

РЕАЛЬНАЯ СТРУКТУРА  
КРИСТАЛЛОВ

УДК 523.34-36

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ В ИЗУЧЕНИИ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

© 2021 г. А. В. Мохов<sup>1,\*</sup>, П. М. Карташов<sup>2</sup>, Т. А. Горностаева<sup>1</sup>, А. П. Рыбчук<sup>1</sup>, О. А. Богатиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: avm8okhov@gmail.com

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 20.07.2020 г.

Принята к публикации 23.07.2020 г.

Представлены итоги многолетних исследований минералогии лунного реголита, полученные с помощью методов аналитической растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Выявлено 105 новых для Луны минеральных фаз, 43 из которых впервые открыты в природных условиях, дана электронная ссылка на итоговую таблицу. Приведен пример изучения конденсатных стекол и самородного молибдена.

DOI: 10.31857/S0023476121040147

ВВЕДЕНИЕ

Термин “реголит” чаще применяется к лунному грунту, особенно в отечественной литературе — подразумеваются несцементированные продукты дезинтеграции и переотложения лунных горных пород, чехлом покрывающие поверхность Луны. Реголит состоит из фрагментов лунных пород и минералов размером от пылевых частиц в доли миллиметра до десятков сантиметров в диаметре. Такой мелкодисперсный материал состоит из обломков пород Луны, частиц метеоритов и продуктов многократных импактов, переплавивших, раздробивших и перемешавших материал поверхности.

Минералогия лунного реголита вызвала большой интерес мирового геологического сообщества в 60–70-х годах прошлого столетия. Лучшие исследователи (петрографы, минералоги, геохимики) того времени были вовлечены в эти работы. В 1975 г. была издана книга Дж.В. Фрондел [1], обобщившая результаты первой стадии исследования лунных материалов. На тот момент на Луне было известно около 60 минеральных видов, три из них были описаны впервые: армоколлит [2], пироксферроит [3] и транквилитиит [4]. Вторая стадия исследований (1975–1999 гг.) характеризуется значительным ослаблением интереса к лунной минералогии, особенно к минералогии реголита [5]. В то же время выявили первые лунные метеориты. Минералогия Луны была расширена несколькими новыми минералами: самородным алюминием [6], йошиокаитом [7] и итробетафитом [8].

Обширный список публикаций, посвященных изучению Луны, размещен на сайте НАСА (<https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/lscref45.pdf>), в нем много работ по исследованию породообразующих минералов (оливинов, пироксенов, шпинелидов, плагиоклазов).

Третья стадия исследований наблюдается сейчас. На фоне развития международных Лунных программ она характеризуется прежде всего исследованием материала лунных метеоритов вместо старых материалов, доставленных миссиями “Аполлон” и автоматическими станциями (АС) “Луна”. Считается, что старые лунные образцы достаточно хорошо изучены. Но исследования нашей группы, проводившиеся в течение двух десятков лет, демонстрируют, что они все еще сохраняют большой объем новой и уникальной минералогической информации.

Минералы лунного реголита стали изучать почти сразу после доставки на Землю проб грунта АС “Луна-16” (Море Изобилия), “Луна-20” (материковый грунт) и “Луна-24” (Море Кризисов). В первые годы были получены важные результаты: обнаружены галит и сильвин, самородный алюминий, Cu–Zn-интерметаллид, с помощью микродифракции электронов диагностированы полиморфы 6Н и 24R муассанита и акаганеит. Выявлены нульвалентные формы ряда элементов в поверхностных слоях стеклянных фрагментов [9]. Тем не менее к концу 70-х годов интерес к изучению лунных минералов снизился, и в начале 80-х исследования были свернуты.

Они возобновились в конце 90-х годов, когда институт был оснащен новым на тот момент ана-

литическим растровым электронным микроскопом (РЭМ) JSM-5300 (JEOL) с энергодисперсионным спектрометром Link ISIS. Через несколько лет JSM-5300 сменил низковакуумный прибор JSM-5610LV (JEOL) со спектрометром INCA-450 (позднее AZtec). Это оборудование позволяло проводить исследования с субмикронной локальностью, что дало основание возобновить изучение минеральных фаз лунного реголита на новом уровне. Позже к исследованиям по этой тематике был привлечен просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 (JEOL), оснащенный спектрометром SDD80 INCA IETEM250 (позднее AZtec), обеспечивающий наноразмерную локальность. Все энергодисперсионные спектрометры – производства фирмы Oxford Instruments.

В этих исследованиях акцент был сделан на изучение самой тонкой фракции лунного реголита, пробы которого с мест посадок трех советских лунных АС были предоставлены из хранилища ГЕОХИ РАН. Было обнаружено много новых для Луны минеральных фаз, часть из которых ранее в природе не встречалась. Также были подтверждены некоторые минералы, лунный генезис которых ранее считался сомнительным. Полный список найденных в лунном реголите минеральных фаз можно посмотреть в таблице на сайте ГЕОХИ РАН [9].

#### МЕТОДИКА ПРОБОПОДГОТОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

При подготовке тонкодисперсных проб особое внимание уделяли их чистоте и предотвращению загрязнения посторонними фазами. На стандартные алюминиевые столики РЭМ наклеивали двухсторонний электропроводящий скотч, в составе которого в пределах чувствительности энергодисперсионного спектрометра фиксировались только углерод и кислород. Свободную от скотча поверхность столика покрывали графитовым клеем во избежание флуоресценции Al. Сразу после вскрытия пробу грунта тонким слоем насыпали на внешнюю сторону скотча, с которого непосредственно перед этим удаляли защитную пленку. Затем столик с приготовленной пробой закрывали в стерильной чашке Петри и убирали в специальное хранилище до момента исследования в РЭМ. Таким образом, в максимальной степени исключался риск заражения проб артефактами, что представляет собой наибольшую угрозу достоверности получаемых результатов.

Обломочные, крупнее основной части материала, кусочки стекла переносили иголкой дикообразно из пробирки на углеродный скотч-подложку, после чего пробу также закрывали до просмотра. Готовые препараты ничем не напыляли для стекания заряда, за исключением самых крупных частиц, которые напыляли углеродом.

Первоначально фрагменты реголита тщательно просматривали в режиме COMPO (Shadow) в режиме отраженных электронов РЭМ с увеличением порядка  $\times 3000$ . Учитывая поставленные задачи, наибольший интерес вызывали акцессорные минералы и другие фазы с увеличенным по сравнению с основной силикатной матрицей средним атомным номером. Выявленные по контрасту фрагменты анализировали на элементный состав.

В случае необходимости, особенно для определения вхождения кислорода в состав анализируемой частицы, регистрировали картины распределения элементов с использованием характеристического рентгеновского излучения. Так выполняли предварительную диагностику фаз и фиксировали их взаимосвязь. Количественный анализ осуществляли на полированных шлифах и на отдельных частицах.

Зачастую препарат лунного грунта представлял собой субмикронные частицы, рассыпанные тонким слоем на углеродном скотче. В этом случае при осуществлении количественного рентгеноспектрального анализа возможны два кардинально различающихся варианта: размер исследуемой частички меньше зоны генерации рентгеновского излучения и, наоборот, крупнее этой области.

*Вариант 1.* Размер частиц сравним или меньше зоны генерации. Форма частиц обычно неправильная. Оптимальным решением в этом случае является анализ с использованием соотношения пик/фон, однако в большинстве случаев при стандартном обеспечении спектрометров этот метод реализован недостаточно корректно, поэтому приходится использовать фрZ-метод с нормировкой на 100%.

*Вариант 2.* Если размер анализируемой частицы превышает предполагаемые размеры зоны генерации рентгеновского излучения, то имеет значение ее собственная геометрия и положение относительно единственного энергодисперсионного детектора. В этом случае после предварительной калибровки по кобальту проводят стандартный анализ с отключенной нормировкой. В результате выбирают точку на поверхности частицы, сумма концентраций элементов в которой наиболее близка к 100%. Таким образом определяют наиболее горизонтальный участок на поверхности частицы. На следующем этапе в этой точке выполняют анализ с включенной нормировкой. Нормировку включают для того, чтобы не создавалось впечатление о выполнении количественного анализа с соблюдением классических норм для полированного образца. Ненормированный анализ осуществляется только в случае плоской горизонтальной поверхности, что может быть подтверждено разворотом образца относительно

детектора. В этом случае результаты определения концентраций элементов и их сумма не меняются при различной ориентации по отношению к детектору. Во всех случаях анализ изучаемой частицы выполняется либо по методике первого, либо второго варианта.

При исследовании препарата возможны несколько ситуаций расположения частицы по отношению к ее окружению: частица, расположенная на углеродном скотче, изолирована от других; частица находится в тесном окружении других частиц, в том числе массивных; маленькая частица на/в частице большего размера; маленькая частица на/в массивной частице в окружении других частиц, в том числе крупных.

*Ситуация 1.* В этом случае анализ выполняется в соответствии с вариантом 1 или 2 в зависимости от соотношения между зоной генерации и размерами частицы.

*Ситуация 2.* Помимо определения состава частицы анализируют все окружающие частицы в радиусе не менее 10 мкм. После этого образец разворачивают на  $90^\circ$ – $120^\circ$ . Повторный анализ выполняется в тех же точках. В случае получения данных, резко отличающихся от предыдущих результатов, осуществляется еще один поворот в ту же сторону. Собранный массив данных достаточно для учета влияющих факторов, и при дальнейшей обработке становится возможным получить вполне адекватные результаты.

*Ситуация 3.* Помимо определения состава основной частицы выполняют несколько анализов матрицы, на/в которой она находится. Это позволяет в ряде случаев учесть влияние элементов матрицы на результаты анализа изучаемой частицы. В случае неправильной геометрии осуществляется разворот (как в ситуации 2).

*Ситуация 4.* Предварительно получают карты распределения элементов на участке  $\sim 10$  мкм относительно анализируемой частицы. На основе полученных карт распределения элементов как в низкоэнергетической (в частности, углерода и кислорода), так и высокоэнергетической областях выявляют зоны поглощения рентгеновского излучения, связанные с геометрией участка. Анализируют, не попадает ли исследуемая частица в одну из таких зон; если да, то определяют угол разворота относительно детектора, на который нужно повернуть образец для устранения указанного эффекта. После этого осуществляют разворот и заново строят карты распределения. Удовлетворившись в достижении оптимальной геометрии, проводят количественный анализ самой частицы и ее окружения. Последующий анализ и обработка полученных данных позволяют надеяться на максимальную достоверность результата [10].

В качестве эталонов были использованы приготовленные по методике [11] и отснятые в тех же

условиях специально отобранные минералы и металлы.

Что касается просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), то использовали как метод суспензий, так и резку и утонение сфокусированным ионным пучком (РЭМ-ФИП). В случае метода суспензий фрагмент реголита размером  $\sim 100$  мкм переносили в стерильную микропробирку, в которую наливали воду аналитической чистоты. Пробирку помещали в ультразвуковой диспергатор, где препарат подвергали ультразвуковой дезинтеграции.

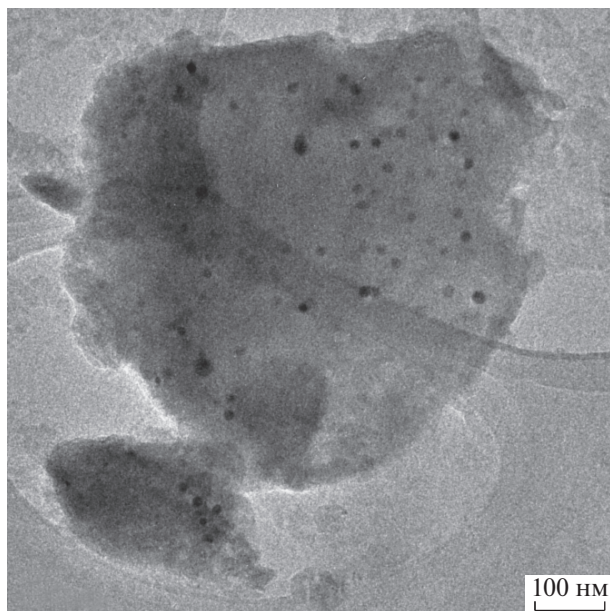
При использовании РЭМ-ФИП в этом приборе осуществляли поиск интересующей частицы реголита. Слабое напыление углеродом позволяло поставить реперные точки вокруг зоны резки с помощью ионного зонда. Дальнейшую резку и извлечение ламели проводили, ориентируясь на реперные точки. Не все попытки получить ламели были успешными, но некоторые из них оказались пригодны для изучения в ПЭМ. При количественном анализе использовали стандартные процедуры спектрометров IETEM-250, внося поправки на снятые эталоны.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОБ ЛУННОГО РЕГОЛИТА ИЗ МОРЯ КРИЗИСОВ

В качестве характерного примера изучения проб лунного реголита приведены результаты исследования нескольких небольших (100–300 мкм) фрагментов стекла красного чайного цвета. Их основная отличительная особенность – наличие пленок самородного молибдена, частично покрывающих их поверхность, а частично погруженных в стекло. Самородный молибден, в свою очередь, местами покрыт высокоуглеродистой пленкой. Стекла были извлечены из самой глубокой части керна, соответствующей диапазону глубин 1.84–1.89 м (проба 24184.4-4.9), доставленного на Землю АС “Луна-24” из Моря Кризисов.

*Стекло.* На Луне стекла образовывались в период интенсивной вулканической деятельности, а также в результате мега- и микроимпактов, которые происходят по настоящее время. Состав, морфология и размер стекол указывают на механизм их образования – магматический или импактный. Стекла составляют основную массу лунного реголита, выполняя цементирующую функцию и являясь агрегаторами тонкодисперсных аморфных и кристаллических частиц.

Первыми включениями, зафиксированными методами ПЭМ, в лунных стеклах были шарики самородного железа, размер которых изменялся от единиц до нескольких сотен нанометров [12–14]. Позднее такие включения неоднократно фиксировали в лунных стеклах (рис. 1), что неудивительно, поскольку самородное железо является

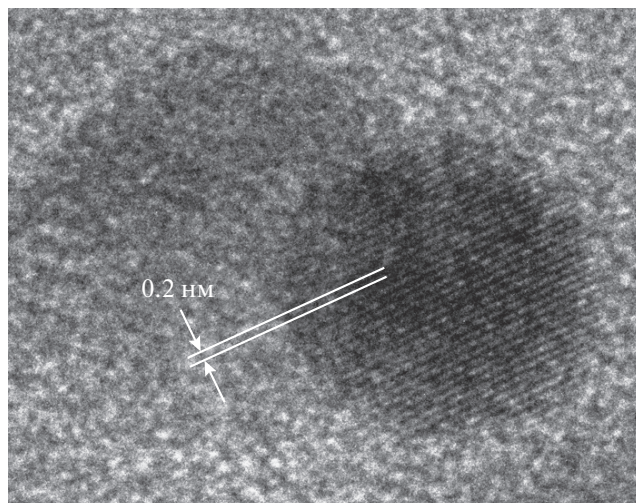


**Рис. 1.** ПЭМ-изображение многочисленных включений шариков металлического железа в стекле лунного реголита (АС “Луна-24”).

самым распространенным металлом на Луне. Методами высокоразрешающей электронной микроскопии установлена монокристалличность наноразмерных образований самородного железа. Микродифракционная картина такого шарика содержала рефлексы, отвечающие плоскости (110) самородного  $\alpha$ -железа кубической модификации с параметром  $a_0 = 0.28$  нм и пр. гр.  $Im\bar{3}m$ . Съемка в ПЭМ с высоким разрешением выявила периодичность структуры с шагом 0.20 нм, что соответствует межплоскостному расстоянию  $d_{110}$  (рис. 2).

Помимо железа в стеклах лунного реголита встречаются разнообразные включения минеральных фаз. Так, на рис. 3 показаны железные шарики и крупное включение пироксена. Среди выявленных включений в стекле встречаются и аморфные выделения типа “стекло в стекле”, когда за счет ликвации обособляются участки стекла другого состава относительно основной матрицы.

Образование стеклянных шариков возможно в результате многочисленных импактных событий, происходящих на Луне [1]. Одним из таких примеров является находка нескольких десятков конденсатных стеклянных шариков размером до 500 нм (рис. 4). Первоначальный анализ их состава показал, что в энергодисперсионном спектре присутствуют интенсивные пики основных элементов Al и Ca, а также низкоинтенсивные пики Si, Fe и Mg. Карты распределения элементов в одном из таких шариков (рис. 5) показали, что Al и Ca сконцентрированы в ядре, а Si и Fe локализо-

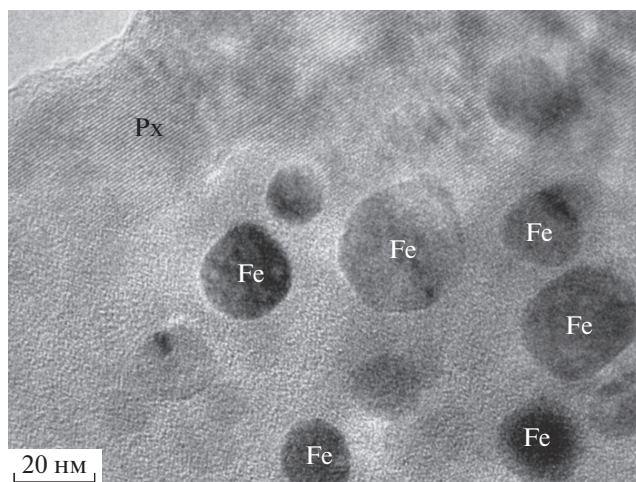


**Рис. 2.** ПЭМ-изображение плоскости (110) самородного  $\alpha$ -железа (АС “Луна-24”).

ваны во внешнем слое. Содержание Mg оказалось столь малым (менее 2% MgO), что в данном случае не имеет информационной значимости.

Такое распределение элементов подтверждается профилем интенсивности рентгеновского характеристического излучения Al, Si, Ca (рис. 6) вдоль линии, указанной на рис. 2. Так, профили Al и Ca демонстрируют рост интенсивности к центру шарика пропорционально увеличению толщины частицы. В то же время профиль Si не зависит от ее толщины, что свидетельствует о равномерном слое стекла, содержащем этот элемент.

Видимо, в газо-плазменном облаке сначала сформировалось ядро Al–Ca, которое в дальнейшем при снижении температуры покрылось тонким слоем высококремниевое стекла. Такой тип



**Рис. 3.** ПЭМ-изображение пироксена и железных шариков в стекле реголита (АС “Луна-24”).



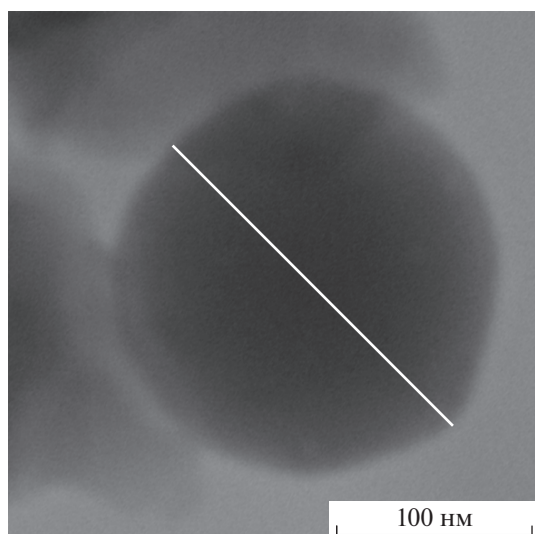


Рис. 4. ПЭМ-изображение одного из конденсатных стеклянных шариков (АС “Луна-24”). Указана линия профиля.

конденсата ранее не был известен в природе, и его существование предсказывали только на основании экспериментальных работ. Таким образом, удалось установить термическую историю этих шариков.

Нередко в стекле фиксировали металлы и сплавы. В одном из фрагментов были обнаружены включения самородного титана, размер которых не превышал нескольких десятков нанометров (рис. 7). На основании картин микродифракции подтверждена гексагональная высокобарическая  $\omega$ -модификация самородного титана с параметром ячейки  $a_0 = 0.462$  нм и пр. гр.  $P6/mmm$ . Моделирование, проведенное с помощью программного пакета eMar, подтвердило соответствие полученной модели зафиксированным дифракционным картинам. Съемка в ПЭМ с высоким разрешением выявила плоскости типа  $(hk0)$  самородного титана. В одном случае была зафиксирована двумерная картина (рис. 7) с межплоскостными расстояниями 0.23 нм. В остальных случаях из-за не совсем точного совпадения кристаллографических плоскостей с проходящим электронным пучком отображалась только одномерная картина.

Самородный титан был обнаружен в природных условиях на Земле и утверждён как самостоятельный минеральный вид, однако это был низкобарический  $\alpha$ -Ti, пр. гр.  $P6_3/mmc$  [15]. Таким образом, впервые в природе обнаружена высокобарическая полиморфная модификация —  $\omega$ -Ti, пр. гр.  $P6/mmm$ . По данным [16]  $\alpha$ -титан переходит в  $\omega$ -форму при давлении 6 ГПа.

Самородный молибден впервые был обнаружен в виде сферических образований в полости стекла из реголита Моря Кризисов [17]. Позднее

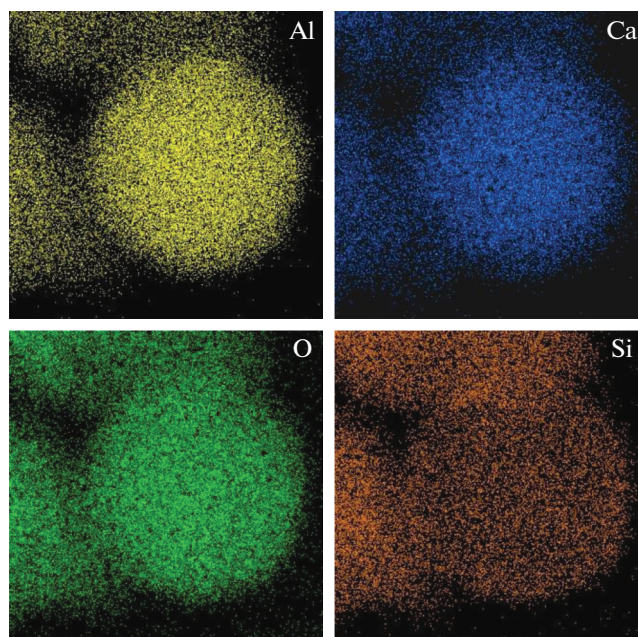


Рис. 5. Карта распределения элементов в частице стекла (АС “Луна-24”), изображенной на рис. 4, полученная в ПЭМ.

он неоднократно встречался в других пробах реголита. Описываемые стекла содержат большое количество самородного молибдена, что является их характерным признаком. Он встречается как в виде корочек и пленок толщиной 0.5–3 мкм, иногда ассоциированных с высокоуглеродистыми пленками (рис. 8), на поверхности и в глубине стекла, так и в виде сферических образований каплевидной формы, практически всегда покрытых слоем стекла (рис. 9). На рис. 9а, полученном в режиме детектирования вторичных электронов, виден каплевидный натек стекла, а на изображении того же участка, полученном в режиме регистрации отраженных электронов (рис. 9б), становится видна более тяжелая (большой средний атомный номер) сферическая частица, скрытая

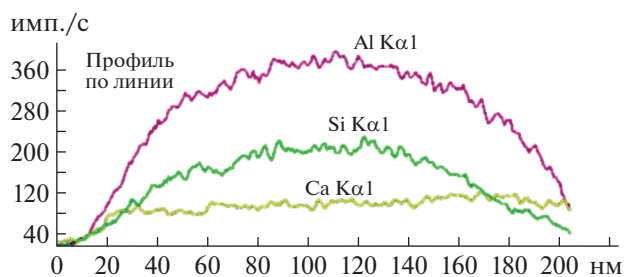


Рис. 6. Профиль интенсивности рентгеновского характеристического излучения Al, Si, Ca вдоль линии на частице стекла (АС “Луна-24”), изображенной на рис. 4, полученный в ПЭМ.

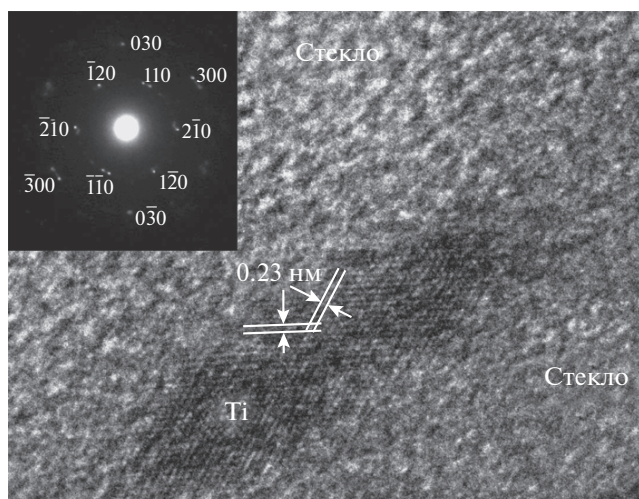


Рис. 7. ПЭМ-изображение включения  $\omega$ -титана в стекле (АС “Луна-24”).

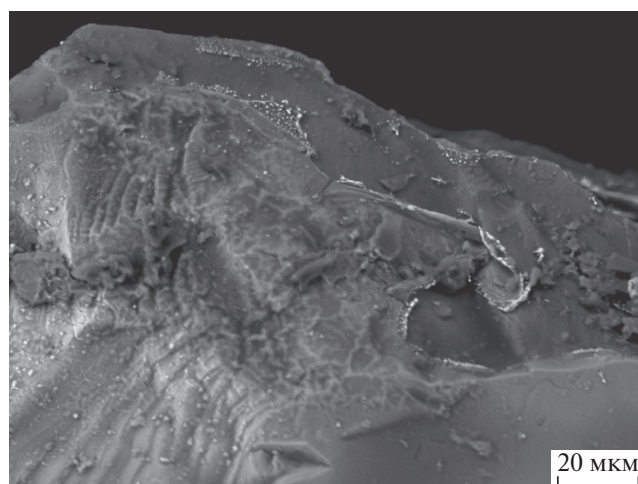


Рис. 8. РЭМ-изображение пленки самородного молибдена, покрытого углеродом, на стекле (АС “Луна-24”).

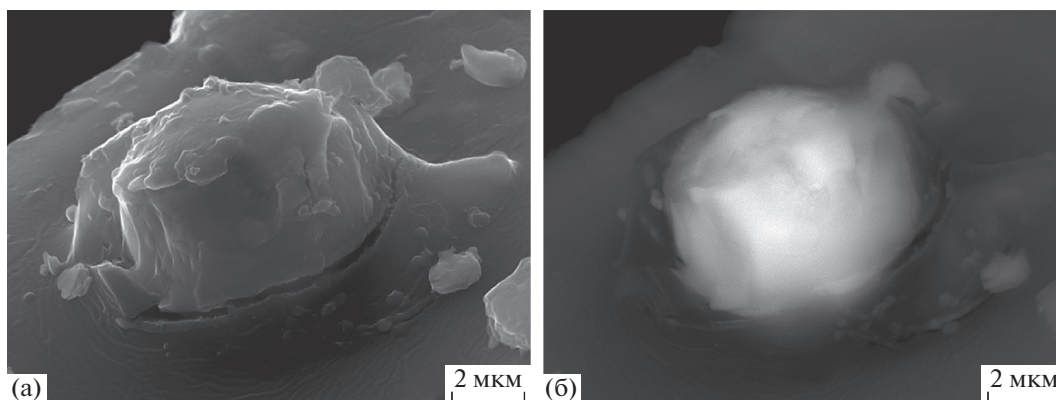


Рис. 9. РЭМ-изображение капли самородного молибдена на стекле (АС “Луна-24”), полученное в режиме детектирования: а – вторичных электронов, б – отраженных электронов.

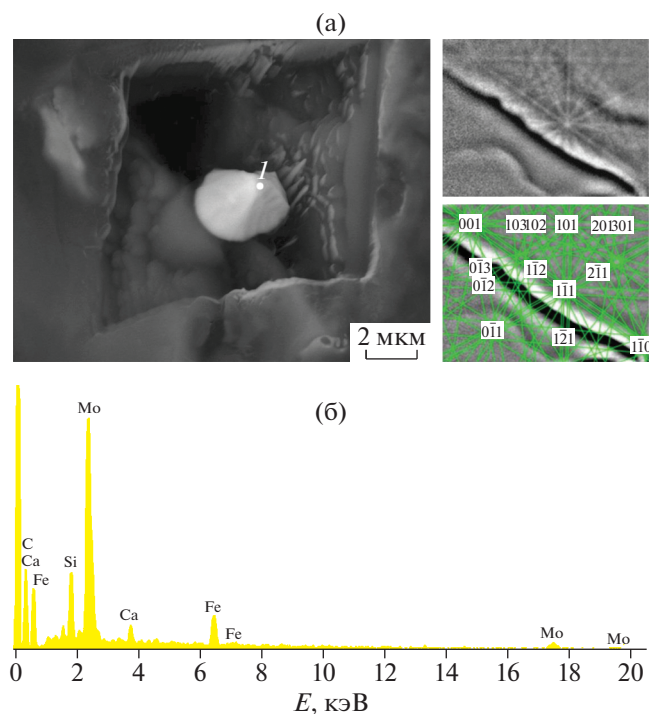
под стеклом. Энергодисперсионный анализ позволяет интерпретировать эту частицу как Мо. Пики O и Si фиксируются в спектре от покрывающей молибденовой частички стекла. Для диагностики такой частицы методом дифракции обратно рассеянных электронов пришлось прибегнуть к помощи ионной резки для удаления ее стеклянной оболочки. Вырезанная с помощью ФИП частица изображена на рис. 10. Анализ полученных дифракционных картин позволил однозначно интерпретировать частицу как самородный молибден кубической сингонии, пр. гр.  $Im\bar{3}m$  (№ 229), параметр элементарной ячейки  $a_0 = 3.15 \text{ \AA}$ .

Самородный молибден обнаружен и методом ПЭМ (рис. 11). В зону выреза ламели попал участок крупного зерна ферроавгита состава  $(\text{Fe}_{0.82}\text{Mg}_{0.66}\text{Ca}_{0.46}\text{Al}_{0.06})_{2.00}\text{Si}_{2.00}\text{O}_{6.04}$ . С поверхностью пироксена контактирует слой аморфного углерода толщиной от 50 до 100 нм. Далее за ним нахо-

дится прослойка самородного молибдена, переходящая в наружный аморфный слой, в составе которого фиксировали лишь C, O, Mo и Na. Микродифракционная поликристаллическая картина, полученная от Mo-слоя, содержит набор основных рефлексов ОЦК-решетки самородного Мо (рис. 12). Кроме них на дифракционной картине присутствует рефлекс, для которого  $d = 0.237 \text{ нм}$ . Он отвечает рефлексу 111 ГЦК-модификации самородного Мо с параметром элементарной ячейки  $a_0 = 0.411 \text{ нм}$ , запрещенный для ОЦК-решетки.

Аморфизация и нарушение структурной монолитности самородного Мо, по-видимому, происходили под воздействием ионизированных частиц солнечного ветра и космического излучения. Монокристаллический слой, подвергавшийся такому воздействию, трансформировался в поликристаллический с образованием нанокристаллов

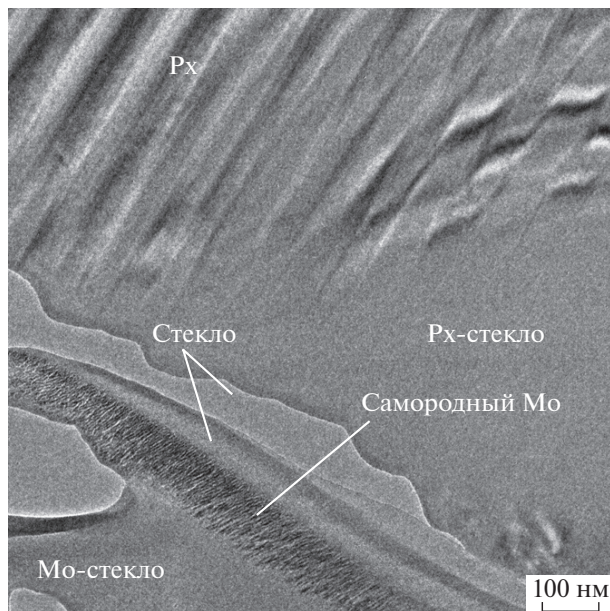




**Рис. 10.** РЭМ-изображение вскрытой ионным пучком частицы самородного молибдена в стекле (АС “Луна-24”), ее индцированная дифракционная картина, полученная в геометрии на отражение (а), и энергодисперсионный спектр (б).

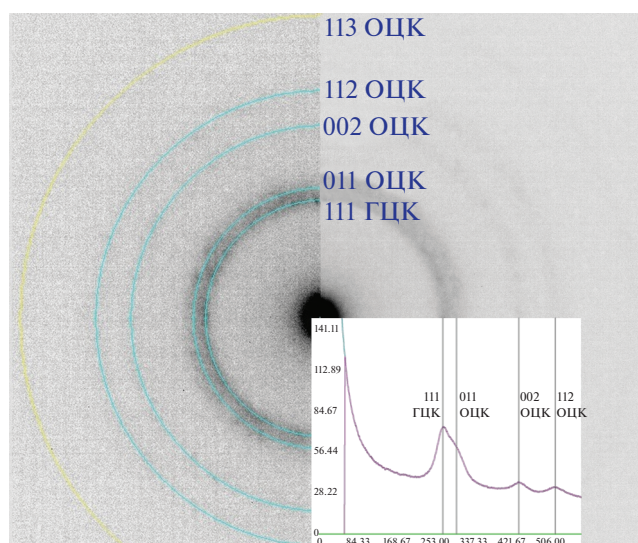
Мо, сохранившихся в виде волокнистых агрегатов (рис. 13). Была зафиксирована его ГЦК-модификация, которая ранее отмечалась исключительно в синтетических конденсатных пленках Мо и только в диапазоне размеров кристаллов до 40 нм [18]. Следы бомбардировки солнечным ветром проявились в виде образования волокнистого Мо-агрегата. Интенсивность этого воздействия оказалась достаточной для полной аморфизации части Мо и покрывающей его углеродистой пленки. Отметим ее насыщение Na, видимо, экстрагированным из окружающего реголита и поглощенном верхним аморфным слоем образца. Насыщение легколетучим Na характерно для верхних слоев реголита, подвергавшихся воздействию солнечного ветра [19].

Ранее в природе был известен только природный сплав – гексамолибден состава (Mo, Ru, Fe, Ir, Os), обнаруженный в хондрите Альенде (тип CV3) [20]. Содержание в нем Мо колеблется в диапазоне от 20.56 до 78.71 мас. %. Были известны только редкие находки на Луне единичных кристалликов минералов Мо – молибденита (Аполлон-15, Луна-16) и повеллита (Луна-24) [1, 21], что свидетельствует о его низком среднем содержании в лунных базитах. Однако самородный Мо ни на Луне, ни до самого последнего времени на

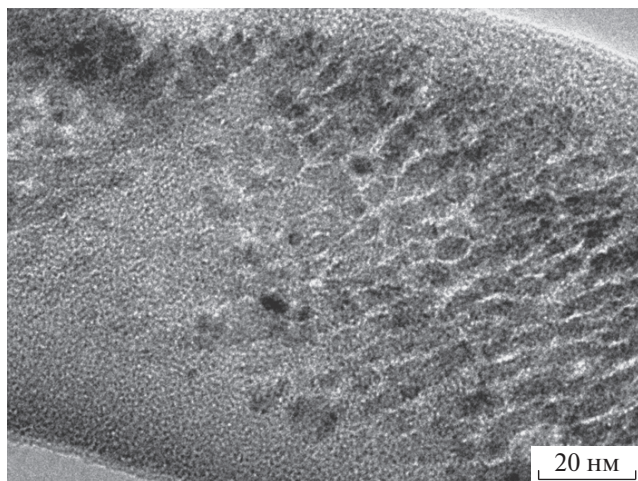


**Рис. 11.** ПЭМ-изображение части вырезанной ионным пучком ламели стекла с пироксеном, аморфными участками и самородным молибденом (АС “Луна-24”).

Земле в природных условиях обнаружен не был. Недавно самородный Мо в ассоциации со многими другими самородными металлами и интерметаллидами был обнаружен в габбро-долеритах, переработанных глубинными восстановленными флюидами в Бобруйской кольцевой структуре (Беларусь) [22].



**Рис. 12.** Микродифракционная картина самородного молибдена (АС “Луна-24”), полученная в ПЭМ.



**Рис. 13.** ПЭМ-изображение треков солнечного ветра в самородном молибдене (АС “Луна-24”), вызывающего его аморфизацию.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подчеркнем важную роль реголита при сборе первичной информации о минералогическом составе Луны как объекта. Реголит является уникальным образованием в плане разнообразия содержащихся в нем минеральных видов. Он представлен хорошо перемешанными частицами минералов лунных пород и материалом метеоритов, принесенными со значительных расстояний (километры и десятки километров). При пониженной гравитации и достаточной мощности импактного события такие частицы могли бы быть перенесены даже на сотни километров. Являясь усредненной пробой лунного вещества, 1 г реголита не сопоставим по обилию минеральных фаз с аналогичным объемом любой другой лунной горной породы. Соответственно, велика информационная нагрузка даже при небольших объемах реголита. Однако эти сведения в значительной мере неполноценны, поскольку по большей части информация о конкретном происхождении каждой минеральной частицы и реальном месте ее образования недоступна. Тем не менее и такая информация может послужить почвой для важных петрологических и геохимических выводов о наличии на Луне гидротермальной и фумарольной активности, о присутствии карбонатитового процесса, о новых необычных способах дифференциации элементов в лунных породах. Именно изучение такого уникального объекта позволило за сравнительно короткий срок практически удвоить количество минеральных видов, известных на Луне.

Вопрос о происхождении стекол в каждом конкретном случае остается открытым: являются ли они результатом вулканической деятельности или результатом импактного события. Несмотря

на незначительные объемы изученного вещества, в нем отражены следы разнообразных и сложных процессов, протекавших на данном участке поверхности Луны. Широкий спектр составов, большое число и разнообразие минеральных включений, зафиксированных на изученных частицах стекол, позволяют сделать некоторые выводы и предположения о породах лунной поверхности (мишени) и обосновать тип минералообразующего события.

Фактически большая часть минеральных частиц реголита агрегируется со стеклом. Оно либо является цементом для микобрекчий, либо тонким, зачастую наноразмерным, слоем покрывает отдельные частицы минеральных фаз. Таким образом, сведения о типе стекла являются важной генетической информацией о процессах формирования реголита в целом. Стекла можно разделить на расплавные и конденсатные, образованные в результате конденсации из газо-плазменных облаков при интенсивных импактах. Расплавные стекла образовывались либо при вулканических процессах, либо при импактах, потеряв при испарении лишь часть летучих компонентов. Они встречаются, как правило, в виде достаточно крупных осколков, зачастую частично раскристаллизованных. Конденсатные стеклянные шарики и пленки образуют наноразмерные индивиды в силу кратковременности сохранения благоприятных условий давление–температура для конденсации. Именно к последнему типу относятся описанные выше примеры стекол.

Что касается самородного Мо, впервые обнаруженного в природных условиях, видимо, это был продукт импактной переработки участка лунной поверхности, заранее обогащенного Мо. Вероятно, ударник обычного хондритового состава попал в участок с аномально повышенным содержанием молибденовых минералов, например в имевшееся фумарольное поле или в ореол его рассеяния в результате предыдущих импактных событий. Так или иначе, но локальная концентрация Мо была достаточно высока, чтобы дать молибденовый расплавный продукт. Об этом свидетельствуют формы его выделений в виде брызг каплевидной формы и относительно толстых пленок на поверхностях других частиц реголита, прикрытых более поздней стеклянной пленкой.

## ВЫВОДЫ

Примененный в работе подход, включающий в себя изучение самых тонких фракций лунного реголита с использованием современных локальных методов электронной аналитической микроскопии, позволил достичь следующих результатов: выявить 105 новых для Луны минеральных фаз, 43 из которых впервые открыты в природных



условиях, что практически удвоило список минеральных фаз, известных на Луне [9]; установить принадлежность обнаруженных минеральных фаз реголита к различным генетическим группам (магматическим эндогенным, эксгалационным, импактным и, возможно, гидротермальным); продемонстрировать, что преждевременно считать полноценной степень изученности имеющегося на Земле лунного реголита, так как современные методы электронной микроскопии наиболее эффективны для обнаружения ранее неизвестных на Луне минеральных фаз. В свою очередь, это позволяет выявлять особенности механизма минералообразования на микро- и наноразмере и расширять представление о процессах формирования Луны.

Работа выполнена за счет бюджетных средств в рамках госзадания ГЕОХИ РАН № 0116-2019-0010 по теме “Новые комплексные подходы к фундаментальной проблеме изучения химического состава, трансформации и миграции наночастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fronde J.W.* Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
2. *Anderson A.T., Bunch T.E., Cameron E.N. et al.* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1970. V. 1. P. 55.
3. *Chao E.C.T., Minkin J.A., Fronde C. et al.* // *Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.* V. 1. Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Houston, 5–8 January, 1970. P. 65.
4. *Wark D.A., Reid A.F., Lovering J.F. et al.* // *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings.* 1971. V. 2. P. 39.
5. *Мохов А.В.* // I Всерос. мол. конф. “Минералы, строение, свойства, методы исследования”. Ильмены, 2009. С. 42.
6. *Ашихмина Н.А., Богатииков О.А., Горшков А.И. и др.* // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 4. С. 953.
7. *Vaniman D.T., Bish D.L.* // *Am. Mineral.* 1990. V. 75. P. 676.
8. *Meyer C., Yang S.V.* // *Am. Mineral.* 1988. V. 73. P. 1420.
9. <http://www.geokhi.ru/DocLab18/data.pdf>.
10. *McGee J.J., Keil K.* // *Microsc. Microanal.* 2001. V. 7. P. 200.
11. *Лапуна М.И., Мохов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 2. С. 38.
12. *Keller L.P., McKay D.S.* // *Science.* 1993. V. 261. № 5126. P. 1305.
13. *James C., Letsinger S., Basu A. et al.* // Abstracts of the 33rd Lunar and Planetary Science Conference. 2002. V. 33. P. 1827.
14. *Thompson M., Christoffersen R.* // 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010. P. 2191.
15. *Fang Q., Bai W., Yang J. et al.* // *Acta Geol. Sinica.* 2013. V. 87. № 5. P. 1275.
16. *Jamison J.C.* // *Science.* 1963. V. 140. № 3562. P. 72.
17. *Богатииков О.А., Мохов А.В., Горшков А.И. и др.* // Докл. РАН. 2002. Т. 386. № 3. С. 368.
18. *Гладких Н.Т., Дукаров С.В., Крышталь А.П. и др.* Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках / Под ред. проф. Гладких Н.Т. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2004. 276 с.
19. *Диков Ю.П., Яковлев О.И., Герасимов М.В.* // Журн. структур. химии. 2008. Т. 49. С. 198.
20. *Ma C., Beckett J.R., Rossman G.R.* // *Am. Mineral.* 2014. V. 99. № 4. P. 654.  
<https://doi.org/10.2138/am.2014.4667>
21. *Богатииков О.А., Мохов А.В., Карташов П.М. и др.* // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 6. С. 803.
22. *Левицкий В.И., Солодилова В.В., Завадич Н.С. и др.* // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 174.  
<https://doi.org/10.31857/S086956520001198-0>