

УДК 523.34-36

СРАВНЕНИЕ СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ ИМПАКТНЫХ СТЕКОЛ НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛИ (КРАТЕР ЖАМАНШИН) И ЛУНЫ (АС «Луна-16, -20, -24»)

© 2019 г. Т. А. Горностаева, А. В. Мохов, П. М. Карташов, О. А. Богатиков

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017, Россия
E-mail: avm8okhov@gmail.com*

Поступила в редакцию 24.04.2018 г.
Получена после доработки 19.06.2018 г.

Впервые проведено сравнительное изучение высоколокальными методами электронной микроскопии импактных стекол кратера Жаманшин и стекол из лунного реголита, доставленных советскими АС «Луна-16, -20, -24». Установлено, что многие расплавные и конденсатные импактные стекла как на Луне, так и на Земле имеют сходное строение и состав, что определяется, прежде всего, физикой импакта и одинаковым набором элементов.

Ключевые слова: импактные стекла, кратер Жаманшин, Луна

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-590327105-119>

ВВЕДЕНИЕ

На самых ранних этапах образования Земля прошла стадию тяжелой астероидной бомбардировки. В ходе этого процесса практически весь объем планетарного вещества Земли подвергся импактному преобразованию, с которым было связано первичное фракционирование материала. Импактные процессы оказали огромное влияние на формирование облика как Земли, так и других планет, поэтому их изучение является весьма важным фундаментальным направлением исследований. Сверхвысокие давления и температуры, мгновенно возникающие в ходе импактных процессов, приводят частично к полному испарению, частично к высокотемпературному переплаву с селективным испарением и последующей закалкой расплавленного вещества, в результате чего образуются стекла разного состава с зародышами минеральных фаз. Таким образом, именно импактные стекла несут в себе информацию о процессах преобразования вещества при экстремальных значениях давления и температуры.

Химический состав лунных стекол изучался с целью определения характеристик горных пород на поверхности Луны (Reid et al., 1972) и особенностей реголита в местах их отбора (Wentworth, McKay, 1988). В ходе этих исследований были обнаружены стекла, которые не соответствова-

ли по составу стандартным типам лунных пород и при этом отличались аномально низким содержанием кремнезема. Такие стекла были найдены во всех образцах лунного грунта, доставленного как советскими автоматическими станциями (АС), так и американскими астронавтами (Fredriksson et al., 1970; Иванов, 1975). Дефицит SiO_2 в лунных стеклах объяснялся его селективным испарением при ударном плавлении. Так, в лунном реголите АС «Луна-20» было обнаружено стекло с содержанием SiO_2 , равным 34.8 мас.%, которое, по мнению авторов (Dowty et al., 1973), являлось остатком от испарения мишени при импактном событии. Хондритоподобные образования (хондриты), найденные в образцах лунного реголита АС «Луна-16» и «Луна-20» (Иванов, 1975), также отличались аномально низким содержанием кремнезема. Таким образом, была зафиксирована потеря заметных количеств кремнезема при испарении в результате импактных процессов на Луне.

Параллельно с изучением образцов лунного грунта проводились экспериментальные исследования ударно-испарительных процессов. Испарению при высоких температурах подвергались лунные породы, а также близкие к ним по составу земные базальты (Naughton et al., 1972; Яковлев и др., 1972, 2003; Маркова и др., 1986). Эти исследования показали, что происходит селективное испарение ударных расплавов: преимущественно испаряются летучие

элементы (Na, K, Si, и Fe), в то время как Ca, Al и Ti концентрируются в остаточном материале. Подобные эксперименты по испарению, проводившиеся и на кислых породах (Horz et al., 1983; Dikov et al., 1993; Яковлев и др., 2005), подтвердили эту тенденцию. Анализ составов расплавленных стекол как в лунных (Warren, 2008), так и в земных (Яковлев и др., 2005) импактных структурах также показал, что остаточный расплав характеризуется более высоким содержанием труднолетучих элементов (Ca, Al и Ti), которые испаряются при значительно более высоких температурах (Horz et al., 1983; Яковлев и др., 1997).

Температурный ряд испарения петрогенных компонентов из кислых и основных расплавов в целом совпадает с рядом летучести индивидуальных оксидов: K_2O , Na_2O , FeO, SiO_2 , MgO, CaO, Al_2O_3 , TiO_2 (Маркова и др., 1986; Яковлев и др., 1972). Эксперименты показали, что в парах преобладает кремнезем (Яковлев и др., 2011). Это объясняется преимущественным испарением кремния (согласно экспериментальным данным, испаряется более 30% от его первоначального содержания) по сравнению с другими петрогенными компонентами мишени (Иванов, 1975).

Конденсация, по данным экспериментов, проходит, так же как и испарение, селективно: сначала формируется высококремниевый конденсат, а затем, по мере расширения и охлаждения облака, конденсируется материал с меньшим содержанием SiO_2 и более насыщенный легколетучими компонентами (Wood, Hashimoto, 1993; Petaev, Wood, 1998; Яковлев и др., 2011).

Сами конденсатные фазы в остывающем облаке могут находиться как в виде отдельных глобул, так и в виде их агломераций, представляющих собой своеобразные трехмерные «паутины» древовидных структур (Лушников и др., 1991; Rietmeijer et al., 2006).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описываемые в настоящей статье исследования проводились с помощью просвечивающей (ПЭМ) и сканирующей (СЭМ) аналитической электронной микроскопии (микроскопы JEM-2100 + рентгеновский энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) IETEM INCA-350 и JSM-5610LV + INCA-450).

Основным способом подготовки образцов для СЭМ является их заливка либо в полимерные, либо в эпоксидные шашки с последующей резкой, шлифовкой и полировкой. Полученные шашки помещали в трубчатые алюминие-

вые обоймы и фиксировали их сплавом Вуда. Все полированные образцы в обязательном порядке напылялись углеродом. В качестве напыляющего материала выбран именно углерод, а не какие-либо металлы с тем, чтобы облегчить интерпретацию и пересчет рентгеновских энергодисперсионных спектров, поскольку он имеет всего один пик К-серии, расположенный в низкоэнергетической части спектра, и может быть легко исключен при его количественной обработке. Истинно количественным анализом следует считать определение концентраций, сумма которых отвечает реальной сумме содержаний измеряемых элементов. При проведении расчетов ЭДС-анализов зачастую используется режим нормировки к 100%. Строго говоря, такой анализ количественным считать нельзя, поскольку в образце могут быть неопределяемые на ЭДС элементы (H, Li, Be и, возможно, другие), и измеренная сумма концентраций может не составить 100%. В этом случае результат, нормированный к 100%, приведет к искажению реальных содержаний элементов. Однако, в случае изученных нами стекол, содержание неопределяемых элементов в образце заведомо не превышало первые десятые процента и было соизмеримо с суммарной ошибкой измерения, следовательно, анализ можно признать количественным. Исходя из этих соображений для ускорения процедуры анализа исследуемых стекол и была использована нормировка к 100%.

В ходе анализа применялись пользовательские эталоны как для формы пиков, так и для содержаний элементов.

Часть образцов изучали на сколе. Сколотый фрагмент приклеивали на электронно-микроскопический столик двухсторонним электропроводящим скотчем и напыляли углеродом. Классический количественный анализ в случае образца неправильной формы был неприменим, поэтому использовалась отработанная ранее методика с вращением образца относительно детектора (Мохов, 2009; Карташов и др., 2010).

Образцы для ПЭМ готовили по методу суспензий. Предварительно измельченный фрагмент образца переносили в стерильную пробирку. После чего пробирку с этой частичкой стекла в небольшом количестве дистиллированной воды аналитической степени очистки помещали в ультразвуковой диспергатор, где образец подвергали дезинтеграции. Для локального извлечения мелких фрагментов использовали ультразвуковой экстрактор на базе оптического цифрового

микроскопа и ультразвуковой иглы (Горностаева и др., 2011). Измельченный ультразвуком препарат в капельке полученной суспензии наносили на специальную медную сеточку с пленкой-подложкой из коллодия и высушивали в сушильном шкафу при температуре 35°C.

При анализе исследуемых частиц в ПЭМ в их рентгеновский спектр обязательно попадают пики флуоресцентно-возбужденные от медной сеточки. Эти пики меди вычитаются из спектра при его обработке, а наличие или отсутствие меди в образце можно определять по соотношению пиков меди $K\alpha/L\alpha$. Количественный же анализ выполнялся с использованием встроенного пакета программ на основе метода Клиффа–Лоримера (Cliff, Lorimer, 1972). По этому методу оцениваются относительные интенсивности при обязательном допущении, что сумма концентраций элементов равна 100%, чем устраняются изменения интенсивностей аналитических линий, вызванные различиями в массовой толщине анализируемых частиц, а поправки на матричные эффекты не вводятся. Поскольку после достижения определенной массовой толщины матричные эффекты все же начинают проявляться, для их учета предусмотрен ручной ввод значений толщины объекта и его плотности. Поправочные коэффициенты K для этого метода были рассчитаны исходя из микрозондовых анализов стекол близкого состава, предварительно отснятых в ПЭМ.

Так же надо учесть, что высокоэнергетичный пучок просвечивающего микроскопа приводит к сильному локальному нагреву и частичному выносу летучих элементов, в частности Na, иногда и K. В случае нормирования суммы к 100%, с применением метода Клиффа–Лоримера, это приводит к эффекту повышения концентрации остальных элементов, особенно максимального содержания Si. В результате анализа стекол, полученные на ПЭМ, в основном имеют несколько завышенную кремнеземистость по сравнению с анализами на СЭМ, выполненными по эталонным методам. Чтобы избежать этого были проведены эксперименты по определению скорости выноса летучих элементов из стекла. В результате были получены зависимости содержания элементов от времени набора спектра и рассчитаны коэффициенты восстановления содержаний на момент нулевого времени набора. Пользовательские коэффициенты K были скорректированы с учетом этих зависимостей.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предметом исследования являлись импактные стекла (иргизиты и жаманшиниты) кратера Жаманшин, расположенного в Казахстане (48°24' с.ш., 60°58' в.д.). Образцы для исследования были взяты из коллекции П.В. Флоренского и предоставлены Петрографическим музеем ИГЕМ РАН. Жаманшиниты — сильно пузыристые стекловатые или частично раскристаллизованные породы, встречающиеся в форме нерегулярных блоков размером до 50 см, некоторые из которых напоминают вулканические шлаки. Иргизиты — это черное стекловатое вещество с глянцевой поверхностью, флюидальной структурой, имеющее форму капель и застывших брызг размером от 1–3 мм до 2–4 см. Часто в поверхность более крупных частиц внедрены мелкие шарики стекла, захваченные ими в полете. Предметом сравнения послужили импактные стекла лунного реголита, доставленного советскими АС из Моря Изобилия («Луна-16»), Моря Кризисов («Луна-24») и с материкового перешейка между ними («Луна-20»).

КЛАССИФИКАЦИИ ИМПАКТНЫХ СТЕКОЛ

Используются различные классификации импактных земных и лунных стекол, в частности по цвету и по содержанию SiO_2 . Однако для некоторых лунных стекол было отмечено несовпадение состава с их цветом. Так, Делано (Delano et al., 1981) изучив составы импактных стекол, которые им определялись как «желтые» из-за цвета в тонком срезе, показал, что они имеют переменный состав (например, TiO_2 от 1.9 до 12.9 мас.%, а также широкий диапазон содержания SiO_2) и не составляют единую группу. При изучении импактных стекол кратера Жаманшин также было выявлено отсутствие прямой корреляции между цветом расплавных стекол (жаманшинитов) и их составом. Так, жаманшиниты синего цвета, отличающиеся высоким содержанием CaO (до 7 мас.%), по данным (Koeberl, 1988) имели неоднородный состав.

Таким образом, согласно литературным данным и ранее проведенным нами исследованиям (Горностаева и др., 2017), окраска импактных стекол не несет определяющей генетической информации. Кроме того, цвет стекол — это субъективная характеристика и, следовательно, ее целесообразно применять лишь на предварительном этапе исследования для удобства маркировки образцов, что и было использовано в настоящей работе.

Градация земных импактных стекол по составу, прежде всего по содержанию SiO_2 , использовалась для последующего поиска аналогов среди пород мишени. Классификация лунных стекол также проводилась на основе сравнения их с лунными породами (Engelhardt, Stengeling, 1981). Однако были найдены стекла, которые по составу не соответствовали ни одному из известных типов лунных пород. К ним относятся, например, зеленые стеклянные сферулы из проб «Аполлона-15» и оранжевые из проб «Аполлона-17» (Arndt, Engelhardt, 1987). В результате изучения оранжевых стекол было показано, что на Луне не существует эквивалентных им пород (Roedder, Weiblen, 1973). Для зеленых стекол было доказано отсутствие генетической связи с морскими базальтами — коренными породами из мест отбора проб (Ma et al., 1978).

Для некоторых импактных стекол предполагались исходные породы исходя из потерь при испарении легколетучих элементов. Одним из самых ярких таких примеров являются HASP-стекла (High-Aluminum Silica-Poor — высокоглиноземистые низкремниевые стекла) — тугоплавкий остаток при испарении расплава импактного происхождения. Термин HASP впервые был использован (Naney et al., 1976), чтобы описать следующий диапазон составов стекол (мас.%): SiO_2 — 30–34, Al_2O_3 — 32–36, CaO ~ 20. HASP-стекла составляют ~50% тонкодисперсной фракции лунного грунта (Keller, McKay, 1992b). Они были найдены во многих образцах, доставленных миссиями «Аполлон» (Vaniman, 1990; Wentworth, McKay, 1988) и советскими АС, а также в составе лунных метеоритов (Warren, Kallemeyn, 1995). Образование HASP-стекол, по данным (Warren, 2008), подразумевает потерю при испарении $1/4$ – $1/3$ SiO_2 от исходного материала (в среднем у континентальной коры Луны содержание SiO_2 составляет 45 мас.%). Однако к HASP были отнесены и все стекла фельдшпатоидного состава с $\text{Al}_2\text{O}_3 > 16$ мас.% и $\text{SiO}_2 < 40$ мас.%, для которых не происходило испарения SiO_2 , а также высокоалюминиевые — с $\text{Al}_2\text{O}_3 > 45$ мас.% и $\text{SiO}_2 < 27$ мас.%, (Vaniman, 1990). Кроме того, авторами (Keller, McKay, 1992b) зафиксированы «ultra HASP»-стекла, содержащие 65 мас.% Al_2O_3 и только 5 мас.% SiO_2 . В целом к группе HASP относят стекла с содержанием Al_2O_3 более 16 мас.% и SiO_2 меньше чем 40 мас.% (Vaniman, 1990).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стекла типа HASP в лунном реголите

В ходе настоящей работы при изучении на СЭМ образцов лунного реголита часть обнару-

женных стекол имела состав, отвечающий HASP. Такие стекла были найдены во всех изученных образцах АС «Луна-16, -20, -24». Выявлены частицы как обломочной, так и сферической формы, что соответствует литературным данным (Vaniman, 1990).

Состав таких HASP-стекол колеблется в широких пределах, в первую очередь по содержанию Са. Были найдены их частицы с незначительным количеством Са, а также с содержанием Mg до 10 мас.%, аналогичные ранее зафиксированным в образцах «Аполлон-16» (Naney et al., 1976).

HASP-стекла, найденные нами в СЭМ, в большинстве случаев не были представлены отдельными частицами, а являлись одним из компонентов стеклянных агрегатов. Так, на рис. 1 показана частица реголита, в которой заключен фрагмент стекла состава HASP (рис. 2). При этом сама частица представляет собой агглютинат стекол различного состава, содержащий включения железных шариков.

При изучении в ПЭМ также были зафиксированы стекла состава, отвечающего типу HASP. Практически все такие стекла содержали кристаллические включения размером до 0.2 мкм. На рис. 3 представлено кристаллическое включение пироксена в HASP-стекле, что подтверждено его составом и микродифракцией.

Стекла типа HASP в жаманшинитах

При изучении жаманшинитов в СЭМ были зафиксированы стекла, имеющие составы, близкие к лунным HASP-стеклам. В качестве примера можно привести стеклянный фрагмент, изображенный на рис. 4. На нем виден контакт HASP-стекла, помеченного цифрой 1, с типичным расплавленным стеклом жаманшинита, отмеченным цифрой 2. Соответственно на рис. 5 приведен ЭДС-спектр HASP-стекла и на рис. 6 — ЭДС-спектр стекла 2.

На уровне локальности ПЭМ в образцах коричневого жаманшинита также были найдены высокоглиноземистые стекла с содержанием SiO_2 ниже 35 мас.%, что отвечает именно стеклам типа HASP. Эти стекла содержали большое количество кристаллических включений разного состава. В энергодисперсионных рентгеновских спектрах от таких стекол в качестве основных пиков присутствуют линии кислорода, алюминия, кремния и кальция. Заметной интенсивностью в ряде случаев отличаются пики железа, тогда как пики магния, фосфора, серы и титана, которые объясняются наличием в стекле включений нанофаз, менее интенсивны. В частности, дополнительную интенсивность пикам железа и титана придают присутствующие

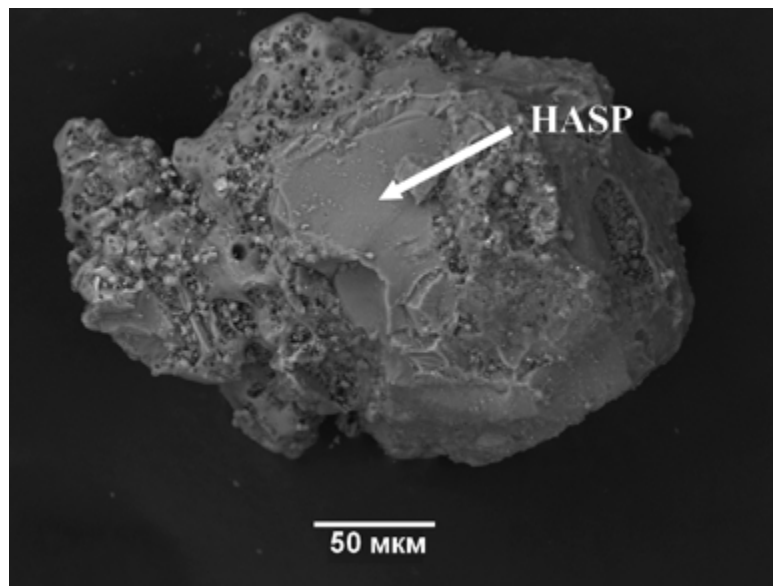


Рис. 1. Частица лунного реголита с фрагментом стекла состава HASP.

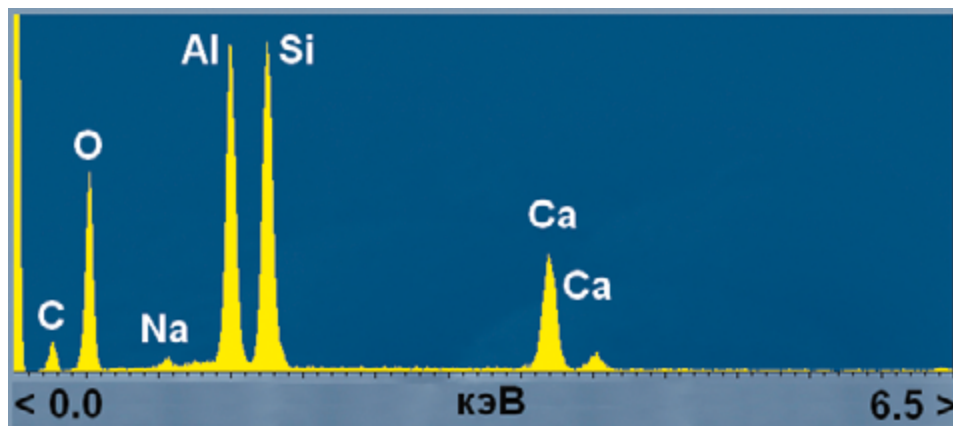


Рис. 2. ЭДС-спектр фрагмента стекла состава HASP.

в стекле включения, отвечающие по составу магнетиту и титаномagnetиту. Пики меди и углерода возбуждаются от медной сеточки и коллодиевой подложки.

Количественный анализ HASP-стекел, определенный в ПЭМ в коричневых жаманшинитах, показал в среднем следующий диапазон колебания элементов (мас.%): MgO — 0–0.3; Al_2O_3 — 31–38; SiO_2 — 33–35; CaO — 18–25; TiO_2 — 0–2; FeO — 5–9. Они были так же, как и лунные стекла, гомогенны на уровне локальности СЭМ и не содержали включений, а в их составе фиксировались Na и K (до 5 мас.%). В этих стеклах были отмечены многочисленные крупные (до 200 нм) включения нанокристаллов полевых шпатов. Наличие этих нанокристаллов заметно сказывается на результатах не столь локальных анализов, привнося в них элементы, характерные для полевых шпатов, в частности Na и K. Исходя из вышесказанного можно заключить, что анализы HASP-стекел,

полученные на СЭМ, искажают информацию о их реальном составе в связи с присутствием наноразмерных включений, фиксируемых при помощи ПЭМ. Поэтому реальный состав таких стекел можно определять только на уровне локальности ПЭМ.

Таким образом, в условиях земного импакта мы имеем практически полный аналог лунных HASP-стекел, и этот термин вполне правомерно использовать и для земных импактитов, обогащенных Al на фоне обеднения Si при значительной доле тугоплавких элементов.

Что касается лунных стекел HASP, то выдвигались различные версии в отношении исходной породы с учетом эффекта частичного испарения, в частности натрия и кремния. Так, в результате кластерного анализа было показано, что HASP-стекла образовались в результате испарения анортозитового габбро, так как, по данным (Naney et al., 1976), они имеют

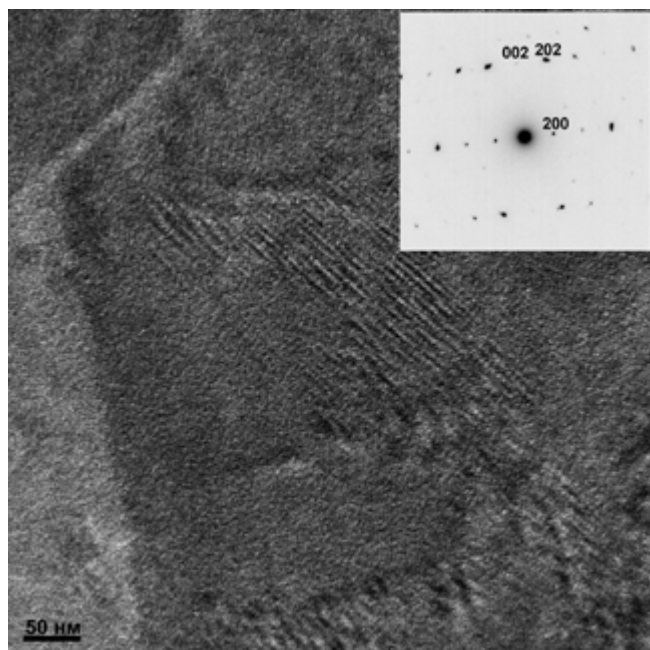


Рис. 3. Кристаллическое включение пироксена в частице стекла типа HASP. «Луна-24». ПЭМ.

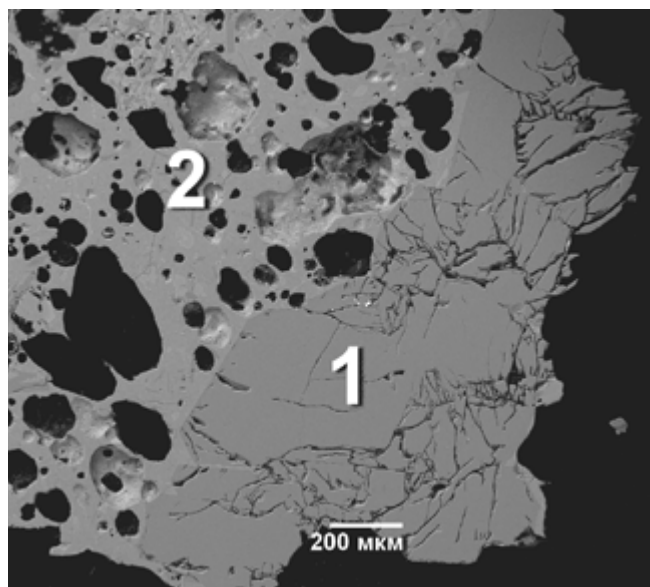


Рис. 4. Контакт двух типов стекол: 1 – стекло состава HASP, 2 – расплавное стекло жаманшинита. СЭМ, отраженные электроны.

состав промежуточный между континентальным базальтом (анортзитовым габбро) и плагиоклазовыми стеклами. Существует мнение, что стекла HASP – результат высокотемпературного импактного плавления анортита (Norris et al., 1993), для которого атомные соотношения $\text{Ca} : \text{Al} : \text{Si} = 1 : 2 : 2$. Другая версия – что исходной породой для стекол HASP, по мнению (Parike et al., 1997), являлись грунт и/или брекчия KREEP базальтов.

Таким образом, нет фиксированных границ содержания основных компонентов для однознач-

ной идентификации этих стекол (Norris et al., 1993; Adcock et al., 1997), а термин HASP используется, чтобы описать любое лунное стекло, в котором отмечено обогащение Al на фоне обеднения Si, что в большинстве случаев могло произойти именно при испарении в результате импактного события (Adcock et al., 1997).

В то же время прогнозируемые процентные потери SiO_2 не могут быть не только точными, а даже приблизительными. Так, по результатам лазерного испарения потери кремнезема для стекол лунного реголита в ряде случаев превышают 30 мас.% от первоначального содержания (Ivanov, Florensky, 1975). По данным других экспериментов, в процессе испарения массовые потери кремнезема для всех HASP-стекол варьируют ~ 20–50% (Yakovlev et al., 2009). Такой широкий диапазон авторы объясняют индивидуальной тепловой историей для каждой частицы, вызванной временной и пространственной неоднородностью температуры. Именно этим обстоятельством объясняются значительные колебания составов изученных нами импактных стекол, что наиболее заметно на уровне локальности ПЭМ.

При этом надо учитывать, что состав стекол определяется не только процессами селективного испарения при импакте, но также и интенсивным перемешиванием разнородных расплавов с возможной последующей ликвацией (Zolensky, Koeberl, 1991; Pratesi et al., 2002). Таким образом, в случае импактных стекол использовать метод прямых аналогий с исходными породами по большей части неправомерно.

Тектитоподобные стекла на Земле и на Луне

Помимо HASP-стекол земные стекла, называемые тектитами, также не имеют аналогов среди пород мишени. О'Киф обнаружил тектитоподобные стекла на Луне в образцах миссии «Аполлон-12» (O'Keefe, 1970). Им приведен их следующий состав (мас.%): $\text{Na}_2\text{O} - 0.7$, $\text{MgO} - 6$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 12$, $\text{SiO}_2 - 61$, $\text{K}_2\text{O} - 2$, $\text{CaO} - 6.3$, $\text{TiO}_2 - 1.2$, $\text{FeO} - 10$. На основании похожеści составов этих стекол и земных тектитов О'Киф (O'Keefe 1976) утверждал, что последние являются лунными вулканическими стеклами, занесенными на Землю кометой. Аналогичной версии придерживались некоторые исследователи и в отношении происхождения иргизитов (Изох, 1986; Скублов, Тюгай, 2004).

В ходе настоящих исследований в образцах реголита, доставленного АС «Луна-16» были зафиксированы стекла, близкие по составу к тектитам. На рис. 7 показан фрагмент тектитоподобного стекла (мас.%): $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13.4$,

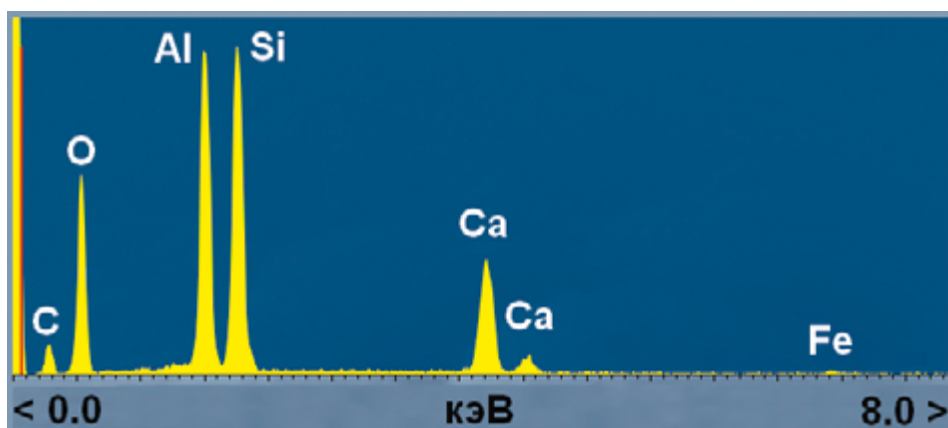


Рис. 5. ЭДС-спектр HASP-стекла (от стекла-1), представленного на рис. 4. Жаманшинит. СЭМ.

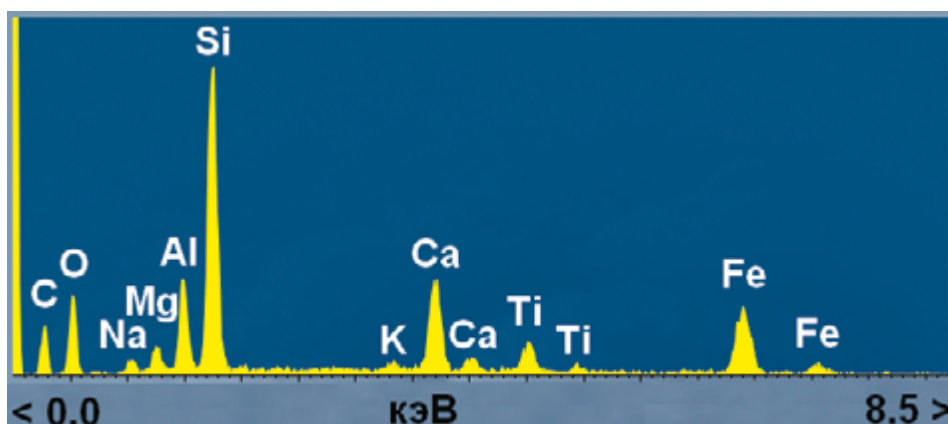


Рис. 6. ЭДС-спектр от стекла-2, представленного на рис. 4. ПЭМ. Жаманшинит. СЭМ.

SiO_2 — 74.8, K_2O — 2.7, CaO — 3.2, FeO — 6.0, заключенного в матрицу стекла другого состава (мас.%): MgO — 5.0, Al_2O_3 — 1.3, SiO_2 — 51.9, CaO — 6.1, TiO_2 — 0.8, MnO — 1.0, FeO — 34.0.

Состав такого тектитоподобного стекла сравним с составом стекол, обнаруженных О'Кифом (O'Keefe, 1970) в образцах лунного грунта. Еще лучше этот состав коррелирует с составами земных тектитов, в среднем содержащих (мас.%): SiO_2 — 68–82, Al_2O_3 — 10–15 (Флоренский, Диков, 1981; Отмахов и др., 2006; Magna et al., 2011 и др.) и изученных нами иргизитов (мас.%): SiO_2 ~ 75.6, TiO_2 ~ 0.5, Al_2O_3 ~ 10, MgO ~ 3.0, CaO ~ 2.8, FeO ~ 5.3, Na_2O ~ 0.8, K_2O ~ 2.0 (Горностаева и др., 2016).

Таким образом, вне зависимости от места локализации импакта (как на Земле, так и на Луне) при испарении и расплавлении вещества мишени в газовое облако и в расплав в значительном количестве поступают основные петрогенные элементы, такие как Na, K, Fe, Si, Mg, Al, Ca. При высокоэнергетичном взрыве значения температуры и давления заведомо превосходят величины, необходимые для испарения этих элементов. В то же время градиенты падения значений этих параметров

лишь незначительно зависят от места импакта и от внешних условий (Зельдович, Райзер, 2008). Соответственно из этого расплава с подобным набором элементов и будут формироваться стекла, часть которых будет близка по составу и строению аналогичным стеклам в других импактных структурах. Следствием вышесказанного является схожесть составов некоторых стекол в различных импактных проявлениях как на Земле, так и на Луне, что подтверждается не только настоящими исследованиями, но и литературными источниками (Изох, Ле Дык Ан, 1983; Скублов, Тюгай, 2004). Видимо, к таким стеклам относятся и тектитоподобные стекла на Луне, иргизиты, а также HASP-стекла из кратера Жаманшин и лунного грунта.

Конденсатные стекла на Земле и на Луне

Конденсатные стекла глобулярного характера, образовавшиеся при слипании отдельных глобул в агрегаты, хоть и в небольших количествах, но были зафиксированы нами в реголите, доставленном тремя советскими АС. Помимо агрегатов были зафиксированы и одиночные конденсатные глобулы размером до 200 нм. Такие глобулы найдены как в лунном реголите (рис. 8), так и в образцах жаманшинитов (рис. 9).

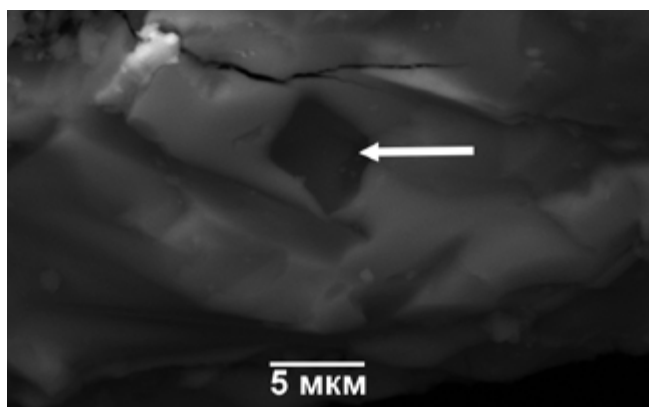


Рис. 7. Частица реголита. Стрелкой указано включение стекла тектитового состава. «Луна-16». СЭМ, отраженные электроны.

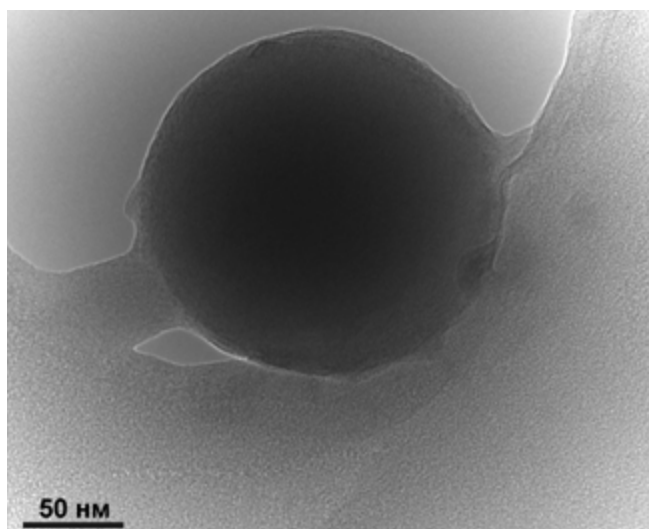


Рис. 8. Аморфный шарик конденсатного стекла. «Луна-24». ПЭМ.

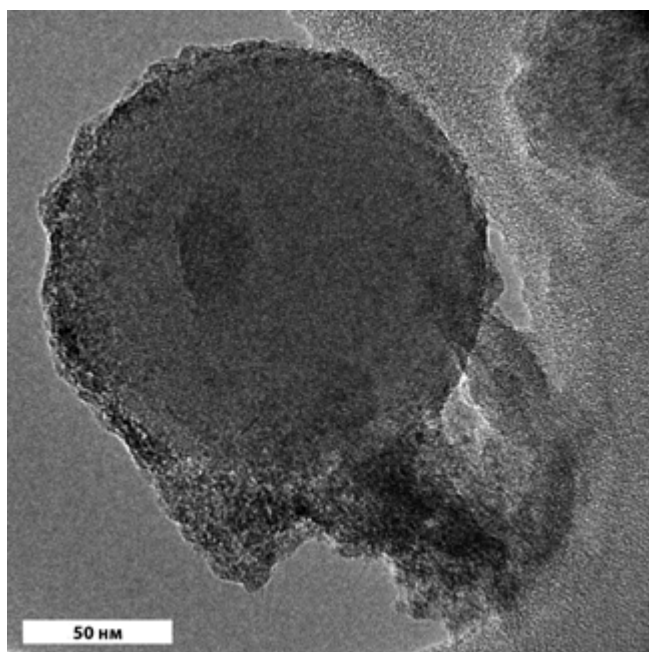


Рис. 9. Конденсатный шарик в жаманшините. ПЭМ.

В лунном реголите изредка отмечаются менее кремнеземистые глобулярные стекла, содержащие легколетучие элементы, такие как Na и K. Как правило, эти стекла раскристаллизованы — в их толще формируются поли- и монокристаллы минеральных фаз, в частности пироксенов (рис. 10). Аналогичные стекла в рамках настоящей работы выявлены и в расплавной части жаманшинитов (рис. 11).

Конденсатные стекла были зафиксированы и при изучении образцов иргизитов методами ПЭМ с локальностью порядка 5 нм. Такие конденсатные стекла, имеющие глобулярную морфологию, характеризуются высокой кремнеземистостью свыше 82–85 мас.% и наличием наноразмерных включений.

Помимо глобулярной формы конденсат может образовывать тонкие пленки на поверхности частиц, обволакивая их, как на Луне, так и на Земле.

Например, на кристалле пироксена в пробе реголита (АС «Луна-24») была зафиксирована стеклянная пленка толщиной около 200 нм. Анализ ее состава показал, что, помимо Si и O, она содержит лишь следовые количества Al. Такой конденсатной пленкой были покрыты многие нанокристаллы и отдельные частички в препаратах для ПЭМ. Так, многие обнаруженные частицы самородного лунного молибдена были покрыты высококремниевой конденсатной пленкой (рис. 12). В некоторых случаях в ее составе, помимо Si и O, фиксировались и легколетучие элементы, такие как Na и K. Толщина конденсатной пленки может варьировать в широких пределах за счет многократных импактов, что обуславливает ее многослойную структуру.

Аналогичные случаи покрытия нанокристаллов конденсатом в рамках настоящей работы были найдены и в земных импактных стеклах. В препаратах иргизита был обнаружен сросток монокристаллов рутила, покрытых тончайшей нанопленкой высококремниевое стекла, в котором, кроме Si и O, других элементов не зафиксировано (рис. 13). На увеличенном фрагменте видно, что толщина пленки составляет всего лишь около 10 нм (рис. 13, врезка). А в препарате жаманшинита был найден кристалл сребродольскита ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_5$), который был покрыт тонким слоем такого же предельно высококремниевое конденсата (рис. 14).

Конденсатные стекла находятся в тесной ассоциации с расплавленными, что подтверждается как настоящими исследованиями, так и данными других исследователей (Dikov et al., 2000). На основа-

нии измерения соотношений изотопов магния и кремния в HASP (Herzog et al., 2012) был сделан вывод, что они, возможно, могли включать в свой состав продукты конденсации из газово-плазменного облака.

В ходе настоящего исследования на ПЭМ-уровне была отмечена значительная неоднородность состава лунных стекол. Помимо расплавных были зафиксированы и фрагменты высококремниевое стекла, содержащего кроме SiO_2 лишь 2–7 мас.% Al_2O_3 , которые, с наибольшей вероятностью, и являются конденсатом. В некоторых случаях такие стекла находятся в ассоциации с расплавными стеклами.

Многие исследователи приписывали иргизитам (Флоренский, Диков, 1981; Margolis et al., 1991), да и тектитам (Engelhardt et al., 1987) конденсатное происхождение. Как показали расчеты, размер конденсатных капель при импакте не может превышать первые сотни нанометров, и их рост до размеров в несколько сантиметров в реальных условиях физически невозможен (Зельдович, Райзер, 2008; Яковлев и др., 2003; Лушников и др., 1991; Rietmeijer et al., 2006; Горностаева и др., 2018).

Что касается минимального размера первичных обособлений конденсатов, то, по экспериментальным данным, самые маленькие сферы имеют размер около 6 нм (Rietmeijer et al., 2006). По полученным в настоящем исследовании данным, минимальный размер отдельной сферы в лунных конденсатных стеклах составляет порядка 5–10 нм, примерно такой же диапазон размеров характерен и для конденсатных стекол кратера Жаманшин (Горностаева и др., 2016).

Максимальный размер одиночных конденсатных глобул для синтезированного конденсата варьирует от 100 нм до 400 нм (Rietmeijer et al., 2006). Среди выявленных в рамках настоящей работы лунных (рис. 8) и земных (рис. 9) конденсатных стекол зафиксированы сопоставимые по размеру (от 100 до 300 нм) сферы.

Одним из характерных признаков лунных стекол, образованных при конденсации из импактного облака, является их высокая кремнеземистость (Keller, McKay, 1992a, 1997; Christoffersen et al., 1994; Warren, 2008). Из теоретических основ и экспериментальных работ относительно испарительного процесса известно, что основным компонентом импактно-образованных паров является кремний и его летучие соединения (например, SiO), что, соответственно, отражается на составе конденсата, приводя к его высокой кремнеземистости, независимо от состава пород мишени (Иванов, 1975).

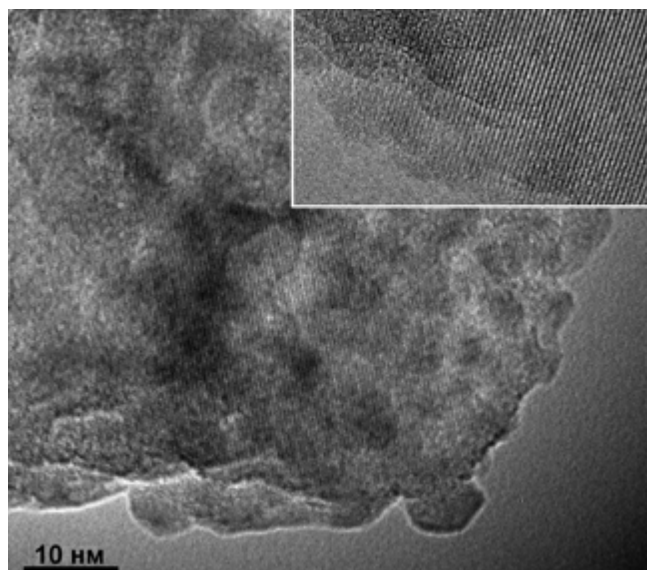


Рис. 10. Агрегат глобулярных натрийсодержащих раскристаллизованных лунных стекол. «Луна-16». На врезке фрагмент кристалла пироксена. ПЭМ.

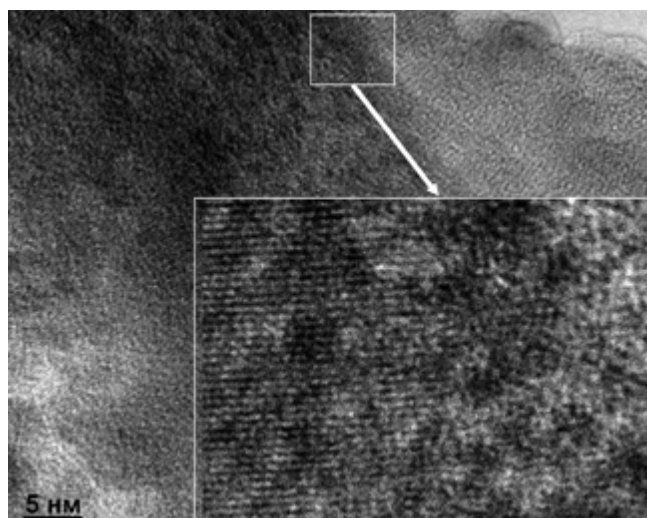


Рис. 11. Агрегат глобулярного натрийсодержащего раскристаллизованного стекла. Жаманшинит. На врезке фрагмент кристалла пироксена. ПЭМ.

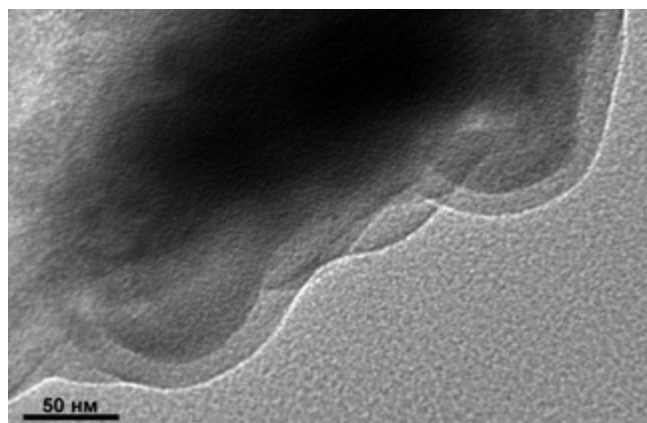


Рис. 12. Нанокристаллы самородного молибдена в конденсатной пленке. «Луна-24». ПЭМ.

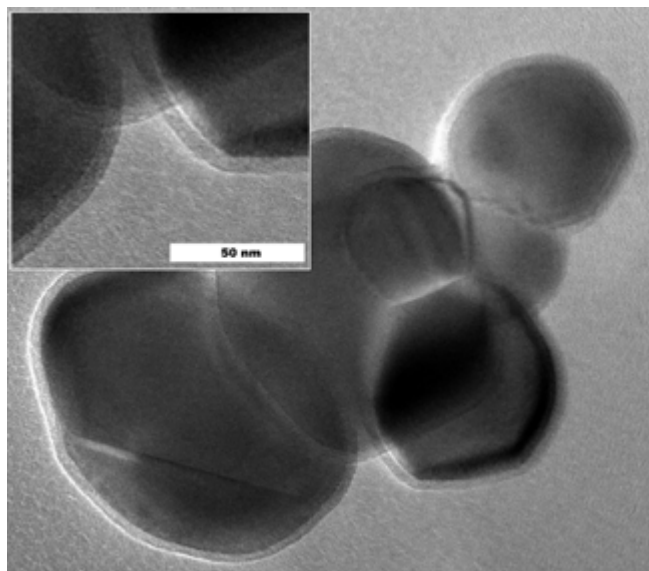


Рис. 13. Кристаллы рутила, покрытые нанослоем стекла.

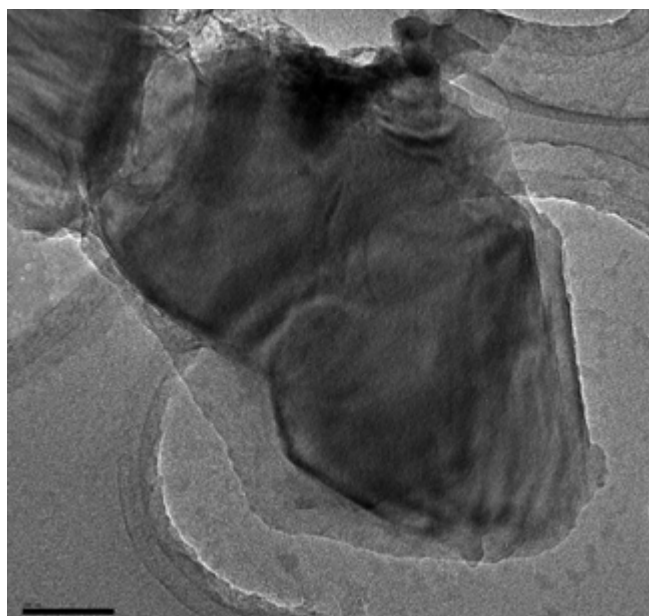


Рис. 14. Крупное включение сребродольскита $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, покрытое конденсатной пленкой. Жаманшинит. ПЭМ.

Келлер и Маккей (1992a) описали наносфероиды, которые содержали в среднем 89 мас.% SiO_2 , а некоторые — до 93 мас.% при небольшой примеси Al. Высокая кремнеземистость и сферическая форма, по мнению авторов, является признаком их образования в результате конденсации из газового облака. Именно такие наносфероиды и были зафиксированы в рамках настоящей работы как в образцах лунного реголита, так и в препаратах жаманшинита.

Однако, следует отметить, что вещество конденсатных стекол никогда не состоит только

лишь из SiO_2 . Так, в изученных иргизитах и жаманшинитах даже самые высококремниевые конденсатные стекла не состояли на 100% из SiO_2 , в них все же содержалось порядка 2–3 мас.% Al_2O_3 . В найденных на ПЭМ гомогенных конденсатных стеклянных сферах из образцов лунного грунта также была отмечена небольшая примесь Al_2O_3 (1–3 мас.%). В следовых количествах (в пределах чувствительности метода) могли фиксироваться и другие элементы. Следует заметить, что такая ситуация характерна и для синтезированного конденсата — по результатам экспериментов было отмечено, что кремниевый конденсат обычно содержит небольшие количества Al и Fe (Rietmeijer, Karner, 1999).

Именно на основании сферической формы и высокой кремнеземистости (SiO_2 от 81 до 97 мас.%) стекла GASP (Gas-Associated Spheroid Precipitate — осажденные газоассоциированные сфероиды) — высококремнеземистые конденсатные стекла размером менее 10 мкм, найденные в лунных образцах (Warren, 2008), были отнесены к конденсатным. Однако, как было обосновано выше, сфероиды GASP размером около 10 мкм не могут иметь конденсатное происхождение. Кроме того, ранее нами было показано, что иргизиты — это капли расплава, покрытые нанометровым слоем конденсатного стекла (Горностаева и др., 2016). Видимо аналогичный механизм образования и у стекол типа GASP, найденных в матрице стекол HASP (Warren, 2008). Автор объясняет это тем, что застывшие в полете капли расплава упали обратно в горячий расплав. На приведенных им электронно-микроскопических снимках четко зафиксированы сферулы GASP, имеющие на поверхности некоторую оболочку. Можно предположить, что аналогично иргизиту капли GASP, пролетая через импактное облако, покрывались конденсатом, который, видимо, и зафиксировал Воррен (Warren, 2008) как некую оболочку на их поверхности. Причем, судя по контрасту в отраженных электронах, на этих снимках конденсат, покрывающий сферулы GASP, был существенно более железистым, чем высококремниевый конденсат иргизитов. Этот факт можно объяснить большим содержанием железа в газо-плазменном облаке импакта и пролетом GASP-шариков сквозь это облако в более высокотемпературном интервале конденсационного окна по сравнению с условиями образования иргизита.

Для каждого соединения характерна определенная температура испарения и конденсации. Как известно из экспериментальных данных,

K_2O и Na_2O испаряются первыми, а конденсируются последними. Причем наблюдается значительный температурный разрыв в этих процессах относительно остальных элементов (Petaev et al., 2014). В случае низкотемпературной конденсации образуются стекла, обогащенные летучими компонентами. В отдельных случаях помимо значительной кремниземистости в составе конденсатных стекол в образцах лунного грунта отмечались и некоторые количества летучих элементов, прежде всего K_2O и Na_2O . Так, Келлер и Маккей (Keller, McKay, 1992b) обнаружили конденсатные стекла «VRAP» (volatile-rich alumina-poor — богатые легкими и бедные алюминием сфероиды), размер которых находится в диапазоне 200–400 нм, а содержание SiO_2 составляло порядка 54–70 мас.% и Al_2O_3 менее 5 мас.% при K_2O — 2–3.5 мас.% и Na_2O — 0.4–1.4 мас.%. Для них также характерно высокое содержание FeO — 20–32 мас.%. Однако оно объясняется наличием значительного количества наноразмерных железных включений, обнаруженных авторами (Keller, McKay, 1992b) в этих стеклах. Они считают, что стекла VRAP представляют собой конденсаты, образованные при дифференциации силикатных паров из расплава во время формирования HASP. Позднее (Warren, 2008) было высказано предположение, что высокое содержание летучих в стеклах VRAP, могло быть вызвано осаждением легких элементов на поверхностях сфероидов при пролете через низкотемпературную зону газо-плазменного облака. Фактически некоторые экспериментально полученные конденсатные стекла (Яковлев и др., 2000) также очень близки к стеклам VRAP.

Такой низкотемпературный процесс может осуществляться либо на самой завершающей стадии конденсационного окна, либо в замкнутом поровом пространстве, при высокой концентрации летучих компонентов в парах. Исходя из этого, можно проследить схожие черты лунных стекол VRAP и порового конденсата. Такой поровый конденсат был зафиксирован в ходе настоящей работы среди расплавных стекол жаманшинита (рис. 11). Его формирование, по всей видимости, связано с конденсационными процессами в замкнутой системе поры на ее стенках из насыщенных легкими элементами паров. Аналогичный конденсат на Луне, найденный в рамках настоящей работы (рис. 10), образовывался, скорее, в вулканогенных стеклах, чем в импактных, поскольку поверхностный слой лунного грунта обеднен летучими элементами (Флоренский, Николаева, 1984; Иванов, 2014). Однако,

в отличие от вулканогенного конденсата, стекла VRAP имеют явные признаки импактного процесса (Keller, McKay, 1992b; Warren, 2008). Соответственно, их образование возможно только на заключительном низкотемпературном этапе существования конденсационного окна.

Ранее считалось, что аморфизованные пленки на поверхности частиц характерны только для безатмосферных космогенных тел и их формирование обусловлено воздействием солнечного ветра (СВ). Частицы реголита, подвергаются воздействию ионов солнечного ветра, проникающих на глубину нескольких десятков нанометров от их поверхности. При этом происходит аморфизация поверхностного слоя реголита, в результате чего формируются пленочные стеклянные каймы, которые впервые были найдены в образцах «Аполлона» (Dran et al., 1970; Bibring et al., 1972). В число действующих факторов СВ входят и потоки тяжелых ионов, которые оставляют треки в зернах реголита (Walker, Yuhas, 1973). Одним из возможных эффектов воздействия СВ является обогащение легкими элементами, в том числе и углеродом. Однако приверженцами теории солнечного ветра была упущена возможность образования аморфных пленок непосредственно в результате импакта, хотя теоретические работы (Зельдович, Райзер, 2008) прямо указывают на такую его природу как на основную. Однако в других работах этот пробел был восполнен (Keller, McKay, 1991; Dikov et al., 1998).

В случае гетерогенного зарождения и роста капель при конденсационном процессе скорость их роста одинакова и высока вероятность слияния таких капель с последующим послойным ростом в течение оставшегося времени конденсации и с образованием пленок наноразмерной толщины без сохранения глобулярного характера составляющих их элементов. Этот факт подтверждается как для лунных пород (Wentworth et al., 1999), так и для зерен реголита (Noble et al., 2001). При гигантском количестве импактов и микроимпактов на Луне и отсутствии вторичных процессов выветривания, которые могли бы разрушать такие пленки, их присутствие на частицах реголита должно быть распространено повсеместно.

В отличие от лунного реголита, где часто регистрируются конденсатные пленки на его фрагментах, в случае земных импактных стекол находки такого покрытия единичны, но, тем не менее, они существуют. Например, нами был найден пленочный конденсат, покрывающий нанокристаллы серебродольскита (рис. 14) в иргизите и рутила (рис. 13) в иргизите.

Пленочные конденсаты отличаются от сферических (капельных), образованных в импактном облаке, прежде всего структурой и составом. Сравнение составов конденсатных пленок, полученных в результате эксперимента, с составами пленок найденных на частицах лунного реголита (Keller, McKay, 1997), позволило сделать авторам (Яковлев и др., 2010) вывод о том, что при их образовании происходит полное осаждение паров без учета индивидуальной летучести компонентов. Результаты эксперимента по испарению и конденсации авгита показали, что верхние слои конденсата содержат повышенные концентрации натрия (до 5.7 мас. %) (Диков и др., 2009). Состав стеклянной пленки отличается от матричного стекла наличием легколетучих элементов, таких, например, как натрий или цинк. Ранее Диковым с соавторами (Dikov et al., 2002) при изучении лунных стекол из проб грунта АС «Луна-16» методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было отмечено, что их поверхностный слой неоднороден по составу и обогащен летучими элементами, такими как Zn, Na, C. Таким образом, в конденсатных пленках, могут присутствовать как легколетучие (C, Na, K, Zn), так и умеренно-летучие (Si, Fe) элементы. В рамках настоящей работы было подтверждено наличие в составе некоторых пленочных лунных конденсатов летучих элементов, в том числе Na и K, а также углерода. Хотя присутствие в таких пленках легколетучих не всегда обязательно.

Изменение толщины таких пленок является следствием как энергетических характеристик импакта и времени нахождения частицы в зоне конденсации, так и последующими воздействиями на нее. Таковыми могут быть возможные повторные импакты и бомбардировка СВ, которые могут увеличить толщину этой пленки.

Стеклянная конденсатная пленка на поверхности частиц выполняет консервирующую роль, предотвращая от окисления металлические фазы, образованные при импактах как на Луне, так и на Земле (Мохов и др., 2011; Горностаева и др., 2014, 2016).

В отличие от Луны на Земле конденсат, содержащий летучие компоненты, практически не имеет шансов сохраниться во времени, поскольку будет разрушен процессами выветривания. Поэтому обнаруженный впервые в настоящей работе в земных импактитах пленочный конденсат был только высококремниевым, за исключением найденного в закрытых порах жаманшинитов (Горностаева и др., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие импактные стекла как на Луне, так и на Земле имеют сходное строение и состав, что определяется, прежде всего, физикой импакта и одинаковым набором элементов. Это дает основание использовать единую для Земли и Луны классификационную схему и полнее применять метод аналогий, что позволяет с большей достоверностью экстраполировать результаты изучения земных образцов на лунные, что особенно важно, учитывая дефицит лунного материала.

Интенсивные процессы полного расплавления вещества при перемешивании, испарении и конденсации, приводят к образованию стекол, состав которых слабо коррелирует с таковыми пород мишени и материалом ударника. Часть стекол будет более зависима от материала конкретной мишени, но часть будет иметь некий универсальный состав. При этом надо учитывать, что состав стекол определяется не только процессами селективного испарения, но также и интенсивным перемешиванием разнородных расплавов при импакте с возможной последующей ликвацией. В случае импактных стекол как лунных, так и земных использовать метод прямых аналогий с исходными породами в большинстве случаев неправомерно.

Поверхностный аморфный слой на частицах реголита образуется не только в результате взаимодействия вещества с солнечным ветром, но и может возникать как на Луне, так и на Земле при импактных событиях. Конденсатная стеклянная пленка на поверхности частиц металлов и минеральных фаз выполняет фиксирующую и защитную роль, препятствуя окислению и вторичным изменениям, в том числе и при длительном контакте с атмосферой.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность проф., докт. геол.-мин. наук П.В. Флоренскому (РГУ нефти и газа им. Губкина) и канд. геол.-мин. наук М.К. Суханову (ИГЕМ РАН) за предоставленные образцы.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Исследования состава и структуры минерального вещества высоколокальными методами».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горностаева Т.А., Мохов А.В., Горностаев А.Н. Ультразвуковой экстрактор для пробобработки в просвечивающей электронной микроскопии // VII Всеросс. конф. по рентгеноспектральному анализу. Новосибирск, 2011. С. 53.

- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатииков О.А. Защитная роль стекляннй пленки на поверхности металлических частиц лунного реголита // Докл. АН. 2014. Т. 459. № 3. С. 349–351.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатииков О.А. Конденсатные стекла кратера Жаманшин. I: Иргизиты // Петрология. 2016. Т. 24. № 1. С. 3–24.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатииков О.А. Конденсатные стекла кратера Жаманшин. II: Жаманшиниты // Петрология. 2017. Т. 25. № 1. С. 3–21.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богатииков О.А. Тип ударника образовавшего кратер Жаманшин (Казахстан) // Петрология. 2018. Т. 26. № 1. С. 90–104.
- Диков Ю.П., Герасимов М.В., Яковлев О.И., Иванов А.В. Валентное состояние железа в конденсате реголита доставленного АЛС «Луна-16» // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 459–469.
- Зельдович Б., Райзер Ю. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 656 с.
- Иванов А.В. Роль испарения в формировании химического состава лунных стекол // Геохимия. 1975. № 8. С. 1150–1153.
- Иванов А.В. Летучие компоненты в образцах лунного реголита. Обзор // Астрономический Вестник. 2014. Т. 48. № 2. С. 120–138.
- Изох Э.П. Петрохимия пород мишени, импактитов и тектитов астроблемы Жаманшин // Космическое вещество и Земля. Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1986. С. 159–203.
- Изох Э.П., Ле Дык Ан. Тектиты Вьетнама. Гипотеза кометной транспортировки // Метеоритика. 1983. № 42. С. 158–169.
- Карташов П.М., Мохов А.В., Горностаева Т.А. и др. Минеральные фазы на сколах стекляннх частиц и в препарате тонкодисперсной фракции из пробы реголита АС «Луна-24» // Петрология. 2010. Т. 18. № 2. С. 115–133.
- Лушников А.А., Негин А.Е., Пахомов А.В., Смирнов Б.М. Аэрогельные структуры в газе // Успехи физических наук. 1991. Т. 161. № 2. С. 113–123.
- Маркова О.М., Яковлев О.И., Семенов Г.А., Белов А.Н. Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена // Геохимия. 1986. № 11. С. 1559–1569.
- Мохов А.В. Аналитическая электронная микроскопия в изучении ультрадисперсной фракции лунного грунта // I Всерос. молодеж. конф. «Минералы, строение, свойства, методы исследования». Ильмены. 2009. С. 42–45.
- Мохов А.В., Карташов П.М., Горностаева Т.А., Богатииков О.А. Самородный иттербий из реголита АС «Луна-24» // Докл. АН. 2011. Т. 441. № 5. С. 670–673.
- Отмахов В.И., Варламова Н.В., Мананков А.Н., Лапова Т.В. Физико-химические исследования тектитов в интересах космического мониторинга // Изв. Томского политехнического ун-та. 2006. Т. 309. № 5. С. 40–44.
- Скублов Г.Т., Тюгай О.М. Петрохимическая модель образования тектитоподобных стекол кратера жаманшин и связь их с лунным импактогенезом // ЗВМО. 2004. № 6. С. 95–117.
- Флоренский К.П., Николаева О.В. О летучих компонентах и материковом веществе планет // Геохимия. 1984. № 9. С. 1251–1267.
- Флоренский П.В., Диков Ю.П. Генезис тектитов – причина их состава и структуры // Геохимия. 1981. № 6. С. 809–819.
- Яковлев О.И., Косолапов А.И., Кузнецов А.В., Нусинов М.Д. Результаты исследования фракционного испарения базальтового расплава в вакууме // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206. № 4. С. 970–973.
- Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В., Влотцка Ф. Особенности испарения алюминия из силикатных расплавов // Геохимия. 1997. № 12. С. 1181–1195.
- Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. Роль ударно-испарительной дифференциации на стадии аккреции Земли // Геохимия. 2000. № 10. С. 1027–1045.
- Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. и др. Экспериментальное изучение факторов, определяющих состав стекол лунного реголита // Геохимия. 2003. № 5. С. 467–481.
- Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. Экспериментальные данные по импульсному плавлению обсициана и их приложение к анализу составов импактных стекол // Геохимия. 2005. № 3. С. 243–253.
- Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. Составы лунных конденсатов и условия их образования на поверхности // XVI Росс. совещ. по экспериментальной минералогии. 2010. С. 291–293.
- Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. Условия образования плёночных конденсатов на поверхности частиц лунного реголита // Геохимия. 2011. № 10. С. 1025–1031.
- Adcock C.T., Spilde M.N., Papike J.J. Automated HASP glass search using the electron microprobe // XXVIII Lunar Planet. Sci. 1997. V. 28. P. 1151–1152.
- Arndt J.V., Engelhardt W. Formation of Apollo-17 orange and black glass beads // Proc. XVII Lunar Planet. Sci. Conf. Part 2. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1987. V. 92. № B4. P. 372–376.
- Bibring J.P., Duraud J.P., Durrieu L. et al. Ultrathin amorphous coatings on lunar dust grains // Science. 1972. V. 175. P. 753–755.
- Christoffersen R., McKay D.S., Keller L.P. Grain rims on ilmenite in the lunar regolith: comparison to vapor deposits on regolith silicates // XXV Lunar Planet. Sci. Conf. Proc. 1994. V. 25. P. 259–260.
- Cliff G., Lorimer G.W. Quantitative analysis of thin metal foils using EMMA-4, the ratio technique // Proceedings of the 5th European Congress on Electron Microscopy. The Institute of Physics, London. 1972. P. 140–141.
- Delano J.W., Lindsley D.H., Rudowski R. Glasses of impact origin from Apollo-11, -12, -15, and -16: Evidence for fractional vaporization and mare/highland mixing // Proc. Lunar Planet. Sci. 12B. 1981. P. 339–370.

- Dran J.C., Durrieu L., Jouret C., Maurette M.* Habit and texture studies of lunar and meteoritic materials with a 1 MeV electron microscope // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1970. V. 9. № 5. P. 391–400.
- Dikov Yu.P., Ivanov A.V., Wlotzka F. et al.* High enrichment of carbon and volatile elements in the surface layers of Luna 16 soil sample 1635: Result of comet or meteorite impact? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. V. 155. № 3. P. 197–204.
- Dikov Yu.P., Gerasimov M.V., Yakovlev O.I., Wlotzka F.* The correlation of alkalis and aluminum during high-temperature volatilization of albite and nepheline // *XXIV Lunar Planet. Sci. Conf. Proc. Abstracts.* 1993. P. 403–404.
- Dikov Y.P., Huth J., Wlotzka F., Ivanov A.V.* HASP glasses in Apollo-17 orange soil sample 74220 // *XXXI Lunar Planet. Sci. Conf.* 2000. V. 31. P. 1110–1111.
- Dikov Yu.P., Ivanov A.V., Wlotzka F., Galimov E.M., Wanke G.* The nature of volatiles in the lunar regolith // *Solar System Research.* 2002. V. 36. № 1. P. 1–11.
- Dowty E., Keil K., Prinz M.* Major-element vapor fractionation on the lunar surface: An unusual lithic fragment from the Luna 20 fines // *Lunar Planet. Sci. Conf.* 1973. V. 21. № 1. P. 91–96.
- Engelhardt W.V., Stengelin R.* Normative composition and classification of lunar igneous rocks and glasses, II Lunar glasses // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. V. 52. Iss. 1. P. 55–66.
- Engelhardt W.V., Luft E., Arndt J. et al.* Origin of moldavites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1987. V. 51. № 6. P. 1425–1443.
- Fredriksson K., Nelen J., Melson W.G.* Petrography and origin of lunar breccias and glasses // *Geochim. Cosmochim. Acta. Supplement.* 1970. V. 1. P. 419.
- Herzog G.F., Delaney J.S., Lindsay F. et al.* Magnesium and silicon isotopes in HASP glasses from Apollo-16 lunar soil 61241 // *XLIII Lunar Planet. Sci. Conf.* 2012. P. 1579–1580.
- Horz F., Fechtig H., Janicke J., Schneider E.* Morphology and chemistry of projectile residue in small experimental impact craters // *XIV Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1983. V. 14. P. B353–B363.
- Ivanov A.V., Florensky K.P.* The role of vaporization processes in lunar rock formation // *VI Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1975. V. 6. P. 1341–1350.
- Keller L.P., McKay D.S.* The origin of amorphous rims on lunar plagioclase grains: Solar wind damage or vapor condensates // *LIV Annual Meet. Meteorit. Soc.* 1991. V. 766. P. 114.
- Keller L.P., McKay D.S.* Impact glasses and vapor condensates in Apollo-11 soil // *Lunar Planet. Sci. Conf. Abstracts.* 1992a. V. 23. P. 673–674.
- Keller L.P., McKay D.S.* Micrometer-sized glass spheres in Apollo-16 soil 61181: implications for impact volatilization and condensation // *Lunar Planet. Sci. Conf.* 1992b. V. 22. P. 137–141.
- Keller L.P., McKay D.S.* The nature and origin of rims on lunar soil grains // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. № 11. P. 2331–2341.
- Koeberl C.* Blue glass: A new impactite variety from Zhamanshin crater, U.S.S.R. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1988. V. 52. Is. 3. P. 779–784.
- Ma M.-S., Schmitt R.A., Warner R.D. et al.* Genesis of Apollo-15 olivine normative mare basalts: Trace elements correlations // *IX Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1978. V. 9. P. 523–533.
- Magna T., Deutsch A., Mezger K. et al.* Lithium in tektites and impact glasses: Implications for sources, histories and large impacts // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2011. V. 75. № 8. P. 2137–2158.
- Margolis S.V., Claeys P., Kyte F.T.* Microtektites, microkrytites, and spinels from a late Pliocene asteroid impact in the Souterm ocean // *Science.* 1991. V. 251. № 5001. P. 1594–1597.
- Naney M.T., Crowl D.M., Papike J.J.* The Apollo-16 drill core: statistical analysis of glass chemistry and the characterization of a high alumina-silica poor (HASP) glass // *Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1976. V. 7. P. 155–184.
- Naughton J.J., Hammond D.A., Margolis S.V., Muenow D.W.* The nature and effect of the volatile cloud produced by volcanic and impact events on the Moon as derived from a terrestrial volcanic model // *III Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1972. V. 3. P. 2015–2024.
- Noble S.K., Pieters C.M., Taylor L.A. et al.* The optical properties of the finest fraction of lunar soil: Implications for space weathering // *Meteorit. Planet. Sci.* 2001. V. 36. № 1. C. 31–42.
- Norris J.A., Keller L.P., McKay D.S.* Impact glasses from the ultrafine fraction of lunar soils // *XXIV Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1993. V. 24. P. 1093–1094.
- O'Keefe J.A.* Tektite glass in Apollo-12 sample // *Science.* 1970. V. 168. P. 1209–1210.
- O'Keefe J.A.* Tektites and their Origin. New York: Elsevier, 1976. 254 p.
- Papike J.J., Spilde M.N., Adcock C.T. et al.* Trace element fractionation by impact-induced volatilization-SIMS study of lunar HASP glasses // *Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1997. V. 28. P. 1059.
- Petaev M.I., Wood J.A.* The condensation with partial isolation (CWPI) model of condensation in the solar nebula // *Meteorit. Planet. Sci.* 1998. V. 33. № 5. P. 1123–1137.
- Petaev M.I., Jacobsen S.B., Huang S.* Testing models of moon origin: condensation of impact-vaporised bulk silicate earth material // *XLV Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 2014. P. 2316–2317.
- Reid A.M., Warner J., Ridley W.I., Brown R.W.* Major element composition of glasses in three Apollo-15 soils // *Meteoritics.* 1972. V. 7. № 3. P. 395–415.
- Rietmeijer F.J.M., Karner J.M.* Metastable eutectics in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system explored by vapor phase condensation // *Journal of Chemical Physics.* 1999. V. 110. P. 4554–4558.
- Rietmeijer F.J.M., Nuth, J.A., Rochette P. et al.* Deep metastable eutectic condensation in Al-Fe-SiO₂-H₂-O₂ vapors: Implications for natural Fe-aluminosilicates // *Amer. Mineral.* 2006. V. 91. P. 1688–1698.

- Roedder E., Weiblen P.W. Apollo-17 «orange soil» and meteorite impact on liquid lava // *Nature*. 1973. V. 244. P. 210–212.
- Pratesi G., Viti C., Cipriani C., Mellini M. Silicate-silicate liquid immiscibility and graphite ribbons in Libyan desert glass // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2002. V. 66. № 5. P. 903–911.
- Vaniman D.T. Glass variants and multiple HASP trends in Apollo 14 regolith breccias // *Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1990. V. 20. P. 209–217.
- Walker R., Yuhas D. Cosmic ray track production rates in lunar materials // *Geochim. Cosmochim. Acta. Supplement 4*. 1973. V. 3. P. 2379–2389.
- Warren P.H. Lunar rock-rain: Diverse silicate impact-vapor condensates in an Apollo-14 regolith breccias // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2008. V. 72. P. 3562–3585.
- Warren P.H., Kallemeyn G.W. QUE93069: a lunar meteorite rich in HASP glasses // *XXVI Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1995. V. 26. P. 1465–1466.
- Wentworth S.J., McKay D.S. Glasses in ancient and young Apollo-16 regolith breccias: Populations and ultra Mg glasses // *XVIII Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 1988. V. 18. P. 67–77.
- Wentworth S.J., Keller L.P., McKay D.S., Morris R.V. Space weathering on the Moon: patina on Apollo-17 samples 75075 and 76015 // *Meteorit. Planet. Sci.* 1999. V. 34. № 4. P. 593–603.
- Wood J.A., Hashimoto A. Mineral equilibrium in fractionated nebular systems // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993. V. 57. № 10. P. 2377–2388.
- Yakovlev O.I., Gerasimov M.V., Dikov Yu.P. Temperatures of formation of HASP and GASP particles // *XL Lunar Planet. Sci. Conf. Proc.* 2009. V. 40. P. 1261.
- Zolensky M.E., Koeberl C. Why are blue zhamanshinites blue? Liquid immiscibility in an impact melt // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. № 5. P. 1483–1486.

Comparison of the Compositions and Microstructures of Terrestrial and Lunar Impact Glasses: Samples from the Zhamanshin Crater and Luna 16, 20, and 24 Missionse

T. A. Gornostaeva, A.V. Mokhov, P.M. Kartashov, O.A. Bogatikov

*Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS
Staromonetnyy alley, 35, Moscow, 119017, Russia*

E-mail: avm8okhov@gmail.com

The paper presents pioneering data on the comparative study of impact glasses from the Zhamanshin crater and lunar regolith (delivered by the Luna 16, 20, and 24 probes). The data were acquired using analytical techniques of ultrahigh spatial resolution. Many of the melt and condensate impact glasses, both terrestrial and lunar, are similar in inner structure and composition, which were controlled primarily by the physics of the impacts and similar compositions of the targets.

Keywords: impact glasses, Zhamanshin crater, Moon