

УДК 52–14 + 54.051

ПОВЕДЕНИЕ СЕРЫ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ШАРИКОВ ИЗ РЕГОЛИТА ПРОБ АС ЛУНА-24 (МОРЕ КРИЗИСОВ)

© 2024 г. А. В. Мохов*, А. П. Рыбчук, Т. А. Горностаева, П. М. Карташов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва, Россия

* E-mail: avm8okhov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 17.09.2023 г.

Исследования лунного реголита, доставленного на Землю советской автоматической станцией (АС) Луна-24, с использованием высоколокальных методов электронной микроскопии позволило получить данные, подтверждающие миграцию серы при остывании металлических расплавов в процессе ликвации. В результате образуются локальные концентраты Fe-S, а часть серы вытесняется вовне, образуя серные оболочки на поверхности капель расплава. Их формирование на поверхности связано с механизмом испарения-конденсации в течение процесса остывания железных шариков. Получившиеся покрытия из серы могут сохраняться в случае консервации их в стекле или под тонкими пленками силикатного конденсата.

Ключевые слова: электронная микроскопия, автоматическая станция Луна-24, Море Кризисов, СЭМ, ЭДС, реголит, лунный грунт, самородное железо, сера, стекло, ликвация, конденсация

DOI: 10.31857/S0320930X24010059, EDN: ОНОХНВ

ВВЕДЕНИЕ

Сернистые соединения являются широко распространенными веществами на поверхности Луны. Уже первые астронавты, вышедшие на поверхность нашего спутника, отмечали своеобразный запах “пороховой гари” от частиц лунного реголита, прилипавших к лунным скафандрам (Черкасов, Шварев, 1975). Сера на Луне представлена в основном в виде сульфидных минералов, содержащихся практически во всех типах пород. Уже первые исследования доставленного на Землю лунного грунта выявили целый ряд сульфидов, в том числе троилит, пентландит, макинавит, кубанит, халькопирит, борнит. Обобщенные факты их обнаружения были освещены в монографии (FrondeL, 1975).

Во время масштабного натурного эксперимента Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) по имитации импакта, с помощью УФ-спектрографа, установленного на борту орбитального аппарата (LRO), было изучено облако пара, образовавшееся в результате удара, в котором зафиксирована сера (Gladstone и др., 2010). По данным такого прямого измерения удалось зафиксировать 0.06% атомарной серы среди высокотемпературных (600–1300 К) легколетучих элементов, при этом не исключалось возможное

наличие соединений этого элемента. По мнению (Ringwood, Kesson, 1977), содержания серы в породах Земли и Луны близки.

Дальнейшие исследования лунного реголита показали неравномерный характер распределения серы в лунной коре – морские базальты оказались значительно сильнее обогащены серой (до 3000 мг/кг) по сравнению с континентальными породами, где ее содержание не превышало 20 мг/кг (Kerridge и др., 1975). Выяснилось, что серу содержит и стекло, в том числе и стеклянные шарики лунного реголита. Так, стекла, доставленные миссиями Apollo, усредненно содержат до 0.5 мас.% серы (Righter и др., 2017). По данным других авторов, содержание серы в лунных стеклах может колебаться от 114 до 576 мг/кг (Saal и др., 2008; McCubbin и др., 2015). Особенно отмечается повышенное содержание серы в стеклянных шариках поверхностных отложений (Chou и др., 1975; Meyer (Jr) и др., 1975; Butler (Jr), Meyer (Jr), 1976; Cirlin и др., 1978; Dikov и др., 1978). При этом анализ профилей распределений серы по сечению таких шариков свидетельствует о накоплении этого элемента во внешних областях таких шариков (Dikov и др., 1978; Saal и др., 2008).

Основная доля минералов лунных пород, содержащих серу, сформировалась в период ак-

тивной магматической деятельности. Видимо, дольше всего длились процессы, связанные с вулканизмом. Они тоже являлись источником серы. Состав вулканических газов был смоделирован Renggli с соавторами (Renggli и др., 2017). По данным полученной модели, эти газы содержали в том числе и такие соединения серы, как CS_2 , COS, CS, S_2 , H_2S , H_2S_2 и HS. В широко распространенных лунных стеклах содержание серы колеблется в пределах 115–576 п.п.м., по данным (Saal и др., 2008).

Активная бомбардировка лунной поверхности на протяжении миллиардов лет также могла послужить источником серы. Этот факт явился основанием для предположения, что сера, обнаруженная на поверхности реголита, может иметь метеоритное происхождение (Moore и др., 1972).

Латеральному переносу и осаждению серы на компоненты лунного реголита могла способствовать бомбардировка протонами солнечного ветра (Kerridge и др., 1975). Keller и McKay (1993) считали солнечный ветер одним из основных факторов, способствующих формированию на частицах реголита поверхностной пленки, содержащей легколетучие элементы, в том числе серу. Кроме того, учитывая, что дневная температура по данным, полученным в ходе Diviner Lunar Radiometer Experiment, может достигать $124^\circ C$ (Williams и др., 2017), а температура плавления серы $112^\circ C$ (Булидорова и др., 2012), то не исключена ее миграция и в связи с суточными температурными циклами.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая значимую роль легких элементов (McCubbin и др., 2015) и, в частности, серы в геохимических процессах на Луне, изучение форм выделения и механизмов миграции этого элемента является актуальной задачей. Целью исследований являлся поиск фактов, иллюстративно демонстрирующих поведение серы на поверхности Луны.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

Как уже отмечалось (Dikov и др., 1978; Renggli и др., 2017), лунные стеклянные и железные шарики зачастую содержат в себе заметное количество серы. Однако основное количество таких шариков имеет субмикронные размеры. Следовательно, наиболее оптимальными средствами их исследований являются высоколокальные методы аналитической электронной микроскопии.

Изучение осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN MIRA-3, оснащенный энергодисперсионным

спектрометром (ЭДС) Oxford AzTec. Поиск фаз и элементный анализ осуществлялись при ускоряющем напряжении 25 кВ, карты распределения элементов по площади регистрировались при ускоряющем напряжении 10 кВ для повышения локальности. Подготовка препарата и резка его пучком ионов галлия выполнялись на двухпучковом микроскопе TESCAN AMBER при 30 кВ и токе 2.5 пА, а финальная полировка – при 5 кВ и токе 150 пА.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Хорошо известно, что микро- и нановыделения самородного железа часто встречаются в пробах лунного реголита (Frondel, 1975; Мохов и др., 2007). Самородное железо в пробах АС Луна-16, Луна-20 и Луна-24 фиксируется в значительных количествах как при микро-, так и наноразмерном масштабе исследований, в большинстве своем в виде шариков. Такие шарики чаще всего встречаются заключенными в матрицу стекла. Эти включения находятся как в расплавленном, так и в конденсатном стекле. Источником железа могут быть как породы Луны, так и материал импакторов, в большом количестве привносимый на ее поверхность на протяжении всей истории существования этого космического тела. Несмотря на ограниченность числа источников, конкретные процессы образования ноль-валентного железа могут различаться.

В ходе изучения препаратов лунного реголита из проб, доставленных АС Луна-24, в результате исследований на сканирующем электронном микроскопе были обнаружены шарики самородного железа диаметром около 10 мкм с заметным содержанием серы (рис. 1, табл. 1, анализ 1). Помимо серы, в спектре фиксируется небольшой пик кремния, при этом остальной набор элементов, присущий расплавленному стеклу, отсутствует. Видимо, наличие кремния обусловлено не столько флюоресценцией в окружающем стекле, а в основном тонкой пленкой высококремниевоего, вероятно конденсатного, стекла на поверхности шариков.

Положение шарика в препарате позволило разрезать его пополам пучком ионов галлия на двухпучковом сканирующем микроскопе AMBER. В результате вскрылись многочисленные включения в матрице самого шарика и стала заметной покрывающая его пленка (рис. 2). В составе железной матрицы на ЭДС-спектре, помимо Fe, фиксировались лишь слабые пики Mg, Al, Si, Ca, P, Ni и S (рис. 3а). Во включениях фиксировались пики этих же элементов, однако интенсивность пика S резко увеличилась по сравнению с матрицей, а пики силикатного набора

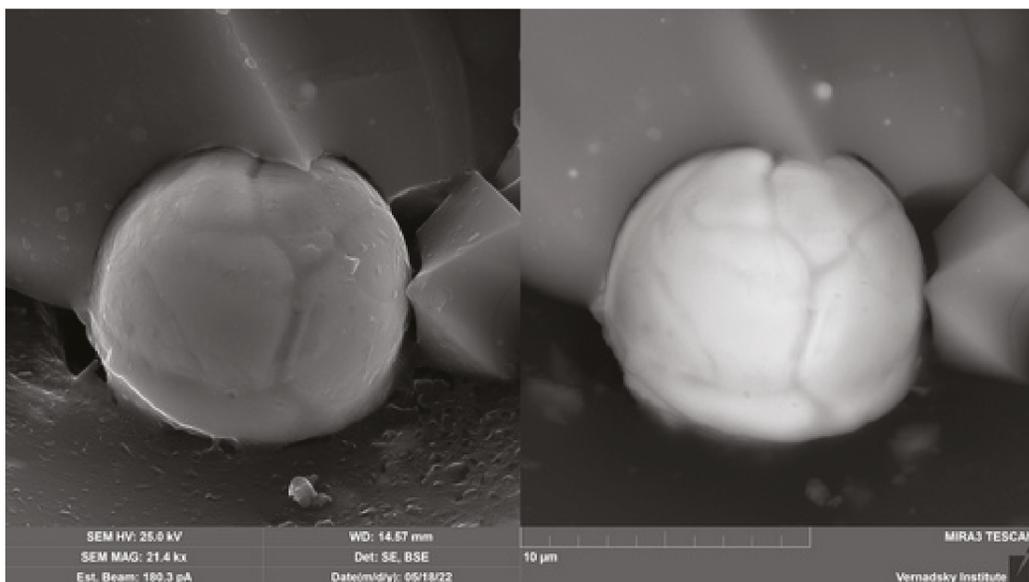


Рис. 1. Исходный вид железного шарика с высоким содержанием серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

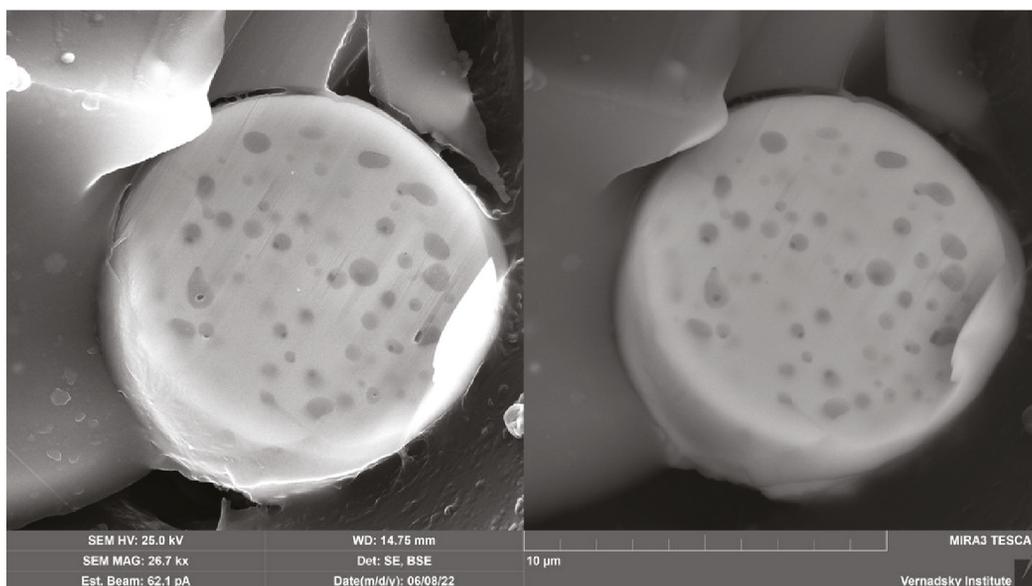


Рис. 2. Вид разрезанного ионным пучком железного шарика: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

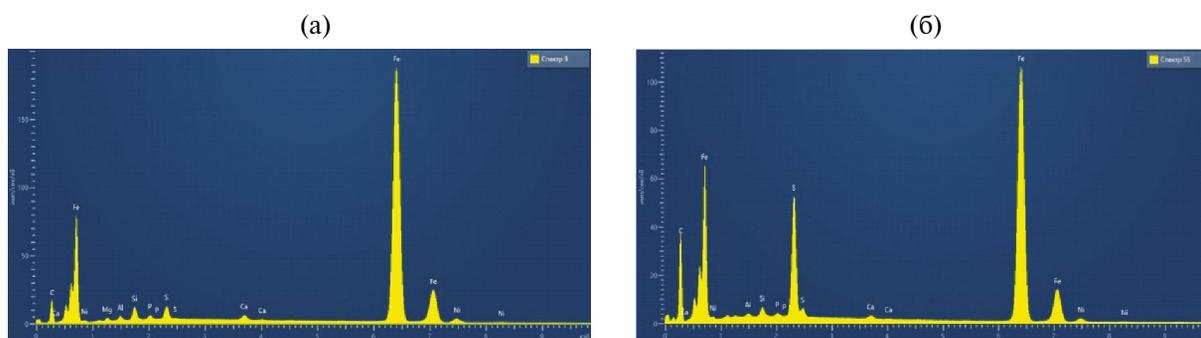


Рис. 3. Рентгеновские энергодисперсионные спектры: (а) – матрицы железного шарика; (б) – включения в нем.

элементов уменьшались вплоть до полного исчезновения в некоторых включениях (рис. 3б). Поэтому можно сделать вывод, что пики Mg, Al, Si и Ca вызваны, скорее всего, флуоресценцией в окружающем железный шарик стекле, а не в нем самом. Анализ состава железной матрицы за вычетом силикатной составляющей приведен в табл. 1, анализ 2, а состав включений – в табл. 1, анализы 3–5. Содержание серы во включениях колеблется в диапазоне 15–32 мас.% по сравнению с 2.6 мас.% в матрице.

Карты распределения элементов, полученные от среза шарика (рис. 4), подтвердили отсутствие в шарике кислорода и концентрацию серы во включениях. Сера также покрывает поверхность шарика тонкой пленкой. При этом ни включения, ни железная матрица, ни поверхностная пленка не дали дифракционных картин на отражение. Методом электронной дифракции на отражение (EBSD) зафиксированы лишь гало.

Пленка серы наиболее отчетливо себя проявила на другом похожем шарике (рис. 5). Как показали карты распределения элементов (рис. 6), он также состоит из железного ядра с примесью серы (табл. 2, анализ 1) и поверхностной пленки с серой в высокой концентрации (табл. 2, анализ 2). Интенсивность сигнала от всех элементов падает в правой части шарика в связи с экранирующим эффектом, вызванным геометрией окружающего

Таблица 1. Анализы железного шарика в разных точках

анализ 1	Si	P	S	Fe	Ni	Bcero
Вес %	11.30	0.93	9.65	75.74	2.38	100.00
± %	0.13	0.09	0.10	0.16	0.06	
Атом. %	18.90	1.41	14.12	63.67	1.90	100.00
анализ 2						
Вес %	0.58	0.33	2.61	92.43	4.05	100.00
± %	0.17	0.17	0.23	0.99	0.97	
Атом. %	1.12	0.58	4.44	90.10	3.75	100.00
анализ 3						
Вес %	3.58	1.14	32.17	61.37	1.73	100.00
± %	0.09	0.07	0.10	0.12	0.05	
Атом. %	5.55	1.60	43.70	47.86	1.29	100.00
анализ 4						
Вес %	8.15	1.12	27.91	61.20	1.63	100.00
± %	0.09	0.06	0.09	0.10	0.04	
Атом. %	12.51	1.55	37.51	47.23	1.19	100.00
анализ 5						
Вес %	2.24	1.93	15.06	78.41	2.36	100.00
± %	0.07	0.06	0.07	0.11	0.05	
Атом. %	3.88	3.03	22.84	68.29	1.95	100.00

Примечание: анализы выполнены в условиях нормировки к 100%.

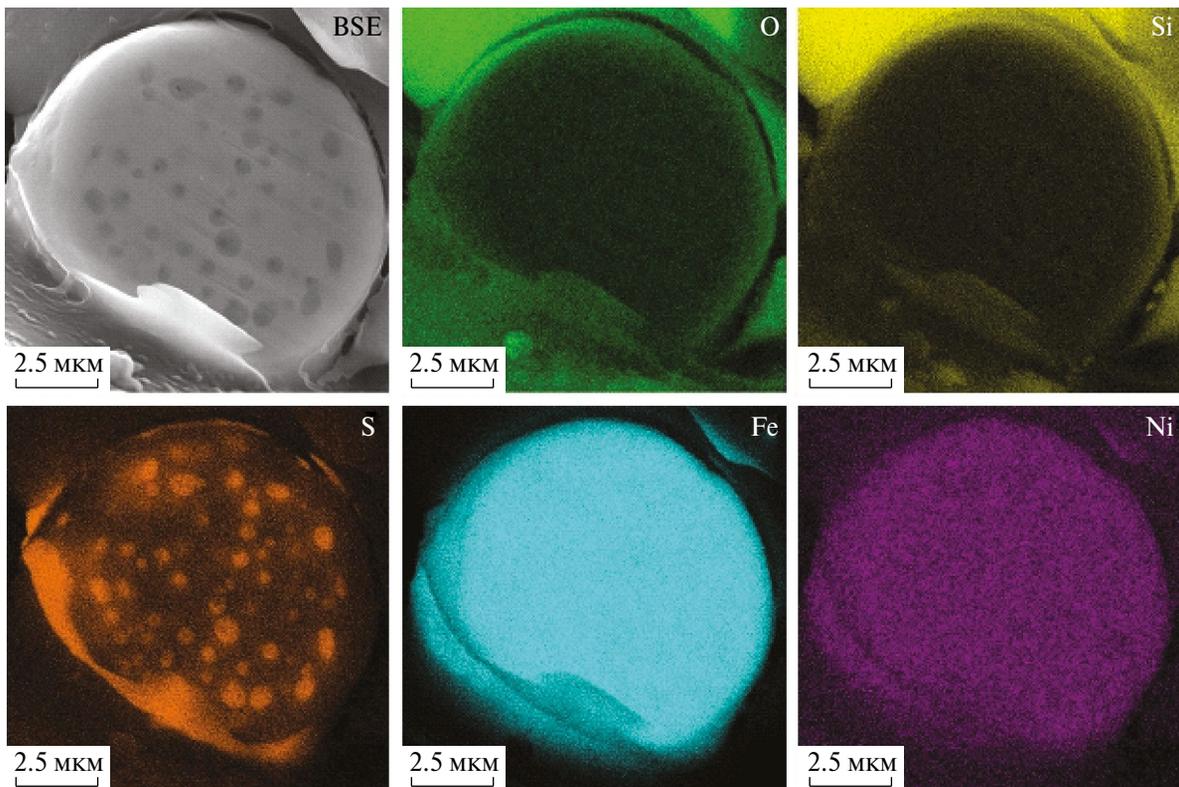


Рис. 4. Карты распределения элементов по разрезанному железному шару.

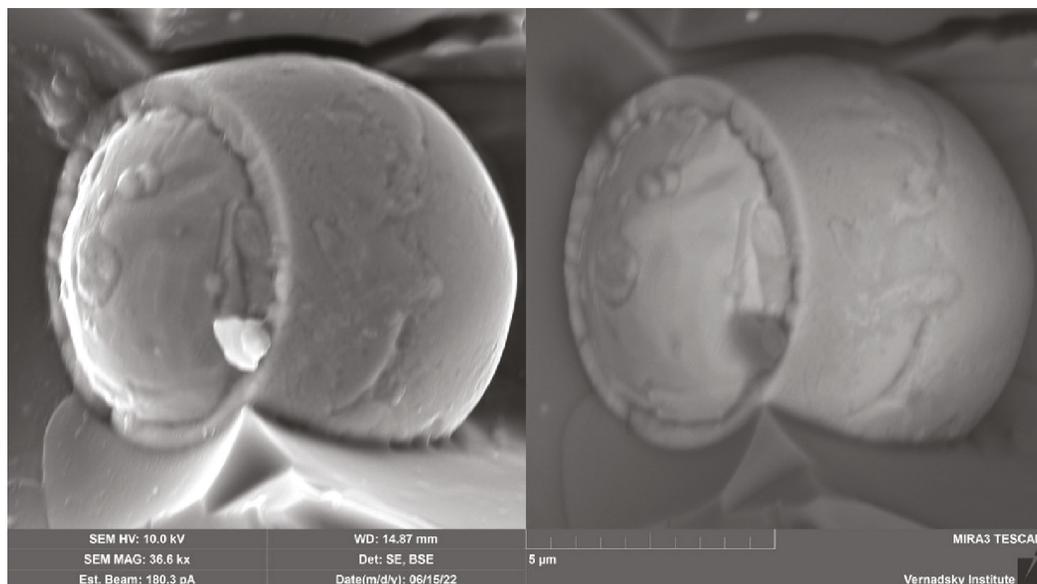


Рис. 5. Железный шарик, покрытый слоем серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

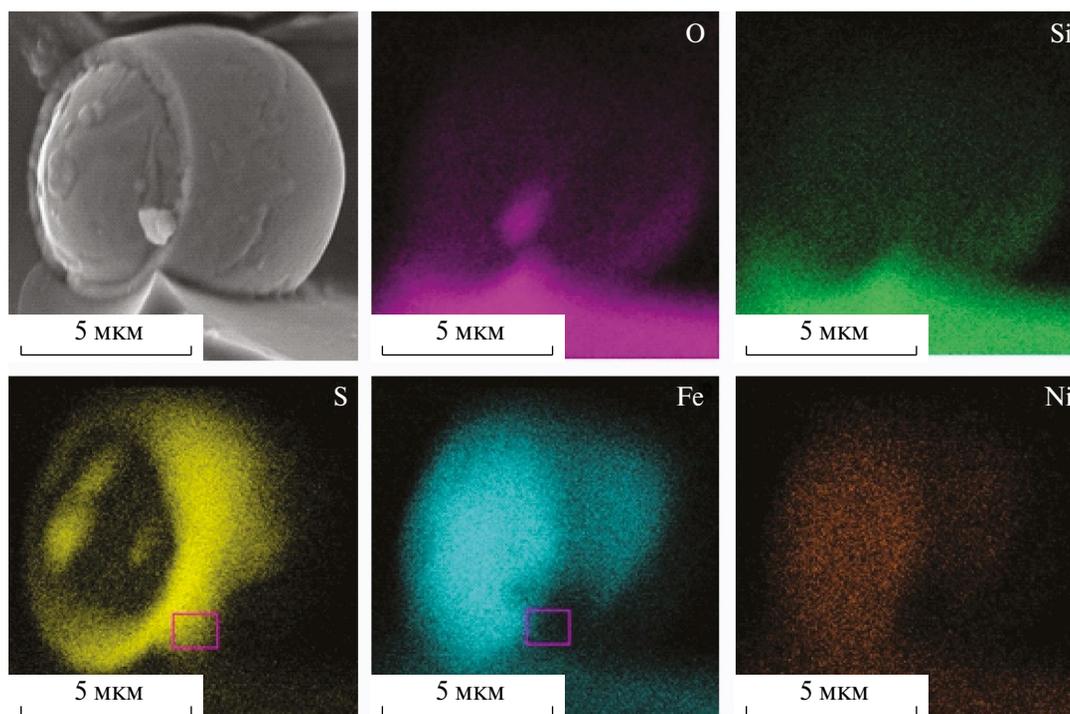


Рис. 6. Карты распределения элементов по железному шарик. Прямоугольником выделен один и тот же участок покрывающей шарик пленки. СЭМ.

стекла. Сигнал от железа в зоне корочки, видимо, возникает из-за небольшой толщины пленки серы и захвата зоной анализа части железного ядра. На ЭДС- спектрах фиксируется небольшой пик Si, видимо, обусловленный наноразмерной покрывающей пленкой высококремниевое конденсатного стекла и флуоресценцией стеклянной матрицы.

Помимо шариков железа, с серой ассоциировалась не вскрытая полость в стеклянной матрице, обнаружить которую позволило использование

Таблица 2. Анализы состава железной матрицы (анализ 1) и поверхностной пленки (анализ 2)

анализ 1	Si	P	S	Fe	Ni	Всего
Вес %	0.58	0.33	2.61	92.43	4.05	100.00
± %	0.17	0.17	0.23	0.99	0.97	
анализ 2						
Вес %	5.11	0.44	86.74	7.70	0.00	100.00
± %	0.25	0.23	0.82	0.81	0.34	

Примечание: анализы выполнены в условиях нормировки к 100%.

повышенного до 25 кВ ускоряющего напряжения электронного микроскопа (рис. 7). Карты распределения элементов по участку с этой полостью выявили неравномерное распределение

серы, железа и никеля (рис. 8). Так, никель и железо частично коррелировали с серой, а основной объем серы располагался в интерстициях между фазами никеля и железа.

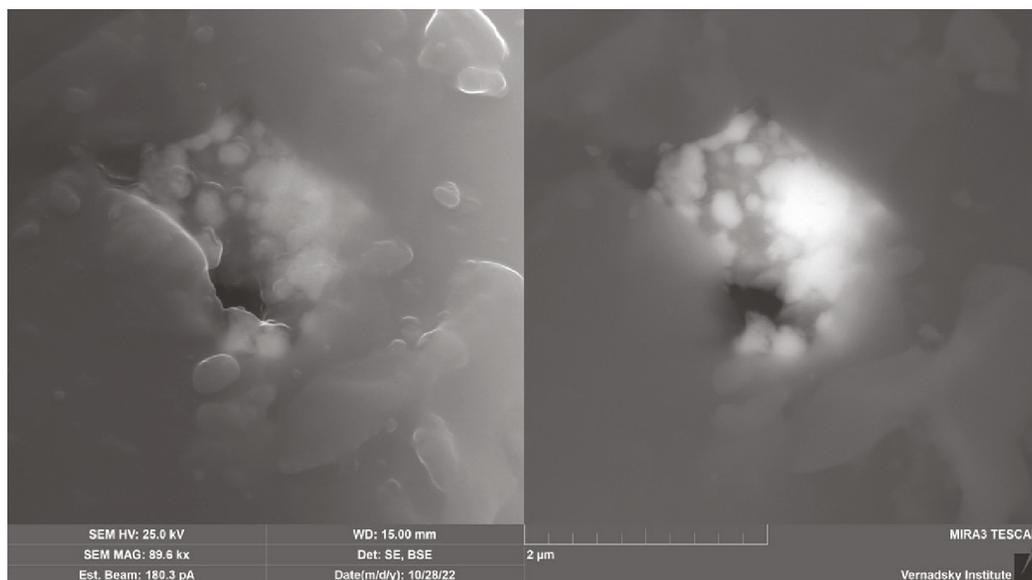


Рис. 7. Полость в стекле с высоким содержанием серы: слева – вторичные электроны; справа – отраженные. СЭМ.

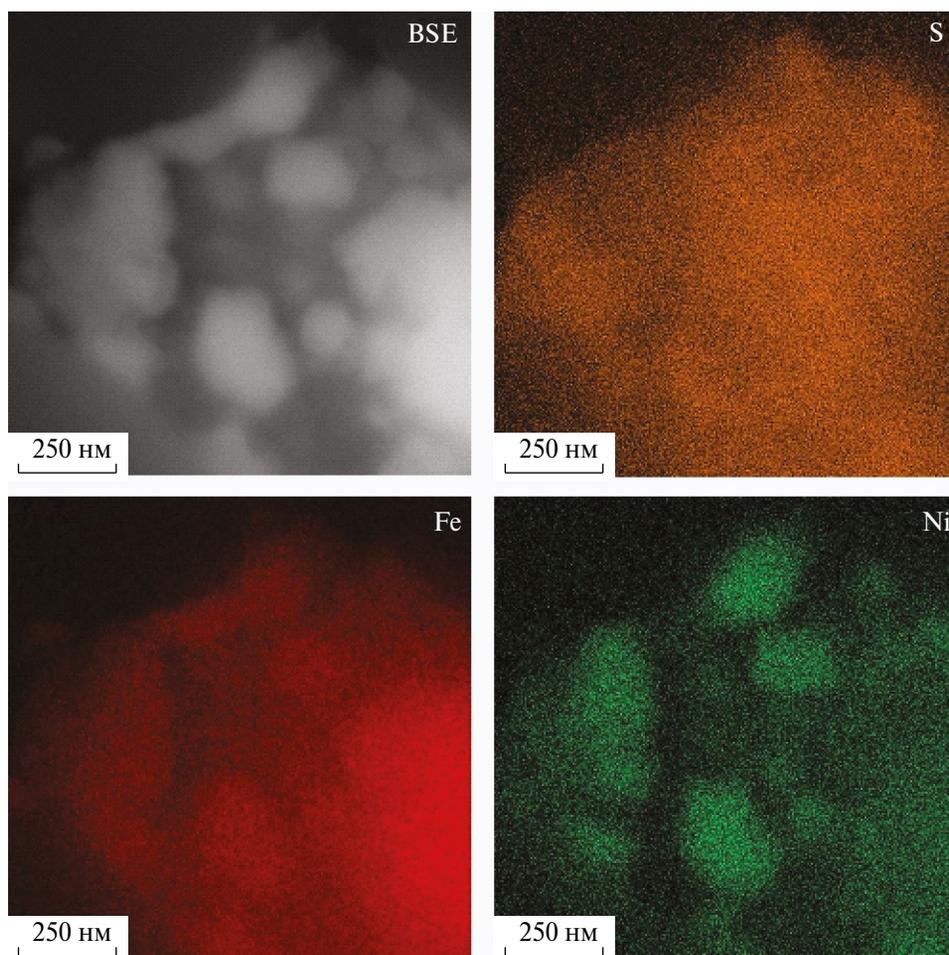


Рис. 8. Распределение серы, никеля и железа в полости стекла. СЭМ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из первых исследователей лунного вещества, доставленного на Землю, уже были обнаружены тонкие пленочные покрытия, содержащие серу и кремний (Carten, 1973). Эти данные позднее были подтверждены в работах (Grant и др., 1974) с использованием методов ОЖЕ-спектроскопии при изучении оранжевых стекол из проб Apollo-17, где пленки толщиной около 30 Å содержали, кроме S, еще C, N, Cl. Причем авторы, опираясь на результаты исследования, однозначно интерпретировали источник серы как лунный. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии при послойном травлении были обнаружены слои, обогащенные серой в шариках зеленого стекла, причем сера была выявлена в формах S^{2-} , S^0 , S^{4+} , S^{6+} (Dikov и др., 1998). Тенденция к расположению слоев серы в верхних слоях изученных шариков отмечены не только этими авторами, но и подтверждены в ходе экспериментальных работ по лазерному испарению аналогов лунного грунта при изучении образовавшихся конденсатных стекол (Gerasimov и др., 1998).

Регистрация профиля распределения серы от поверхности шарика зеленого стекла к его центру показала падение концентрации этого элемента с 600 п. п. м. до 210 п. п. м. на дистанции в 120 мкм (Saal и др., 2008). В работе (Saal, Hauri, 2021) на основе изучения изотопных отношений серы было выдвинуто предположение об осаждении этого элемента на поверхности стекол при дегазации магматических выбросов.

Настоящее исследование позволило выявить и наглядно продемонстрировать характер миграции серы, связанной с шариками самородного железа. Сера концентрируется в матрице самородного железа и частично вытесняется на поверхность шарика (рис. 1, 2). Видимо, сера в процессе ликвации остывающей капли жидкого железа, обогащенного серой, частично формируется в виде наносфер Fe-S расплава и частично вытесняется на поверхность шарика. Осаждение пленки серы из газовой среды на поверхность образца представляется маловероятным, поскольку стекло, окружающее шарики, такой пленкой не покрыто. На поверхности еще неостывшего шарика осуществляется взаимосвязанный процесс испарения-конденсации. В начале процесса, когда испарение превалирует над конденсацией, некоторая часть поступившей на поверхность шарика серы будет безвозвратно потеряна, испарившись в пространство, поскольку система является открытой. Вопрос степени открытости системы не является таким уж принципиальным. Безвозвратные потери серы рассматриваются как

возможный сценарий и не являются необходимым элементом процесса. Основное предположение в том, что объем системы достаточен для быстрого падения плотности газов в районе шариков, обеспечивая условия конденсации на их поверхности. Это исключает вариант нахождения шариков в матрице стекла. Многочисленные примеры такого включения железных шариков в стекле демонстрируют кардинально другую морфологию таких шариков (Liu и др., 2007; Мохов и др., 2015), исключающую наличие поверхностных пленок и обеспечивающую плотный их контакт с матрицей стекла. Исходя из этого, вариант шариков в стекле мы отвергаем и предположение о достаточном объеме считаем достаточно вероятным.

Далее, при остывании шарика, процесс конденсации будет превалировать над испарением и на поверхности шарика будет формироваться пленка конденсатной серы, скорее всего, в ноль-валентной форме. Толщина пленки будет зависеть от состава исходной капли Fe-S расплава, ее размера и, соответственно, от скорости охлаждения шарика. При относительно медленном остывании время преобладания процесса испарения над конденсацией и безвозвратные потери серы будут значительны и конденсатная пленка окажется очень тонкой. И, наоборот, при быстром остывании роль испарения окажется незначительной по сравнению с процессом конденсации и толщина пленки серы будет больше. Именно это зафиксировано на полученных снимках. Размер шарика на рис. 2 около 10 мкм и он покрыт тонкой пленкой, тогда как шарик на рис. 5 практически вдвое его меньше, его масса, соответственно, существенно меньше, и остывать он будет значительно быстрее, и пленка серы на его поверхности заметно более толстая, несмотря на возможные колебания исходного состава шариков.

В качестве альтернативного механизма формирования серы на поверхности шарика можно предположить лишь застывание жидкой серы, выступившей на поверхности шарика. Но такой механизм возможен лишь при температуре 120°C и давлении 3–7 Па (Химическая энциклопедия, 1995), что на четыре порядка превышает атмосферное давление на Луне 0.3 нПа (Wilson и др., 1999). При температуре, ниже указанной, сера находится в твердом состоянии и не может выделяться, при большей температуре в условиях Луны сера испарится, запуская рассмотренный выше механизм испарения-конденсации. Вероятность осуществления такого механизма застывания крайне мала.

Видимо, шарики образовались путем переплавки какого-либо сульфида железа. Судя по

фазовой диаграмме Fe-S (Walder и др., 2005; Гасанова и др., 2019), в диапазоне температур ~1000–1550°C возможно совместное существование металлического гранецентрированного железа и жидкой серы при ее содержании до 42%. Соединения с более высокими содержаниями серы состоят из фаз $Fe_{1-x}S$, FeS_2 и жидкой серы. Чистая сера кристаллизуется при снижении температуры, начиная с 115°C. Видимо, при остывании, в процессе ликвации сера вытеснялась в локальные включения с высоким своим содержанием, а также на внешнюю поверхность застывающей капли, где и образовывала пленочное покрытие из железа с высоким содержанием серы или даже из чистой серы. Вероятное наличие в пленке ноль-валентной серы следует из аналогии с результатами ранее выполненных работ по послойному исследованию строения стеклянных шариков (Dikov и др., 1978; Saal и др., 2008), в которых такое состояние серы отмечалось наряду с другими. Еще одним подтверждением высокой концентрации серы в пленке по сравнению с содержанием железа служат карты распределения элементов, выполненные на пониженном до 10 кВ ускоряющем напряжении для улучшения локальности анализа. Прямоугольники на картах распределения железа и серы указывают на один и тот же участок поверхности шарика и наглядно демонстрируют разницу в содержаниях этих элементов (рис. 6). Однако надо учитывать массивность шарика железа по сравнению с незначительной толщиной пленки. Электронный пучок, даже при пониженном ускоряющем напряжении, все равно пробивал тонкую покрывающую пленку и вызывал генерацию характеристического излучения железа массивного шарика. Таким образом, сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии железа в покрывающей шарик пленке невозможно, можно говорить лишь о существенно превосходящей концентрации в ней серы по сравнению с железом.

В процессе остывания капель серосодержащего железа из расплава закалка шариков должна была происходить очень быстро, чтобы ликвационные сферы Fe-S были зафиксированы в стадии формирования внутри железной матрицы. Такие условия в большей степени отвечают краевой зоне импакта, хотя и периферийная зона вулканического извержения тоже может соответствовать этим условиям, но, по нашему мнению, вероятность импакта все же выше.

О наличии диффузного механизма вытеснения серы косвенно может свидетельствовать концентрация этого элемента в интерстициях между металлическими фрагментами в обнаруженной закрытой полости в стекле (рис. 7). Невскрытое состояние этой полости позволило сохранить за-

печатанные в ней фазы в неприкосновенности от позднейших изменений. Карты распределения элементов (рис. 8) демонстрируют наличие в полости фрагментов железа с серой, железа с никелем и серой, а также зоны с серой, не коррелирующей ни с какими другими элементами. Видимо сера выделилась при остывании жидкого включения из железо-никель-сера расплава в самостоятельную фазу по такому же диффузионному механизму, как и из железных шариков, но, поскольку система была закрытой, то и потерь на испарение не произошло.

Методы моделирования кристаллизации расплава Fe-S при 5000 К и 360 ГПа показали, что система ведет себя как жидкость или аморфное вещество. С ростом концентрации серы коэффициент самодиффузии сначала растет, а затем снижается. В случае быстрой закалки следует ожидать образования аморфной фазы с элементами кристаллических неупорядоченных блоков и цепочек (Белашенко и др., 2007).

Полученные нами методом EBSD гало аморфного материала от матрицы разрезанного железного шарика и Fe-S включений в нем соответствуют прогнозу такой модели – единичные, неупорядоченно расположенные в матрице фрагменты кристаллической структуры не могли дать дифракционную картину. Но следует учитывать, что появление гало могло быть также вызвано аморфизацией лишь поверхностного слоя в результате воздействия ионного пучка.

На поверхности шарика присутствует и аморфная тончайшая нанометровая пленка высококремниевое стекла, о чем свидетельствует небольшой пик кремния на спектрах ЭДС. Ранее уже отмечалось присутствие кремния наряду с серой в работах (Carten, 1973; Диков и др., 2009). Наличие таких пленок на поверхности вызвано конденсацией кремнезема при более поздних импактах и, видимо, широко распространено. Такие пленки хорошо сохраняются со временем и могут предотвратить вторичные преобразования лежащих под ними минеральных фаз, изолируя их, в числе других факторов, от воздействия атмосферы Земли во время хранения проб (Горностаева и др., 2014). Эта стеклянная пленка сконденсировалась на всей поверхности частички реголита, включая железные шарики, и, как показано в работе (Горностаева и др., 2014), играет консервирующую роль.

ВЫВОДЫ

Впервые получены наглядные данные о поведении серы при остывании металл-сульфидных капель с образованием ликвационных серосодержащих сфер в теле самородного железа. При этом

часть отликвировавшего сульфида отжималась на поверхность металлических сфер. После чего сера конденсировалась в виде тонких пленок, покрывающих поверхность железных шариков. При этом часть серы (или вся, поступившая на внешнюю поверхность шарика), по-видимому, находится в элементарном состоянии. Возникшие таким образом агрегаты металла, сульфида и самородной серы сохраняются благодаря их консервации в массе стекла или под тонкими пленками силикатного конденсата.

Работа выполнена за счет бюджетных средств по госзаданию ГЕОХИ РАН в рамках темы “Новые комплексные подходы к фундаментальной проблеме изучения химического состава, трансформации и миграции наночастиц и легкоподвижных форм элементов в окружающей среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белащенко Д.К., Кусков О.Л., Островский О.И. Применение модели погруженного атома к жидким растворам системы Fe-S // Неорганич. материалы. 2007. Т. 43. № 9. С. 1113–1125.
- Булидорова Г.В., Галяметдинов Ю.Г., Ярошевская Х.М., Барабанов В.П. Физическая химия. Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2012. 396 с. ISBN978–5–7882–1367–5.
- Гасанова У.А., Алиев О.М., Бахтиярлы И.Б., Мамедов Ш.Г. Исследование системы FeS–PbS // Журн. неорганич. химии. 2019. Т. 64. № 2. С. 196–200.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В., Карташов П.М., Богати-ков О.А. Защитная роль стеклянной пленки на поверхности металлических частиц лунного реголита // ДАН. 2014. Т. 459. № 3. С. 349–351.
- 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.
- Мохов А.В., Карташов П.М., Богатииков О.А. Луна под микроскопом: новые данные по минералогии Луны. М.: Наука, 2007. 127 с.
- Мохов А.В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Асадулин Э.Э., Богатииков О.А. Нанокристаллы самородных железа и титана в импактных стёклах лунного реголита // ДАН. 2015. Т. 460. № 4. С. 441–445.
- Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. М: Наука, 1975. 143 с.
- Химическая энциклопедия в 5 т. / Ред. Зефилов Н.С. (гл. ред.). М: Советская энциклопедия, 1995. Т. 4. 639 с.
- Butler (Jr) P., Meyer (Jr) C. Sulfur prevails in coatings on glass droplets: Apollo 15 green and brown glasses and Apollo 17 orange and black (devitrified) glasses // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 1561–1581.
- Carten J.L. Morphology and chemistry of probably VLC (Vapor-Liquid-Solide) – type of whisker structures and other features on surface of breccia 15015.36 // Proc. 4th Lunar Sci. Conf. 1973. P. 413–422.
- Chou C.L., Boynton W.V., Sundberg L.L., Wasson J.T. Volatiles on the surface of Apollo 15 green glass and traceelement distributions among Apollo 15 soils // Proc. 6th Lunar Sci. Conf. 1975. P. 1701–1727.
- Cirlin E.N., Housley R.M., Grant R.W. Studied of volatiles in Apollo 17 samples and their implication to vapor transport processes // Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1978. P. 2049–2063.
- Dikov Yu.P., Bogatnikov O.A., Barsukov V.L., Florensky K.P., Ivanov A.V., Nemoshkalenko V.V., Alyoshin V.G., Chudinov M.G. Some features of the main element conditions in surface layers of the regolith particles of the Luna automatic stations samples: X-ray photoelectronic spectroscopic studies // Proc. 9th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1978. P. 2111–2124.
- Dikov Y.P., Ivanov A.V., Wlotzka F., Galimov E.M., Wänke H. High enrichment of carbon and volatile elements in the surface layers of Luna 16 soil sample 1635: Result of comet or meteorite impact // Earth and Planet. Sci. Lett. 1998. V. 155 № 3–4. 197–204.
- Fronde J.W. Lunar Mineralogy. New York: Wiley-Interscience, 1975. 332 p.
- Gerashimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Y.P. Physics and chemistry of impacts // Earth, Moon, and Planets. 1998. V. 80. № 1. С. 209–259.
- Gladstone G.R., Hurley D.M., Retherford K.D., P. Feldman D., Pryor W.R., Chaufray J.Y., Versteed M., Greathouse T.K., Steffl A.J., Throop H., and 10 co-authors. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume // Science. 2010. V. 330. № 6003. P. 472–476.
- Grant R.W., Housley R.M., Szalkowski F.J. Marcus H.L. Auger electron spectroscopy of lunar samples // Proc. 5th Lunar Sci. Conf. 1974. P. 2423–2439.
- Keller L., McKay D. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith // Science. 1993. V. 261. № 5126. P. 1305–1307.
- Kerridge J.F., Kaplan I.R., Petrowski C. Evidence for meteoritic sulfur in the lunar regolith // Proc. 6th Lunar and Planet. Sci. Conf. 1975. P. 2151–2162.
- Liu Y., Taylor L.A., Thompson J.R., Schnare D.W., Park J.-S. Unique properties of lunar impact glass: Nanophase metallic Fe synthesis // Am. Mineralogist. 2007. V. 92. P. 1420–1427.
- McCubbin F.M., Vander Kaaden K.E. Tartèse R., Klima R.L., Liu Y., Mortimer J., Barnes J.J., Shearer Ch.K., Tremain A.H., Lawrence D.J., and 4 co-authors. Magmatic volatiles (H, C, N, F, S, Cl) in the lunar mantle, crust, and regolith: Abundances, distributions, processes, and reservoirs // Am. Mineralogist. 2015. V. 100. № 8–9. P. 1668–1707.
- Meyer (Jr) C., McKay D.S., Anderson D.H., Butler (Jr) P. The source of sublimates on the Apollo15 green and Apollo 17 orange glass samples // Proc. 6th Lunar Sci. Conf. 1975. P. 1673–1699.
- Moore C.B., Lewis C.F., Cripe J., Delles F.M., Kelly W.R., Gibson (Jr) E.K. Total carbon, nitrogen, and sulphur in

- Apollo 14 lunar samples // Proc. 3rd Lunar Sci. Conf. 1972. P. 2051–2058.
- Renggli C.J., King P.L., Henley R.W., Norman M.D.* Volcanic gas composition, metal dispersion and deposition during explosive volcanic eruptions on the Moon. // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2017. V. 206. P. 296–311.
- Righter K., Go B.M., Pando K.A., Danielson L., Ross D.K., Rahman Z., Keller L.P.* Phase equilibria of a low S and C lunar core: Implications for an early lunar dynamo and physical state of the current core // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 463. P. 323–332.
- Ringwood A.E., Kesson S.E.* Composition and origin of the Moon // Proc. 8th Lunar Sci. Conf. 1977. P. 371–398.
- Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L., Van Orman J.A., Rutherford M.C., Cooper R.F.* Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature.* 2008. V. 454. № 7201. P. 192–195. doi:10.1038/nature07047.
- Saal A.E., Hauri E.H.* Large sulfur isotope fractionation in lunar volcanic glasses reveals the magmatic differentiation and degassing of the Moon // *Sci. Adv.* 2021. V. 7. № 9. id. eabe4641.
- Walder P., Pelton A.D.* Thermodynamic modeling of the Fe-S system // *J. Phase Equilibria and Diffusion.* 2005. V. 26. P. 23–38.
- Williams J.P., Paige D.A., Greenhagen B.T., Sefton-Nash E.* The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment // *Icarus.* 2017. V. 283. P. 300–325.
- Wilson J.K., Smith S.M., Baumgardner J., Mendillo M.* Enhancement of the Moon's sodium tail following the Leonid meteor shower of 1998 // *Bull. Am. Astron. Soc.* 1999. V. 31. P. 1132. id. 38.03.