ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 491, № 2, с. 42–45

МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 52-43

САМОРОДНЫЙ КОБАЛЬТ ИЗ РЕГОЛИТА МОРЯ КРИЗИСОВ

© 2020 г. А. В. Мохов[1,*], Т. А. Горностаева[1], П. М. Карташов[1], А. П. Рыбчук[1], академик РАН О. А. Богатиков[1]

Поступило 29.01.2020 г.
После доработки 10.02.2020 г.
Принято к публикации 13.02.2020 г.

Впервые в двух препаратах из пробы морского лунного реголита, доставленного автоматической станцией “Луна-24” обнаружен высокочистый самородный кобальт. Предположительно он был образован в процессе конденсации вещества из импактного газово-плазменного облака. Ранее самородной кобальт подобной чистоты отмечался только в продуктах низкотемпературной гидротермальной переработки гипербазитов.

Ключевые слова: самородный кобальт, лунный реголит, минералы Луны, высокотемпературный конденсат, стекло, ПЭМ, ЭДС

DOI: 10.31857/S268673972004012X

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнее изучение тонкодисперсной фракции лунного реголита с использованием высоколокальных методов электронной микроскопии уже позволило выявить большое количество новых для Луны минеральных фаз, среди которых были описаны самородные металлы и сплавы [1–3]. Поскольку автоматическая станция (АС) “Луна-24” доставила на Землю наиболее представительную и большую по объему пробу лунного реголита из всех АС, неудивительно, что основная часть этих находок была сделана именно в препаратах из Моря Кризисов. Несмотря на более чем двадцатилетний срок изучения этой пробы, она продолжает быть источником новой информации о минералогии лунного реголита. К сожалению, многие находки самородных металлов и интерметаллидов представлены единичными зернами субмикронных размеров.

В двух препаратах проб Л24104.1 и Л24181.1, отвечающих разным глубинам буровой колонки, обнаружены две частицы высокочистого самородного кобальта. Первая находка была сделана около 10 лет назад, что исключает вероятность заражения препаратов из одного источника.

Целью настоящей работы, входящей в цикл многолетних исследований тонкодисперсных фракций лунного реголита, является расширение знаний о минералогии Луны и процессах минералообразования в специфических условиях лунной поверхности, в том числе направленных на понимание механизмов образования и причин обилия здесь самородных металлов.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлись препараты проб лунного реголита, доставленного из Моря Кризисов АС “Луна-24” из участков керна соответствующих глубинам 104–105 и 181–182 см.

Изучение проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (Япония), оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) “INCA”-450 (Великобритания). Ускоряющее напряжение в 25 кВ выбрано из необходимости регистрировать диагностические линии элементов в области 12–18 кВ при поисковом режиме работы. Препарат готовился методом насыпания реголита на двусторонний графитовый электропроводящий скотч непосредственно сразу после вскрытия капсулы с пробой. Вслед за этим препарат герметизировался до момента исследований во избежание загрязнения образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первая обнаруженная частица свободно лежала на углеродном скотче-подложке вдали от других частиц препарата. Ее размер не превышал 3 мкм (рис. 1). Частица отличалась сложной комковатой в целом изометричной морфологией. В ее энергодисперсионном (ЭДС) спектре фикси-

[1] *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: avm8okhov@gmail.com*

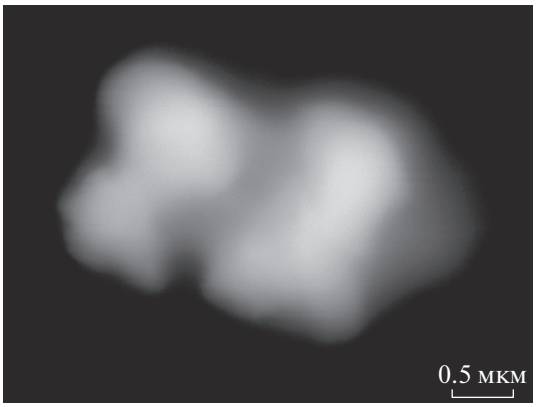

Рис. 1. Частица самородного кобальта из реголита АС “Луна-24” с глубины 104–105 см. СЭМ.

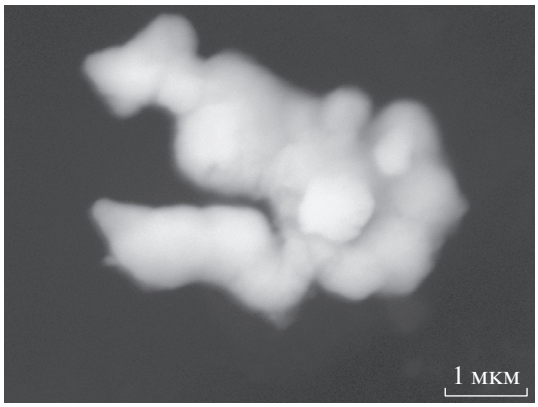

Рис. 2. Частица самородного кобальта из реголита АС “Луна-24” с глубины 181–182 см. СЭМ.

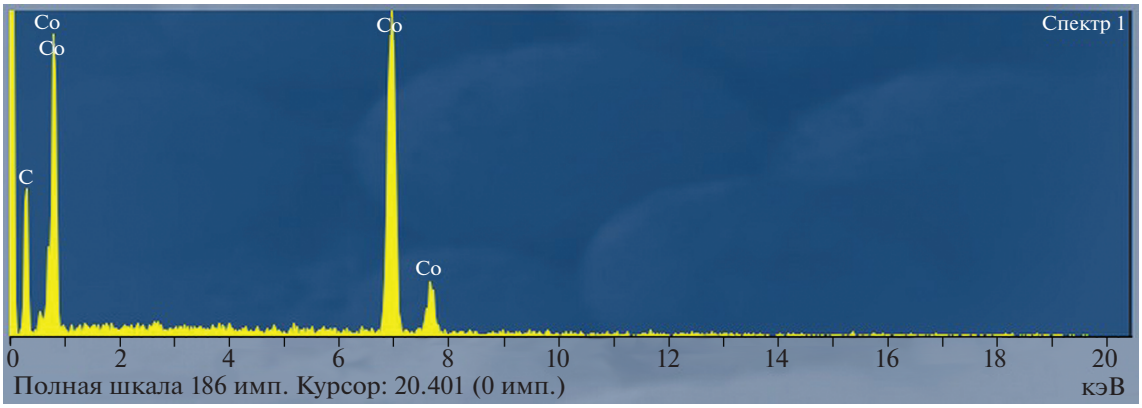

Рис. 3. ЭДС-спектр от частицы самородного кобальта из реголита АС “Луна-24” с глубины 181–182 см.

ровались пики *K*- и *L*-линий Co и пик углерода при отсутствии пиков кислорода и других элементов. Наличие пика углерода объясняется возбуждением углеродного скотча-подложки.

Вторая частица размером около 5 мкм (рис. 2) была обнаружена среди фрагментов стекла, пироксена (представленного структурами распада пижонита в авгите), самородного железа и титаномагнетита. Несмотря на большое различие между изученными пробами по глубине отбора керна, морфологически вторая частица очень похожа на первую – сложена комковатым агрегатом индивидов сферических очертаний. Поскольку частица находилась на расстоянии 5–7 мкм от соседних частиц, то ее спектр ЭДС посторонних пиков, кроме углеродного, возбужденного от скотча-подложки, не содержал (рис. 3). Картины распределения элементов, полученные для улучшения локальности при пониженном до 8 кВ ускоряющем напряжении, подтвердили отсутствие в этой частице как углерода и кислорода, так и других элементов.

Таким образом, в составе обеих частиц самородного кобальта каких либо примесей на уровне чувствительности метода не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание кобальта по колонке грунта “Луны-24” колеблется в пределах от 34 до 46 × 10^{-6} мас. %; при этом авторы [4] отмечают, что такое содержание Co обычно для лунных пород. Лонги с соавторами указывают, что максимальное содержание Co в оливинах из материковых пород Луны может достигать значений 200 × × 10^{-6} мас. % [5]. В лунных морских базальтах, а также в материковой брекчии содержание Co составляет до 50 × 10^{-6} мас. % [6]. Кроме того ими было отмечено, что в материковой лунной брекчии Co наряду с Ni содержатся преимущественно в составе мелких металлических частиц. Поскольку основная часть серы была испарена еще при формировании Луны [7], кобальт вместе с никелем проявляет там не халькофильные, а преимущественно сидерофильные и даже литофиль-

ные свойства. Неоднократно отмечалось [8] повышенное содержание кобальта и никеля в составе железных металлических частиц лунных пород. Статистический максимум содержания в них кобальта приходится на 1–2.5 мас. % при содержаниях никеля 25–45 мас. %. В образцах морского грунта, доставленных миссией "Аполлон-15" была найдена частица камасита, содержащая 3.2 мас. % Co [9]. То есть отклонения в сторону повышенных содержаний кобальта относительно среднего при пониженных содержаниях никеля также известны, как для коренных пород Луны, так и для полимиктовых пород (брекчий и агглютинатов) [8].

Что касается метеоритного вещества, то максимальное содержание Co фиксируется в железных метеоритах – до 1 мас. %, но также может достигать первых процентов. Так, в железном метеорите Чедер содержание кобальта 0.55 мас. % [10], что является средним содержанием для этого типа метеоритов. В аномально обогащенном никелем железном метеорите Butler содержание кобальта составляет 1.4 мас. %, что является повышенным по сравнению с другими железными метеоритами [11].

На Земле в природных условиях металлический Co был найден только один раз в протолочках золотосодержащих тальк-хлоритовых сланцев Айдырлинского района на Южном Урале [12]. Самородный кобальт здесь был установлен в полиминеральных агрегатах, сложенных цюсунитом, оксидами титана (рутилом, анатазом, брукитом), кварцем, мусковитом $2M_1$ и графитом. В этих же протолочных пробах был обнаружен вайрауит CoFe. Здесь восстановленные высококобальтовые фазы образовались в ходе низкотемпературных процессов серпентинизации и гидротермальной переработки гипербазитов.

В магматических условиях кобальт в расплаве неразделим с никелем и, при этом, кларк последнего на порядок выше, чем у кобальта. Дифференциация никеля и кобальта в природных условиях на Земле осуществляется лишь в относительно низкотемпературных условиях с участием водных флюидов. В промышленности чистый кобальт получается либо в гидрометаллургии, либо в высокотемпературных испарительных процессах [13].

В найденных нами лунных частицах кобальта примеси Ni не зафиксировано. Таким образом, магматическое происхождение этих частиц исключается. Гидротермальное происхождение в лунных условиях также маловероятно. По нашему мнению, наиболее вероятным вариантом образования самородного кобальта на Луне является его возникновение в качестве конденсата из высокотемпературного газово-плазменного облака во время импактного процесса. Форма частиц, их размеры и отсутствие примесей также не противоречат гипотезе об их импактном происхождении. В этом случае остается неявным источник Co, так как он в достаточных количествах содержится как в лунном грунте мишени, так и в составе возможных ударников. Каков бы ни был источник кобальта, содержащие его минеральные фазы были полностью испарены в процессе импактного взрыва, и частицы кобальта формировались путем атомарной или кластерной сборки из газово-плазменного облака.

Следует учитывать, что чистый металлический кобальт в технических изделиях не применяется, а служит лишь легирующим компонентом в различных сплавах и композитах. Единственным исключением является металлический ^{60}Co в источниках γ-излучения для медицины и техники [14].

Таким образом, учитывая единство состава и морфологии частиц кобальта, обнаруженных в разных препаратах лунного реголита с перерывом в 10 лет, а также методику пробоподготовки, исключающую лишние операции, загрязнение изученных проб техногенным кобальтом мы считаем невозможным.

ВЫВОДЫ

Впервые именно в природных, специфических лунных условиях обнаружен высокочистый самородный кобальт, сформировавшийся, по нашему мнению, в процессе конденсации вещества из импактного газово-плазменного облака.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы № 0136–2019–0010 "Исследования состава и структуры минерального вещества высоколокальными методами".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А.* (ред. Бортников Н.С.) Новые данные по минералогии Луны (Луна под микроскопом). М., "Наука", 2007, 128 с.
2. *Карташов П.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А., Богатиков О.А., Ашихмина Н.А.* Минеральные фазы на сколах стеклянных частиц в препарате тонкодисперсной фракции из пробы реголита АС "Луна-24". // Петрология. 2010. Т. 18. № 2. С. 115–133.
3. *Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Богатиков О.А., Сахаров О.А., Трубкин Н.В.* Структурное состояние самородного молибдена в реголите Луны // ДАН. 2016. Т. 471. № 1. С. 87–90.
4. *Барсуков В.Л., Дмитриев Л.В., Тарасов Л.С., Колесов Г.М., Шивалеевский И.Д., Рамендик Г.И., Гаранин А.В.* Геохимические и петрохимические особенности реголита и пород из Моря Кризисов / В кн.: Лунный грунт из моря кризисов М.: Наука. 1980. с.159–165.

5. *Longhi J., Durand S. R., Walker D.* The Pattern of Ni and Co Abundances in Lunar Olivines // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2010. V. 74. №. 2. P. 784–798.

6. *Wänke H., Dreibus G., Palme H.* Non-meteoritic Siderophile Elements in Lunar Highland Rocks -Evidence from Pristine Rocks // Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1979. V. 10. P. 611–626.

7. *Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M.* Lunar Sourcebook—A User's Guide to the Moon // Research supported by NASA, Cambridge, England, Cambridge University Press. 1991. 753 p.

8. *Wittmann A., Korotev R.L.* Iron-nickel - (-Cobalt) Metal in Lunar Rocks Revisited // Proc. Conf. Lunar Highlands Crust. 2013. V. 377. №. 394. P. 16.

9. *Axon H. J., Goldstein J. I.* Metallic Particles of High Cobalt Content in Apollo 15 Soil Samples // Earth and Planetary Science Letters. 1973. V. 18. №. 2. P.173–180.

10. *Агафонов Л.В., Попов В.А., Аношин Г.Н., Поспелова Л.Н., Забелин В.И., Кудрявцев В.И.* Минеральный состав, структура и распределение ЭПГ и РЗЭ в железном метеорите Чедер (Тува) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. №. 6. С. 794–806.

11. *Goldstein J.I.* Butler, Missouri: An Unusual Iron Meteorite // Science. 1966. V. 153. №. 3739. P. 975–976.

12. *Новгородова М.И.* Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 288с.

13. *Резник И.Д., Соболь С.И., Худяков В.М.* Кобальт. М.: Металлургия. 1995. В 2-х т. 440с.

14. *Перельман Ф.М., Зворыкин А.Я.* Кобальт и никель. М.: Наука, 1975. 215с.

NATIVE COBALT FROM REGOLITH OF MARE CRISIUM

A. V. Mokhov[a,#], T. A. Gornostaeva[a], P. M. Kartashov[a], A. P. Rybchuk[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*

For the first time, high-purity native cobalt was detected in two preparations from a probe of marine lunar regolith delivered by the AS "Luna-24". Presumably, it was formed during the condensation of a substance from an impact gas-plasma cloud. Previously, native cobalt of similar purity was observed only in products of low-temperature hydrothermal alteration of hyperbasites.

Keywords: native cobal, lunarregolith, moonminerals, high temperature condensate, glass, TEM, EDS