

УДК 523.34-36

## РТУТЬСОДЕРЖАЩИЙ СУЛЬФИД ИЗ ЛУННОГО РЕГОЛИТА МОРЯ ИЗОБИЛИЯ

© 2014 А.В. Мохов, П.М. Карташов, Т.А. Горностаева, О.А. Богатиков

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Москва, 119017; e-mail: avm@igem.ru*

В пробе реголита из Моря Изобилия описан агломерат разнообразных частиц силикатов разного состава, содержащий кроме того хорошо ограненный кубический кристалл самородного вольфрама и уникальный сложный сульфид меди и серебра с заметным содержанием ртути  $(\text{Cu}_{10}\text{Ag}_2\text{Hg})_{13}\text{S}_{14}$ . Он заметно отличается по составу от уже известных ртутьсодержащих сульфидов – балканита и даниэльсита и ближе к представителям блеклых руд ряда тетраэдрит-фрейбергит. Поскольку ассоциация самородного вольфрама с ртутным сульфидом свидетельствует о формировании агрегата при умеренных температурах, несопоставимых с температурами, характерными для импактных процессов, происхождение этого агломерата можно привязать лишь к эксгалитам лунных fumarol.

*Ключевые слова:* реголит, Луна, СЭМ, микроминералы, ЭДС, вольфрам, сульфид ртути.

Фрагменты лунного реголита были доставлены на Землю в 70-х годах прошлого века автоматическими станциями (АС) «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» (рис. 1а). Морской лунный грунт был отобран и доставлен на Землю АС «Луна-16» из Моря Изобилия и АС «Луна-24» из Моря Кризисов, а материковый – АС «Луна-20» (материковый перешеек между двумя вышеназванными морями) (рис. 1б). Наряду с пробами, доставленными американскими астронавтами, этот лунный грунт детально изучался в разных странах в ведущих научных центрах и лабораториях. Результаты этих исследований были обобщены в обзоре Дж. Фрондел (Frondel, 1975). После значительного перерыва в начале этого века исследования минералов лунного грунта были возобновлены с использованием более совершенной приборной базы обладающей лучшей локальностью.

Аналитический сканирующий электронный микроскоп, оснащенный энергодисперсионным спектрометром (ЭДС), является наиболее подходящим инструментом для поиска и идентификации минеральных фаз субмикронной размерности в тонкодисперсной фракции лунного реголита. Именно с его помощью (JSM-5300LV + INCA-450) выполнялись исследования проб из Моря Изобилия. Методики пробоподготовки и исследований были изложены нами ранее (Кар-

ташов и др., 2010; Мохов и др., 2007). Основной задачей этой, как и ранее выполненных работ, являлось выявление минералообразующих процессов в специфических условиях низкой гравитации, отсутствия кислородной атмосферы и свободной воды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В одном из препаратов был обнаружен спаянный стеклом агломерат разнообразных частиц (рис. 2), в основном силикатов разного состава, содержащий две фазы наиболее яркие в отраженных электронах. Их качественный анализ был выполнен с получением карт распределения элементов по площади. Количественные измерения состава были проведены с использованием методики смены ориентации образца относительно детектора (Карташов и др., 2010), что позволило диагностировать обе эти минеральные фазы.

Одной из них оказался самородный вольфрам (рис. 3, 4), представленный, в частности, и хорошо ограненным кубическим кристаллом. Как показали карты распределения элементов, источником пика углерода на его рентгеновском ЭДС-спектре (рис. 4), являлся углеродный скотч, на который был нанесен препарат.

Другой фазой оказался сульфид меди и серебра с заметным содержанием ртути (рис. 3, 5).

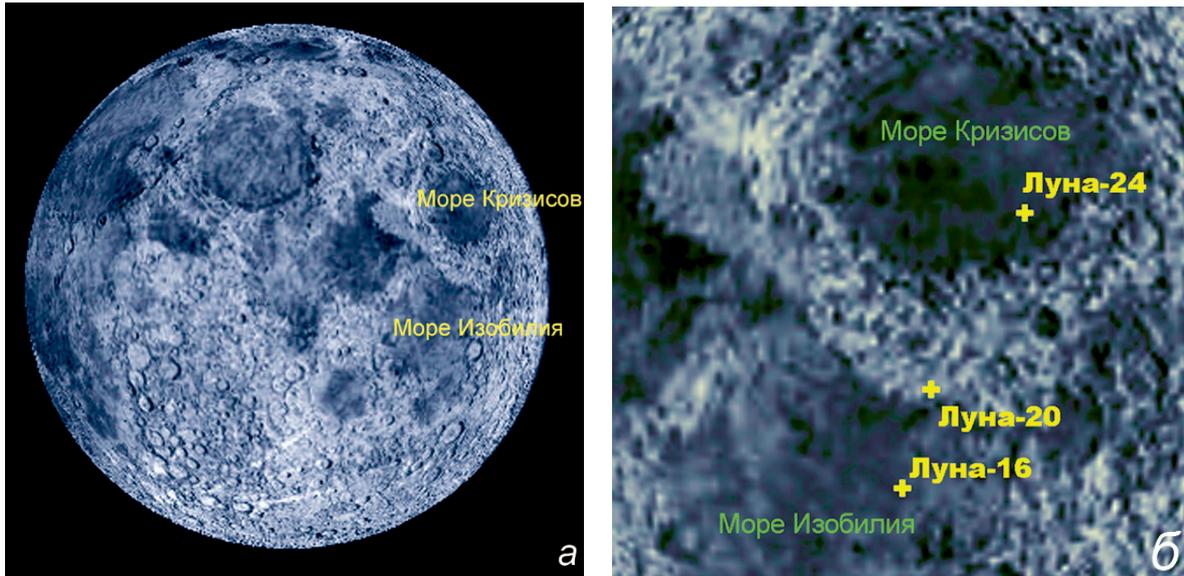


Рис. 1. Места отбора проб лунного реголита советскими автоматическими станциями.

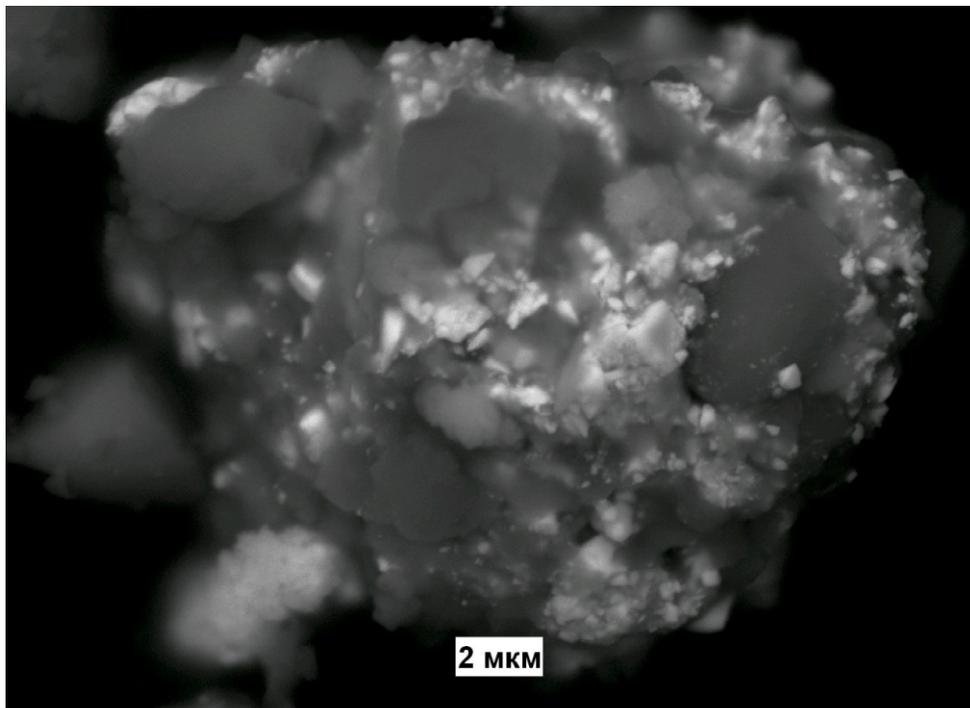


Рис. 2. Общий вид агрегата частиц из пробы реголита АС «Луна-16». Отраженные электроны.

Из-за тесной ассоциации с находящимися рядом фазами в его ЭДС-спектре (рис. 5) фиксируются пики от стекла, силикатов и самородного вольфрама, и только с помощью карт распределения элементов удалось дифференцировать его истинный состав и вычистить из спектра посторонние элементы. Усредненные данные трех количественных анализов, выполненных с вращением образца относительно детектора, позволили представить формулу этой фазы в виде  $(\text{Cu}_{10}\text{Ag}_2\text{Hg})_{13}\text{S}_{14}$ .

Теория «ртутного ветра» (Беляев, 1975) на Луне предусматривает испарение и миграцию паров ртути из областей, подвергающихся сол-

нечному нагреву и концентрацию адсорбированной ртути в постоянно затененных областях. Логично предположить, что в такой ситуации ртуть будет оседать на всех доступных поверхностях, не давая существенных ее концентраций. В то же время валовое содержание ртути в лунных породах может быть значительным (Gladstone et al., 2010). В нашем же случае ртуть сконцентрирована в составе одной единственной фазы. Так что образование сложного сульфида, содержащего ртуть, вряд ли можно связать с феноменом «ртутного ветра».

В настоящее время известно лишь два минерала, качественный элементный состав которых

МОХОВ и др.

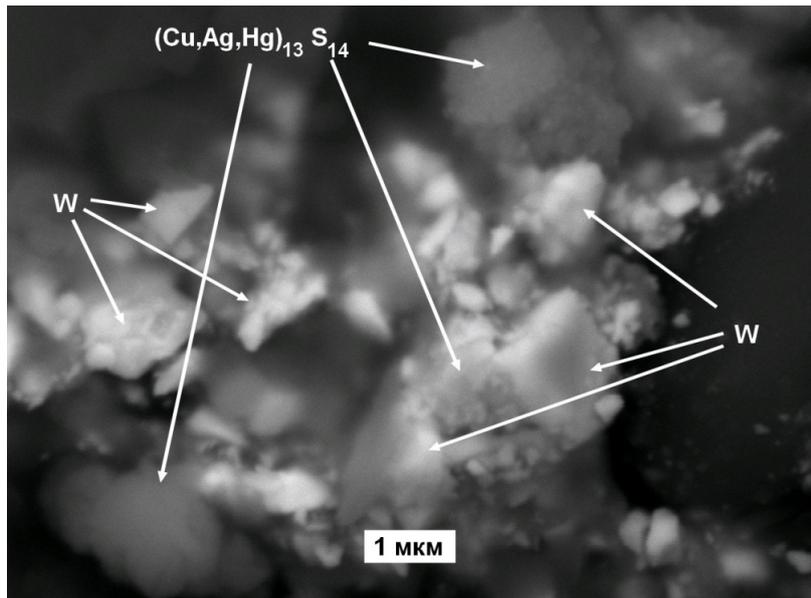


Рис. 3. Сrostки ртутьсодержащего сульфида с самородным вольфрамом.

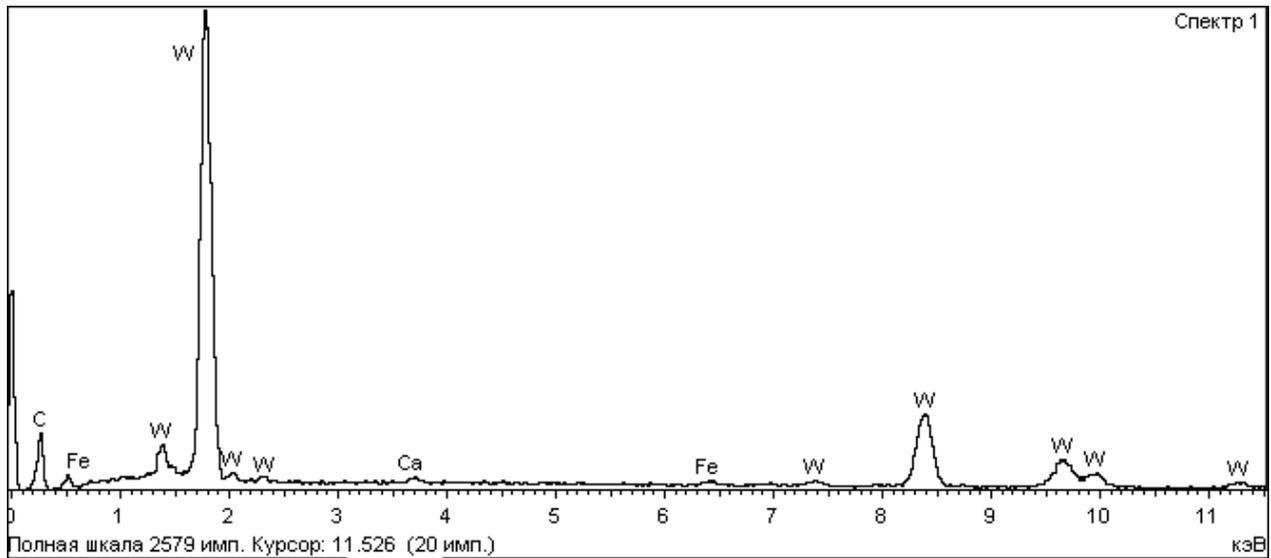


Рис. 4. Энергодисперсионный рентгеновский спектр от частицы самородного вольфрама.

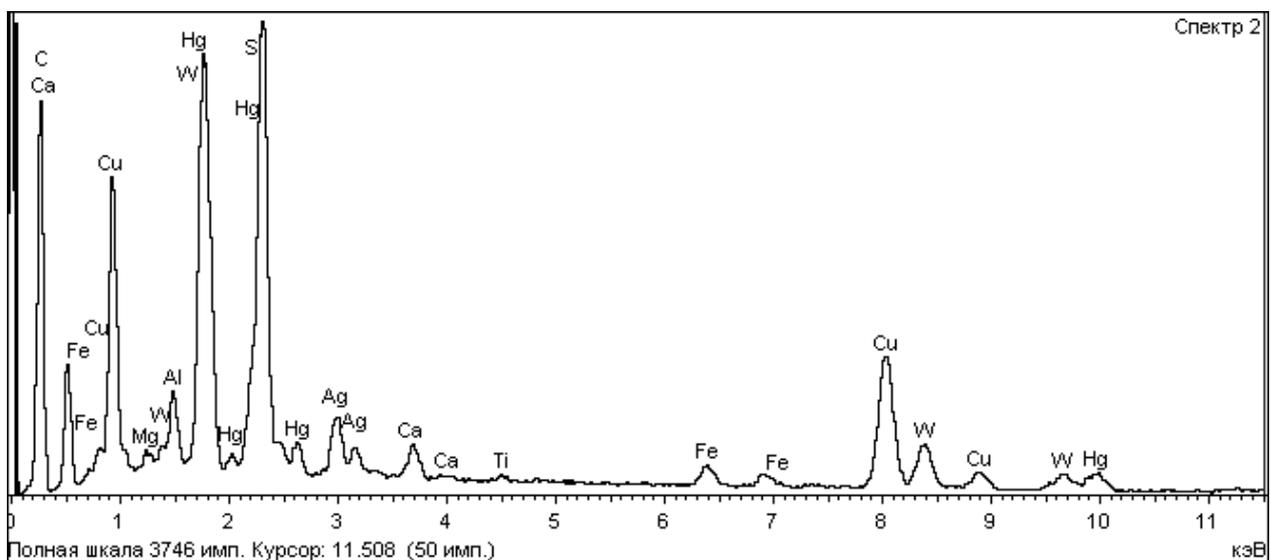


Рис. 5. Энергодисперсионный рентгеновский спектр от Cu-Ag-Hg-сульфида.

полностью соответствует обнаруженной фазе: балканит  $\text{Cu}_9\text{Ag}_5\text{HgS}_8$  и даниэльсит  $(\text{Cu}, \text{Ag})_{14}\text{HgS}_8$ . Однако нетрудно заметить, что соотношение металлов и серы в них совершенно иное. Вместе с тем, довольно близкое соответствие мы находим в формулах блеклых руд ряда тетраэдрит-фрейбергит  $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4\text{Me}_2]\text{Sb}_4\text{S}_{13} - \text{Ag}_6[\text{Cu}_4\text{Me}_2]\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  где Me может быть в частности ртутью (в разновидности тетраэдрита – шватцит). Если представить себе ртутно-серебряный тетраэдрит с вакансиями в позиции сурьмы, то его формула  $\text{Me}_{12}\text{S}_{13}$  (где Me=Cu, Ag, Hg) будет близка к найденному нами  $\text{Me}_{13}\text{S}_{14}$ . Однако наличие мелких и высокозарядных катионов  $\text{Sb}^{5+}$ ,  $\text{As}^{5+}$ ,  $\text{Te}^{6+}$  является определяющей чертой структуры всех минералов группы блеклых руд и вакансий в этой позиции никогда не наблюдались. Таким образом, мы столкнулись с совершенно уникальным сложным сульфидом, не имеющим аналогов среди известных науке минералов. Вместе с тем, весь опыт земной минералогии говорит о том, что сложные ртутные сульфиды и сульфосоли встречаются только в средне- и низкотемпературных гидротермальных жилах полиметаллических месторождений различной формационной принадлежности и в колчеданных месторождениях. Не имея на Луне аналогов гидротермалитов данных формационных типов, мы, с большой долей вероятности, можем привязать нашу находку только лишь к эксгалатам лунных фумарол. Образование сульфидной минерализации на земных фумаролах резко ограничено присутствием там кислородной атмосферы, однако и здесь мы знаем примеры обильной эксгалативной сульфидной минерализации (например, вулканы Кудрявый (Чаплыгин и др., 2004; Юдовская и др., 2003; Yudovskaya et al., 2006), Мутновский (Zelenski et al., 2006; Zelenski et al., 2009), Вулкано (Campostrini et al., 2011) и некоторые другие). На Луне же не существует ограничений связанных с окислением новообразованных сульфидных фаз при соприкосновении с атмосферой.

Дополнительную информацию нам дает тесная ассоциация нового сульфида с хорошо окристаллизованным самородным вольфрамом. С одной стороны, самородный вольфрам уже был обнаружен в вулканических эксгалатах именно тех земных вулканов, где как раз отмечалась обильная и разнообразная сульфидная минерализация (Yudovskaya et al., 2005). Вместе с тем, неоднократно описывавшийся нами самородный вольфрам импактного происхождения (Карташов и др., 2010; Мохов и др., 2007) имеет совершенно иную морфологию. Для него характерны сферические агрегаты тонкого, нано-глобулярного строения. Их морфология отражает условия быстрой кристаллизации в

ходе конденсации высокотемпературного газоплазменного облака в течение десятков минут (реально эффективная стадия этих процессов протекает в течении секунд и их долей) после импактного события. Динамику и скорость развития импактных процессов можно ориентировочно сопоставить со временем формирования «грибов» ядерных взрывов, сопоставимых по мощности с импактными процессами. Однако, в данном случае мы столкнулись с совершенными кубическими кристаллами, видимо выросшими из газовой фазы с невысокой концентрацией металла на протяжении сравнительно продолжительного отрезка времени (десятки и сотни часов как минимум). Важно подчеркнуть, что тесная ассоциация самородного вольфрама с ртутным сульфидом свидетельствует об образовании этого вольфрама при умеренных температурах, несопоставимых с температурами плавления/испарения вольфрама имевших место в импактных процессах. При этом следует заметить, что и типовой земной самородный вольфрам (Новгородова и др., 1995; Mills et al., 2011) образовывался в гидротермальных кварцевых жилах также при сравнительно невысоких температурах (в пределах поля термической стабильности фенгита —  $<400^\circ\text{C}$ ).

Таким образом, формирование встреченной нами тесной парагенетической ассоциации нового медно-серебро-ртутного сульфида и самородного вольфрама могло происходить, по нашему мнению, в результате осаждения из лунных фумарольных газов. Заключительные стадии излияния колоссальных объемов базальтовых лав при образовании лунных морей не могли не сопровождаться и соответствующей им по масштабности фумарольной активностью. Однако следы этой былой активности, имевшей место чуть менее двух миллиардов лет назад, за прошедшее с тех пор время были в значительной мере замаскированы процессами реголитообразования (включающими в себя как многократную импактную переработку, так и разнообразные факторы космического выветривания). Тем не менее, отсутствие на Луне агрессивной в химическом отношении атмосферы и свободной воды, способствовало сохранению реликтовых минеральных ассоциаций былой лунной фумарольной деятельности.

## ВЫВОДЫ

Тщательное изучение лунного реголита с использованием современных высоколокальных методов позволяет нам выявлять реликтовые фумарольные ассоциации и отличать их от первично-магматических и импактных минеральных ассоциаций.

## Список литературы

- Беляев Ю.И.* О ртутном ветре между континентальными и морскими районами Луны // Геохимия. 1975. № 5. №. 4-6. С. 768-770.
- Карташов П.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А., и др.* Минеральные фазы на сколах стеклянных частиц в препарате тонкодисперсной фракции из пробы реголита АС «Луна 24» // Петрология. 2010. Т. 18. № 2. С. 115-133.
- Мохов А.В., Карташов П.М., Богатилов О.А.* Луна под микроскопом. Новые данные по минералогии Луны. М.: Наука, 2007. 128 с.
- Новгородова М.И.* Самородный вольфрам с включениями оксида иттрия из аллювия реки Большая Поля (Приполярный Урал). // ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 681-684.
- Чаплыгин И.В., Мозгова Н.Н., Брызгалов И.А., Мохов А.В.* Кадмоиндит  $CdIn_2S_4$  – новый минерал из fumarol вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Записки ВМО. 2004. Ч. СXXXIII. № 4. С. 21-27.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Чаплыгин И.В. и др.* Формы нахождения золота в продуктах кристаллизации современных высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый, Курильские острова // ДАН. 2003. Т. 391. № 4. С. 535-539.
- Campostrini I., Demartin F., Gramaccioli C.M., Russo M.* Vulcano – tre secoli di mineralogia. Associazione Micromineralogica Italiana press, 2011. 344 p.
- Fronde J.W.* Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
- Gladstone G.R., Hurley D.M., Retherford K.D., Feldman P.D., Pryor W.R., Chaufray J-Y., Versteeg M., Greathouse T.K., Steffl A.J., Throop H., Parker J.W., Kaufmann D.E., Egan A.F., Davis M.W., Slater D.C., Mukherjee J., Miles P.F., Hendrix A.R., Colaprete A., Stern S.A.* LRO-LAMP Observations of the LCROSS Impact Plume // Science. 2010. V. 330. № 6003. P. 472-476.
- Mills S.J., Kartashov P.M., Ma C., Rossman G.R., Novgorodova M.I., Kampf A.R., Raudsepp M.* Yttriaite-(Y): the natural occurrence of  $Y_2O_3$  from the Bol'shaya Pol'ya river, Russian Federation // American Mineralogist. 2011. V. 96. № 5. P. 1166-1170.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Mokhov A.V.* Native elements in high-temperature mineral associations of the Kudryavy volcano // Abstracts of ACFAS Conference. Chikoutimi, Quebec, May 9-13. 2005.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Gorbacheva S.A.* Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: evidence from the Kudryavy volcano, Kurile islands // Miner Deposita. 2006. V. 40. Is. 8. P. 828-848.
- Zelenski M., Balić-Žunić T., Bindi L., Garavelli A., Makovicky E., Pinto D., Vurro F.* First occurrence of iodine in natural sulfosalts: The case of mutnovskite,  $Pb_2AsS_3$  (I, Cl, Br), a new mineral from Mutnovsky volcano, Kamchatka Peninsula, Russian Federation // American Mineralogist. 2006. V. 91. № 1. P.21-28.
- Zelenski M., Garavelli A., Pinto D., Vurro F., Možlo Y., Bindi L., Makovicky E., Bonaccorsi E.* Tazieffite,  $Pb_{20}Cd_2(As,Bi)_{22}S_{50}Cl_{10}$ , a new chloro-sulfosalt from Mutnovsky volcano, Kamchatka Peninsula, Russian Federation // American Mineralogist. 2009. V. 94. № 6. P. 1312-1324.

## MERCURY-BEARING SULPHIDE FROM LUNAR REGOLITH OF MARE FECUNDITATIS

**A.V. Mokhov, P.M. Kartashov, T.A. Gornostaeva, O.A. Bogatkov**

*Institute Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS*

The article describes in the probe of regolith from Mare Fecunditatis the agglomerate of different silicate particles, containing well formed cubic crystal of native tungsten and unique complex copper and silver sulphide with essential mercury content with composition  $(Cu_{10}Ag_2Hg)_{13}S_{14}$ . This sulphide differs significantly from two already known minerals of similar qualitative composition – balkanite and danielsite, and it is more close to members of fahlores from tetrahedrite-freibergite series. Whereas the association of native tungsten with mercury sulphide gives evidence that this aggregate is formed under moderate temperatures, which are incommensurable with those, typical for impact processes. Thus, the origin of this agglomerate can be related to Lunar fumaroles activity.

Keywords: regolith, Moon, SEM, microminerals, EDX, tungsten, mercury sulphide.