



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. В. Кронрод, Ю. А. Нефедьев, В. А. Кронрод, О. Л. Кусков, А. О. Андреев,
Селенофизика и модели трехслойной лунной мантии, *Учен. зап. Казан. ун-та.
Сер. Физ.-матем. науки*, 2019, том 161, книга 1, 24–38

DOI: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2019.1.24-38>

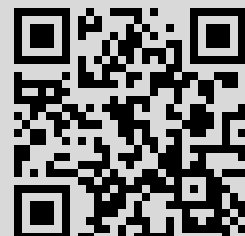
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 178.204.135.187

20 ноября 2019 г., 18:03:25



СЕЛЕНОФИЗИКА И МОДЕЛИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЛУННОЙ МАНТИИ

*Е.В. Кронрод¹, Ю.А. Нефедьев², В.А. Кронрод¹,
О.Л. Кусков¹, А.О. Андреев²*

¹*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
г. Москва, 119991, Россия*

²*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Аннотация

Многие космические агентства и страны недавно объявили о своих планах по исследованию Луны в ближайшие несколько лет. Основная цель проведения таких работ состоит в подготовке и размещении долгосрочных научно-технических баз на ближней стороне Луны и на лунных полюсах, чтобы проводить космические эксперименты и изучать внутреннюю структуру Луны. Для реализации этих планов важной является информация о селенофизических параметрах, поскольку без нее решение задач, начиная от выбора места для баз до их технического и научного оборудования, невозможно. В настоящей работе анализируются лунное гравитационное поле, динамическая фигура, проблема существования лунного ядра, а также геохимия многослойной Луны с использованием данных космических миссий. Последнее исследование включает решение двух задач. Первая задача состоит в построении модели химического состава трехслойной мантии Луны на основе совместной инверсии гравитационных, сейсмических и петролого-геохимических данных. Вторая задача заключается в выявлении степени химической однородности резервуаров мантии, а именно: является ли она гомогенной или же мантия Луны стратифицирована по химическому составу с разными концентрациями петрогенных элементов в различных зонах мантии. Решение этих задач позволит провести сопоставление состава силикатных фракций Луны и Земли и выявить их геохимическое сходство и/или различие.

Ключевые слова: селенофизика, петрологогеохимия, модели внутреннего строения Луны

Введение

Глобальное изучение Луны космическими методами в новом тысячелетии началось с серии космических миссий по исследованию ее топографии, внутреннего строения и гравитационного поля. Особенно важный вклад в знание селенофизических параметров был внесен миссиями CLEMENTINE (1994, NASA, США) [1], LRO (NASA, США) [2], GRAIL [3], SELENE (KAGUYA) [4]. Следует отдельно отметить лунную миссию SMART-1 [5], у которой были новые технологические возможности для получения широкого спектра данных о Луне. С помощью миссии LRO были получены уникальные снимки поверхности Луны с высоким разрешением. Миссия LRO (NASA, США) является первым серьезным шагом в реализации долгосрочной программы по созданию пилотируемых лунных баз, которые планируется создать в 20-е годы XXI в. Эта миссия должна была помочь найти наиболее подходящие площадки для прилунений. С этой целью искались источники кислорода и воды и проводились исследования радиационной обстановки в окололунном пространстве. Данные задачи решались шестью научными инструментами, установленными

на LRO. 2007 год стал годом начала космических проектов Японии, Китая и Индии. Необходимо отметить японскую миссию SELENE (KAGUYA), с помощью которой выполнены высокоточные топографические и гравитационные наблюдения всей поверхности Луны, включая обратную сторону Луны и лунные полюса. Китайский спутник Chang'e-1 и Chandrayan-1 дали новые данные о гравитационном поле, масконах, коре и геохимическом составе Луны. Кроме того, важную информацию о Луне можно получить посредством наблюдений за физической либрацией Луны (ФЛЛ) с лунной поверхности с помощью лунного телескопа, а также путем теоретического моделирования ФЛЛ. Исследование вращения небесных объектов позволяет понять их сложную внутреннюю структуру, особенно когда нет возможности использовать другие методы. Соответствующие результаты всех описанных выше проектов были опубликованы в виде обзоров [1].

Следует также сказать, что исследование состава и внутреннего строения Луны проводится весьма надежными, но принципиально различными геохимическими и геофизическими методами. Петролого-геохимические и изотопные исследования образцов, доставленных космическими аппаратами, накладывают слабые ограничения на физические свойства лунных недр, тогда как измерения тепловых потоков, геодезические, электромагнитные и сейсмические исследования дают лишь косвенную информацию о химическом составе и термальном состоянии мантии. Геофизические данные не выявляют вещественную природу мантии и не отражают специфику ее минералогии, поэтому требуют дешифровки в терминах химического состава. Химический состав Луны должен рассматриваться в качестве фундаментального геохимического ограничения при тестировании космогонических моделей ее происхождения. Исследование химического состава и внутреннего строения Луны, выявление сходства и/или различия состава силикатной Земли (Bulk Silicate Earth, BSE) и ее спутника (Bulk Silicate Moon, BSM) является ключевой проблемой лунной геохимии XXI в.

1. Лунное гравитационное поле и динамическая фигура

Одной из главных задач по изучению Луны является исследование и моделирование динамической фигуры Луны. Решение данной задачи позволяет определить структурное распределение масс в теле Луны. Динамическая фигура связана с эллипсоидом инерции, который определяется значениями лунных моментов инерции A , B , C и их направлением в пространстве. Абсолютные значения и ориентация моментов инерции A , B , C не могут быть определены из наблюдений как космическими, так и наземными методами. Могут быть определены только комбинации моментов инерции. При этом анализ вариаций орбит лунных орбитальных аппаратов (ЛОА) позволяет получить разложения гравитационного потенциала по сферическим гармоникам (коэффициенты Стокса) [6]. С целью определения безразмерных моментов инерции используется лазерная локация Луны (ЛЛЛ) угловых отражателей на поверхности Луны и наблюдения по измерениям физической либрации.

Лунные орбитальные аппараты позволяют проводить современные перспективные исследования фигуры и гравитационного поля Луны. Анализ орбитальных данных миссий Apollo, Clementine, LRO, GRAIL, KAGUYA позволил вычислить с большой точностью коэффициенты разложения лунного гравитационного поля до 165-го порядка [7]. Выполненный анализ гравитационного поля Луны подтвердил ранее полученные данные, что значения гармоник четвертого порядка близки по величине к гармоникам второго порядка. Исключением является член J_2 . Асимметрия лунного гравитационного поля на невидимой и видимой сторонах Луны доказывается отличием от нуля коэффициентов S_{nm} с четными m и C_{nm} с нечет-

ными m . Можно сделать общий вывод, что реальная физическая фигура Луны является более сложной системой, чем модель, которую можно было бы описать трехосным эллипсоидом.

2. Проблема существования лунного ядра

Вопрос о наличии у Луны ядра возник после проведенных в 70-х годах прошлого века сейсмических экспериментов на лунной поверхности. В рамках космической программы Apollo на Луну были доставлены четыре сейсмометра, которые фиксировали сейсмическую активность небесного тела вплоть до 1977 г. [8]. Оказалось, что лунотрясения происходят гораздо реже, чем на Земле. Тот факт, что поверхность земного спутника покрыта кратерами, оставшимися от столкновений с малыми космическими телами, искажает сигналы приборов на поверхности Луны и делает колебания лунной коры не такими заметными. Поэтому информация о глубинной внутренней структуре лунного тела оставалась недоступной для сейсмической сети Apollo [8]. В результате не только состав и агрегатное состояние были неизвестны, но даже само существование лунного ядра оставалось под вопросом. Поэтому информацию о внутренней структуре Луны в основном получали через изучение моментов инерции Луны, физической либрации и электромагнитной индукции.

Одним из важнейших методов исследования внутренней структуры небесных объектов, для которых недоступны геофизические методы, успешно применяемые на Земле, является изучение вращения небесного тела. В этом отношении весьма перспективным оказалось изучение внутреннего строения Луны через наблюдение ее физической либрации, особенно, с помощью лазерной локации Луны (ЛЛЛ) и космических наблюдений лунного гравитационного поля.

Результаты ЛЛЛ можно использовать для выявления многих слабовыраженных особенностей лунного вращения. По ним удастся реконструировать сложное строение лунных глубин. На сегодняшний день ЛЛЛ (реализуемая более 40 лет) является одним из самых эффективных источников информации о Луне. Точность лазерных измерений достигла уровня, достаточного для определения даже релятивистских эффектов в системе Земля–Луна. Анализ лазерных данных при определении параметров лунного вращения позволил не только уточнить числовые характеристики динамической фигуры Луны и коэффициенты упругости k_2 и l_2 , но и однозначно определить амплитуды и фазы чандлеро-подобных мод в свободной либрации и в то же время открыть наличие сильной диссипации вращения [8]. Моделирование либрационных наблюдений позволило получить числовые параметры размера и химического состава лунного ядра, а также оценить возможность наличия жидкого ядра по космическим гравиметрическим измерениям [9]. В результате моделирования получены следующие параметры: радиус лунного ядра в среднем 300 (+90/–100) км, если рассматривать железное ядро, и 400 (+80/–180) км, если ядро описывается эвтектической композицией Fe–FeS. Эти исследования очень важны с точки зрения решения одной из фундаментальных проблем космических исследований по разработке гипотезы происхождения Луны. Космогонические модели показывают, что если Луна образовалась за счет аккреции из первичного вещества, то размер ядра должен быть более 360 км. Если же Луна состоит из того же материала, что и мантия Земли, то радиус ядра может быть менее 285 км. Последнее согласуется с теорией гигантского столкновения Протоземли с небесным телом размером с Марс и выброса на околоземную орбиту большого количества вещества, из которого в дальнейшем и сформировалась Луна. Хотя в настоящее время идут споры о достоверности данной гипотезы, она остается одной из основных и отбрасывать ее нельзя.

Представленные оценки параметров лунного ядра из ЛЛЛ и космических наблюдений, как и сам факт его существования, все же имеют лишь косвенное доказательство. Прямые доказательства наличия у Луны ядра можно получить только из определения параметров свободной либрации Луны и из сейсмологических исследований.

Долгое время информация, полученная с Луны посредством сейсмических датчиков, считалась практически бесполезной для ученых. Однако за последние сорок лет методы анализа лунных сейсмических данных существенно изменились. Так, используя новые методы обработки отраженной и преобразованной сейсмической энергии, Вебер и др. [8], Гарсия и др. [10] заново проанализировали сейсмограммы миссии Apollo. При вычислениях «погрешность», возникающая из-за кратеров, была учтена. В итоге был получен вывод, что, подобно Земле, Луна имеет раскаленное металлическое ядро. Диаметр его составляет примерно 330–360 км, оно окружено частично расплавленной оболочкой диаметром примерно 480 км. Внутри ядра, в свою очередь, находится твердая железная сердцевина диаметром примерно 240 км. Таким образом, были впервые получены прямые свидетельства о лунном ядре и его двухслойной структуре.

Сейсмограммы были также проанализированы путем обработки данных по группам, что позволило определить источник возникновения сейсмической активности. Путем построения траекторий прохождения сейсмических волн и изучения особенностей их отражения от внутренних слоев Луны были определены состав и структура слоев лунного ядра на различных глубинах. Результаты исследований лунного ядра подтверждают гипотезу о формировании Луны примерно 4.5 млрд лет назад в результате столкновения Земли с крупным космическим объектом размером с планету Марс. Гипотетически этот толчок «выбил» из Земли кусок, состоящий из коры расплавленной мантии, который позднее и превратился в Луну. Исследования, проведенные на Кольской сверхглубокой скважине, установили, что состав пород полуострова практически на 90% совпадает с вещественным составом лунных пород. Таким образом, можно сделать вывод о том, что удар произошел в том месте, где располагались те слои земной коры, которые в последующем превратились в Кольский полуостров.

3. Петролого-геофизические ограничения на состав и строение мантии

Мы рассматриваем модель дифференцированной в результате частичного плавления первоначально однородной Луны – модель магматического океана (Lunar Magma Ocean, LMO) [11, 12]. Пятислойная модель внутреннего строения Луны [13–16] состоит из анортозитовой коры со средней толщиной 39 км, трехслойной мантии и Fe–S-ядра, причем для того, чтобы задача была замкнутой, размеры ядра определяются в результате решения обратной задачи [11, 12]. Входные параметры моделей (масса и момент инерции Луны, мощность, плотность и состав коры, скорости P -, S -волн ($V_{P,S}$) в мантии, плотность Fe–S-ядра и другие ограничения), принятые по [13–16], приведены в работе [11]. На основе сейсмической информации Apollo [14] и гравитационных данных GRAIL [15] принято, что мантия состоит из трех зон: верхняя мантия на глубинах 39–240 км, средняя – 240–750 км и нижняя мантия, простирающаяся от 750 км до границы с ядром; глубина солидификации LMO принята равной 750 км по [14], ниже находится первичная (primordial) недифференцированная мантия, не затронутая процессами частичного плавления.

Для того чтобы получить информацию о термохимической структуре лунных недр, интегральную совокупность геофизических и геологических данных (масса, момент инерции, тепловой поток, скорости сейсмических волн, образцы лунных

Табл. 1

Модели состава и физических свойств нижней мантии Луны
на глубине 1000 км (~ 4.012 ГПа)

Химический состав (мас.%)	Модели	
	Холодная	Горячая
MgO	30.0	29.0
FeO	12.0	13.0
Al ₂ O ₃	4.0	5.0
CaO	3.2	4.0
SiO ₂	50.55	48.75
Na ₂ O	0.05	0.05
TiO ₂	0.2	0.2
Mg#	81.7	80
Фазовый состав (мол.%)	Холодная	Горячая
Оливин	16.3 (Fo ₈₄)	22.0 (Fo ₈₃)
Ортопироксен	62.8	46.0
Клинопироксен	16.4	25.8
Гранат	4.2	5.9
Ильменит	0.3	0.3
Физические свойства	Холодная	Горячая
ρ , г/см ³	3.408	3.441
V_p , км/с	7.99	8.03
V_s , км/с	4.46	4.46
K_s , ГПа	126.8	130.6
G , ГПа	67.9	68.4

пород, модели состава и термального состояния коры, мантии и ядра) необходимо конвертировать в термины температуры, химического состава и физических свойств. Решение такой обратной задачи позволяет построить модели химического и минерального состава трехслойной мантии Луны, согласованные с сейсмическими, термальными и гравитационными данными. Проблема осложняется тем фактом, что количество известных параметров меньше числа неизвестных, причем разделение эффектов влияния состава и температуры на внутреннее строение мантии представляет трудную для решения задачу. Для уменьшения числа неизвестных термальное состояние мантии принято по данным совместной инверсии сейсмических и гравитационных данных [11, 12, 14, 17, 18]. Расчеты проведены при фиксированном распределении температуры на средних глубинах трех мантийных резервуаров $T_{150 \text{ км}} = 600^\circ \text{C}$, $T_{500 \text{ км}} = \text{ }^\circ \text{C}$, $T_{1000 \text{ км}} = 1100^\circ \text{C}$. Погрешность ± 0.05 км/с ($\approx 1\%$) в значениях $V_{P,S}$ приводит к ошибке в определении температуры $\pm 100^\circ \text{C}$ на глубинах до 500 км и $\pm 150\text{--}200^\circ \text{C}$ на глубинах 1000 км [17].

Моделирование фазового состава и физических свойств мантии проведено с помощью метода минимизации свободной энергии Гиббса в рамках системы Na₂O–TiO₂–CaO–FeO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ (NaTiCFMAS) и уравнений состояния минералов в приближении Ми–Грюнайзена–Дебая на основе программного комплекса THERMOSEISM с учетом фазовых превращений и ангармонизма [17, 19, 20]. Система NaTiCFMAS включает фазы постоянного и переменного состава (табл. 1). Предполагается, что двухвалентное железо является преобладающей формой железа в мантии Луны и что химические реакции не зависят от летучести кислорода. Добавление Al₂O₃, Na₂O и TiO₂ важно для стабильности граната, клинопироксена и Ti-содержащих ассоциаций.

Здесь, как и ранее [11], состав, средняя толщина и плотность анортозитовой коры фиксированы [13, 15], а химический состав, минералогия и физические свой-

ства каждой зоны трехслойной мантии определяются в результате решения обратной задачи. В рамках системы NaTiCFMAS химический состав мантии варьировался в диапазоне (мас.%) $25 \leq \text{MgO} \leq 45$, $4 \leq \text{SiO}_2 \leq 55$, $5 \leq \text{FeO} \leq 15$, $0.1 \leq \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 7$, причем концентрации CaO и Al_2O_3 связаны хондритовым отношением $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.8$, а концентрации Na_2O (0.05 мас.%) и TiO_2 (0.2 мас.%) фиксированы [11]. В каждой зоне составы считаются постоянными и равными значениям в некоторых средних точках по разрезу мантии в сочетании с естественным требованием отсутствия инверсии плотности. Скачки состава допускаются лишь на геофизических границах. Скорости упругих волн ($V_{P,S}$) рассчитывались для изотропной фазовой ассоциации, состоящей из твердых растворов минералов; модули сжатия (K_S) и сдвига (G) находились по усреднению Фойгта–Реусса–Хилла (Voigt–Reuss–Hill averaging), принятому в теории композитов. Распределение давления в спутнике принято по [11].

Задача формулируется следующим образом. Требуется найти такие распределения концентраций оксидов и $V_{P,S}$ в мантийных резервуарах, которые удовлетворяют балансовым соотношениям на валовый состав Луны [11], уравнениям сохранения массы и момента инерции Луны по данным GRAIL [16], а также скоростям распространения P -, S -волн из сейсмических экспериментов Apollo в интервале заданных погрешностей [14]. Балансовые соотношения на валовый состав подразумевают, что концентрации оксидов в нижней мантии соответствуют таковым в системе кора – верхняя мантия – средняя мантия; в решении используется статистический метод Монте-Карло [11].

В результате моделирования получаем внутренне согласованную информацию по химическому составу в каждой зоне мантии, фазовым ассоциациям (химический состав фаз и их пропорции), их плотности, упругим модулям и скоростям P -, S -волн. Набор получаемых решений включает в себя вероятностные распределения концентраций породообразующих оксидов в трех резервуарах мантии, средние значения распределений и их девиации. Для всех приведенных в работе результатов разность между расчетными и экспериментально определенными величинами для момента инерции, балансовых уравнений и сейсмических скоростей не превышает погрешности экспериментально определенных параметров. Погрешности расчетов и процедура решения обратной задачи описаны в [11, 12, 17].

4. Результаты моделирования

На рис. 1 представлены результаты расчетов химического состава и скоростей P -, S -волн минеральных ассоциаций, термодинамически устойчивых в каждой зоне трехслойной мантии Луны. Результаты приведены в виде частотных распределений, средние значения которых соответствуют решениям, оптимально удовлетворяющим ограничениям на среднюю мощность коры (39 км) [15], $V_{P,S}$ [14], массу и момент инерции Луны [16] и радиус ядра (260–280 км) [11].

По гистограммам (рис. 1) видно, что значения скоростей P -волн в нижней мантии (≈ 7.9 – 8.0 км/с) выше, чем в верхней (≈ 7.7 км/с) и средней мантиях (≈ 7.8 – 7.9 км/с). Как можно видеть из рис. 1, *а*, скорости P -волн в мантийных зонах монотонно возрастают с глубиной, что в целом соответствует модели [14], и, возможно, испытывают скачки на химических границах, но слабо меняются внутри каждого слоя. Скорости S -волн ведут себя консервативно и имеют значения в интервале 4.40–4.45 км/с, возможно, с некоторым уменьшением на глубинах средней мантии (рис. 1, *б*) в результате влияния температуры, нарастающей быстрее, чем давление.

Ряд геохимических особенностей на рис. 1 заслуживает специального обсуждения. Следует обратить внимание на вариации концентраций Al_2O_3 в различных

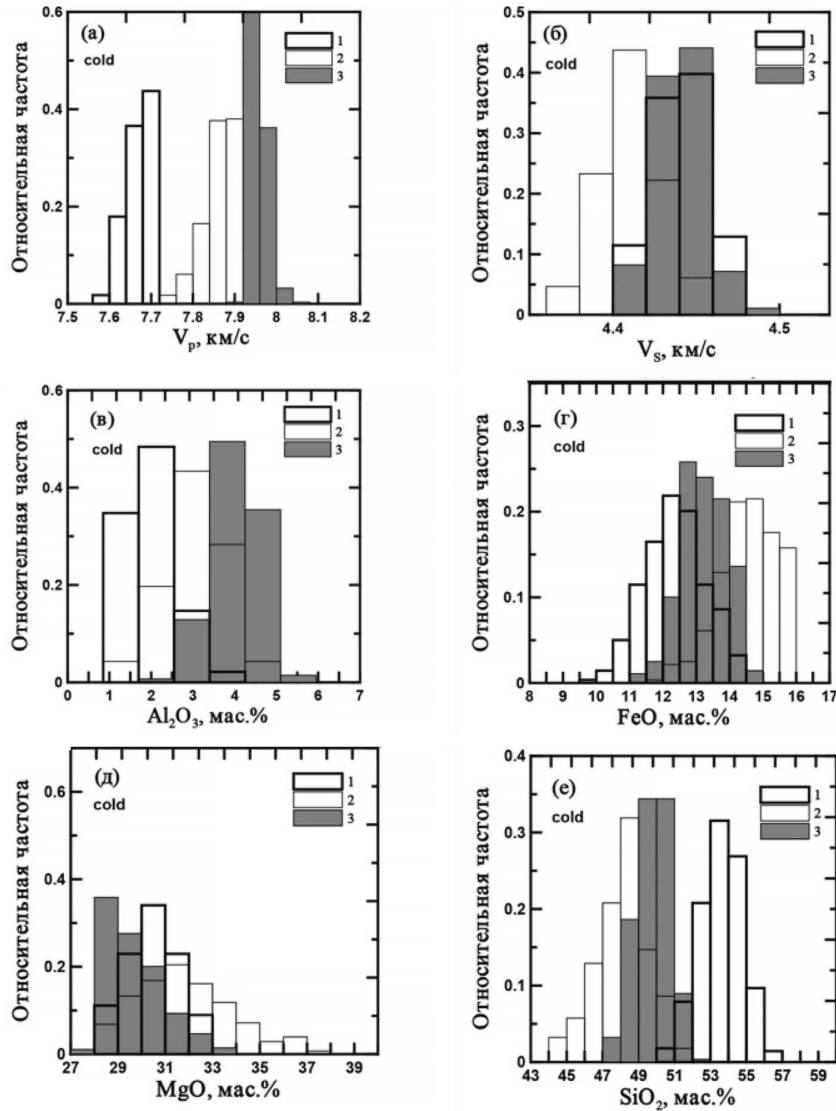


Рис. 1. Вероятностные оценки скоростей P -, S -волн (V_P , V_S) и концентраций порообразующих оксидов (Al_2O_3 , FeO , MgO , SiO_2) в трехслойной мантии Луны, полученные инверсией сейсмических и гравитационных данных. Результаты приведены при фиксированных температурах на средних глубинах мантийных резервуаров: $T_{150 \text{ км}} = 600^\circ\text{C}$, $T_{500 \text{ км}} = 900^\circ\text{C}$, $T_{1000 \text{ км}} = 1100^\circ\text{C}$. 1, 2, 3 – верхняя (39–240 км), средняя (240–750 км), нижняя мантия (750 км – ядро) соответственно

зонах мантии. Можно видеть тенденцию постепенного повышения содержания Al_2O_3 от 1–2 мас.%. в верхней мантии до 3 мас.%. в средней и до 4–5 мас.%. в нижней мантии (рис. 1, в). Решение обратной задачи приводит к более высоким содержаниям Al_2O_3 в мантии Луны по сравнению с геохимическими оценками 1.3–3.1 мас.%. Al_2O_3 [11]. Нижняя мантия обогащена Al_2O_3 и имеет более высокие концентрации граната (табл. 1) по сравнению с верхней мантией, содержащей 53–55 мас.%. SiO_2 и только 1–2 мас.%. Al_2O_3 , доминирующей фазой в которой является ортопироксен (> 70 мол.%) + оливин) [17].

Содержания FeO ($\approx 11\text{--}14$ мас.%) (рис. 1, *з*) и MgO ($\approx 28\text{--}31$ мас.%) (рис. 1, *д*) достаточно стабильны в верхней и нижней мантии. Если небольшое уменьшение скорости S -волн (рис. 1, *б*) в средней мантии не является артефактом, то оно может быть связано с небольшим увеличением концентрации FeO в этой зоне (рис. 1, *з*), но таким образом, чтобы это не приводило к инверсии плотности. Это связано с тем, что при совместном обращении сейсмических и гравитационных данных модели состава наследуют характерные особенности поведения скоростей P -, S -волн и распределения плотности в зональной мантии.

Верхняя и нижняя мантия характеризуется значениями магнезиального числа MG# в интервале 80–83, которые согласуются с рядом геохимических и геофизических оценок [13, 18, 22] и перекрывают валовые оценки MG# 80–81.5 в силикатной фракции Луны [11], но резко отличаются от таковых для BSE (FeO – 8 мас.% и MG# 89) [23], что указывает на существенные различия состава силикатной Луны и пиролитовой мантии Земли. Концентрации SiO₂ во всех зонах мантии ведут себя консервативно и составляют 53–55 мас.% в верхней мантии и 48–51 мас.% в средней и нижней мантиях (рис. 1, *е*). Подчеркнем, что высокая пироксеновость верхней мантии является геохимическим следствием геофизических моделей [14, 16], используемых при инверсии в соотношения для состава.

Результаты расчетов указывают на химическую зональность мантии, причем в средней мантии на глубинах $\approx 250\text{--}750$ км (реальное положение границ и их резкость остаются не до конца ясными) наблюдаются проявления зоны пониженных скоростей [14]. Эксперименты Apollo по электромагнитному зондированию Луны не исключают существование слоя повышенной проводимости на глубинах > 200 км [24]. Природу зоны пониженных скоростей можно объяснить более железистым составом (вплоть до 15 мас.% FeO) по отношению к выше- и нижележащей оболочкам (рис. 3, *з*). К сожалению, у нас нет петрологических доказательств возможности обогащения средней мантии закисным железом, а в сейсмических моделях нет убедительных доказательств наличия зоны пониженных скоростей на этих глубинах.

Результаты, служащие иллюстрацией влияния химического состава на минералогию и физические свойства нижней мантии на глубине 1000 км, приведены в табл. 1. Поскольку нижняя мантия, вероятно, обогащена Al₂O₃ (рис. 1), гранат становится важной Al-содержащей фазой нижней мантии (4–6 мол.% или 12–18 мас.%, табл. 1), контролирующей содержания Al в сосуществующих пироксенах, а также значения физических свойств. Это согласуется с результатами тестирования сейсмических моделей [17] и петролого-геофизическими моделями [25], но радикально противоречит предположению [21], согласно которому нижняя мантия может содержать лишь 1 мас.% Al₂O₃.

Таким образом, из решения обратной многопараметрической задачи следует, что мантия Луны стратифицирована по химическому составу с разными концентрациями оксидов в различных зонах мантии (рис. 1). Судя по гистограммам, разделение мантии на три зоны может оказаться оправданным, но необходимо обратить внимание на то, что существуют общие области химического состава в верхней и средней мантии, а состав средней мантии может частично перекрываться с составом нижней мантии. Это говорит о неопределенности положения геофизических границ в мантии Луны, определенных в сейсмических моделях [14].

Результаты моделирования предполагают, что концентрации FeO ($\approx 11\text{--}14$ мас.%), MgO ($\approx 28\text{--}31$ мас.%) и значения MG# (80–83) примерно одинаковы в верхней и нижней мантиях, но резко отличаются от таковых для BSE (FeO ≈ 8 мас.% и MG# 89). Для рассмотренных моделей термального состояния мантия Луны обогащена SiO₂, FeO и обеднена MgO по отношению к примитивной мантии Земли, что указывает на существенные различия в составах Земли и ее спутника.

Заключение

В работе проведено исследование результатов, полученных современными космическими миссиями, лунного гравитационного поля и динамической фигуры Луны, рассмотрена проблема существования лунного ядра и петролого-геофизических параметров состава и строения лунной мантии.

Анализ данных, полученных роботизированным космическим аппаратом LRO, показал, что существуют следы водорода в южных кратерах Южного полюса, которые находятся в постоянной тени от Солнца. При этом можно сделать заключение, что наличие водорода является признаком присутствия водяного льда. По данным радиометра Diviner миссии LRO [26], средняя максимальная температура в полярных регионах составляет 200 К, а средние минимальные температуры – 50 К, хотя в южной полярной области средняя максимальная температура на 11 К теплее, чем в северной полярной области. Поэтому теоретически при данных условиях лед в кратерах в полярных областях может храниться в течение миллиардов лет. В рамках проекта ученые изучили поверхность кратеров с помощью радара Goldstone Solar System Radar, расположенного в Калифорнии. Было установлено, что холодные кратеры могут сохранять самые разнообразные молекулы, например молекулы воды или метана. Кроме того, в ходе изучения химического состава молекул внутри кратеров астрономы могут получить новую информацию о ранних стадиях образования Солнечной системы. Что касается петролого-геофизических параметров состава и строения лунной мантии, можно сказать следующее. На основе инверсии гравитационных и сейсмических данных построены внутренне согласованные модели химического состава, минералогии и скоростей P -, S -волн трехслойной мантии Луны. Значения скоростей P -волн в нижней мантии (≈ 7.9 – 8.0 км/с) выше, чем в верхней (≈ 7.7 км/с) и средней мантии (≈ 7.8 – 7.9 км/с). Скорости S -волн имеют значения в интервале 4.40–4.45 км/с. Выявлена тенденция постепенного повышения содержания Al_2O_3 от 1–2 мас. % в верхней мантии до 3 мас. % в средней и до 4–5 мас. % в нижней мантии с более высокой концентрацией граната. Концентрации SiO_2 во всех зонах мантии ведут себя консервативно и составляют 53–55 мас. % в верхней мантии и 48–51 мас. % в средней и нижней мантии. Термальное моделирование вещественного состава лунной мантии показало, что в верхней и нижней мантии содержание магния и оксидов железа имеет одинаковое значение. Если сравнивать полученные параметры с земной мантией, имеются существенные различия в содержании диоксида кремния и оксидов железа и магния, для первых двух элементов их концентрация у Луны выше, а для оксида магния ниже, чем у Земли. Данный факт может быть одним из свидетельств того, что Земля и Луна в процессе эволюции не были образованы из единого газопылевого облака.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, а также поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 17-35-50099 мол_нр, 18-05-00225, 18-32-00895 мол_а), стипендией Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов № СП-3225.2018.3, программой Президиума РАН № 17 и Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Литература

1. *Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Lemoine F.G.* Topography of the Moon from the Clementine lidar // *J. Geophys. Res.: Planets.* – 1997. – V. 102, No E1. – P. 1591–1611. – doi: 10.1029/96JE02940.

2. *Binder A.B.* Lunar Prospector: Overview // *Science*. – 1998. – V. 281, No 5382. – P. 1475–1476. – doi: 10.1126/science.281.5382.1475.
3. *Sood R., Chappaz L., Melosh H.J., Howell K.C., Milbury C., Blair D.M., Zuber M.T.* Detection and characterization of buried lunar craters with GRAIL data // *Icarus*. – 2017. – V. 289. – P. 157–172. – doi: 10.1016/j.icarus.2017.02.013.
4. *Araki H., Tazawa S., Noda H., Ishihara Y., Goossens S., Sasaki S., Kawano N., Kamiya I., Otake H., Oberst J., Shum C.* Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry // *Science*. – 2009. – V. 323, No 5916. – P. 897–900. – doi: 10.1126/science.1164146.
5. *Burchell M.J., Robin-Williams R., Foing B.H.* The SMART-1 lunar impact // *Icarus*. – 2010. – V. 207, No 1. – P. 28–38. – doi: 10.1016/j.icarus.2009.10.005.
6. *Nefedyev, Y.A., Valeev S.G., Mikeev R.R., Andreev A.O., Varaksina N.Y.* Analysis of data of “Clementine” and “KAGUYA” missions and “ULCN” and “KSC-1162” catalogues // *Adv. Space Res.* – 2012. – V. 50, No 11. – P. 1564–1569. – doi: 10.1016/j.asr.2012.07.012.
7. *Williams J.G., Boggs D.H., Ratcliff J.T.* Lunar fluid core moment // *Proc. 41st Lunar and Planetary Sci. Conf.* – 2010. – Abstr. No 2336.
8. *Weber R.C., Lin P.-Y., Garnero E.J., Williams Q., Lognonne Ph.* Seismic detection of the lunar core // *Science*. – 2011. – V. 331, No 6015. – P. 309–312. – doi: 10.1126/science.1199375.
9. *Moons M.* Physical libration of the Moon // *Celestial Mech.* – 1982. – V. 26, No 2. – P. 131–142. – doi: 10.1007/BF01230875.
10. *Garcia R.F., Gagnepain-Beyneix J., Chevrot S., Lognonne Ph.* Very preliminary reference Moon model // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2011. – V. 188, No 1–2. – P. 96–113. – doi: 10.1016/j.pepi.2011.06.015.
11. *Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V.* Testing the reference Moon model in respect of the thermal regime and chemical composition of the mantle: Thermodynamics versus seismology // *Izv., Phys. Solid Earth.* – 2016. – V. 52, No 3. – P. 344–352. – doi: 10.1134/S1069351316030071.
12. *Kronrod V.A., Kuskov O.L.* Inversion of seismic and gravity data for the composition and core sizes of the Moon // *Izv., Phys. Solid Earth.* – 2011. – V. 47, No 8. – P. 711–730. – doi: 10.1134/S1069351311070044.
13. *Taylor S.R.* *Planetary Science: A Lunar Perspective.* – Houston, USA: Lunar and Planetary Institute, 1982. – 481 p.
14. *Gagnepain-Beyneix J., Lognonne Ph., Chenet H., Lombardi D., Spohn T.* A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2006. – V. 159, No 3–4. – P. 140–166. – doi: 10.1016/j.pepi.2006.05.009.
15. *Wieczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F., Kiefer W.S., Taylor G.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Solomon S.C., Andrews-Hanna J.C., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Smith D.E., Watkins M.M., Williams J.G., Zuber M.T.* The crust of the Moon as seen by GRAIL // *Science*. – 2013. – V. 339, No 6120. – P. 671–675. – doi: 10.1126/science.1231530.
16. *Williams J., Konopliv A., Boggs D., Park R., Yuan D., Lemoine F., Goossens S., Mazarico E., Nimmo F., Weber R., Asmar S., Melosh H., Neumann G., Phillips R., Smith D., Solomon S., Watkins M., Wieczorek M., Andrews-Hanna J., Head J., Kiefer W., Matsuyama I., McGovern P., Taylor G., Zuber M.* Lunar interior properties from the GRAIL mission // *J. Geophys. Res.: Planets.* – 2014. – V. 119, No 7. – P. 1546–1578. – doi: 10.1002/2013JE004559.

17. *Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V.* Thermo-chemical constraints on the interior structure and composition of the lunar mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2014. – V. 235. – P. 84–95. – doi: 10.1016/j.pepi.2014.07.011.
18. *Khan A., Maclennan J., Taylor S.R., Connolly J.A.D.* Are the Earth and the Moon compositionally alike? Inferences on lunar composition and implications for lunar origin and evolution from geophysical modeling // *J. Geophys. Res.: Planets.* – 2006. – V. 111, No E5. – Art. E05005, P. 1–21. – doi: 10.1029/2005JE002608.
19. *Fabrichnaya O.B., Kushov O.L.* Constitution of the mantle. I. Phase relations in the FeO–MgO–SiO₂ system at 10–30 GPa // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1991. – V. 69, No 1–2. – P. 56–71. – doi: 10.1016/0031-9201(91)90153-9.
20. *Кусков О.Л., Галлимзянов Р.Ф., Трускиновский Л.М., Пильченко В.А.* Достоверность термодинамических расчетов химических и фазовых равновесий при сверхвысоких давлениях // *Геохимия.* – 1983. – № 6. – С. 849–871.
21. *Taylor G.J., Wieczorek M.A.* Lunar bulk chemical composition: A post-Gravity Recovery and Interior Laboratory reassessment // *Philos. Trans. R. Soc., A.* – 2014. – V. 372, No 2024. – Art. 20130242, P. 1–17. – doi: 10.1098/rsta.2013.0242.
22. *Grimm R.E.* Geophysical constraints on the lunar Procellarum KREEP Terrane // *J. Geophys. Res.: Planets.* – 2013. – V. 118, No 4. – P. 768–778. – doi: 10.1029/2012JE004114.
23. *McDonough W.F.* Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1990. – V. 101, No 1. – P. 1–18. – doi: 10.1016/0012-821X(90)90119-I.
24. *Дайел П., Паркин К., Дейли В.* Лунная электропроводность, магнитная проницаемость и температура по данным магнитных экспериментов экспедиций «Аполлон» // *Космохимия Луны и планет / Под ред. А.П. Виноградова.* – М.: Наука, 1975. – С. 323–340.
25. *Hood L.L., Jones J.H.* Geophysical constraints on lunar bulk composition and structure: A reassessment // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* – 1987. – V. 92, No B4. – P. E396–E410. – doi: 10.1029/JB092iB04p0E396.
26. *Williams J.-P., Paige D.A., Greenhagen B.T., Sefton-Nash E.* The global surface temperatures of the Moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment// *Icarus.* – 2017. – V. 283. – P. 300–325. – doi: 10.1016/j.icarus.2016.08.012.

Поступила в редакцию
18.09.18

Кронрод Екатерина Викторовна, научный сотрудник

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, д. 19, г. Москва, 119991, Россия
E-mail: *e.kronrod@gmail.com*

Нефедьев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор Астрономической обсерватории им.В.П. Энгельгардта

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *star1955@mail.ru*

Кронрод Виктор Александрович, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, д. 19, г. Москва, 119991, Россия
E-mail: *va_kronrod@mail.ru*

Кусков Олег Львович, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией термодинамики и математического моделирования природных процессов

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, д. 19, г. Москва, 119991, Россия
E-mail: *ol_kuskov@mail.ru*

Андреев Алексей Олегович, младший научный сотрудник Института физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *alexey-andreev93@mail.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2019, vol. 161, no. 1, pp. 24–38

doi: 10.26907/2541-7746.2019.1.24-38

Selenophysics and Models of the Lunar Three-Layered Mantle

E.V. Kronrod^{a}, Y.A. Nefedyev^{b**}, V.A. Kronrod^{a***},
O.L. Kuskov^{a****}, A.O. Andreev^{b*****}*

^a*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^b*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: **e.kronrod@gmail.com, **star1955@mail.ru, ***va_kronrod@mail.ru,
****ol_kuskov@mail.ru, *****alexey-andreev93@mail.ru*

Received September 18, 2018

Abstract

The paper focuses on analyzing the data produced by the modern space missions. The purpose of the work is to analyze the lunar gravitational field and dynamic figure, problem of the lunar core existence and to determine petrologic and geophysical parameters of the composition and structure of the lunar mantle using computer simulation. The analysis of space observations has shown that the real physical figure of the Moon is a more complex system than the model that can be described by a triaxial ellipsoid; at the same time, absolute values and orientation of the inertia moments can be determined neither from space observations nor from ground-based ones. Only the combinations of the inertia moments can be determined. On the basis of the study of trajectories of seismic waves passing and features of their reflection from the lunar inner layers produced by the Apollo mission's seismographs, the composition and structure of the lunar core layers at various depths have been determined. The results of the lunar core studies confirm the hypothesis that the Moon was formed 4.5 billion years ago as a result of the Earth's collision with a large space object. Petrologic and geophysical investigation includes the solution of two problems. The first one is the construction of a three-layered lunar mantle chemical composition model on the basis of a joint inversion of gravitational, seismic, and petrologic and geochemical data. The second problem consists in the revelation of a degree of the mantle reservoirs' chemical homogeneity, namely whether the mantle is homogeneous or stratified by chemical composition with different concentrations of petrogenic elements in various zones of the mantle. Based on the inversion of gravitational

and seismic data, inherently coherent models of chemical composition, mineralogy, and lunar three-layered mantle rates have been developed. The results of the simulation have shown that the models of the lunar mantle's thermal state are enriched by SiO_2 , FeO and depleted by MgO in relation to the primitive Earth's mantle, which indicates the significant distinction between the compositions of the Earth and Moon.

Keywords: selenophysics, petrology and geochemistry, lunar internal structure models

Acknowledgments. The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University and supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 17-35-50099 mol_nr, 18-05-00225, 18-32-00895 mol_a), scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduates (no. SP-3225.2018.3), Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences no. 17, and "BASIS" Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics.

Figure Captions

Fig. 1. Probabilistic estimates of P -, S -wave velocities (V_P , V_S) and rock-forming oxide concentrations (Al_2O_3 , FeO, MgO, SiOfr_m[0]₋₂) in the three-layered mantle of the Moon obtained by the inversion of seismic and gravitational data. The results are given for the fixed temperatures at the average depths of mantle reservoirs: $T_{150 \text{ km}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{500 \text{ km}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{1000 \text{ km}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. 1, 2, 3 – upper (39–240 km), middle (240–750 km), lower mantle (750 km – core), respectively.

References

1. Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Lemoine F.G. Geophysical Topography of the Moon from the Clementine lidar. *J. Geophys. Res.: Planets*, 1997, vol. 102, no. E1, pp. 1591–1611. doi: 10.1029/96JE02940.
2. Binder A.B. Lunar Prospector: Overview. *Science*, 1998, vol. 281, no. 5382, pp. 1475–1476. doi: 10.1126/science.281.5382.1475.
3. Sood R., Chappaz L., Melosh H.J., Howell K.C., Milbury C., Blair D.M., Zuber M.T. Detection and characterization of buried lunar craters with GRAIL data. *Icarus*, 2017, vol. 289, pp. 157–172. doi: 10.1016/j.icarus.2017.02.013.
4. Araki H., Tazawa S., Noda H., Ishihara Y., Goossens S., Sasaki S., Kawano N., Kamiya I., Otake H., Oberst J., Shum C. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, 2009, vol. 323, no. 5916, pp. 897–900. doi: 10.1126/science.1164146.
5. Burchell M.J., Robin-Williams R., Foing B.H. The SMART-1 lunar impact. *Icarus*, 2010, vol. 207, no. 1, pp. 28–38. doi: 10.1016/j.icarus.2009.10.005.
6. Nefedyev Y.A., Valeev S.G., Mikeev R.R., Andreev A.O., Varaksina N.Y. Analysis of data of "Clementine" and "KAGUYA" missions and "ULCN" and "KSC-1162" catalogues. *Adv. Space Res.*, 2012, vol. 50, no. 11, pp. 1564–1569. doi: 10.1016/j.asr.2012.07.012.
7. Williams J.G., Boggs D.H., Ratcliff J.T. Lunar fluid core moment. Proc. 41st Lunar and Planetary Sci. Conf., 2010, abstr. no. 2336.
8. Weber R.C., Lin P.-Y., Garnero E.J., Williams Q., Lognonne Ph. Seismic detection of the lunar core. *Science*, 2011, vol. 331, no. 6015, pp. 309–312. doi: 10.1126/science.1199375.
9. Moons M. Physical libration of the Moon. *Celestial Mech.*, 1982, vol. 26, no. 2, pp. 131–142. doi: 10.1007/BF01230875.
10. Garcia R.F., Gagnepain-Beyneix J., Chevrot S., Lognonne Ph. Very preliminary reference Moon model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2011, vol. 188, nos. 1–2, pp. 96–113. doi: 10.1016/j.pepi.2011.06.015.

11. Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V. Testing the reference Moon model in respect of the thermal regime and chemical composition of the mantle: Thermodynamics versus seismology. *Izv., Phys. Solid Earth.*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 344–352. doi: 10.1134/S1069351316030071.
12. Kronrod V.A., Kuskov O.L. Inversion of seismic and gravity data for the composition and core sizes of the Moon. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 711–730. doi: 10.1134/S1069351311070044.
13. Taylor S.R. *Planetary Science: A Lunar Perspective*. Houston, Lunar Planet. Inst., 1982. 481 p.
14. Gagnepain-Beyneix J., Lognonne Ph., Chenet H., Lombardi D., Spohn T. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2006, vol. 159, nos. 3–4, pp. 140–166. doi: 10.1016/j.pepi.2006.05.009.
15. Wiczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F., Kiefer W.S., Taylor G.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Solomon S.C., Andrews-Hanna J.C., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Smith D.E., Watkins M.M., Williams J.G., Zuber M.T. The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 2013, vol. 339, no. 6120, pp. 671–675. doi: 10.1126/science.1231530.
16. Williams J., Konopliv A., Boggs D., Park R., Yuan D., Lemoine F., Goossens S., Mazarico E., Nimmo F., Weber R., Asmar S., Melosh H., Neumann G., Phillips R., Smith D., Solomon S., Watkins M., Wiczorek M., Andrews-Hanna J., Head J., Kiefer W., Matsuyama I., McGovern P., Taylor G., Zuber M. Lunar interior properties from the GRAIL mission. *J. Geophys. Res.: Planets*, 2014, vol. 119, no. 7, pp. 1546–1578. doi: 10.1002/2013JE004559.
17. Kuskov O.L., Kronrod V.A., Kronrod E.V. Thermo-chemical constraints on the interior structure and composition of the lunar mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2014, vol. 235, pp. 84–95. doi: 10.1016/j.pepi.2014.07.011.
18. Khan A., Maclennan J., Taylor S.R., Connolly J.A.D. Are the Earth and the Moon compositionally alike? Inferences on lunar composition and implications for lunar origin and evolution from geophysical modeling. *J. Geophys. Res.: Planets*, 2006, vol. 111, no. E5, art. E05005, pp. 1–21. doi: 10.1029/2005JE002608.
19. Fabrichnaya O.B., Kushov O.L. Constitution of the mantle. I. Phase relations in the FeO–MgO–SiO₂ system at 10–30 GPa. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1991, vol. 69, nos. 1–2, pp. 56–71. doi: 10.1016/0031-9201(91)90153-9.
20. Kuskov O.L., Galimzyanov R.F., Truskinovsky L.M., Pil'chenko V.A. Reliability of thermodynamic calculations of chemical and phase equilibria at high pressures and temperatures. *Geokhimiya*, 1983, no. 6, pp. 849–871. (In Russian)
21. Taylor G.J., Wiczorek M.A. Lunar bulk chemical composition: A post-Gravity Recovery and Interior Laboratory reassessment. *Philos. Trans. R. Soc., A*, 2014, vol. 372, no. 2024, art. 20130242, pp. 1–17. doi: 10.1098/rsta.2013.0242.
22. Grimm R.E. Geophysical constraints on the lunar Procellarum KREEP Terrane. *J. Geophys. Res.: Planets*, 2013, vol. 118, no. 4, pp. 768–778. doi: 10.1029/2012JE004114.
23. McDonough W.F. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, vol. 101, no. 1, pp. 1–18. doi: 10.1016/0012-821X(90)90119-I.
24. Dyal P., Parkin C., Daily W. Lunar electrical conductivity, magnetic permeability, and temperature based on the magnetic experiments of the Apollo expeditions. In: Vinogradov A.P. (Ed.) *Kosmokhimiya Lunny i planet* [Cosmochemistry of the Moon and Planets]. Moscow, Nauka, 1975, pp. 323–340.

25. Hood L.L., Jones J.H. Geophysical constraints on lunar bulk composition and structure: A reassessment. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1987, vol. 92, no. B4, pp. E396–E410. doi: 10.1029/JB092iB04p0E396.
26. Williams J.-P., Paige D.A., Greenhagen B.T., Sefton-Nash E. The global surface temperatures of the Moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment. *Icarus*, 2017, vol. 283, pp. 300–325. doi: 10.1016/j.icarus.2016.08.012.

Для цитирования: Кронрод Е.В., Неведьев Ю.А., Кронрод В.А., Кусков О.Л., Андреев А.О. Селенофизика и модели трехслойной лунной мантии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2019. – Т. 161, кн. 1. – С. 24–38. – doi: 10.26907/2541-7746.2019.1.24-38.

For citation: Kronrod E.V., Nefedyev Y.A., Kronrod V.A., Kuskov O.L., Andreev A.O. Selenophysics and models of the lunar three-layered mantle. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2019, vol. 161, no. 1, pp. 24–38. doi: 10.26907/2541-7746.2019.1.24-38. (In Russian)