

О.В. АВЧЕНКО, А.В. АСЕЕВА

## О гипотезе образования Луны по А.А. Маракушеву

Согласно литературным данным, изотопный состав кислорода, кремния, хрома, вольфрама, титана и циркония лунных пород мало отличается от состава земных, что свидетельствует о едином происхождении Земли и Луны. В то же время на Луне изотопный состав хлора, рубидия, цинка, галлия, калия, железа заметно фракционирован и обогащен тяжелыми изотопами, нежели в земных породах. Это объясняется проявлением кинетического изотопного эффекта, который имеет место, когда диссипация легкоподвижных компонентов происходит с поверхности магмы в открытое пространство. Таким образом, кристаллизация лунных пород проходила в условиях, отличных от земных. Происхождение Луны рассматривается в свете гипотезы А.А. Маракушева, согласно которой Луна отделилась от прото-Земли, масса которой за счет флюидной оболочки была значительно больше современной массы нашей планеты и создавала необходимый момент импульса. Это событие датируется возрастом примерно 50 млн лет с начала образования Солнечной системы и произошло одновременно с началом импульсного отделения тяжелого ядра прото-Земли. Будущая Луна формировалась из относительно легкого силикатного материала, но с захватом мантии прото-Земли. Подчеркивается, что другие две наиболее обоснованные гипотезы происхождения Луны – импактная и испарения – не могут объяснить все особенности изотопного состава лунных пород и происхождения галилеевых спутников Юпитера.

Ключевые слова: изотопная геохимия лунных пород, гипотезы происхождения Луны, прото-Земля.

**About a hypothesis of formation of the Moon according to A.A. Marakushev. O.V. AVCHENKO, A.V. ASEEVA** (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Results of synthesis of literary data concerning isotope geochemistry of lunar rocks show that isotope composition of oxygen, silicon, chrome, tungsten, titanium and zirconium is not so different from composition of terrestrial rocks that testifies to a uniform source of a genesis of the Earth and the Moon. At the same time the isotope composition of flying components of lunar rocks – chlorine, rubidium, zinc, gallium, potassium, iron is considerably fractionated and enriched with heavy isotopes, compared with isotope composition of terrestrial rocks. It is explained by manifestation of kinetic isotope effect which takes place when dissipation of flying components happens from the surface of magma in open space. Thus, crystallization of lunar rocks took place in conditions other than terrestrial. The origin of the Moon is considered in the light of A.A. Marakushev's hypothesis according to which the Moon separated from proto-Earth whose mass at the expense of a fluid cover created the necessary moment of an impulse. This event is dated by the age about 50 million years since the beginning of formation of the Solar system and took place along with the beginning of pulse separation of proto-Earth heavy nucleus. Future Moon was formed of rather light silicate material, but with capture of the proto-Earth mantle. It is emphasized that other two most reasonable hypotheses of origin of the Moon – via a giant impact or evaporations cannot explain all features of isotope composition of lunar rocks and origin of Galilean satellites of the Jupiter.

Key words: isotope geochemistry of lunar rocks, hypotheses of origin of the Moon, proto-Earth.

### Введение

Алексей Александрович Маракушев (1925–2014 гг.), академик РАН (с 1991 г.), работал в Дальневосточном геологическом институте с 1956 по 1964 г., где основал отдел

---

\*АВЧЕНКО Олег Викторович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, АСЕЕВА Анна Валерьевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: sirenevka@mail.ru

петрографии. Области интересов ученого – петрогенезис различных горных пород, рудообразование, термодинамика минералов, космическая петрология, он опубликовал около 500 научных работ, в том числе 31 монографию, много лет руководил секцией космической петрологии Петрографического комитета РАН. В последние десятилетия жизни он создал чрезвычайно интересную гипотезу образования Земли, планет Солнечной системы и их спутников. В этой гипотезе выделяется проблема происхождения Луны, в настоящее время одна из самых обсуждаемых в космической петрологии в связи с опубликованием массы новых данных по составу лунных пород. Однако, по неясным причинам, точка зрения А.А. Маракушева [11] на генезис Луны остается практически неизвестной.

Напомним, что в рамках программы «Аполлон» Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА), принятой в 1961 г., было выполнено семь полетов на Луну и шесть выходов космонавтов на ее поверхность. Последний полет состоялся в ходе миссии Аполлон-17, когда 11 декабря 1972 г. лунный модуль «Челленджер» с Юджином Сернаном и геологом Харрисоном Шмиттом на борту совершил посадку в долине Таурус–Литтров на юго-восточной окраине Моря Ясности. По официальной версии НАСА, в результате шести выходов на поверхность Луны было собрано и отправлено на Землю 382 кг лунного грунта. Изучение всего материала (вместе с доставленным в количестве 326 г советскими автоматическими станциями Луна-16, -20 и -24) показало, что Луна и Земля имеют общую раннюю историю развития в интервале 4–4,5 млрд лет тому назад. Поэтому решение загадки происхождения Луны проливает новый свет и на самую раннюю геологическую историю Земли. Рассмотрение трех наиболее обоснованных гипотез происхождения Луны – центробежного отрыва части Земли [11], столкновения прото-Земли с налетающим телом [15, 19, 20, 27] и испарения [6–9] – представляет собой цель настоящего сообщения. Как оказалось, новые фактические данные по изотопному составу Луны не только не противоречат гипотезе образования Луны по А.А. Маракушеву [11], но и подтверждают ее в большей степени.

### Некоторые факты о Луне

Из планет внутренней части Солнечной системы, т.е. Марса, Земли, Венеры и Меркурия, только Земля имеет массивный спутник – Луну. У Марса есть лишь небольшие спутники неправильной формы Фобос и Деймос. Современное расстояние от Луны до Земли составляет 384,4 тыс. км. Луна удаляется от Земли на 38 мм в год, что связано с уменьшением кинетической энергии спутника, обуславливающей гравитационное воздействие Луны на Землю – причину морских и океанских приливов и отливов.

Средняя плотность Луны ( $3,34 \text{ г/см}^3$ ) очень близка к плотности верхней мантии Земли ( $3,30\text{--}3,40 \text{ г/см}^3$ ). Средняя плотность Земли, приведенная к нормальному давлению (1 атм.),  $4,45 \text{ г/см}^3$ . Различие обусловлено тем, что Земля содержит массивное железоникелевое ядро (с примесью легких элементов), в котором сосредоточено 32 % ее массы. Радиус ядра Луны, по данным О.Л. Кускова и В.А. Кронрода [10], которые обобщили большой блок геофизических данных, равен 350–380 км для модели железного ядра и до 500 км для железосульфидного. Количество общего железа эти авторы оценили в 10–12 % от общей массы Луны. То есть железосиликатное отношение, равное 0,4–0,5, – у земного спутника одно из наиболее низких для известных тел Солнечной системы. Другими словами, Луна сильно обеднена железом. Исследования магнитного поля Луны, произведенные с помощью магнитометров Лунохода-2 и Аполлонов-12, -14, -15, -16, показали отсутствие регулярного поля и наличие протяженных остаточных полей различной ориентации. По сейсмическим данным, обработанным Ё. Накамурай, Луна подразделяется на кору со средней мощностью 58 км, верхнюю (58–270 км), среднюю (270–500 км) и нижнюю (500–1000 км) мантию [36]. Диаметр Луны на линии полюсов 3471,94 км, а на линии экватора 3476,28 км, что составляет около четверти земного диаметра.

На поверхности Луны выделяются темные части, названные «морями», и светлые, более возвышенные и гористые – «континенты», или «материки». Средняя высота «морей» примерно на 2,5 км ниже, чем у «континентов». «Моря» – более молодые геологические образования. Они занимают около 16 % площади Луны. В результате вулканической деятельности лава затопила низинные участки и они покрылись базальтовым слоем, дающим темный цвет (рис. 1). Самая глубокая впадина (8000 м) расположена на обратной стороне Луны. Поверхность Луны покрыта кольцевыми горами – кратерами, имеющими центральное поднятие, и цирками, не имеющими его. Количество кратеров огромно, из них с диаметром >3500 м – более 17 000. Расположены они в основном на «континентах». Кратеры появились вследствие падения метеоритов. На видимой стороне Луны их значительно меньше, чем на обратной. Специалисты НАСА, изучающие спутник при помощи зондов, нашли в кратерах его северного полюса большие запасы замерзшей воды. На Луне не оказалось мощного слоя пыли, которого так опасались конструкторы лунных модулей, но небольшой ее слой, толщиной не более 1 см, присутствует. По внешнему виду пыль похожа на цемент, обладает чрезвычайно сильной слипаемостью, так что высыпать небольшую порцию лунной пыли из пробирки оказывается трудной задачей.

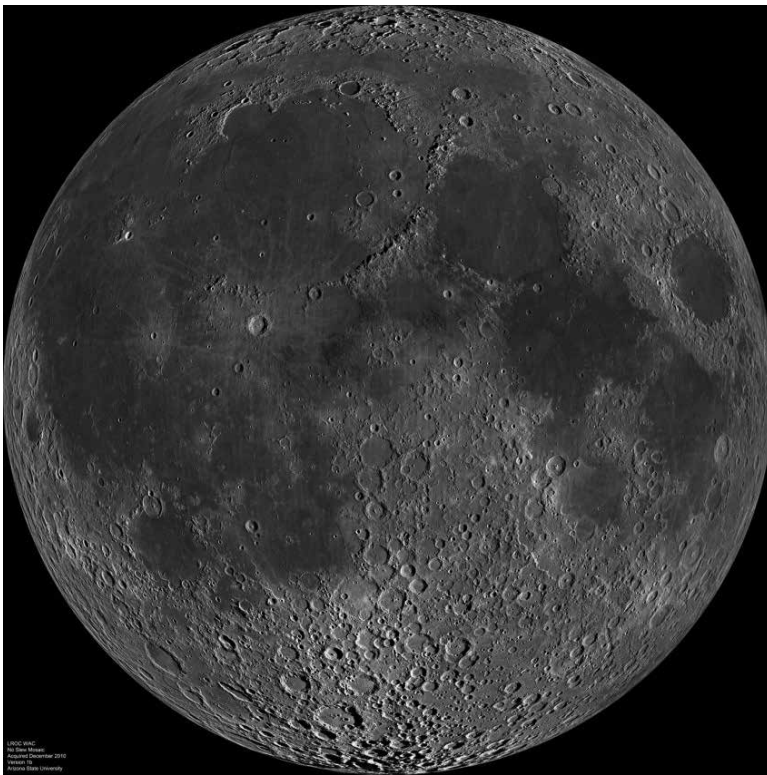


Рис. 1. Изображение обращенной к Земле стороны Луны, составленное из 1300 снимков, выполненных аппаратом NASA Lunar Reconnaissance Orbiter. Хорошо видны вулканические темные депрессии (лунные «моря») и многочисленные метеоритные кратеры разного размера (<https://apod.nasa.gov/apod/ap110303.html>)

Возраст Луны оценивается в 50–70 млн лет с начала образования Солнечной системы, т.е. лежит в диапазоне 4517–4497 млрд лет [6, 23], среднее значение 4,507 млрд лет. Поскольку все существующие изотопно-геохронологические методы оценивают возраст Земли величиной в 4,56 млрд лет [3], Луна лишь немного (не более 50 млн лет) моложе Земли, и все гипотезы образования Луны должны учитывать этот факт.

## Особенности магматических пород Луны

Образцы горных пород Луны, доставленных на Землю, представляют собой, как правило, либо брекчии, либо реголит, либо породы, несущие несомненные следы ударного метаморфизма. Большая часть поверхностных образований Луны, откуда были взяты образцы, испытала ударный метаморфизм, связанный с падением метеоритов, следствием чего были плавление, испарение даже петрогенных компонентов и диссипация летучих. Иначе говоря, имеющийся петрологический материал может не отражать первичного химического состава пород, который был и каким остается на глубине под слоем реголита.

Наиболее представлена на Луне группа основных магматических пород: разнообразные базальты, габбро, анортозиты и др. Значительно реже отмечены образования ультраосновного, среднего и кислого составов. По сравнению с земными, лунные породы содержат пониженное содержание щелочей, чаще всего 0,1–2 %. Содержание кремнезема изменяется в пределах 34–53 % [4]. Основные породы и, в особенности, их вулканические разновидности слагают огромные площади. Они обнаружены во всех местах отбора автоматическими станциями и всеми миссиями Аполлон. Породы «материковых» и «морских» районов Луны различны. В первых распространены преимущественно плутонические образования – анортозиты, лейкогаббро, оливиновые нориты, нориты, троктолиты, а вулканические развиты более ограниченно, во вторых, напротив, преобладают вулканогенные – пикробазальты, пикродолериты, оливиновые и ильменитовые базальты и долериты, плутонические же распространены меньше и представлены оливиновыми и ильменитовыми габброидами [1]. Вместе с тем А.А. Маракушев полагает, что лунные породы представлены исключительно вулканогенными образованиями – как раскристаллизованными, так и стекловатыми, и применение к ним термина «плутонические» неоправданно. Интересно, что в центральных частях материковых районов установлены т.н. KREEP-породы, представляющие собой двупироксеновые базальты с повышенным содержанием оксидов калия, фосфора, рубидия и лантаноидов [4]. О новом типе высококалийевых базальтов с содержанием окиси калия больше 0,5 вес.% и отношением  $K_2O/Na_2O > 1$  докладывалось на 46-й лунно-планетной научной конференции [41]. Они получили название VHK-базальты (Very High Potassium). Детали их происхождения неясны, но, вероятно, их обогащение калием связано с метасоматическими вторичными процессами. Главные минералы лунных пород – плагиоклаз, клинопироксен, оливин, кристобалит, тридимит, ортопироксен, ильменит, группа шпинели. В лунных породах широко развит клиноэнстатит (на Земле встречается только в породах бонинит-марианитовой группы). Минералы с летучими компонентами имеют подчиненное значение, но присутствуют в некоторых разновидностях пород. В самом первом приближении лунные породы богаче  $TiO_2$  и  $FeO$ , чем их земные аналоги, но для некоторых видов земных и лунных пород наблюдается почти полное сходство химического состава. Однако ильменит-оливиновые и ильменитовые базальты Луны, согласно [1], земных аналогов не имеют.

## Особенности изотопной геохимии лунных пород

Изотопная геохимия лунных пород – ключевой критерий в выборе той или другой гипотезы происхождения Луны. Рассмотрим подробнее эту интересную тему.

Изотопный состав некоторых элементов у лунных образцов и земных пород почти совпадает, например кислорода (всех трех его изотопов) [26, 44, 49, 50], кремния [24, 25], хрома [32], вольфрама [30, 46, 47], титана [51] и циркония [42, 43]. Интересно, что в этом списке находятся такие тугоплавкие и малоподвижные металлы, как последние два.

Изотопный состав титана в образцах Земли (2 базальта, 1 андезит, 1 ильменит и очищенный (99,99 %) титан с месторождения из штата Юта) практически постоянен и в среднем близок к величине  $\epsilon^{50}Ti$  (‰) =  $0,01 \pm 0,01$  [51]. Только некоторые из лунных образцов

(8 высоко- и низкотитанистых базальтов, 6 ильменитов, 1 пироксен, 9 реголитов; всего 24) показали измеримые отклонения от состава земных пород, максимально низкое значение  $\epsilon^{50}\text{Ti}$  было равно  $-0,23 \pm 0,04$ . Эти отклонения объясняются длительным влиянием космических лучей на лунную поверхность, что доказывается корреляцией  $\epsilon^{50}\text{Ti}$  с изотопами самария и гадолиния [51]. Приведенные оценки значительно отличаются от полученных при исследовании метеоритного вещества, для которого они вдобавок сильно изменчивы:  $3,07 \pm 0,07$  (углистые хондриты),  $-0,58 \pm 0,05$  (обычные хондриты),  $-0,17 \pm 0,06$  (энстатитовые хондриты),  $-0,92 \pm 0,06$  (ахондриты).

Цирконий – один из сверхтугоплавких металлов, космические лучи или радиоактивный распад хрома или вольфрама влияют на изменение его изотопного состава минимально [17, 31], поэтому цирконий представляет собой почти идеальную систему для установления общего (или разного) источника происхождения вещества Луны и Земли. Изотопный состав циркония в лунных и земных образцах практически идентичен [17]. Это заключение базируется на 28 анализах пяти лунных (две породы и три минерала) и 73 анализах пяти земных образцов. Лунные породы были отобраны в поле распространения высокотитанистых «морских» базальтов, минералы представляют собой 2 ильменита и 1 пироксен. Земные образцы – 2 зерна циркона возрастом 4,01 и 3,4 млрд лет из района Джек Хиллс (Австралия), а также базальт (BHVO-2), андезит (AGV-2) и сланец (SCo-1) из коллекции стандартов Геологической службы США. Изотопный состав циркония в этих земных (З) и лунных (Л) образцах совпадает в пределах точности измерений:

$$\begin{aligned} \epsilon^{91}\text{Zr} (\text{З}) &= -0,07 \pm 0,02, & \epsilon^{91}\text{Zr} (\text{Л}) &= -0,08 \pm 0,03; \\ \epsilon^{92}\text{Zr} (\text{З}) &= -0,06 \pm 0,02, & \epsilon^{92}\text{Zr} (\text{Л}) &= -0,04 \pm 0,02; \\ \epsilon^{96}\text{Zr} (\text{З}) &= 0,06 \pm 0,04, & \epsilon^{96}\text{Zr} (\text{Л}) &= 0,09 \pm 0,06. \end{aligned}$$

Таким образом, приведенные данные по изотопному составу тугоплавких металлов с большой степенью достоверности указывают на единый источник происхождения Земли и Луны. Вместе с тем поведение изотопов летучих компонентов в лунных породах совсем другое, нежели в земных. Так, недавно на основании последних аналитических данных было установлено, что породы Луны обогащены тяжелыми изотопами хлора [18, 45], рубидия [40], калия [48], галлия и цинка [29] сравнительно с земными породами. Иначе говоря, изотопный состав этих компонентов сильно фракционирован. Изотопное фракционирование отмечается и для железа [38].

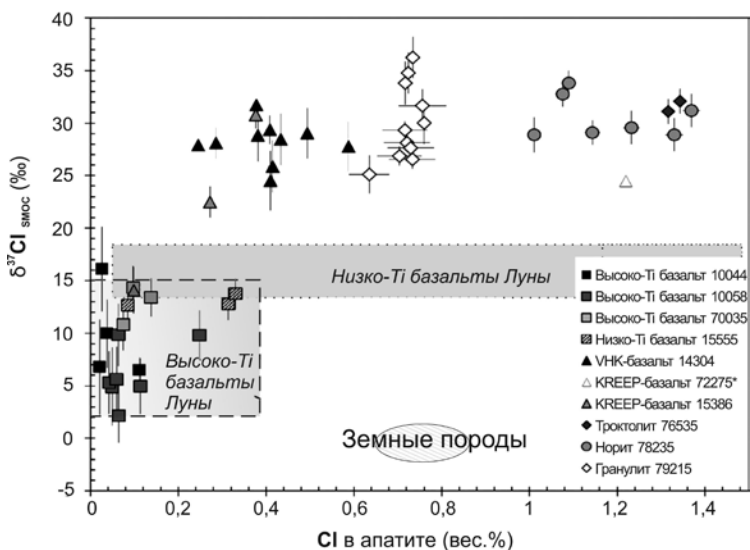


Рис. 2. Величина  $\delta^{37}\text{Cl}_{\text{SMOC}}$ , ‰ (по вертикали) в лунных апатитах относительно валового содержания в них хлора, вес.% (по горизонтали) [18]. Овал на рисунке – область изотопных составов хлора в земных апатитах

Рассмотрим для примера опубликованные данные по хлору и рубидию. Лунные породы имеют значительно более тяжелый состав хлора, чем земные, хотя измеренное в них изотопное отношение для хлора ( $\delta^{37}\text{Cl}$ ) изменяется в широких пределах. Это иллюстрирует рис. 2, где приведены данные по величине  $\delta^{37}\text{Cl}$  в апатитах относительно валового содержания в них хлора [18]: хорошо виден более тяжелый, чем в земных породах, изотопный состав хлора в разнообразных лунных базальтах, причем интересно, что наиболее высоки значения  $\delta^{37}\text{Cl}$  (от +25 до +35 ‰) в «континентальных» лунных KREEP-базальтах, норитах, троктолитах и гранулитах. В апатитах из этих же образцов установлены валовые содержания Cl (1–1,4 вес.%) – большие, чем в апатитах земных пород (рис. 2). Высокими содержаниями  $\delta^{37}\text{Cl}$ , в среднем от  $12,8 \pm 2,4$  до  $10,1 \pm 3,2$  ‰, были также в расплавных включениях пироксенов и оливинов, находящихся в лунных базальтах [45]. Подобным образом лунные породы обогащены тяжелым изотопом рубидия по сравнению с земными. Так, согласно [40], величина  $\delta^{87}\text{Rb}$  в земных породах изменяется в пределах от -0,09 до -0,16 ‰, среднее значение  $-0,12 \pm 0,06$  ‰. Для лунных низкотитанистых базальтов среднее  $\delta^{87}\text{Rb}$  равно  $0,06 \pm 0,07$  ‰, а для высокотитанистых –  $0,05 \pm 0,19$  ‰. Таким образом, разница средних величин  $\delta^{87}\text{Rb}$  лунных и земных пород достигает  $0,17 \pm 0,13$  ‰. Из лунных пород были изучены три низкотитанистых и три высокотитанистых базальта и один норит, среди земных – четыре базальта, один андезит и один гранит.

### **Три наиболее обоснованные гипотезы образования Луны**

Исходя из устаревших предположений, что появление спутника на орбите Земли вызвано гравитационным захватом Землей Луны, случайным захватом Луны на околоземную орбиту, коаккрецией Луны и Земли из роя твердых тел, невозможно объяснить чрезвычайно большое сходство изотопного состава вулканических пород Луны и Земли, валовую обедненность железом Луны относительно Земли и, напротив, большую обогащенность железом мантии Луны, чем мантии Земли. Ниже рассматриваются три современные гипотезы образования Луны, призванные дать ответы на наиболее существенные вопросы о геохимии и физике Луны.

#### ***Гипотеза центробежного отрыва части Земли***

В XIX в. сын Чарльза Дарвина Джордж Говард предположил, что причина образования Луны – отрыв части Земли под действием центробежной силы. То есть на начальном этапе расплавленная Земля вращалась так быстро, что часть ее оторвалась. Кроме того, на основе своих расчетов он предсказал, что Луна должна постепенно удаляться от Земли, что подтвердилось современными оценками (см. выше). Однако уже в 30-х годах прошлого столетия было показано, что его гипотеза несостоятельна, так как суммарного вращательного момента системы Земля–Луна недостаточно для возникновения даже в жидкой Земле ротационной неустойчивости, следствием которой и должна быть потеря Землей части вещества под действием центробежной силы [15]. Эти расчеты момента опирались, естественно, на массу современной Земли. Новое дыхание гипотеза центробежного отрыва получает в работе А.А. Маракушева [11], который полагает, что масса прото-Земли была значительно больше. Рассмотрим подробно эту точку зрения, поскольку авторы статьи склонны поддерживать именно ее.

Общая структура Солнечной системы представляется в следующем виде. В окружении ее располагается огромное количество небольших кометных тел облаков Оорта, Хиллса и пояса Койпера, к которым близка по своему физическому состоянию и местоположению планета Плутон. Затем располагаются планеты-гиганты с водными и гелий-водородными флюидными оболочками (в единицах массы Земли): Уран (14,6), Нептун (17,2), Сатурн (92,2) и Юпитер (317,9), за которыми идут дегазированные планеты земной группы,

занимающие околосолнечную позицию: Марс (0,1074), Земля, Венера (0,8150) и Меркурий (0,0558). Между Юпитером и Марсом находится пояс астероидов, представляющий собой многочисленные обломки самостоятельных железокремнистых планет и, возможно, спутников, потерянных планетами. Прото-Земля закономерно вписывается в систему гигантских планет по диаметру, массе и моменту импульса (рис. 3, см. таблицу).

В теории А.А. Маракушева выделяются две ключевые идеи. Первая идея состоит в том, что планеты земной группы ранее (на протопланетной стадии их образования) имели гигантские флюидные оболочки, впоследствии утерянные под воздействием солнечного ветра (газа, состоящего из протонов и электронов), который движется от Солнца, распространяясь на расстояние до 200 а.е. Вторая ключевая идея состоит в проявлении физико-химического эффекта флюидно-силикатной жидкостной несмешиваемости, или расслаивания протопланет на плотные тяжелые железокремнистые ядра и менее плотные флюидные оболочки. В ядрах преимущественно концентрировались тугоплавкие компоненты ( $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe$ ,  $FeO$ ,  $Ni$  и др.), содержание которых в исходных газовой-пылевых

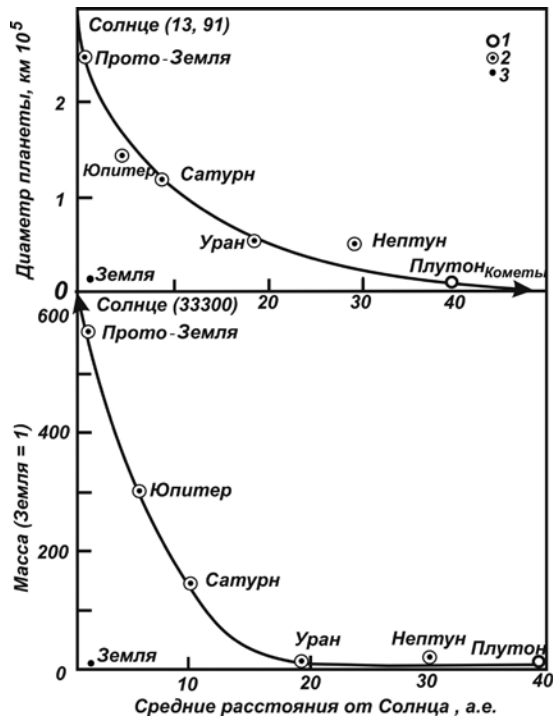


Рис. 3. Предполагаемое положение прото-Земли в ряду планет Солнечной системы в зависимости от диаметра и массы планет по А.А. Маракушеву [11]. 1 – ледяные кометоподобные планеты, 2 – планеты, расслоенные на железокремнистые ядра и гигантские флюидные оболочки, 3 – современная Земля

Основные характеристики Солнца, Земли, прото-Земли, флюидных планет-гигантов и Плутона по А.А. Маракушеву [11]

Параметр	Солнце	Земля	Прото-Земля	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	–	1,00	<b>1,00</b>	5,203	9,539	19,18	30,06	39,75
Период обращения вокруг Солнца, годы	–	1	?	11,86	29,46	84,01	164,8	247,7
Период вращения, сут	27–32	1,0	<b>0,4</b>	0,411	0,426	0,459	0,668	6,38
Орбитальная скорость, км/с	0	29,8	?	13,1	9,6	6,8	5,4	4,7
Масса (Земля = 1)	333 000	1	<b>570</b>	317,82	95,28	14,56	17,28	0,11
Диаметр, $10^5$ км	13,91	0,127	<b>2,5</b>	1,43	1,20	0,518	0,49	0,03
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,41	5,52	<b>1,3</b>	1,3	0,71	1,47	2,27	1,0
Сила тяжести (Земля = 1)	28	1,00	<b>4,3</b>	2,64	1,15	1,17	1,18	
Момент импульса, кг·м <sup>2</sup> /с	–	$7,2 \times 10^{33}$	<b><math>1,5 \times 10^{39}</math></b>	$0,7 \times 10^{39}$	$1,3 \times 10^{38}$	$2,5 \times 10^{36}$	$2,3 \times 10^{36}$	$9,9 \times 10^{28}$

Примечание. Момент импульса планет, кроме прото-Земли, вычислен по работе И.И. Смутьского и О.И. Кротова [14]. Момент импульса прото-Земли рассчитан по формуле:  $L = I\omega$ , где  $I$  – момент инерции,  $\omega$  – угловая скорость.

туманностях было низким. Поэтому железокремниевые ядра планет невелики по размеру относительно общего размера планет-гигантов.

Данные идеи, выдвинутые А.А. Маракушевым [11], имеют вполне определенное обоснование. Так, сравнительно недавно в окружении небольших звезд, подобных Солнцу, были открыты массивные флюидные планеты, соизмеримые по размеру с Юпитером. Например, две группы исследователей, изучая доплеровское изменение спектра звезды 51 Pegasi, пришли к выводу, что возле нее вращается планета, примерно равная по массе половине Юпитера [33, 37, 39]. Кроме того, Н. Тайсон и Д. Голдсмит упоминают о гигантской экзопланете, превышающей массу Юпитера чуть не в два раза, которая вращается вокруг солнцеподобной звезды HD 73256 на среднем расстоянии, составляющем всего 3,7 % дистанции от Земли до Солнца [16].

Для обоснования второй ключевой идеи А.А. Маракушева – эффекта флюидно-силикатной жидкостной несмесимости – были проведены эксперименты. Расслаивание, или жидкостная несмесимость, экспериментально моделировалось на материале обыкновенного хондрита Царев [11]. Хондриты представляют собой железокремниевые метеориты, в структуре которых фиксируется процесс расщепления метеоритного вещества на мельчайшие силикатные капельки (хондры) и богатую никелистым железом матрицу, следовательно, хондриты являются обломками железокремневых планет, находящихся на самых начальных стадиях своей эволюции. В эксперименте с выдержкой 5 ч при  $T = 1400$  °С, давлении водно-водородной смеси  $P = 400$  МПа и мольной доле водорода, равной 0,65, было достигнуто расслоение на три зоны – основную (верхнюю), ультраосновную и металлическую (нижнюю). Зоны разделялись резкими границами. В ультраосновном слое наблюдались округлые выделения (капли) металлической фазы. Гравитационное оседание их и слияние привели к образованию нижнего слоя, сложенного никелистым железом, сульфидами и примесью силикатного материала. Это расслоение (расщепление), по мнению А.А. Маракушева, в принципе аналогично расслоению хондритов на хондры и матрицу. Таким образом, результаты проведенных экспериментов и само наличие хондритовых метеоритов служат обоснованием второй идеи А.А. Маракушева.

Кратко резюмируем гипотезу образования Луны по А.А. Маракушеву [11]. Первоначально околосолнечная планетная система была представлена рядом однородных гигантских планет, в том числе из земной группы (в единицах массы Юпитера): прото-Меркурий (3,4) – прото-Венера (2,8) – прото-Земля (1,8) – прото-Марс (2,13) – Юпитер (1), Сатурн (0,3), Уран (0,05), Нептун (0,05). В процессе эволюции эти планеты расслоились на флюидные оболочки и железосиликатные ядра благодаря эффекту флюидно-силикатной жидкостной несмесимости. Образование в планетах тяжелых ядер носило импульсный характер и сопровождалось отделением более легкого силикатного материала в спутниковые системы под действием центробежных сил. В спутниках концентрировался относительно более легкий и бедный железом материал, поэтому имел место эффект обогащения железом ядер протопланет. Таким образом, прото-Земля, по А.А.Маракушеву [11], была, подобно Юпитеру, гигантской планетой с гелий-водородной флюидной оболочкой и являлась материнской планетой по отношению к современным Земле и Луне. Отношение масс Луны и прото-Земли в начале рождения Луны было крайне низким, если судить по аналогии с системой Ио–Юпитер, для которой оно равно  $3,9 \times 10^{-5}$ . С потерей прото-Землей флюидной оболочки под воздействием солнечного ветра отношение масс Луны и Земли приблизилось к современному ( $1,2 \times 10^{-2}$ ). В свою очередь, это привело к ослаблению гравитационного поля Земли и потере системы ее небольших спутников (сохранилась лишь крупная Луна). Другие гигантские околосолнечные планеты – прото-Меркурий, прото-Венера, прото-Марс также потеряли свои флюидные оболочки и ранее образованные системы небольших спутников. Отделение спутников околосолнечных планет проходило на протопланетной стадии их развития и определяло их железосиликатные отношения, так как в спутники отходил относительно легкий силикатный материал. По суммарному содержанию железа и никеля (масс.%) эти



планеты образуют следующий ряд: Меркурий – 66, Земля – 36, Венера – 32, Марс – 25. Таким образом, исходная масса планет Солнечной системы была значительно больше современной. Флюидно-силикатная расплавная масса Луны отделилась с захватом мантии прото-Земли еще до потери прото-Землей гигантской флюидной оболочки. Поэтому в дальнейшем Луна эволюционировала под воздействием сильного гравитационного поля прото-Земли, которое контролировало эндогенную активность спутника 4,5–3,2 млрд л.н. В этот же период продолжались формирование расплавленного ядра Луны и обогащение его железом по отношению к первичному составу отделившейся лунной массы. Это привело к развитию вулканических депрессий («морей»), обусловленных флюидными плюмами, исходящими из расплавленного ядра, главным образом на видимой стороне Луны, которые заместили первичную кору. Около 3 млрд л.н. Луна почти полностью консолидировалась с затвердеванием лунного ядра, прекращением дегазации и флюидных потоков, исходящих из ядра, прекращением вулканизма и потерей собственного магнитного поля. Луна, таким образом, превратилась в эндогенно-пассивное («мертвое») небесное тело.

### *Гипотеза столкновения прото-Земли с налетающим телом*

Гигантское столкновение между прото-Землей и космическим телом размером с Марс, которое назвали Тейей, произошедшее около 4,5 млрд л.н., является наиболее популярной моделью происхождения Луны [15, 19, 20, 21, 27]. Существующие теории ударного формирования Луны предполагают чередование двух основных фаз: собственно столкновения двух тел с образованием диска обломков и последующей аккреции части этого диска с образованием спутника Земли. Результаты моделирования зависят от множества факторов, часть которых остается неопределенной, – массы и скорости вращения Земли, которые несколько миллиардов лет тому назад могли сильно отличаться от современных, массы и скорости Тейи, угла, под которым Тейя врзается в Землю, и степени расплавления сталкивающихся тел вследствие удара. Все сценарии, дававшие более или менее правдоподобное совпадение с наблюдаемыми данными, требовали, чтобы пришлое тело задело Землю по касательной, вскользь, а не столкнулось с ней лоб в лоб, из чего следует, что это тело не могло находиться в орбитальной плоскости Земли. В 2004 г. было показано [22], что в наиболее вероятном сценарии столкновения Тейя должна быть примерно в шесть раз меньше по массе, чем Земля, причем 4/5 вещества образующейся Луны поступили именно с Тейи. Отсюда следует, что исходный химический состав Тейи столь же близок к составу Земли, как и состав сегодняшней Луны. Но тогда получается, что Земля и Тейя формировались на близких орбитах, на одном расстоянии от Солнца, чтобы вобрать в себя одно и то же вещество. Здесь возник вопрос: могут ли два крупных тела сформироваться на одной и той же орбите? Разве одно из них не могло бы просто поглотить другое? В 2015 г. А. Мاستробуоно-Баттисти с сотрудниками [34] просчитала 40 моделей последних стадий планетарной аккреции. Предполагалось, что у тел на равноудаленных от Солнца орбитах будет близкий состав. В результате моделирования оказалось, что существует примерно один шанс из трех, что Тейя имеет тот же химический состав, что и Земля. Таким образом, сходство химического состава Земли и вулканических пород Луны как будто не противоречит оригинальной ударной теории.

Гипотеза ударного столкновения Земли и Луны дает объяснение высокому значению углового момента системы Земля–Луна, наклону оси Земли и более низкому содержанию железа в Луне, поскольку предполагается, что катастрофическое столкновение произошло после образования ядра Земли. Железо сконцентрировалось в ядре Земли, а Луна образовалась из каменного вещества земной мантии. Поэтому И. Стюарт [15] утверждает, что если мы хотим получить в ударных теориях непротиворечивый вариант и по химическому составу, и по моменту импульса, то без крупного налетающего тела, похоже, нам не обойтись.

## *Гипотеза испарения*

Гипотеза одновременного происхождения Земли и Луны как двойной системы в процессе коллапса пылевого сгущения была выдвинута и детально разработана Э.М. Галимовым и его учениками в ряде работ [6–9]. Центральными положениями этой идеи являются утрата железа и других летучих компонентов Луной в результате испарения (1) и фрагментация сгущения в два конденсированных тела с разным содержанием железа (2). В самом процессе испарения породообразующих элементов, в том числе железа, нет ничего удивительного. Эксперименты показали, что если испарять расплав, который имеет первичный хондритовый состав (как наиболее близкий к первоначальному космическому веществу, из которого формировались планеты), то после наиболее легколетучих компонентов (соединений углерода, серы, хлора и ряда других) начнут испаряться щелочные элементы (K, Na), а затем наступит очередь железа, кремния, магния. В конечном счете расплав обогащается наименее летучими Al, Ca, Ti. Однако в гипотезе испарения существует два вопроса, которые необходимо было разрешить. Во-первых, каким образом и почему происходит разделение одного облака пылевого сгущения на два фрагмента, большой и маленький, одному из которых предстояло стать Землей, а другому – Луной? Во-вторых, почему Земля не обеднена железом, а также кремнием и магнием в той же степени, что и Луна (ведь в соответствии с гипотезой Луна и Земля образуются одновременно из одного и того же пылевого сгущения)?

Луна, по Галимову, в сравнении с Землей сверхобеднена летучими компонентами – K, Na, Rb, Fe и очень сильно – Pb [8]. Обедненность Луны железом и, в особенности, свинцом объясняется Э.М. Галимовым особым механизмом испарения, согласно которому оно происходило не с поверхности Луны, а из сравнительно небольших тел или частиц. При этом процесс испарения не оставляет, согласно Э.М. Галимову [8, 9], никаких следов фракционирования изотопов вследствие того, что его величина определяется термодинамическим (а не кинетическим) изотопным эффектом, который при высоких температурах очень небольшой. Такая возможность реализуется в высокотемпературном коллапсирующем облаке горячих рассеянных частиц, находящихся в равновесии со своим насыщенным паром. Иначе говоря, испарение происходит в закрытой системе. Выделение пара во внешнюю зону облака и утрата летучих компонентов происходят «слой за слоем» по мере сжатия облака. Выжатый пар сносится направленным потоком солнечного ветра. Идея закрытой системы неприменима к расплаву, выброшенному на околоземную орбиту и испаряющемуся в космическое пространство, но она вполне объясняет процесс, протекающий в облаке частиц. Испаряющиеся частицы окружены своим паром, и облако в целом находится в условиях закрытой системы. Облако сжимается в результате гравитации, происходит его коллапс, и тогда перешедшая в пар часть вещества выжимается из облака, а оставшиеся частицы оказываются обедненными летучими. При этом фракционирования изотопов почти не наблюдается. Компьютерный расчет модели, основанной на приведенных принципах, хорошо описал коллапс облака частиц. При этом формировалось центральное тело повышенной температуры. Но в модели вначале облако не фрагментировалось, т.е. возникало одно тело, а не двойная система Земля–Луна. Угловой момент системы Земля–Луна был недостаточен для разделения общего тела на два фрагмента. Однако если принять во внимание эффект испарения, то ситуация коренным образом изменится. Эффект испарения с поверхности частиц вызывает, по Э.М. Галимову [7], эффект отталкивания, что и приводит к появлению ротационной неустойчивости, которая завершается формированием двух горячих тел, после которого остается большое количество вещества в окружающем эти тела облаке частиц. При этом оба фрагмента, как тот, которому предстояло стать Луной, так и будущая Земля, были бы обеднены летучими компонентами и железом практически в одинаковой степени. Однако компьютерное моделирование показало, что если один из фрагментов оказался (случайно) несколько большей массы, чем другой, то дальнейшая аккумуляция вещества протекает крайне асимметрично [7].

Зародыш большего размера растет гораздо быстрее. С увеличением разницы в размерах лавинообразно возрастает различие скоростей аккумуляции вещества из оставшейся части облака. В результате зародыш меньшего размера лишь немного изменяет свой состав, в то время как зародыш большего размера (будущая Земля) аккумулирует практически все первичное вещество облака и в конечном счете приобретает состав, весьма близкий к составу первичного хондритового вещества, за исключением наиболее летучих компонентов, безвозвратно покидающих коллапсирующее облако. Утрата летучих элементов в этом случае происходит не за счет испарения в пространстве, а за счет выжимания остаточного пара коллапсирующим облаком, и без заметного фракционирования изотопов. Таким образом объясняется разделение одного облака на два фрагмента и сверхобеднение Луны железом и другими летучими компонентами сравнительно с Землей. В конечном счете ответ на два выше поставленных вопроса нашелся в русле особого механизма испарения летучих компонентов из коллапсирующего облака частиц, исключающего или сводящего к малым величинам фракционирование изотопов. Фактор испарения по механизму, предложенному Э.М. Галимовым, впервые позволил получить математическое решение развития двойной системы Земля–Луна при реальных физических параметрах.

### **Обсуждение гипотез происхождения Луны**

Выбор наиболее правдоподобной гипотезы образования Луны определяется через удовлетворительное объяснение геохимических особенностей поведения изотопов в ее породах. Напомним, что изотопный состав кислорода, кремния, хрома, вольфрама, титана, циркония в лунных и земных породах различается незначительно. В особенности показательна близость изотопных составов земных и лунных пород в отношении таких тугоплавких металлов, как титан и цирконий. Это обстоятельство явным образом свидетельствует о едином источнике происхождения вещества Земли и Луны, что и утверждается во всех трех рассматриваемых гипотезах. Таким образом, понятно, что Луна произошла из вещества, близкого по составу к земным породам. Вместе с тем изотопные составы легкоподвижных компонентов – хлора, рубидия, галлия, цинка, калия и даже железа в породах Луны и Земли, как указано выше, различны: в породах Луны они обогащены тяжелыми изотопами, другими словами, сильно фракционированы. Это обстоятельство можно объяснить проявлением кинетического изотопного эффекта, который имеет место, когда диссипация летучих компонентов происходит с поверхности магмы в открытое пространство. В особенности показательна фракционирование хлора (рис. 2), галлия и цинка. Так, концентрация тяжелого хлора в апатитах Луны на порядок выше, чем в апатитах из пород Земли.

Установленное изотопное фракционирование целого ряда элементов противоречит гипотезе образования Луны по Э.М. Галимову [6–9], поскольку эта гипотеза предполагает особый механизм испарения летучих компонентов из коллапсирующего облака частиц, исключающего или сводящего к нулевым величинам фракционирование изотопов. Кроме того, трудно согласиться и с другой идеей Э.М. Галимова, согласно которой Луна сверхобеднена летучими компонентами [6–9]. Например, валовое содержание хлора в апатитах из разных магматических пород Луны во многих случаях превышает содержание хлора в апатитах Земли (рис. 2). Кроме того, есть прямые доказательства присутствия летучих компонентов в лунном магматизме. Например, в работе О.А. Богатикова и др. [5] сообщается, что в вулканических стеклах обнаруживаются многочисленные микровакуоли с минералами, содержащими летучие компоненты – галит, сильвин и ольдгамит (CaS). Данную ассоциацию стекла и хлоридов, как показывают наблюдения, нельзя полагать вторичной, поскольку она не приурочена к импактным трещинам. В работах А.В. Мохова [12, 13], изучавшего лунный реголит, приводятся многочисленные примеры минералов, содержащих фтор, хлор и серу, причем часть этих минералов, по мнению А.В. Мохова,

несомненно, возникла при эндогенном минералообразовании. Находки йодида родия, гидроксихлоридов, фторида и хлорида сурьмы, барита и целестина свидетельствуют об очень активной роли галогенов и серы и, возможно, кислорода при минералогенезе из газовой фазы. Участие хлора в процессах лунного минералообразования подчеркивалось в работе Н.А. Ашихминой [2]. Хлор может быть транспортным компонентом при элементопереносе в газовой среде. Как следует из состава найденных фаз, не только хлор, но и другие галогениды и сера способны выполнять эту функцию, и, судя по количеству разнообразных галогеносодержащих фаз, этот процесс на Луне занимает значимое место среди прочих. Интересные факты о количестве воды в щелочных полевых шпатах из так называемых лунных гранитов приводятся в работе [35], где установлено, что содержание воды в щелочном полевом шпате из образца Аполло 15405 достигает 20 ppm. Это вполне сопоставимо с данными для земных риолитов, в щелочных полевых шпатах которых присутствует 10–1000 ppm воды [28]. Установлен цирконовый возраст этих лунных гранитов – 4,3–3,9 млрд лет, т.е. кристаллизация лунных риолитовых магм имела место после образования собственно Луны и не могла происходить из сухих расплавов. Все собранные факты в отношении механизма изотопного фракционирования и содержания летучих компонентов в лунных породах противоречат идеям Э.М. Галимова и не позволяют принять его точку зрения на образование Луны.

В настоящее время в литературе принята, как указывалось, импактная, или мегаимпактная, гипотеза образования Луны. Однако она имеет свои трудности в интерпретации имеющихся на сегодня фактов в основном из-за того, что вещество столкнувшегося с Землей тела (Тейи) должно быть по изотопному составу элементов очень близким к земному веществу. Поэтому гипотетическая Тейя обязана сформироваться на той же орбите, что и Земля, но потом столкнуться с ней, как показывают расчеты, по касательной, причем большая часть вещества Тейи (80 % или больше) переходит в образующуюся Луну. И хотя компьютерные модели показывают 30%-ю осуществимость такого удара [34], неясности подобного механизма образования Луны, по меньшей мере, обращают на себя внимание. Э.М. Галимов [8], кроме того, подчеркивал маловероятность совпадения изотопных составов кислорода и системы гафний–вольфрам в веществе импактора и Земли, что ставит перед гипотезой импакта трудные или даже непреодолимые, по его выражению, проблемы. Наше возражение против этой гипотезы состоит в том, что она введена искусственно, как говорят, *ad hoc*, и неприменима для объяснения, к примеру, образования галилеевых спутников Юпитера.

Гипотеза А.А. Маракушева об образовании Луны, на наш взгляд, наиболее правдоподобна [11]. Она предполагает одинаковый изотопный состав малоподвижных элементов в земных и лунных породах, а модельной первичной массы прото-Земли вполне достаточно для обеспечения необходимой величины вращательного момента, при котором происходит центробежный отрыв лунной массы (см. таблицу). При этом отделение Луны происходило на протопланетной стадии развития Земли одновременно с началом импульсного отделения тяжелого ядра прото-Земли. Это событие датируется возрастом примерно 50 млн лет с начала образования Солнечной системы. В будущую Луну отходил относительно легкий силикатный материал, но с захватом мантии прото-Земли. Поэтому данная гипотеза очень просто объясняет общий дефицит железа Луны. Вместе с тем содержание железа в земной мантии в настоящее время оценивается в 8 %, тогда как для Луны эти оценки составляют 13–18 %, причем более правдоподобна, по Э.М. Галимову, нижняя оценка. Поэтому надо думать, что формирование ядра Земли с уходом железа из мантии в ядро было весьма растянутым по времени и завершилось уже после отделения Луны. В периоде времени 4,5–3,2 млрд л.н. продолжалось формирование ядра Луны с развитием магматизма, образованием вулканических депрессий («морей») и поднятий («континентов»), обусловленных флюидными плюмами, исходящими из расплавленного ядра. Образование лунных вулканических пород происходило с испарением летучих компонентов в открытое пространство, что сопровождалось кинетическим изотопным эффектом, вызвавшим

вышеописанное фракционирование изотопов. Около 3 млрд л.н. Луна полностью консолидируется с затвердеванием лунного ядра, прекращением флюидных потоков и вулканизма, потерей ранее существовавшей флюидной оболочки и собственного магнитного поля.

Представленная гипотеза может также хорошо объяснить формирование и других спутников планет Солнечной системы. Так, в спутниковой системе Юпитера различаются массивные спутники внутренней зоны и мелкие спутники промежуточной и внешней зон. Во внутренней зоне расположены свойственные только Юпитеру галилеевы спутники с высокой плотностью вещества – Каллисто, Ганимед, Европа и Ио. В этом ряду плотность закономерно возрастает с приближением к Юпитеру: 1,8, 1,9, 3,1, 3,5 г/см<sup>3</sup>. Спутник Ио имеет диаметр 3640 км, плотность 3,5 г/см<sup>3</sup>, массу  $8,9 \times 10^{22}$  кг, расстояние от него до Юпитера 422 000 км. Луна имеет почти такие же параметры: диаметр по экватору 3476,28 км, плотность 3,34 г/см<sup>3</sup>, масса  $7,347 \times 10^{22}$  кг, она отдалена от Земли на 384 400 км. Это подчеркивает вероятную аналогию механизмов образования Луны, Ио и других галилеевых спутников, что может служить хорошим подтверждением справедливости высказанной гипотезы образования Луны и дает основание полагать, что прото-Земля выглядела 4,5 млрд л.н. примерно так, как Юпитер сейчас. Заметим, что момент импульса прото-Земли в пять раз превышает момент импульса современного Юпитера (см. таблицу), причем, чтобы современная Земля смогла создать подобный импульс, она должна вращаться со скоростью свыше двух оборотов в секунду! Поэтому никакой импактной гипотезы, объясняющей увеличение момента импульса прото-Земли и отделение Луны от прото-Земли, не требуется.

На наш взгляд, гипотеза образования Луны по А.А. Маракушеву [11] свободна от особых противоречий, находится в полном согласии со всем имеющимся фактическим материалом по изотопному составу компонентов, способна объяснить образование других спутников Солнечной системы и поэтому является наиболее рациональной.

## Выводы

1. Земля и Луна имеют единый источник происхождения слагающего их вещества, что доказывается близким изотопным составом кислорода, кремния, хрома, вольфрама, титана и циркония.

2. Изотопный состав легкоподвижных компонентов (Cl, Rb, Zn, Ga, K) лунных пород более обогащен тяжелыми изотопами по сравнению с составом земного вещества, что объясняется проявлением кинетического изотопного эффекта, который имеет место, когда диссипация летучих компонентов происходит с поверхности магмы в открытое пространство.

3. Происхождение Луны рассматривается в свете гипотезы А.А. Маракушева [11], согласно которой Луна отделилась от прото-Земли, масса которой за счет флюидной оболочки превышала массу современной Земли более чем в 500 раз и создавала необходимый момент импульса. Это событие датируется возрастом примерно 50 млн лет с начала образования Солнечной системы и происходило одновременно с началом импульсного отделения тяжелого ядра прото-Земли. Будущая Луна формировалась из относительно легкого силикатного материала, но с захватом мантии прото-Земли.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Е.Д., Богатиков О.А., Борсук А.М. и др. Магматические горные породы. Т. 3. Основные горные породы. М.: Наука, 1985. 488 с.
2. Ашихмина Н.А., Богатиков О.А., Горшков А.И. и др. Акцессорные минералы стекловатых фрагментов «Луны-24» // ДАН СССР. 1979. Т. 248, № 4. С. 953–955.
3. Бибикова Е.В., Федотова А.А., Клаэссон С., Аносова М.О., Шумлянский Л.В. Время зарождения континентальной коры в ранней истории Земли: изотопное и геохимическое (U–Th–Pb, Lu–Hf, REE) изучение терри-

- генных цирконов архейских метасадочных пород Сарматии // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. Т. 2. М.: Красанд, 2013. С. 147–167.
4. Богатиков О.А., Гоньшакова В.И., Фрих-Хар Д.И., Кочемасов Г.Г., Волкова В.М., Чижова И.А., Осипов Б.В. Классификация лунных магматических пород. М.: Недра, 1985. 71 с.
  5. Богатиков О., Фрих-Хар Д., Ашихмина Н., Диков Ю.П., Лазько Е.Е., Свешникова Е.В. Роль летучих компонентов в образовании горных пород Луны // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 2. С. 450–454.
  6. Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf–W, Rb–Sr, J–Pu–Xe, U–Pb) применительно к проблемам формирования планет на примере системы Земля–Луна // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: Красанд, 2013. С. 47–61.
  7. Галимов Э.М., Кривцов Л.М., Забродин А.В., Легкоступов М.С., Энеев Т.М., Сидоров Ю.И. Динамическая модель образования системы Земля–Луна // Геохимия. 2005. № 11. С. 1139–1150.
  8. Галимов Э.М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газопылевого сгущения (доклад на XIX всероссийском симпозиуме по геохимии изотопов 16 ноября 2010 г.) // Геохимия. 2011. № 6. С. 563–580.
  9. Галимов Э.М. Основные черты геохимии Луны и Земли, определяемые механизмом образования системы Земля–Луна (доклад на 81-й международной метеоритной конференции, Москва, июль 2018) // Геохимия. 2019. № 8. С. 762–776.
  10. Кусков О.Л., Кронрод В.А. Валовый состав и размеры ядра Луны // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: Либроком, 2008. С. 317–329.
  11. Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 254 с.
  12. Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А. Луна под микроскопом. Новые данные по минералогии Луны. Атлас. М.: Наука, 2007. 127 с.
  13. Мохов А.В. Новые ультрадисперсные минеральные фазы лунного реголита по данным аналитической электронной микроскопии: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2009. 51 с.
  14. Смульский И.И., Кротов О.И. Изменение кинетического момента в динамике Солнечной системы // Космич. исслед. 2015. Т. 53, № 3. С. 253–262.
  15. Стьюарт И. Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную. М.: Альпина нон-фикшн, 2018. 274 с.
  16. Тайсон Н., Голдсмит Д. История всего. 14 миллиардов лет космической эволюции. СПб.: Питер, 2017. 348 с.
  17. Akram W., Schönbachler M. Zirconium isotope constraints on the composition of Theia and current Moon-forming theories // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 449. P. 302–310.
  18. Barnes J., Tartese R., Anand M., McCubbin F., Neal C., Franchi I. Early degassing of lunar urKREEP by crust-breaching impact(s) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 447. P. 84–94.
  19. Cameron A.G.W., Ward W.R. The Origin of the Moon // *Abstr. Lunar and Planetary Sci. Conf.* 1976. Vol. 7. P. 120–122.
  20. Canup R. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // *Science.* 2012. Vol. 338. P. 1052–1055.
  21. Canup R., Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation // *Nature.* 2001. Vol. 412. P. 708–712.
  22. Canup R. Simulations of a late lunar-forming impact // *Icarus.* 2004. Vol. 168. P. 433–456.
  23. Connelly J., Bizzarro M., Krot A., Nordlund Å., Wielandt D., Ivanova M. The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk // *Science.* 2012. Vol. 338. P. 651–655.
  24. Fitoussi C., Bourdon B. Silicon isotope evidence against an enstatite chondrite Earth // *Science.* 2012. Vol. 335. P. 1477–1480.
  25. Georg R., Halliday A., Schauble E., Reynolds B. Silicon in the Earth's core // *Nature.* 2007. Vol. 447. P. 1102–1106.
  26. Hallis L., Anand M., Greenwood R., Miller M., Franchi I., Russell S. The oxygen isotope composition, petrology and geochemistry of mare basalts: evidence for large-scale compositional variation in the lunar mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2010. Vol. 74. P. 6885–6899.
  27. Hartmann W., Davis D. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus.* 1975. Vol. 24. P. 504–515.
  28. Johnson E., Rossman G. A survey of hydrous species and concentrations in igneous feldspars // *Am. Mineral.* 2004. Vol. 89. P. 586–600.
  29. Kato C., Moynier F. Gallium isotopic evidence for extensive volatile loss from the Moon during its formation // *Sci. Adv.* 2017. Vol. 3. DOI: 10.1126/sciadv.1700571.
  30. Kruijer T., Kleine T., Fischer-Gödde M., Sprung P. Lunar tungsten isotopic evidence for the late veneer // *Nature.* 2015. Vol. 520. P. 534–537.
  31. Leya I., Wieler R., Halliday A.N. The influence of cosmic-ray production on extinct nuclide systems // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. Vol. 67. P. 529–541.
  32. Lugmair G., Shukolyukov A. Early solar system timescales according to <sup>53</sup>Mn–<sup>53</sup>Cr systematics // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1998. Vol. 62. P. 2863–2886.
  33. Marcy G.W., Butler R.P., Williams E., Bildsten L., Graham J.R., Ghez A.M., Jernigan J.G. The Planet around 51 Pegasi // *Astrophys. J.* 1997. Vol. 481. P. 926–935.

34. Mastrobuono-Battisti A., Perets H., Raymond S. A primordial origin for the compositional similarity between the Earth and the Moon // *Nature*. 2015. Vol. 520. P. 212–215. DOI: 10.1038/nature14333.
35. Mills R., Simon J., Alexander C., Wang J., Hauri E. Water in alkali feldspar: The effect of rhyolite generation on the lunar hydrogen budget // *Geochem. Perspect. Lett.* 2017. Vol. 3. P. 115–123.
36. Nakamura Y. Seismic velocity structure of the lunar mantle // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88. P. 677–686.
37. Noyes R., Jha S., Korzennik S. et al. A planet orbiting the star  $\rho$  Coronae Borealis // *Astrophys. J. Lett.* 1997. Vol. 483. L111. – <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/310754> (дата обращения: 10.02.2021).
38. Poitrasson F. Does planetary differentiation really fractionate iron isotopes? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 256. P. 484–492.
39. Powell C. Vanishing world: Could the first planet discovered around a sunlike stars be a mirage? // *Sci. Amer.* 1997. N 5. P. 17–18.
40. Pringle E., Moynier F. Rubidium isotopic composition of the Earth, meteorites, and the Moon: Evidence for the origin of volatile loss during planetary accretion // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2017. Vol. 473. P. 62–70.
41. Roberts S.E., Neal C.R. VHK basalt petrogenesis via magma chamber and impact processes // 46th Lunar and Planetary Sci. Conf. 2015. 1297. – <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2015/pdf/1297.pdf> (дата обращения: 10.02.2021).
42. Schönbächler M., Lee D.-C., Rehkämper M., Halliday A., Hattendorf B., Günther D. Nb/Zr fractionation on the Moon and the search for extinct  $^{92}\text{Nb}$  // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. Vol. 69. P. 775–785.
43. Schönbächler M., Rehkämper M., Fehr M., Halliday A., Hattendorf B., Günther D. Nucleosynthetic zirconium isotope anomalies in acid leachates of carbonaceous chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. Vol. 69. P. 5113–5122.
44. Spicuzza M., Day J., Taylor L., Valley J. Oxygen isotope constraints on the origin and differentiation of the Moon // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 253. P. 254–265.
45. Stephant A., Anand M., Zhao X., Chan Q., Bonifacie M., Franchi I. The chlorine isotopic composition of the Moon: Insights from melt inclusions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019. Vol. 523. 115715. – <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115715> (дата обращения: 10.02.2021).
46. Touboul M., Kleine T., Bourdon B., Palme H., Wieler R. Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W isotopes in lunar metals // *Nature*. 2007. Vol. 450. P. 1206–1209.
47. Touboul M., Puchtel I.S., Walker R.J. Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon // *Nature*. 2015. Vol. 520. P. 530–533.
48. Wang K., Jacobsen S. Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon // *Nature*. 2016. Vol. 538. P. 487–490.
49. Wiechert U., Halliday A., Lee D.-C., Snyder G., Taylor L., Rumble D. Oxygen isotopes and the moon-forming giant impact // *Science*. 2001. Vol. 294. P. 345–348.
50. Young E., Kohl I., Warren P., Rubie D., Jacobsen S., Morbidelli A. Oxygen isotope evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact // *Science*. 2016. Vol. 351. P. 493–496.
51. Zhang J., Dauphas N., Davis A.M., Leya I., Fedkin A. The proto-Earth as a significant source of lunar material // *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 5. P. 251–255.