sup>. Houston, 1976. P. 120–122.
- Stolper E.* Crystallization sequences of Ca-Al-rich inclusions from Allende meteorite: an experimental study // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982. Vol. 46. № 11. P. 2159–2180.
- Taylor S.* The unique lunar composition and its bearing on the origin of the Moon // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987. Vol. 51. № 5. P. 1297–1310.
- Warren P. H.* Growth of the continental crust: a planetary-mantle perspective // Tectonophysics, 1989. Vol. 161. P. 165–199.

**Ю. И. Бакулин**

*Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
gpr@mail.kht.ru*

### Минеральное сырье – основа экономики России

Минерально-сырьевая база (МСБ) является общенациональным достоянием и материальной базой экономики. Такой высокий статус требует к ней особого отношения, направленного, прежде всего, на защиту МСБ от комплексного использования недропользователями и на восполнение добытого минерального сырья вновь разведанным за счет государственного финансирования работ. Эти проблемы существовали всегда, но есть механизмы их разрешения. В новых экономических условиях, называемых «рыночной экономикой», трудно представить такие производственные обстоятельства, которые влияли бы на цену ежедневно и даже чаще, как это происходит на бирже. Охарактеризовав основные особенности МСБ, сконцентрируем внимание на необходимых действиях по защите ее от истощения.

Стоимость разведанных и предварительно оцененных запасов России составляет около 29 трлн. долл. Основную ценность составляет углеводородное сырье (газ, нефть, конденсат, угли), составляющие вместе более 70 %, далее следуют черные