

О ВЗАИМОСВЯЗИ СОСТАВОВ ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ, ПЕРВИЧНОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАНТИИ

© 2015 г. В. Н. Анфилов*, Ю. В. Хачай**, А. Н. Антипин**

*Институт минералогии УрО РАН
456317, г. Миасс, Челябинская обл.
E-mail: anfilogov@mineralogy.ru

**Институт геофизики УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

Поступила в редакцию 17.02.2014 г.

Установленные экспедициями Аполлон и беспилотными станциями Луна-16 и Луна-20 резкие различия в составе Земли и Луны заставили исследователей искать эффективный способ разделения вещества на стадии формирования планетной системы Земля–Луна. Выдвинутая рядом авторов гипотеза мегаимпакта, так же как другие гипотезы образования Луны, содержит ряд непреодолимых противоречий. В настоящей работе мы предлагаем концепцию, в основу которой положена идея двухстадийного механизма образования планет. На первой стадии формируются первичные зародыши планет, центральная часть которых сложена веществом, близким по составу к включениям CAI метеорита Альенде. Средняя часть сложена железом и внешняя – материалом, близким к энстатитовым хондритам. Согласно предложенной модели, вещество, из которого формировалась центральная часть Луны, отделилось от вещества Земли на первой стадии процесса ее образования при столкновении и разрушении первичных зародышей. При этом основная масса железа перешла в состав новых зародышей Земли, а значительная доля рефракторных элементов была выброшена на орбиту, где формировалась Луна.

Ключевые слова: *формирование планет земной группы, двухстадийный механизм, образование Луны.*

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о происхождении и составе вещества Луны имеет принципиальное значение для понимания механизма формирования планет Солнечной системы. 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 работах (Левин, Маева, 1975; Галимов, 2004, 2005).

Идея отделения вещества Луны от Земли была высказана Дж. Дарвиным в 1880 г. (Darvin, 1880). Ее несоответствие законам небесной механики рассмотрено в работе (Левин, Маева, 1975). Как отмечают авторы работы, в случае возникновения ротационной неустойчивости, которая является причиной отделения части вещества от вращающегося тела, плавное отделение спутника от основного тела невозможно. Выброшенное в результате ротационной неустойчивости вещество либо улетает прочь, либо возвращается обратно. Позднее А.Е. Рингвуд (Ringwood, 1986) модифицировал гипотезу Дарвина, предположив, что материал из мантии Земли выбрасывался на орбиту Луны ударами крупных метеороидов.

Гипотеза совместного образования Земли и Луны рассматривается в работах О.Ю. Шмидта и Е.Л. Рускол (Шмидт, 1950, 1957; Рускол, 1972). О.Ю. Шмидт предполагал, что Луна аккумулировалась в окрестностях растущей Земли из околоземного 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 разному составу этих тел, по мнению авторов работы (Левин, Маева 1975), является сомнительной.

СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ И ВНУТРЕННЕМ СТРОЕНИИ ЛУНЫ

Существенный прогресс в изучении Луны был достигнут при изучении материалов, доставленных на Землю беспилотными станциями Луна-16, Луна-20 и экспедициями Аполлон. Изучение этих материалов позволило получить жесткие ограничения относительно возможного состава вещества

Луны, а изучение ее гравитационного поля и первые сейсмические эксперименты дали сведения о распределении плотности и структуре внутренних областей Луны (Хейс, Уолкер, 1975; Ringwood, 1986; Nakamura, 1983; Schubert et al., 2004). Детальный анализ результатов и вопросов, которые появились в связи с получением новых данных, сделан в работе Б.Ю. Левина и С.В. Маевой (1975), а также У.М. Каулы (Kaula, 1971). Отметим наиболее важные из них. Установлено, что Луна претерпела магматическую дифференциацию, которая происходила одновременно с ее ростом. Следствием этого открытия стала необходимость высокой начальной температуры Луны. Реальный источник энергии для реализации этого состояния, не установлен. У.М. Каула полагал, что астеносфера Луны радиусом 700 км свидетельствует о том, что эта область была слишком холодна, чтобы принять участие в ранней дифференциации (Kaula, 1971). Попытки объяснить высокую температуру в недрах Луны повышенным содержанием радиоактивных элементов создает проблему источника повышенных содержаний этих элементов. Наблюдение гравитационного потенциала показало, что распределение плотности вещества во внутренних областях Луны близко к постоянной величине. Значение безразмерного момента инерции шара с постоянной плотностью (C) равно 0.4. Для Луны значение этого параметра ~ 0.395 . Согласно Б.Ю. Левину и С.В. Маевой (1975), масса железного ядра не превосходит 1–2% массы Луны, в то время как у Земли доля железного ядра составляет около 30 мас. %. Третьей особенностью Луны является ее обогащение минералами с высоким содержанием Са, Al и, по-видимому, Ti. У.М. Каула считает, что адекватная модель образования Луны должна объяснить три основных отличия ее химического состава от состава хондритовых метеоритов: 1) потерю летучих, 2) потерю железа и 3) обогащение плагиоклазом (Kaula, 1971).

Наличие на Луне мощной анортозитовой коры и частично расплавленной центральной части заставляет предполагать, что весь ее объем прошел через расплавленное состояние и на завершающей стадии формирования Луны вблизи ее поверхности существовал слой расплава мощностью не менее 400 км (Warren, 1985).

Несовершенство трех основных гипотез образования Луны и перечисленные выше проблемы, главная из которых – разогрев вещества Луны до температуры плавления, привели к появлению гипотезы мегаимпакта (Cameron, Ward, 1976; Benz et al., 1986, 1987; Taylor, 1987; Cameron, Benz, 1991; Camp, 2004). По данным С. Тайлора высокое содержание тугоплавких элементов в породах лунной поверхности и резкое обеднение пород летучими компонентами настолько велики, что Луну и Землю трудно рассматривать как объекты, образованные из единой физико-химической системы

(Taylor, 1987). Он полагает, что если система Земля–Луна уникальна, то возможен и генезис ее необычен и таким необычным вариантом является широко обсуждаемая в последнее время гипотеза образования Луны в результате столкновения Земли с космическим телом планетарного размера (с массой Марса или больше). Мегаимпакт рассматривается также как источник энергии, необходимой для инициирования процесса разделения первично однородной Земли на металлическое ядро и силикатную мантию. Заметим, что Меркурий, Венера и Марс также имеют металлические ядра, но у них нет спутников и, кроме того, трудно предположить, что для всех внутренних планет Солнечной системы существовал единый способ образования ядра в результате их случайного столкновения с другими космическими телами.

Гипотеза мегаимпакта не решает проблему, а лишь заменяет ее решение умозрительной схемой. Произвольно варьируя состав и размер импактора, с помощью этой гипотезы можно объяснить любые установленные различия в составе Земли и Луны, а также отклонения Луны от плоскости эклиптики и большой удельный угловой момент количества движения пары Земля–Луна, но какие-либо алгоритмы ее проверки отсутствуют. Ряд геохимических противоречий, не совместимых с гипотезой мегаимпакта, рассмотрены Э.М. Галимовым (2004, 2005). Но главная проблема заключается в том, что гипотеза мегаимпакта не позволяет объяснить раннее, за 5–10 млн лет после начала формирования Земли, разделение геохимических резервуаров ядра и мантии (Анфилов, Хачай 2005, 2013).

ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК ВЕЩЕСТВА НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛУНЫ

Для того чтобы понять природу различия химического состава Земли и Луны и механизм разогрева вещества Луны на начальном этапе ее формирования, мы должны принять определенную динамическую модель образования Луны. Наиболее обоснованной является модель, предложенная О.Ю. Шмидтом, которая в дальнейшем была развита в работах Е.Л. Рускол и У.Д. Каулы (Шмидт, 1950, 1957; Ruskol, 1960, 1963; Рускол, 1975; Kaula, 1971; Печерникова, Витязев, 2005).

Е.Л. Рускол и У.Д. Каула считают, что наиболее вероятной является модель, в которой Луна формировалась как побочный (сопутствующий) продукт образования Земли (Каула, 1971). Однако этот тезис может иметь двоякое толкование. В варианте, принятом Е.Л. Рускол и У.Д. 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 непреодо-

долимы трудности при объяснении различия химического состава Земли и Луны.

В нашей модели на начальном этапе Луна формировалась в сфере притяжения растущей Земли преимущественно из фрагментов, которые образовались при разрушении первичных зародышей Земли (Анфилов, Хачай, 2005, 2012, 2013). Модель предполагает, что на первой стадии образуются первичные зародыши, центральная часть которых состоит из наиболее высокотемпературных конденсатов, близких по составу к CAI – обогащенным Са и Al включениям, которые обнаружены в метеорите Алленде. Средняя оболочка этих зародышей состоит преимущественно из железо-никелевого материала, который конденсируется из газовой фазы вслед за высокоглиноземистыми конденсатами.

В процессе роста первичных зародышей происходил их разогрев за счет энергии распада короткоживущих радиоактивных изотопов, главным из которых является ^{26}Al с периодом полураспада $\tau = 7.38 \cdot 10^5$ лет (Nichols, 2000). Отношение $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ в протопланетном веществе оценивается величиной $5 \cdot 10^{-5}$ (Merk et al., 2002). При таком содержании изотопа ^{26}Al по мере роста массы зародышей температура их центральных областей увеличивается и в центре зародыша радиусом более 200 км может достигать 2200 K, (Merk et al., 2002; Анфилов, Хачай, 2005). Этого вполне достаточно для плавления материала CAI в центральной части зародыша, температура плавления которого равна 1830 K (Stolper, 1982), и железо-никелевой смеси в его средней оболочке. Внешняя оболочка зародыша, отдающая тепло в пространство, останется твердой.

Дальнейшее формирование планет идет по следующей схеме. В соответствии с моделью аккумуляции В. Сафронова (1969), число зародышей образованных на начальном этапе процесса агломерации продуктов конденсации, велико и они будут часто сталкиваться друг с другом. Столкновение зародышей, имеющих близкие размеры, расплавленные алюмосиликатное ядро и среднюю оболочку, сложенную железом, и твердую силикатную внешнюю оболочку 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 проис-

ходит разделение химических резервуаров ядра и силикатной мантии.

СОСТАВ ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ

Рассмотренный выше двухстадийный механизм формирования Земли позволяет предложить согласованный с ним вариант образования Луны, объясняющий дефицит железа в составе Луны и высокую первичную температуру в ее недрах. Принципиальное отличие нашей модели от модели Шмидта–Рускола заключается в том, что материал, из которого на начальном этапе формируется Луна, представлен не первичными частицами общего протопланетного облака, а главным образом фрагментами первичных зародышей Земли, выброшенными 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.

Разрушение первичных зародышей Земли происходит на такой стадии, когда их массы были малы и скорости, необходимые для того чтобы фрагменты, которые вышли из зоны питания растущей Земли при столкновении и разрушении относительно небольших тел, были вполне достижимыми. Поэтому количество фрагментов первичных зародышей, перешедших при столкновении зародышей на орбиты спутников Земли, было достаточным для формирования центральной части Луны. После формирования центральной части Луны ее рост обеспечивался за счет материала, находящегося на гелиоцентрических орбитах и фрагментов, которые образовывались при столкновении планетезималей с растущей Землей. Поэтому начиная с определенного момента состав материала, из которого формируются Земля и ее спутник, будет практически одинаковым.

Именно на начальном этапе возникает неравномерное распределение железа между Землей и Луной. При формировании вторичных зародышей Земли основная масса железа переходит в их центральные части, из которых затем формируется ядро Земли. На Луну попадают фрагменты первичных зародышей, в которых значительная часть представлена материалом CAI, обогащенным Al_2O_3 . 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

Таблица 1. Зависимость температуры в центре растущего зародыша планеты от радиуса и среднего содержания Al_2O_3

Table 1. The dependence of temperature in centre of growing planet on radius and average content Al_2O_3

Радиус, км	К концентрация Al_2O_3 , %			
	1.0	3.0	4.6	9.0
	Температура в центре, К			
50	1240	1701	1734	1825
100	1676	1752	1812	1978
150	1690	1793	1876	2104
200	1701	1828	1928	2206
250	1711	1856	1972	2290
300	1718	1878	2006	2359
400	1730	1912	2059	2461

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 выйти за пределы области притяжения Земли и Луна оказалась обедненной этими компонентами. Возможен и более вероятен 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. О возможности второго варианта свидетельствует наличие на Луне пород щелочной серии, в том числе гранитов (Шарков, Богатиков, 2001), которые могли образоваться только в присутствии воды в первичном веществе Луны.

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ

Одним из фундаментальных достижений экспедиций Аполлон является доказательство высокой плотности теплового потока на поверхности Луны. На основании этого сделан вывод о том, что Луна прошла через стадию интенсивной магматической дифференциации (Левин, Маева, 1975). Убедительным доказательством этого является наличие у Луны древней анортозитовой коры, которая могла образоваться только в результате кристаллизационной дифференциации слоя расплава мощностью около 400 км, который должен был существовать у

поверхности Луны на завершающей стадии ее формирования (Binder, Manfred, 1980; Кусков, Конрад, 1998; Binder, 1986; Solomon, 1986). Такая мощность магматического океана у поверхности Луны согласуется с экспериментальными данными по кристаллизации лунных базальтов и пикритовых стекол и положением нижней границы средней мантии, которая находится на глубине 500 км.

Все это предъявляет определенные требования к тепловым моделям Луны, главным из которых является наличие тепловой энергии, необходимой для ее раннего разогрева. Имеющиеся результаты показали (Левин, Маева, 1975), что за столь короткое время известные внутренние источники энергии не могут нагреть Луну до температуры, необходимой для ее плавления и магматической дифференциации.

В нашей модели Луна начинает формироваться из фрагментов первичных планетезималей, средняя температура которых была выше 2000 К (Анфилов, Хачай, 2013; Хачай и др., 2013). Время остывания обломков размером в несколько десятков километров, которые могли выступать в качестве зародышей при формировании Луны, составляет $\sim 10^4$ лет. Этого вполне достаточно для образования нового тела размером в первые сотни километров, в котором тепло сохраняется в течение $\sim 10^6$ лет.

Дополнительным источником тепла, способным поддержать высокую температуру ее центральной части, является распад ^{26}Al . Как мы отметили выше, разрушение первичных зародышей Земли начинается через 1 млн лет после образования CAI. Этот интервал определяется по относительному возрасту железных метеоритов, который равен 1–3 млн лет (Kleine et al., 2005). Время, в течение которого тела радиусом до 400 км нагреваются за счет энергии распада ^{26}Al , зависит от периода полураспада, равного $\tau = 7.38 \cdot 10^5$ лет (Nichols, 2000), и от концентрации Al_2O_3 (табл. 1). В материале, близком по составу к CAI, из которого должна строиться центральная часть Луны, содержание Al_2O_3 равно около 30 мас. %. При таком содержании этот источник энергии будет работать в течение по крайней мере 1.0 млн лет, после того как материал CAI войдет в состав Луны, и в течение этого времени основная часть растущей Луны будет находиться в расплавленном состоянии. Одновременно в процессе роста Луны будет действовать другой источник энергии. Столкновения планетезималей с расплавленной Луной будут неупругими, и значительная часть энергии, которая выделяется при таких столкновениях, будет трансформироваться в тепловую энергию Луны. Тепловая модель Луны и распределение температуры в процессе ее формирования будут представлены нами в отдельной работе. Предварительный результат численного решения задачи о распределении температуры внутри Луны, впервые выполненный для 3D-модели среды со случай-

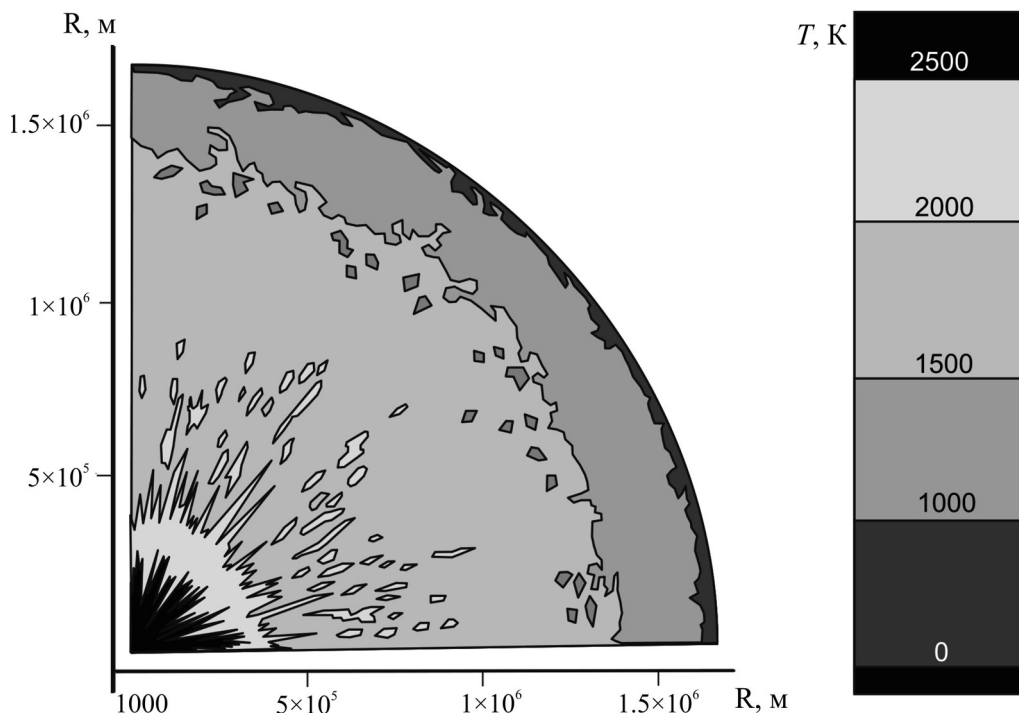


Рис. 1. Вариант распределения температуры в сечении трехмерного сектора Луны к моменту завершения ее аккумуляции.

Как видно из результатов численного решения, неоднородное распределение температуры, являющееся следствием случайного распределения тел и частиц по массам и скоростям выпадающих на растущую поверхность, сохраняется и эволюционирует во внутренних оболочках.

Fig. 1. The variant of temperature distribution into the section of 3D Moons segment to the moment of its active accumulation process ending.

As it seen from the results of numerical solution, the heterogeneous temperature distribution which is the effect of random allocation according to masses and velocities of bodies and particles, which were falling on the growing surface and then were conserved and evolved into the inner envelopes.

ным заданием размеров тел и частиц в формирующемся слое (Хачай и др., 2013), приведен на рис. 1.

Важными параметрами, определяющими тепловую и химическую эволюцию Луны, являются возможный состав и размеры ее ядра. Численное моделирование химического состава и размеров ядра, выполненные В.А. Кронродом и О.Л. Кусковым (1997), привели авторов к двум альтернативным вариантам: железному ядру радиусом 330–390 км с плотностью 8.0 г/см³ и пирротиновому ядру радиусом 490–590 км с плотностью 4.7 г/см³. Заметим, что главным параметром, определяющим размер ядра в этой модели, является не состав, а предполагаемая плотность ядра. Понятно, что плотность 8.0 г/см³ может иметь только железное ядро, в то время как для плотности 4.7 г/см³ возможны альтернативные варианты. Таким вариантом является ядро Луны, которое состоит из железа и минералов, которые входят в состав САИ и, согласно нашей модели, слагали ядра первичных зародышей Земли. Принимая рассчитанную в работе (Кронрод, Кусков, 1997) плотность пирротинового ядра равную 4.7 г/см³,

среднюю плотность САИ, равную 3.0 г/см³, и плотность железа, равную 8.0 г/см³, можно рассчитать доли этих компонентов в составе ядра Луны для размера 490–590 км. Они получаются равными 0.7 для железа и 0.3 для алюмосиликатной составляющей.

Гравитационное ускорение в телах размером до 500 км мало, и поэтому при формировании центральной части Луны разделение железа и силикатных фаз по плотности не происходило. Можно предположить, что структура лунного ядра в момент его формирования была аналогична структуре палласитов. Материал САИ, равномерно распределенный в объеме ядра, выполнял в нем роль оливина в палласитах. Впоследствии силикатный материал и железо могли разделиться, и в итоге могло сформироваться железное ядро размером 330–390 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный выше механизм образования Луны можно рассматривать как формирование двойной планеты из единого протопланетного облака.

Принципиальные его отличия от предложенных ранее механизмов совместного образования Земли и Луны заключаются в следующем. Во-первых, источником материала для формирования Луны предполагаются фрагменты первичных зародышей Земли и материал, который выбрасывается в область питания Луны при столкновении планетезималей с растущей Землей. Во-вторых, рост Луны и Земли происходит одновременно. Предложенный механизм позволяет объяснить существующие различия в составе Луны и Земли и высокую температуру, которая поддерживается в течение всего процесса роста Луны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. (2005) Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли. *Докл. АН*. **403**(6), 803-806.
- Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. (2012) Дифференциация вещества мантии в процессе аккумуляции Земли и формирование первичной земной коры. *Литосфера*. (6), 3-13.
- Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. (2013) Эволюция ядра и силикатных оболочек в процессе гетерогенной аккумуляции Земли. *Литосфера*. (4), 146-153.
- Галимов Э.М. (2004) О происхождении вещества Луны. *Геохимия*. (7), 691-706.
- Галимов Э.М. (2005) Динамическая модель образования Луны. *Геохимия*. (11), 1139-1150.
- Кронрод В.А., Кусков О.Л. (1997) Определение химического состава, температуры и радиуса ядра по геофизическим данным. *Геохимия*. (2), 134-142.
- Кусков О.Л., Кронрод В.А. (1998) Модель химической дифференциации Луны. *Петрология*. **6**(6), 615-633.
- Левин Б.Ю., Маева С.В. (1975) Загадки происхождения и термической истории Луны. *Космохимия Луны и планет*. М.: Наука, 283-298.
- Печерникова Г.В., Витязев А.В. (2005) Импа́кты и эволюция ранней Земли. *Катастрофические воздействия космических тел*. (Ред. В.В. Адушкин, И.В. Немчинов). М.: Академкнига, 251-265.
- Рускол Е.Л. (1972) Об образовании Луны из околоземного роя. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. (7), 99-108.
- Рускол Е.Л. (1975) Происхождение Луны. *Космохимия Луны и планет*. М.: Наука, 638-644.
- Сафронов В.С. (1969) Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 244 с.
- Хачай Ю.В., Анфилов В.Н., Антипин А.Н. (2013) 3D-модель эволюции тепловых неоднородностей в земном ядре на этапе ее аккумуляции. *Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли: мат-лы междунар. конф. Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича*. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 321-323.
- Хейс Дж.Ф., Уолкер Д. (1975) Изверженные лунные породы и природа недр Луны. *Космохимия Луны и планет: мат-лы Советско-Американской конф.* М.: Наука, 275-282.
- Шарков Е.В., Богатиков О.А. (2001) Ранние этапы тектономагматического развития Земли и Луны: сходство и различия. *Петрология*. **9**(2), 115-139.
- Шмидт О.Ю. (1950) Возникновение планет и их спутников. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **14**(1), 29-45.
- Шмидт О.Ю. (1957) Четыре лекции о теории происхождения Земли. М.: Изд-во АН СССР, 141 с.
- Benz V., Slattery W.L., Cameron A.G.V. (1986) The origin of the Moon and single- impact hypothesis I. *Icarus*. **66**, 51-535.
- Benz V., Slattery W.L., Cameron A.G.V. (1987) The origin of the Moon and single- impact hypothesis II. *Icarus*. **71**, 30-45.
- Binder A.B. (1986) The initial thermal state of the Moon. *Origin of the Moon*. (Eds W.K. Hartman, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston: Lunar and Planet. Institute, 425-433.
- Binder A.B., Manfred A.L. (1980) The thermal history, thermal state and related tectonism of a Moon of fision origin. *J. Geoph. Res.* **85**(B6), 3194-3208.
- Cameron A.G.V., Benz W. (1991) The origin of the Moon and single- impact hypothesis IV. *Icarus*. **92**, 204-216.
- Cameron A.G.V., Ward W. (1976) The origin of the Moon. *Sci. Proc. Lunar. Conf. 7th*. Houston, 120-122.
- Camp R.M. (2004) Simulation of the late lunar-forming impact. *Icarus*. **168**, 433-456.
- Darwin G.H. (1880) On the secular changes in the orbit of a satellite revolving around a tidally distributed planet. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. **171**, 713-891.
- Kaula W.D. (1971) Dinamical aspects of lunar origin. *Geophys. Res. Sp. Phys.* **9**, 217-238.
- Kleine N., Mezger K., Palme H., Scherer E., Munker C. (2005) Early core formation and late accretion of chondrite parent bodies: Evidence from ¹⁸²Hf-¹⁸²W in CAIs, metal rich chondrites and iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **69**, 5805-5818.
- Merk R., Breuer D., Spohn T. (2002). Numerical modeling of ²⁶Al – Induced radioactive melting of asteroids concerning accretion. *Icarus*. **159**, 183-19.
- Nakamura Y. (1983) Seismic velocity structure of the lunar mantle. *J. Geophys. Res.* **88**, 677-686.
- Nichols R. H. Jr. (2000) Short lived radionuclides in meteorites: constraints on nebular time scales to the production of solids. *Space Sci. Rev.* (1-26), 113-122.
- Ringwood A.E. (1986) Composition and origin of the moon. *Origin of the Moon*. (Eds W.K. Hartman, R.L. Phillips, G.J. Taylor). Lunar Planet. Inst. Houston, 673-698.
- Ruskol E.L. (1960) The origin of the Moon. 1. Formation of a swarm bodies around the Earth. *Sov. Astron. AJ*. **4**, 657-688.
- Ruskol E.L. (1963) On the origin of the Moon. 2. The growth of the Moon in circumterrestrial swarm of satellites. *Sov. Astron. AJ*. **7**, 221-227.
- Schubert G., Turcotte D., Olson P. (2004) Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge University Press, 940 p.
- Solomon S.C. (1986) On the early thermal state of the Moon. *Origin of the Moon*. (Eds W.K. Hartman, R.J. Phillips, G.J. Taylor). Houston: Lunar and Planet. Institute, 435-452.
- Stolper E. (1982) Crystallization sequences of Ca-Al-rich inclusions from Allende meteorite: an experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **46**(11), 2159-2180.
- Taylor S.R. (1987) The unique lunar composition and its bearing on the origin of the Moon. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **51**(5), 1297-1310.
- Warren P.H. (1985) The magma ocean concept and Lunar evolution. *Annu Rev. Earth. Planet. Sci.* **13**, 201-240.

Рецензент Ю. А. Балашов

On the relationship of Moon composition and the primary Earth's crust and mantle

V. N. Anfilogov*, Yu. V. Khachai, A. N. Antipin****

Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS

Institute of Geophysics, Urals Branch of RAS

In this paper we propose a concept that is based on the idea of a two-stage mechanism for the formation of planets. In the first stage it was formed the primary planetary embryos the central part of which is composed of material similar in composition to the Allende meteorite inclusions SAI. The middle part is composed of iron and external part – of material close to the enstatite chondrites. Under the proposed model, the substance formed the central part of the Moon, separated from the material of the Earth in the first stage of its formation during the collision and destruction of its primary embryos. In this case, the bulk of iron moved into new nuclei of the early Earth, and a significant proportion of refractory elements have been thrown into orbit, where the Moon was formed.

Key words: *accumulation of the terrestrial planets, two-stage mechanism, accumulation of the Moon.*