

Термохимические ограничения на модели состава и внутреннего строения Луны

н.с., к.х.н. Кронрод Екатерина Викторовна

Лаборатория термодинамики и математического моделирования
природных процессов

Введение

Система Земля–Луна занимает особое место в Солнечной системе, а ее происхождение тесно связано с проблемой начального состояния и ранней эволюции небесных тел. Химический состав и термальная эволюция Луны должны рассматриваться в качестве фундаментального геохимического ограничения при тестировании космогонических моделей ее происхождения.

Цель настоящей работы заключается в моделировании термического режима и химического состава мантии Луны на основе совместной инверсии сейсмических, гравитационных и петрологических данных и построении согласованных моделей внутреннего строения Луны.

Обоснование новизны исследования

Принципиальная новизна и оригинальность результатов исследования заключаются в реконструкции химического состава и внутреннего строения мантии и ядра Луны на основе решения обратной задачи с учетом петролого-геохимических, геофизических и физико-химических методов и данных.

Модель Луны

Рассматривается сферически-симметричная пятислойная модель Луны: кора (0–40 км), верхняя (40–250 км), средняя (250–750 км) и нижняя мантия (750 км–ядро) и железо-сульфидное ядро, размеры которого определяются в результате выполнения ограничений на массу и момент инерции. Предполагается, что состав первичной нижней мантии равен современному среднему составу вышележащих оболочек, образовавшихся в результате дифференциации лунного магматического океана (LMO, [1]). Глубина LMO ~750 км соответствует сейсмической модели [2]. Состав коры задается по [3].

Постановка задачи, метод решения, исходные данные

Исследования химического состава и внутреннего строения Луны проводились методами термодинамики, физики минералов и математического моделирования. Реконструкция химического состава и теплового режима производится на основе совместной инверсии гравитационных и сейсмических данных, а также масс-балансовых петрологических соотношений методом Монте-Карло [4]. При построении моделей в качестве граничных условий используются сейсмические данные «Аполло», масса и момент инерции по данным GRAIL [5]. Расчеты равновесного состава и физических свойств минеральных ассоциаций в системе NaTiCFMAS производятся методом минимизации свободной энергии Гиббса в программном комплексе *THERMOSEISM*. Влияние химического и фазового состава на сейсмические и плотностные свойства мантии Луны исследовано в широком диапазоне концентраций: $25 \leq \text{MgO} \leq 45\%$, $40 \leq \text{SiO}_2 \leq 55\%$, $5 \leq \text{FeO} \leq 15\%$, $0.1 \leq \text{CaO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 7\%$ ($\text{CaO} \sim 0.8\text{Al}_2\text{O}_3$, [6]), что позволяет охватить весь набор потенциальных лунных составов.

Результаты и выводы

В результате решения обратной задачи определены зависимости валовых концентраций FeO, Al₂O₃, SiO₂ и MgO в силикатной фракции Луны (мантия+кора) для «холодных» и «горячих» сценариев термального состояния (результаты для «холодной» модели приведены на рис. 1) [7, 8], рассчитаны частотные распределения основных оксидов в трех слоях мантии, а также вероятные размеры ядра Луны [9, 10, 11, 12].

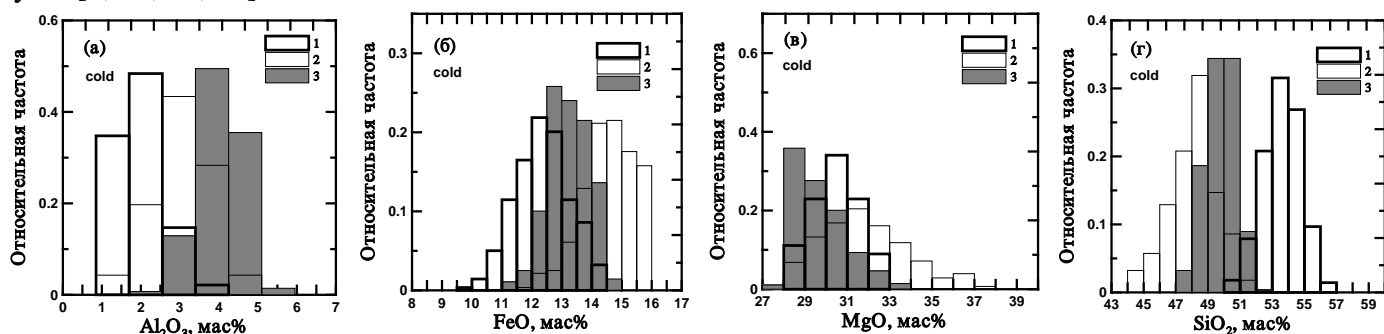


Рис. 1. Вероятностные оценки концентраций основных породообразующих оксидов в трехслойной мантии Луны для «холодной» модели (cold) с температурами на разных глубинах мантии: $T_{150\text{км}}=600^\circ\text{C}$, $T_{500\text{км}}=$

900°C, $1000_{\text{км}}=1100^\circ\text{C}$. 1 – верхняя (39-240 км), 2 – средняя (240-750 км), 3 – нижняя мантия (750 км – граница ядро-мантия). (а) - Al_2O_3 , (б) - FeO , (в) – MgO , (г) – SiO_2

Результаты работы позволяют связать набор физико-химических и геофизических параметров на фундаментальном уровне и установить более надежные ограничения на химический состав, минералогию и строение мантии Луны и сделать следующие основные выводы:

1. На основе комплекса геофизических данных и метода равновесной термодинамики впервые установлено, что при всех допустимых распределениях температуры мантия и валовый состав силикатной порции Луны (BSM = кора+мантия) обогащены FeO (12-13 мас.%) и обеднены MgO (Mg# 80-81.5) по отношению к валовому составу примитивной мантии Земли (BSE, $\text{FeO} \sim 8\%$ и Mg# 89), что указывает на существенные различия химического состава силикатных оболочек Земли и ее спутника.

2. Мантия Луны стратифицирована по химическому составу с разными концентрациями основных оксидов в верхней, средней и нижней мантии. Выявлена тенденция повышения содержания Al_2O_3 с глубиной: от 1-3% в верхней мантии до 4-7 мас.% в нижней мантии. Оценки распространенности оксида алюминия в Луне (BSM) в зависимости от температуры попадают в две различные группы. Холодные модели BSM по содержанию $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 3.0$ -4.6 мас.% сопоставимы с валовым составом силикатной Земли (BSE), в то время как горячие модели BSM существенно обогащены $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 5.1$ -7.3 мас.% ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1.3$ –1.6×BSE) по сравнению с BSE. Модели, обогащенные Ca и Al (4-6 мас.% CaO и Al_2O_3), могут рассматриваться в качестве петрологической основы нижней мантии. Концентрации SiO_2 составляют 50-55% в верхней и 45-50 мас.% в нижней мантии; ортопироксен, а не оливин, является доминирующим минералом верхней мантии. Наиболее вероятным составом верхней мантии является оливин-содержащий пироксенит, обедненный Ca и Al (~ 2 мас.%) по сравнению с нижней мантией.

3. Радиусы Fe-S ядра со средней плотностью 7.1 г/см^3 и содержанием серы 3.5-6 мас.% находятся в интервале 50-350 км с наиболее вероятным значением около 300 км ($\sim 1\%$ от массы Луны) и довольно слабо зависят от теплового режима Луны.

Полученные результаты позволят внести существенный вклад в приоритетные задачи Российских федеральных проектов Луна-25 и последующих по изучению химического состава, теплового режима и внутреннего строения Луны.

Список литературы

- [1] Кронрод Е.В. и др. Катархейский и донектарский этапы в истории Земли и Луны // В книге Маров М.Я. и др. «Формирование Луны и ранняя эволюция Земли». URSS. 2019. 320 с. Глава 3 (с. 85-173)
- [2] Gagnepain-Beyneix J. et al. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy // Phys. Earth Planet. Inter. 2006 V. 159 P. 140-166.
- [3] Wieczorek M.A. et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL // Science. 2013. V. 339. P. 671–675.
- [4] Кронрод В.А., Кусков О.Л. Моделирование химического состава и размеров ядра луны инверсией сейсмических и гравитационных данных // Физика Земли. 2011. № 8. С. 62–80
- [5] Williams J.G. et al. Lunar interior properties from the GRAIL mission // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. 1546.
- [6] Elardo S.M., Draper D.S., Shearer Jr.C.K. Lunar magma ocean crystallization revisited: bulk composition, early cumulate mineralogy, and the source regions of the highlands Mg-suite // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75, P. 3024-3045.
- [7] Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на «холодные» и «горячие» модели внутреннего строения Луны: 2. Состав трехслойной мантии // Астрономический Вестник, 2019, том 53, № 2, с. 83-98
- [8] Kuskov O.L., Kronrod E.V., Kronrod V.A. Thermo-chemical constraints on the lunar bulk composition and the structure of a three-layer mantle // Phys. Earth Planet. Interiors 2019. 286 (2019), 1-12
- [9] Кусков О.Л., Кронрод Е.В., Кронрод В.А. Влияние термального состояния на химический состав мантии и размеры ядра Луны // Геохимия, 2019, № 6
- [10] Кронрод Е.В., Кусков О.Л., Кронрод В.А. Оценка влияния распределения температуры на химический состав мантии и размеры ядра Луны // Труды ВЕСЭМПГ-2019, Москва, 16–17 апреля 2019 г., с. 301-304
- [11] Кронрод Е.В. и др. Селенофизика и модели трехслойной лунной мантии // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2019. Т. 161. Книга 1. С. 24-38
- [12] Kronrod E. et al. The effect of temperature distribution in the lunar mantle on joint inversion of geochemical (bulk chemical composition), seismic and selenodetic (GRAIL and LLR) data // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1301 (2019) 012001, doi:10.1088/1742-6596/1301/1/012001