

Изучение состава и минеральных парагенезисов, слагающих лунные породы и поверхностный реголит, позволяют установить роль эндо- и экзогенных факторов при минералообразовании на Луне. Реальные сведения о минералогии Луны основаны на результатах изучения проб, взятых из девяти точек, причём шесть из них характеризуют морские районы, а три континентальные. Все имеющиеся в распоряжении землян пробы лунного вещества были доставлены в результате полётов шести американских пилотируемых кораблей – Аполлон-11, 12, 14, 15, 16 и 17 (1969–1972 гг.) и трёх советских автоматических возвращаемых станций – Луна-16, 20 и 24 (1970–1976 гг.).

Сразу после получения первых образцов лунного материала в лучших лабораториях мира начались детальные его исследования с привлечением самой современной на тот момент аппаратуры, где далеко не последнюю роль играла электронная микроскопия. К концу 70-х годов было определено чуть меньше двух сотен лунных минералов, имеющих свои земные аналоги, большая часть из которых была описана в обобщающем справочнике Дж. Фрондел [Frondel, 1975]. Четыре же минерала, неизвестные к тому моменту на Земле, были открыты впервые: армолколит, пироксферроит, транквиллитит и иошиокаит.

Отсутствие нового минерального материала с Луны привело к практически полному снижению интереса к вопросам минералогии ближайшего Земного соседа. И лишь в последние годы 20-го века развитие аналитической аппаратуры, обладающей более высокой чувствительностью и разрешением, послужило побудительной причиной возобновления изучения минералов Луны.

По результатам первоначальных исследований возобладала точка зрения, что формирование поверхности Луны, в отличие от Земли, происходило не за счёт внутренних, а за счёт внешних процессов, связанных с падением крупных метеоритов. Именно в связи с их падением связывают образование многих металлических фаз, фракционирование и образование восстановленных плёнок, стёкол и многих минеральных фаз. Однако использование аналитической аппаратуры последних поколений при возобновившихся исследованиях лунного грунта дают основание для серьёзного дополнения устоявшейся теории приданием большей значимости магматизму в формировании облика нашего спутника.

При этом одной из самых актуальных задач является определение критериев, на основании которых можно было бы уверенно диагностировать механизм образования лунных минералов. Если диагностировать материнские лунные минералы как эндогенные можно с достаточной степенью уверенности исходя из аналогии с земными, то отличия минералов импактного происхождения от вулканических эксгалатов выявить непросто. Для этого, как оказалось, наибольшую информативную ценность представляют микронные и наноразмерные выделения акцессорных и рудных минералов, металлов и их соединений. Ранее этот круг объектов пристально не изучался в виду недостаточной локальности исследовательской аппаратуры.

В связи с этим основной упор был сделан на локальное изучение минеральных фаз ранее плохо исследованных самых тонких фракций лунного реголита. Пробы реголита – обломочного слоя переменной мощности, покрывающего всю поверхность Луны, представляют собой хорошо перемешанные, главным образом полимиктовые брекчии с признаками многократных ударных явлений, космического (солнечного) излучения и термального воздействия. Именно реголит составлял основную массу проб лунного грунта, доставленного советскими автоматическими лунными станциями (АС) «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24». Именно самая тонкая фракция, менее 85–74 мкм, изучалась последние годы и продолжает изучаться методами аналитической сканирующей (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (рисунки 1–3).

Для получения достоверных результатов при изучении столь мелких объектов методами электронной микроскопии очень важно избежать контаминации образцов в процессе пробоподготовки. Например, при полировке столь мелких зёрен в микротрещинах и порах может забиться полировочный материал, который потом может быть интерпретирован как природный. Видимо наименее рискованный в плане заражения пробы посторонними фазами является самый простой метод пробоподготовки для СЭМ: содержимое вскрытой капсулы рассыпается тонким слоем на двухсторонний графитовый скотч, предварительно приклеенный к электронно-микроскопическому столику. После чего препарат сразу помещается в электронный микроскоп для его изучения. В перерывах образец убирается в стерильную чашку Петри и герметизируется.

Дополнительные меры приходится применять для повышения точности определения содержания элементов при энергодисперсионном анализе в СЭМ. Учитывая, что обнаруженные частички имеют неправильную форму, и их непосредственный анализ не может считаться достоверно количественным, используется специально разработанная методика, предусматривающая многократный физический разворот анализируемой частицы относительно детектора и регистрацию соответствующих этим положениям спектров. На основании обработки полученного массива спектров удаётся существенно увеличить точность проведённых определений содержаний элементов.

В результате исследования тонкодисперсной фракции лунного реголита методами СЭМ было обнаружено около ста новых минеральных фаз, как правило, субмикронного размера. И среди них почти тридцать были открыты впервые в природе. Многие из них были описаны в монографии [Мохов и др., 2007]

Далеко не всегда удаётся однозначно интерпретировать полученные данные и однозначно определить характер процесса, приведшего к образованию той или иной фазы. Зачастую его приходится лишь предполагать с той или иной степенью вероятности. Так, например, такие самородные металлы, как Mo, W и Re можно достаточно уверенно отнести к импактным, то Al, Fe, Cu и Zn могут быть образованы как в ходе импактных событий, так и в результате эксгальтативной вулканической деятельности. Ну а сросток Sn, Pb и Au, как и самородные Sb, Ag, Au и Pt, наиболее вероятно имеет вулканическое фумарольное происхождение.

Такая же неопределённость в интерпретации механизмов минералообразования свойственна и для обнаруженных фаз более сложного состава.

Возможно, более однозначной окажется интерпретация изучения лунного реголита более высоколокальными методами ПЭМ. В частности, определяющая генетическая информация может быть получена при высокоразрешающем изучении стёкол, заключающих в себе те или иные лунные минеральные фазы. Так, например, выяснилось, что частички самородного молибдена оказались заключены в тонкий обволакивающий слой высокремниевое импактного стекла, что только подтвердило формирование Mo из газовой фазы при ударных метеоритных событиях.

Таким образом, именно электронная микроскопия, вероятнее всего, поможет решить проблему диагностики минералообразующих процессов для лунного реголита.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 12-05-00624а и программы ОНЗ-5.

Литература

1. *FrondeI J.W.* Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
2. *Мохов А.В., Карташов П.М., Богатиков О.А.* Новые данные по минералогии Луны (Луна под микроскопом). М.: «Наука», 2007. 128 с.

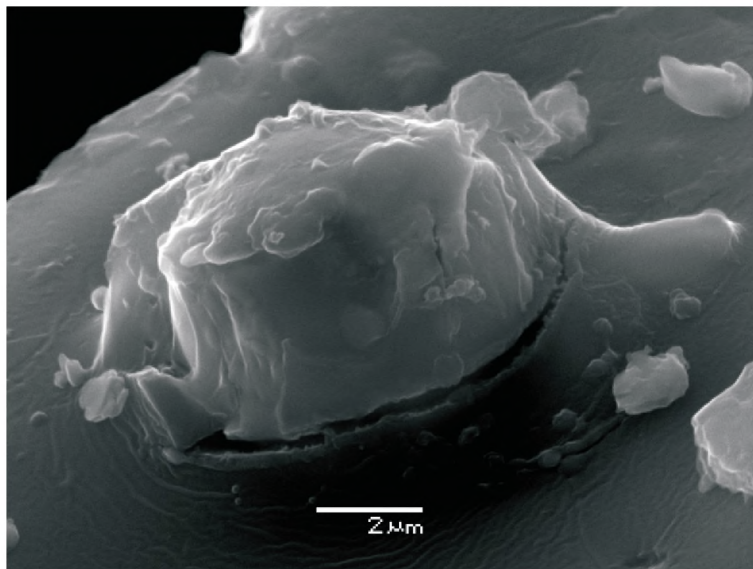


Рисунок 1 – Самородный Мо под слоем импактного стекла. Вторичные электроны

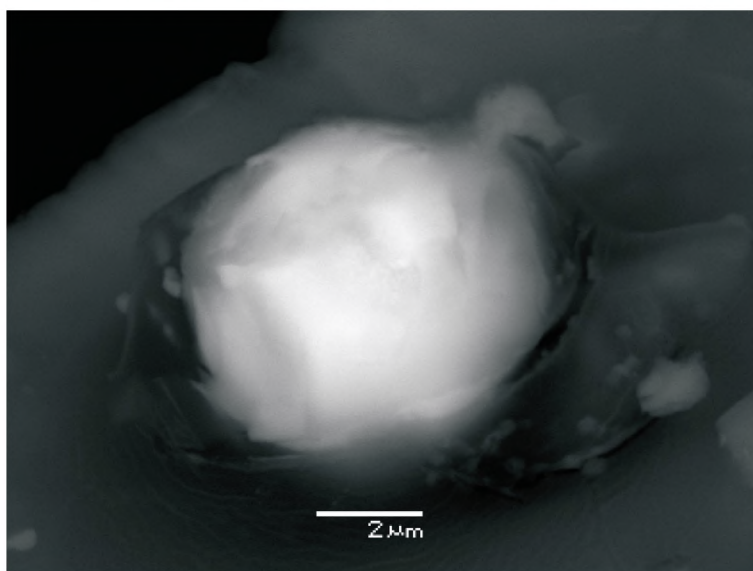


Рисунок 2 – Тот же участок с самородным Мо. Отражённые электроны

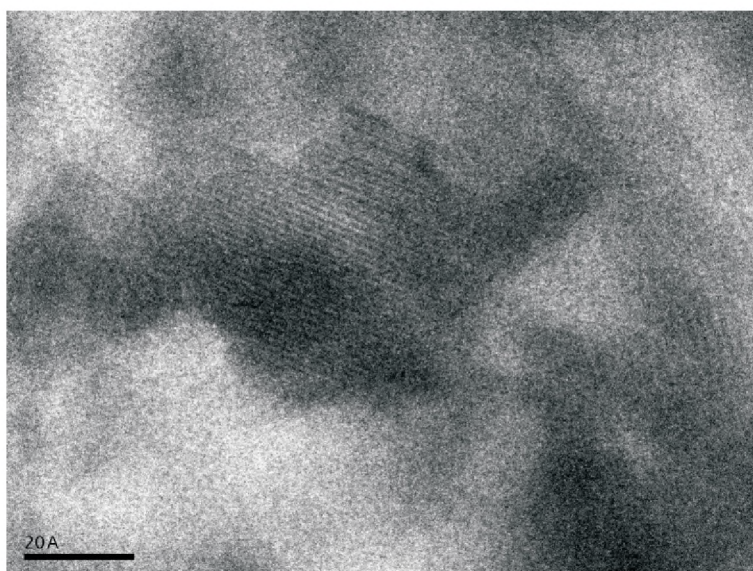


Рисунок 3 – Наноразмерный кристалл самородного Мо в стекле. Проходящие электроны