

УДК 523.34-36

НАХОДКА HgS В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ ИЗ ПРОБ “АПОЛЛОНА-17”

© 2020 г. А. П. Рыбчук¹, А. В. Мохов^{1,*}, Т. А. Горностаева^{1,**},
П. М. Карташов¹, академик РАН О. А. Богатиков¹

Поступило 05.12.2019 г.

После доработки 05.12.2019 г.

Принято к публикации 10.12.2019 г.

При исследовании образцов лунного реголита из проб “Аполлона-17” методами электронной микроскопии была обнаружена частица сульфида ртути размером ~3 мкм. По-видимому, она сохранилась благодаря покрывающему ее тонкому слою высококремниевое стекла, несущего защитные функции. Предположительно эта частица образовалась из газовой фазы путем конденсации паров Hg и S.

Ключевые слова: лунный реголит, минералы Луны, высокотемпературный конденсат, стекло, СЭМ, ЭДС

DOI: 10.31857/S2686739720030172

ВВЕДЕНИЕ

Целью продолжающейся уже несколько лет работы по изучению тонкодисперсных фракций лунного реголита является расширение базы знаний о лунной минералогии и процессах, приводящих к минералообразованию в специфических условиях лунной поверхности при интенсивном воздействии солнечного ветра, температурных перепадов и множественных метеоритных бомбардировок.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках сравнительного изучения образцов лунного реголита, доставленного советскими автоматическими станциями “Луна” и пробам, переданными NASA для исследований Академии наук СССР, был изучен образец миссии “Аполлона-17”. Отбор пробы производился в горном массиве между Морем Ясности и Морем Спокойствия.

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (Япония), оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA-450 (Великобритания).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе исследования в режиме отраженных электронов по контрасту была обнаружена яркая частица треугольной формы размером ~3 мкм (рис. 1), расположенная на поверхности более крупного фрагмента реголита с составом, отвечающим SiO₂. На рис. 2 эта частица отображена во вторичных электронах, где видно, что поверхности обеих частиц покрыты тонкой высококремниевой стеклянной пленкой. В энергодисперсионном спектре от обнаруженной 3-х микронной частички, помимо пиков кислорода и кремния, в качестве основных зафиксированы пики серы и ртути (рис. 3). Пики же кремния и кислорода регистрируются в этом спектре, как от матрицы, так и от покрывающей весь этот агрегат пленки, что было подтверждено картинами распределения элементов по площади, выполненных с пониженным до 8 кВ ускоряющим напряжением для улучшения локальности.

Полуколичественный пересчет этого спектра, выполненный по методике [1] с вращением относительно детектора и за вычетом углерода и силикатной составляющей, показал атомное соотношение Hg/S = 3.2/3.4, что, с учетом неправильной формы частицы, отвечает формуле одного из трех полиморфов HgS — кубического метациннабарита, гексагонального гиперциннабарита или тригональной киновари. Находка чистого моносulfида ртути является первой среди известных лунных минералов. До этого сообщалось об обнаружении ртутьсодержащего сульфида с формулой (Cu₁₀Ag₂Hg)₁₃S₁₄ в пробах реголита из моря Кризисов [2].

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: avm8okhov@gmail.com

**E-mail: goliaf77@mail.ru

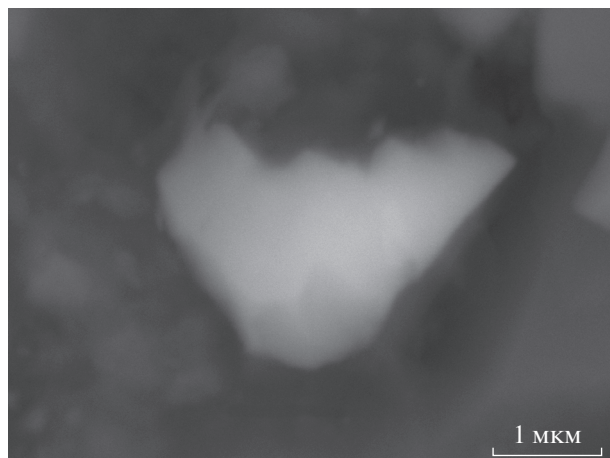


Рис. 1. Изображение частицы HgS в отраженных электронах.

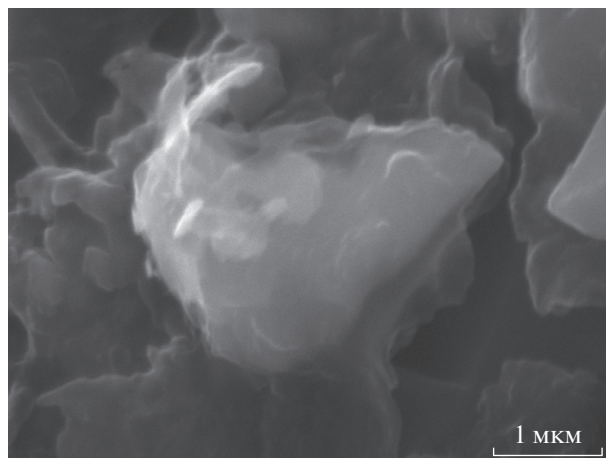


Рис. 2. Изображение частицы HgS во вторичных электронах.

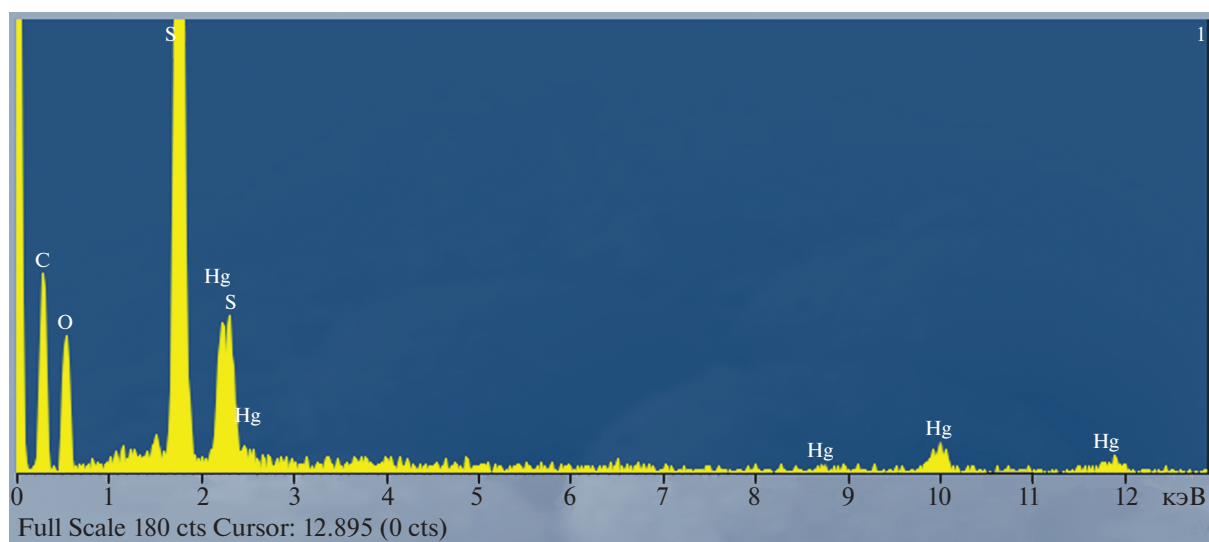


Рис. 3. Энергодисперсионный спектр от частицы HgS.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из источников летучих элементов, попадающих на поверхность Луны (в том числе Hg и S), является метеоритное вещество. Наиболее обогащены этими элементами хондриты [3]. Концентрация Hg в различных хондритах колеблется в пределах от 0.01 до 7 ppm [4]. При изучении образцов углеродистых хондритов Allende и Murchison было определено, что сульфид ртути является основной Hg-содержащей фазой [5]. В челябинском метеорите, хондрите класса LL5, был диагностирован арзакит $\text{Hg}_2\text{S}_2(\text{Br}, \text{Cl})_2$ [6]. Сера также присутствует во всех типах метеоритов, в большей степени это касается хондритов и ахондритов, где она входит в состав различных суль-

фидов, прежде всего в троилит, и реже, в добреелит, найнинджерит или ольдгамит [7].

Другой возможный источник привноса Hg и S на поверхность Луны связан с периодом ее интенсивной вулканической активности [8]. В образцах “Аполлона-17” было определено общее содержание серы, которое колебалось от 550 до 1300 мкг на грамм грунта [9]. В работе [10] в оранжевых стеклах из образцов “Аполлона-17” были проанализированы составы расплавных включений, где также были обнаружены значительные количества серы (612–887 ppm). Ртутьсодержащий сульфид с формулой $(\text{Cu}_{10}\text{Ag}_2\text{Hg})_{13}\text{S}_{14}$ предположительно фумарольно-экспалятивного происхождения был обнаружен в реголите из пробы AC “Луна-24” [2].

Кроме того, в ходе импактных процессов из реголита и первичных пород Луны в газово-плазменное облако выбрасываются, в числе других, и легколетучие Hg и S. В результате эксперимента LCROSS (имитация импакта непосредственно на поверхности Луны) было установлено, что при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ в облаке испаренного вещества присутствовало до ~ 120 кг Hg [11]. Гибсон и Мур [8] показали, что от 12% до 30% S из лунного реголита могут быть испарены при нагревании в вакууме до 750°C . Таким образом, многочисленные и постоянные импакты и микроимпакты должны были бы приводить к миграции летучих элементов по лунной поверхности.

Помимо импактных процессов, к перераспределению летучих элементов, в частности Hg и S, по поверхности Луны приводят температурные перепады, вызываемые суточным циклом. Согласно экспериментальным данным [12] в условиях, имитирующих лунный день, при температурах $130\text{--}150^\circ\text{C}$ из лунного реголита испаряется до 15–20% свободной Hg. Прямые измерения содержаний ртути в лунном реголите на интервале в 30 см показали их возрастание с глубиной в три раза (от 6×10^{-6} до 9×10^{-6} мас. %) [13]. Была выдвинута гипотеза о существовании меридионального “ртутного ветра” между экватором и полюсами. Он вызван разницей температур поверхности в примерном диапазоне от $+150^\circ\text{C}$ до -150°C , что приводит к преимущественному испарению ртути в экваториальных областях и ее переносу к полюсам с последующей конденсацией.

Возникновение “ртутного ветра”, по мнению авторов [14], возможно также и в результате переноса паров ртути из горячей лавы в период вулканической деятельности на Луне и их конденсации на поверхности холодного континентального реголита. В результате вулканической деятельности вместе с Hg так же высвобождаются и значительные количества S.

Циклический нагрев и охлаждение поверхности, происходящие в течение лунных суток, так же служащие причиной возникновения “ртутного ветра” (“серного ветра”), могут привести к существенному перераспределению этих элементов по поверхности Луны. Это может послужить причиной неоднородного латерального распределения Hg и S.

Таким образом, атомарные ртуть и сера на поверхности Луны весьма мобильны. Поскольку моносulfиды Hg являются наиболее стойкими соединениями ртути, известными в химии, они являются естественными ее фиксаторами на местности. Этот эффект усиливается при условии, что ртутные фазы покрываются стеклянными импактными конденсатными пленками, препятствующими дальнейшей миграции ртути.

ВЫВОДЫ

По нашему мнению, наиболее вероятным “строительным материалом” для синтеза обнаруженного нами сульфида ртути служили атомарные ртуть и сера. Их соединение могло бы легко образоваться путем конденсации даже из разреженных паров.

Учитывая вышесказанное, нельзя однозначно прогнозировать, как именно распределены Hg и S по поверхности Луны; но в то же время очевидно, что их концентрация в месте отбора образцов пробы лунного реголита “Аполлона-17” была достаточной для формирования кристалла HgS. Консервация кристалла на длительный срок, включая доставку его на Землю, видимо, стала возможной благодаря тонкопленочному слою высококремниевое стекла, сыгравшего защитную роль.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы “Исследования состава и структуры минерального вещества высоколокальными методами” (0136–2019–0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов А.В. Аналитическая электронная микроскопия в изучении ультрадисперсной фракции лунного грунта // I Всеросс. молодеж. конф. “Минералы, строение, свойства, методы исследования”. Ильмены. 2009. С. 42–45.
2. Мохов А.В., Карташов П.М., Горностаева Т.А., Богатиков О.А. Ртутьсодержащий сульфид из лунного реголита Моря Изобилия // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 231–236.
3. Ehmman W.D., Huizenga J.R. Bismuth, Thallium and Mercury in Stone Meteorites by Activation Analysis // Geochim. Cosmochim. Acta. 1959. V. 17. № 1–2. P. 125–135.
4. Reed Jr G.W., Jovanovic S. Mercury in Chondrites // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. № 8. P. 2219–2228.
5. Lauretta D.S., Klaue B., Blum J.D., Buseck P.R. Mercury Abundances and Isotopic Compositions in the Murchison (CM) and Allende (CV) Carbonaceous Chondrites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2001. V. 65. № 16. P. 2807–2818.
6. Мороз Т.Н., Горяйнов С.В., Похиленко Н.П., Подгорных Н.М., Нишанбаев Т.П. Спектры комбинационного рассеяния света метеорита Челябинск // Метеорит Челябинск – год на Земле. 2014. P. 589–597.
7. Gibson E.K., Moore C.B., Primus T.M., Lewis C.F. Sulfur in Achondritic Meteorites // Meteoritics. 1985. V. 20. № 3. P. 503–511.
8. Иванов А.В. Летучие компоненты в образцах лунного реголита. Обзор // Астрономический Вестник. 2014. Т. 48. № 2. С. 120–138.
9. Gibson Jr E.K., Moore G.W. Sulfur Abundances and Distributions in the Valley of Taurus-Littrow // Lunar

- and Planetary Science Conference Proceedings. 1974. V. 5. P. 1823–1837.
10. Hauri E.H., Weinreich T., Saal A.E., Rutherford M.C., Van Orman J.A. High Pre-eruptive Water Contents Preserved in Lunar Melt Inclusions // *Science*. 2011. V. 333. Iss. 6039. P. 213–215.
 11. Gladstone G.R., Hurley D.M., Rutherford K.D., et al. LRO-LAMP Observations of the LCROSS Impact Plume // *Science*. 2010. V. 330. № 6003. P. 472–476.
 12. Беляев Ю.И., Ковешникова Т.А. О содержании ртути в реголите моря Изобилия, Моря Спокойствия и Океана Бурь // В сб.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука. 1974.
 13. Krähenbühl U. Distribution of Volatile and Non-Volatile Elements in Grain-size Fractions of Apollo 17 Drive Tube 74001/2 // *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* 1980. V. 11. P. 1551–1564.
 14. Беляев Ю.И. О ртутном ветре между континентальными и морскими районами Луны // *Геохимия*. 1975. № 5. С. 768–770.

FIND OF HGS IN LUNAR REGOLITH FROM APOLLO-17 PROBES

**A. P. Rybchuk^a, A. V. Moxov^{a,#}, T. A. Gornostaeva^{a,##},
P. M. Kartashov^a, and Academician of the RAS O. A. Bogatikov^a**

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: avm8okhov@gmail.com*

^{##}*E-mail: goliaf77@mail.ru*

The study of lunar regolith samples, delivered by Apollo-17 by electron microscopy, revealed the compound HgS, in the form of ~3 mkm size particle. Apparently, this particle was preserved, due to a thin layer of highly siliceous glass, carrying protective functions. The main components of the HgS compound most likely served as atomic Hg and S, which were joined by condensation.

Keywords: lunar regolith, moon minerals, high temperature condensate, glass, TEM, EDS