

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОМЕТЕОРИТНОГО УДАРА НА ЛУНЕ

© 2020 г. Е. М. Сорокин^а, * О. И. Яковлев^а, Е. Н. Слюта^а, М. В. Герасимов^б, М. А. Зайцев^б,
В. Д. Щербаков^с, К. М. Рязанцев^а, С. П. Крашенинников^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

^бИнститут космических исследований РАН
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^сМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет
Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

*e-mail: egorgeohim@ya.ru

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

После доработки 02.07.2019 г.

Принята к публикации 05.07.2019 г.

Ударно-взрывная переработка горных пород микрометеоритной и метеоритной бомбардировкой на поверхности Луны и других безатмосферных тел Солнечной системы является доминирующим геологическим и геохимическим процессом, в результате которого формируется рыхлый слой реголита. В статье рассмотрены результаты имитации микрометеоритного ударного процесса с помощью миллисекундного лазера. Мишенью в эксперименте служили образец базальта, сходного по составу с базальтами морских районов Луны и базальтовое стекло, полученное из этого же базальта, плавлением. При лазерном “ударе” продукты выброса из кратера (стеклянные сферулы, капли различной формы и конденсаты) и продукты плавления в образованном кратере изучались методами электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального, рентгенодифракционного и рентгенофлюоресцентного анализа. Показано, что стекла (капли расплава), в эксперименте с базальтовой мишенью имеют неоднородный химический состав. Они представляли собой в различных пропорциях смешанные в результате плавления составы исходных минералов базальта. Сферулы, претерпевшие значительную испарительную дифференциацию, из опыта с базальтовой мишенью (кристаллический базальт) составили около 25% всех измеренных сферул. В случае с “ударом” по базальтовому стеклу, доля таких сферул, претерпевших глубокую испарительную дифференциацию, составила ~90%. Наблюдалось обеднение стекол легколетучими и умереннолетучими компонентами (Na₂O, K₂O, FeO и т.д.). Наиболее дифференцированные стекла соответствовали обнаруженным на Луне высокоглиноземистым стеклам HASP (Al₂O₃ > 34 вес. %, SiO₂ < 32 вес. %). Таким образом, показано, что в ударном процессе заложен важный геохимический механизм распределения вещества.

Ключевые слова: удар, микрометеоритная бомбардировка, испарительная дифференциация, эксперимент, лазер, космическое выветривание, HASP-стекла, Луна

DOI: 10.31857/S0016752520020119

ВВЕДЕНИЕ

Все безатмосферные тела Солнечной системы, и Луна не исключение, с момента своего образования и на протяжении всей геологической истории подвергаются метеоритной и микрометеоритной бомбардировке. В результате систематической ударно-взрывной переработки пород на поверхности Луны сформировался рыхлый слой реголита, мощность которого коррелирует с возрастом подстилающих пород — чем древнее породы, тем больше мощность реголита. В более молодых морских районах и морях Луны, сложенных, как правило, базальтами, мощность реголита ме-

няется в диапазоне от 3 до 11 м, средняя мощность составляет около 5 м. В более древних материковых областях мощность реголита изменяется в более широком диапазоне — от 1 м в высокогорной местности до 18 и более в районах плоскогорья (Бондаренко, Шкуратов, 1998). Средняя мощность реголита на лунной материковой коре составляет 9–10 м (Langevin, Arnold, 1977; Taylor, 1982; McKay et al., 1974). Этот слой подстилает так называемый слой мегареголита, который, по-видимому, стоит из переплетения широкомасштабных выбросов от больших импактов, импактно-дробленных и брекчированных коренных пород (Peeples et al., 1978; Langevin, 1982).

Реголит состоит из обломков подстилающих пород, фрагментов минералов и вторичных частиц, сформированных при ударно взрывной переработке пород – брекчий, агглютинатов и частиц стекла. Химический и минеральный состав определяется в основном составом подстилающих пород, присутствием около 1–2% метеоритного вещества (Langevin, Arnold, 1977; Taylor, 1982; McKay et al., 1974), и добавлением некоторого количества вещества из других близлежащих районов.

В результате постоянного облучения солнечным ветром и космическими лучами различных энергий частицы и минералы реголита обогащаются водородом, изотопами гелия и других благородных газов, космогенными изотопами. Ионизирующее облучение солнечного ветра способствует образованию восстановленных форм Fe, Ti, Si и др. элементов в поверхностном слое минеральных частиц реголита.

Совокупность физико-механических процессов происходящих на поверхности безатмосферного тела проявляющихся в изменении исходных пород (дробление, плавление и т.д.) поверхностного слоя называется космическим выветриванием. Этот процесс определяет степень зрелости реголита, то есть изменение его оптических характеристик. Обычно рассматриваются три процесса, обуславливающие степень зрелости лунного грунта: (1) формирование субмикронных зерен Fe⁰ в частицах реголита (Housley et al., 1973; Napke et al., 1975; Morris, 1976, 1978, 1980), (2) уменьшение размер частиц из-за микрометеоритной бомбардировки реголита (McKay et al., 1991) и (3) формирование агглютинатов (Adams, McCord, 1971). Процессы (1) и (3) приводят к потемнению реголита; уменьшение размера частиц, напротив, приводит к осветлению (Starukhina, Shkuratov, 2001).

Наблюдается прямая зависимость между средним размером частиц, мощностью реголита и его зрелостью – чем меньше размер частиц, тем выше мощность реголита, тем выше степень зрелости реголита (Слюта, 2014). С увеличением зрелости реголита увеличивается количество агглютинатов, шлаков и стеклянных шариков, а морфология частиц становится более сложной. Количество агглютинатов в зрелом реголите в наиболее древней материковой области может достигать 50–60% (McKay et al., 1974).

Космическое выветривание включает в себя несколько процессов, которые можно классифицировать на (1) бомбардировка микрометеороидами, то есть космической пылью широко распространенной в Солнечной Системе и (2) облучением электромагнитным излучением или атомными частицами от Солнца, галактических источников или магнитосферы Земли (Pieters, Noble, 2016). Среди перечисленных факторов космического

выветривания особо выделяю микрометеоритную бомбардировку. К микрократерам относятся кратеры диаметром от ~1 мкм до ~1 см (Hartung et al., 1972.) При этом скорость микрометеороидов-ударников до встречи с Луной варьирует в широком диапазоне – от 4–5 до 70 км/с при средней скорости около 20 км/с. Наиболее высокими скоростями, как правило, обладают частицы из пылевых хвостов комет. Известно как минимум 17 таких метеорных роев, с которыми ежегодно сталкивается система Земля–Луна (Слюта и др., 1995).

Предполагается, что наибольший вклад приносимой энергии на поверхность Луны микрометеороидами обусловлен ударами микрочастиц массой 10^{-6} – 10^{-2} г (Hartung et al., 1972). Воздействия метеорных тел на поверхности планет создают очень высокие ударные напряжения; этот ударный процесс увеличивает внутреннюю энергию материала мишени, а также самого метеороида, что приводит к слиянию и очень частому испарению частей обоих (Cintala, 1992). Плотность микрометеоритного потока в окололунном пространстве оценивается в $\sim 6.7 \times 10^{-16}$ г/с см² (Cremonese et al., 2013).

При высокоскоростном ударе микрометеороидов происходит дробление, плавление и частичное испарение материала мишени и ударника. В результате плавления и испарения происходит смешение составов исходных минеральных фаз, пропорционально их содержанию в исходной породе-мишени и степени плавления (McKay et al., 1991).

Предполагается, что плавление различных минералов во время ударного процесса может приводить к плохому перемешиванию расплавов, полученных из этих минералов. Это может приводить к образованию текстурно-неоднородных стекол со шлирами, состоящими из стекол разного состава (Hörz et al., 1991). Кроме высокотемпературного ударного плавления на лунной поверхности при ударном кратерообразовании также происходят процессы испарения расплавов и конденсации силикатного пара. Признаки глубокой испарительной дифференциации расплавов обнаружены в так называемых HASP стеклах (High Alumina Silica Poor) лунного реголита (Keller, McKey, 1992). Стеклянные частицы, образованные в результате испарения, были найдены в брекчии в образце реголита 14076, доставленного пилотируемой экспедицией Apollo-14 (Warren, 2008).

Исследование возможности процессов испарения и конденсации вещества как в процессе вулканической активности, так и в процессе метеоритной и микрометеоритной бомбардировки на Луне имеет длительную историю (Vonneguth et al., 1966; Нусинов и др., 1972), в результате которой было не только обнаружено явление глубокой испарительной дифференциации (Яковлев и др.,

Таблица 1. Результаты точечных измерений химического состава минералов базальта по данным микрозондового анализа (рис. 1)

№ точки	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
1	49.34	0.00	31.80	0.00	0.00	1.02	15.07	2.81	0.12	100.15
2	54.09	0.00	28.79	0.17	0.00	1.14	11.49	4.69	0.46	100.83
3	51.50	0.40	2.15	16.14	0.17	9.84	19.15	0.35	0.00	99.69
4	51.16	0.67	1.00	18.16	0.44	24.22	5.37	0.20	0.00	101.22
5	41.53	0.18	7.88	14.54	0.17	20.65	2.73	0.00	0.00	87.68
6	3.34	1.27	1.93	0.61	0.00	90.49	0.71	0.55	0.00	98.90
7	0.47	43.39	0.40	1.03	0.66	51.00	0.29	0.24	0.00	97.47

1988, 1992, 1997), но и оценена важность этого процесса в формировании, например, базальтовой и гранитной коры на Земле (Яковлев и др., 2000).

Испарение расплава является одним из важных элементов процесса преобразования пород при метеоритном ударе. Предполагается, что в процессе высокотемпературного плавления может происходить модификация состава стекла при частичном испарении ряда элементов, например, Si, Na, K, Rb (Ivanov, Florensky, 1975; Napey, 1976; Delano, 1981). С целью изучения испарения при лазерном “ударе” был проанализирован химический состав сферул стекла на сканирующем микроскопе

Основной задачей этой работы и последующей планируемой серии экспериментальных исследований по имитации микрометеоритной бомбардировки с помощью импульсного лазера является исследование роли ударных событий в процессе химической дифференциации вещества первичной коры, которая сохранилась на Луне и не сохранилась на Земле. В работе представлены результаты лазерного “удара” по образцу базальта, близкого по составу к базальту морских районов Луны, а также, по стеклу, полученному из этого же образца базальта.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ

Для эксперимента был выбран образец природного толеитового тонкозернистого базальта (срединно-океанического хребта) без стекла (далее базальт), который был раздроблен на небольшие фрагменты размером примерно 1.5 × 1.5 см. Часть из этих обломков была раздроблена и истерта в стальной ступке до размера частиц ~70 мкм и разделена на четыре пробы. Средний химический состав базальта для этих четырех проб был получен по результатам рентгенофлуоресцентного анализа (мас. %): SiO₂ – 48.71, TiO₂ – 1.05, Al₂O₃ – 14.01, MgO – 6.54, MnO – 0.20, FeO – 11.04, CaO – 11.54, Na₂O – 2.03, K₂O – 0.26, P₂O₅ – 0.12, ППП (потери при прокаливании) – 2.12. Рентгенофлу-

оресцентный анализ проводился на приборе – рентгеновский спектрометр Axious Advanced PW 4400/04. Рентгенодифракционный анализ (рентгенофазовый) проводился на рентгеновском дифрактометре PanAnalytical X'Pert Pro (скорость сканирования 1 град. в мин, в конфигурации 2θ, напряжение 50 кВт, сила тока 40 мА). Этим методом были выявлены следующие фазы: плагиоклаз (вероятно, лабрадор), пироксен, гематит, ильменит, кварц и некоторые слоистые алюмосиликаты (примерный модалльный состав: Pl – 55%, Px – 39%, Qtz – 2%, Hem – 2%). Другая часть фрагментов базальта была закатана в “шашки” и проанализирована на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-8100 (рис. 1, табл. 1).

Один из фрагментов базальта был подвергнут плавлению в кварцевом тигле при 1300°C, в течение 30 мин в атмосфере чистого азота. Использовалась печь Nabertherm RHTV 1700 (ГЕОХИ РАН). Полученное стекло базальтового состава (далее базальтовое стекло) закатали в шашку и проанализировали на сканирующем электронном микроскопе. Стекло оказалось гомогенным по составу, что является необходимым условием при сравнении результатов эксперимента с тонкозернистым образцом базальта, поскольку гетерогенность мишени может влиять на гетерогенность продуктов выброса из кратера. Средний состав стекла измеренный электронной микроскопией (мас. %): SiO₂ – 51.50, TiO₂ – 1.11, Al₂O₃ – 14.39, MgO – 7.10, MnO – 0.17, FeO – 10.62, CaO – 11.23, Na₂O – 1.92, K₂O – 0.29, сумма – 98.33).

Анализ продуктов выброса из кратера (сферулы расплава) производился на сканирующем электронном микроскопе в МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре петрологии, Jeol JSM-6480LV (Япония) с энерго-дисперсионным Oxford X-MaxN и кристалл-дифракционным INCA Wave-500 (Oxford Instrument Ltd., Великобритания) спектрометрами и камерой дифракции обратно рассеянных электронов Oxford Nordlys Max2. Кроме того использовалась оптическая микроскопия, микрозондовый анализ, рентгеновская дифракция, видимая/ближняя ИК-спектрометрия.

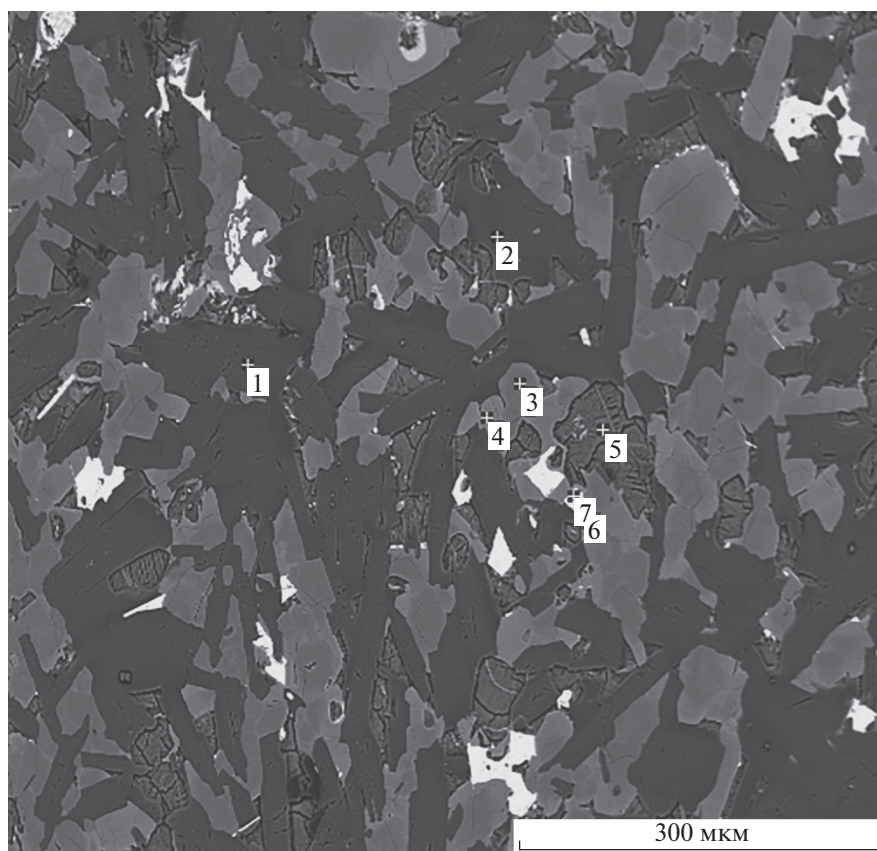


Рис. 1. Изображение исходного образца базальта под электронным микроскопом в обратно-отраженных электронах. Цифрами обозначены точки измерений состава по спектру ЭДС (табл. 1).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для испарения базальта использовали импульсный лазер на неодимовом стекле. Длина волны лазерного излучения составляла 1.06 мкм, длительность импульса 10^{-3} с, энергия импульса ~600–700 Дж. Плотность потока энергии $\sim 10^6$ – 10^7 Вт/см². Температура в точке “удара” составляла порядка 4000–5000 К, что соответствовало температуре испарения при высокоскоростных ударных процессах со скоростями столкновения порядка 10–15 км/с (Герасимов и др., 1999).

Схема установки для лазерного испарения приведена на рис. 2. В герметичную камеру объемом ~500 см³ с оптическим окном из кварцевого стекла помещали мишень – образец базальта (1.5 × 1.5 см). Камеру продували аргоном при атмосферном давлении. По окончании продувки подачу газовой смеси уменьшали, не перекрывая полностью, чтобы избежать попадания в камеру атмосферного воздуха (Зайцев и др., 2016).

В специально изготовленную герметичную камеру установки для лазерного испарения объемом ~500 см³ с оптическим окном из кварцевого стекла помещали мишень – образец базальта или базальтового стекла размером 1.5 × 1.5 см. Камеру

продували аргоном при атмосферном давлении. По окончании продувки подачу газовой смеси уменьшали, не перекрывая полностью, чтобы избежать попадания в камеру атмосферного воздуха (Зайцев и др., 2016). Камера имела форму цилиндра, который с внутренней стороны выстилался по всей поверхности медной фольгой (рис. 2). Образец закреплялся в специальном латунном держателе. После лазерного удара в мишени образовывался кратер, а продукты выброса из кратера (расплав и пар) осаждались на медную фольгу. Камера открывалась только через 20 мин после удара, чтобы конденсат полностью осел на подложку. Продукты выброса подразделялись на три типа – хлопья конденсата (микронный и менее размер частиц, неправильной формы), капли стекла различной формы (гетерогенные образования, крупные формы выделения – десятки и сотни микрон) и стеклянные сферулы (гомогенные шарики расплава, единицы и десятки микрон), которые соскребались пластиковым ножом в пакетик из кальки. Каждый тип продуктов выбросов из кратера исследовался отдельно. Полученные образцы закатывали в шашку для дальнейшего изучения с помощью микрозонда и сканирующего электронного микроскопа.

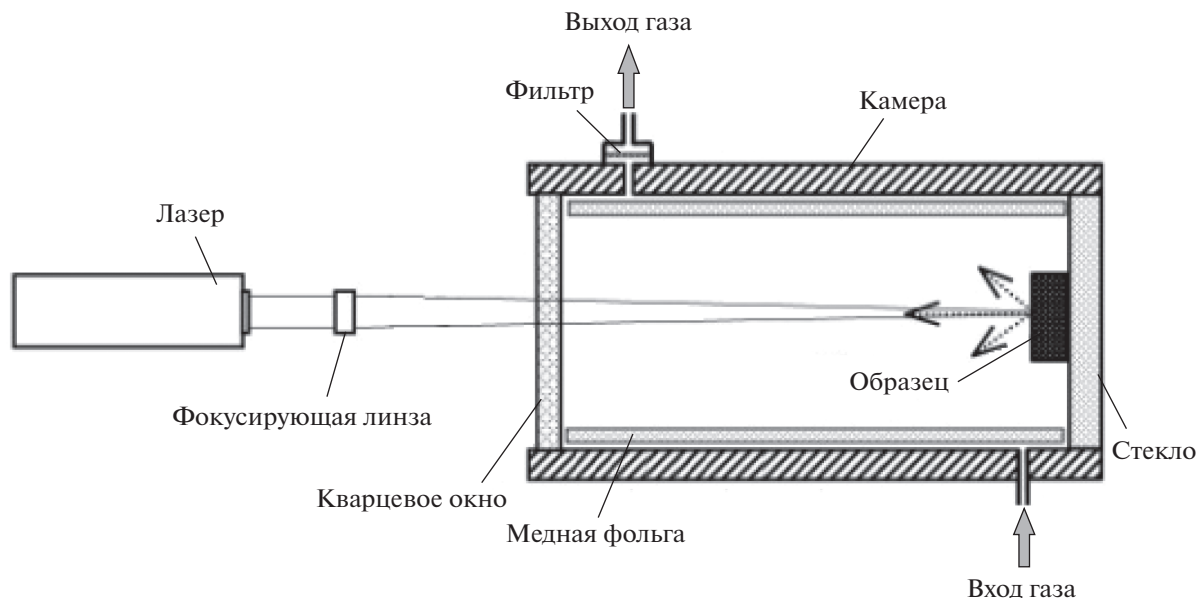


Рис. 2. Схема устройства камеры для лазерного облучения и испарения исследуемых образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образование капель расплава в виде шариков (после закалки – сферул стекла) объясняется диспергацией расплава, выброшенного под давлением струи испаренного пара из кратерной полости образца.

Текстурная неоднородность, наблюдаемая в стеклянных каплях в опыте с базальтовой мишенью (рис. 3, 4), проявляется и в неоднородном распределении химического состава стекла (табл. 2). Например, содержание оксида железа варьирует от 16.5 мас. % до менее 1 мас. %, в то время как содержание оксида алюминия варьирует от 9 мас. % до более 32 мас. %.

Обнаруженная неоднородность химического состава стекла указывает на селективное испаре-

ние и неполное перемешивание расплавов отдельных минералов базальтовой мишени. Несмотря на то, что размер минеральных зерен в базальте находится в пределах от десятков до сотни микрометров, этого достаточно, чтобы вызвать гетерогенность в продуктах выброса. Отчасти это подтверждается текстурами течения, обнаруженными в кратере и в некоторых больших (более 100 мкм) каплях в продуктах выброса (рис. 4). Вероятно, процессу выброса предшествовал процесс плавления соседних минералов, расплав которых не успевал гомогенизироваться вследствие перемешивания за короткий промежуток времени. Компоненты этого гетерогенного расплава вылетали в виде отдельных и различных по составу капель, которые закаливались в полете, превращаясь в стекло. Кроме того, свою роль сыграл и размер

Таблица 2. Химический состав капель стекла, выброшенных из базальтовой мишени, по данным микрозондового анализа

№ точки	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
6	48.05	0.98	11.68	10.61	0.19	11.54	13.38	1.17	0.37	99.27
7	49.4	0.62	25.17	3.35	0.14	3.63	13.66	2.48	0.25	99.21
8	51.88	0.12	30.12	0.25	0.06	1.16	13.33	3.33	0.29	100.67
10	43.77	3.85	12.24	9.6	0.43	16.44	12.27	1.07	0.11	101.9
11	50.96	0.12	32.36	0.12	0.00	0.94	15.21	3.27	0.19	103.5
12	49.51	2.05	8.9	11.00	0.50	12.81	13.5	1.27	0.25	101.28

Примечания. Номера проб табл. соответствуют цифрам на рис. 4.



Рис. 3. Изображение стеклянной капли с текстурами течения под микроскопом в проходящем свете.

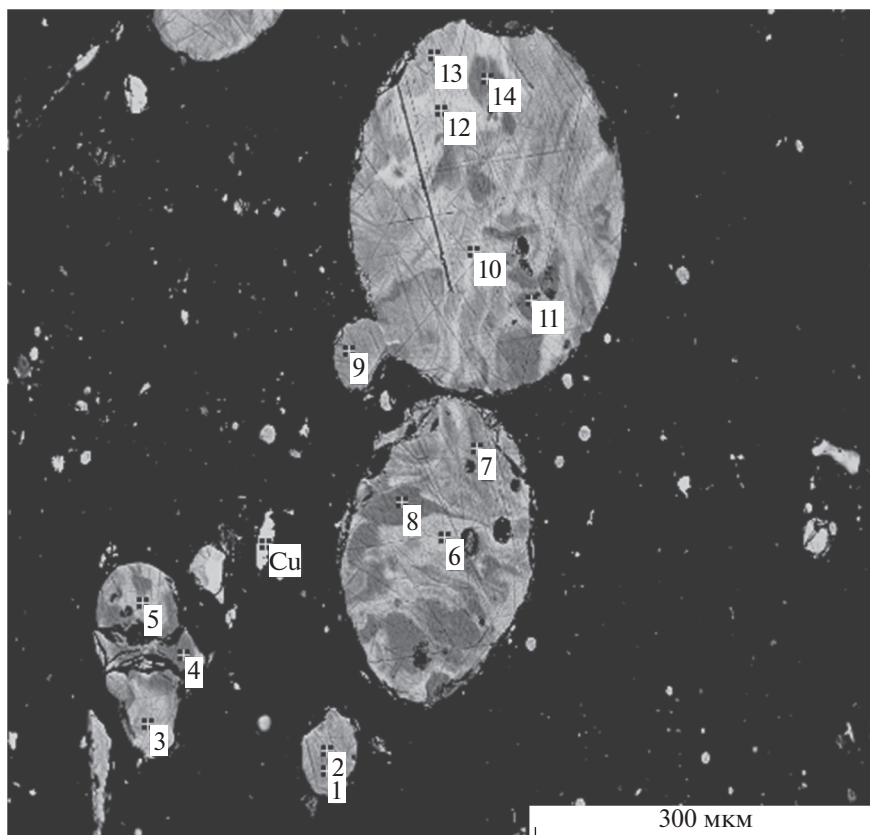


Рис. 4. Изображение неоднородных стеклянных капель (в обратно-отраженных электронах). Цифрами показаны точки измерений состава (микронзондовый анализ) (табл. 2).

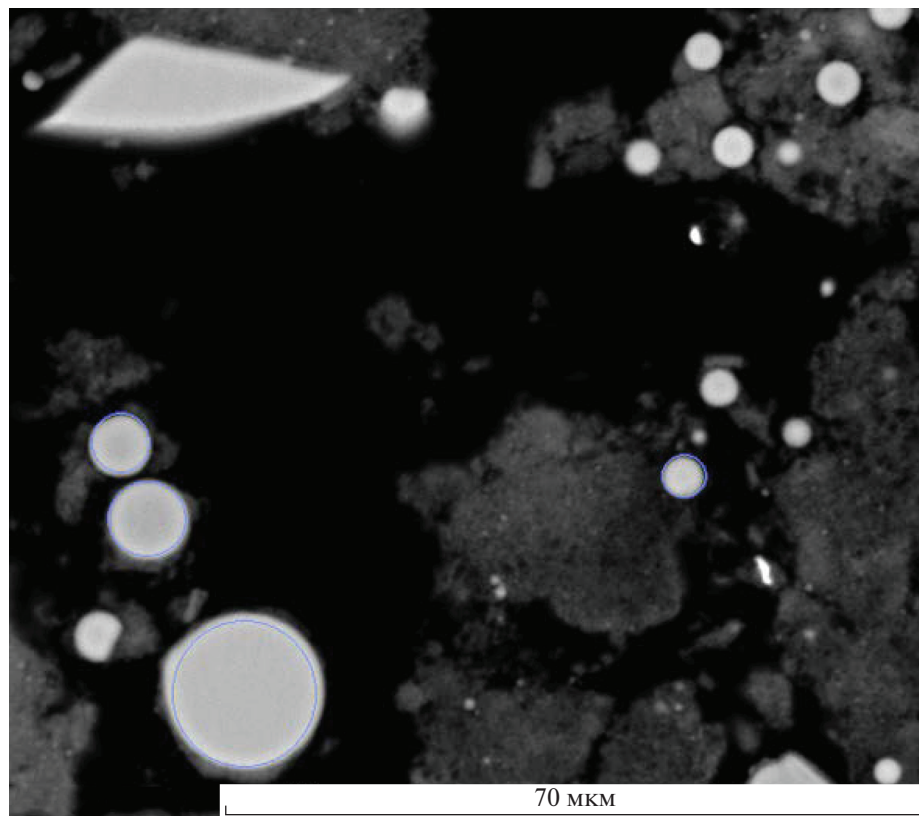


Рис. 5. Изображение стеклянных сферул полученное сканирующим электронным микроскопом. Образования неправильной формы – конденсатные пленки.

капель: большие капли-стекла (около 100 мкм) несут следы такой несмесимости, в то же время, сферулы меньше 20 мкм имеют гомогенный состав (рис. 3, 4, 5).

Образование капель расплава в виде шариков (после закалки – сферул стекла) объясняется диспергацией расплава, выброшенного под давлением струи испаренного пара из кратерной полости образца. Сферулы весьма гомогенны по химическому составу, но между сферулами наблюдается существенный разброс составов. Например, диапазон значений содержания оксида железа находится в пределах от 1 до 52 мас. %, а содержания SiO_2 от 9 до 60 мас. %. Таким образом, в продуктах плавления и выброса из кратера имеются сферулы, где половина вещества представлена оксидом железа, и присутствуют сферулы с высоким содержанием кремнезема.

Был проанализирован химический состав 110 сферул размером ~1–45 мкм, полученных от выстрела по базальтовой мишени, а также 179 сферул размером ~1–60 мкм, полученных при ударе по базальтовому стеклу. Следует отметить, что диаметр определялся по различным срезам стеклянных шариков, которые могут отражать лишь примерный размер самой сферулы, что является ограничением метода электронной микроскопии.

В сферулах наблюдается закономерное разделение оксидов по летучестям. Зависимость концентраций умеренно летучего оксида железа от труднолетучих CaO и Al_2O_3 в опыте с базальтовым стеклом (рис. 6а) и кристаллическим базальтом (рис. 6б) показывают обратную корреляцию. В случае с базальтовой мишенью наблюдаются сферулы, обогащенные оксидом железа по сравнению с исходной породой. Минимальные содержания железа (0.2 мас. %) в продуктах плавления обнаружены в опыте с базальтовым стеклом.

Распределение кремнезема в зависимости от труднолетучих CaO и Al_2O_3 характеризуется обратной корреляцией (рис. 6в, 6г). В отличие от продуктов базальтовой мишени, в которых минимальное содержание кремнезема составляет около 20% (рис. 6в), в опыте с базальтовым гомогенным стеклом в некоторых сферулах наблюдается почти полное отсутствие кремнезема (рис. 6г). Между оксидами труднолетучих компонентов CaO и Al_2O_3 наблюдается ожидаемая прямая корреляционная зависимость (рис. 6д, 6е). Следует отметить, что во всех рассмотренных сферулах из базальтовой мишени в отличие от опыта с базальтовым стеклом наблюдается большой разброс значений (рис. 6), который, по-видимому, обусловлен неоднородным составом базальтовой

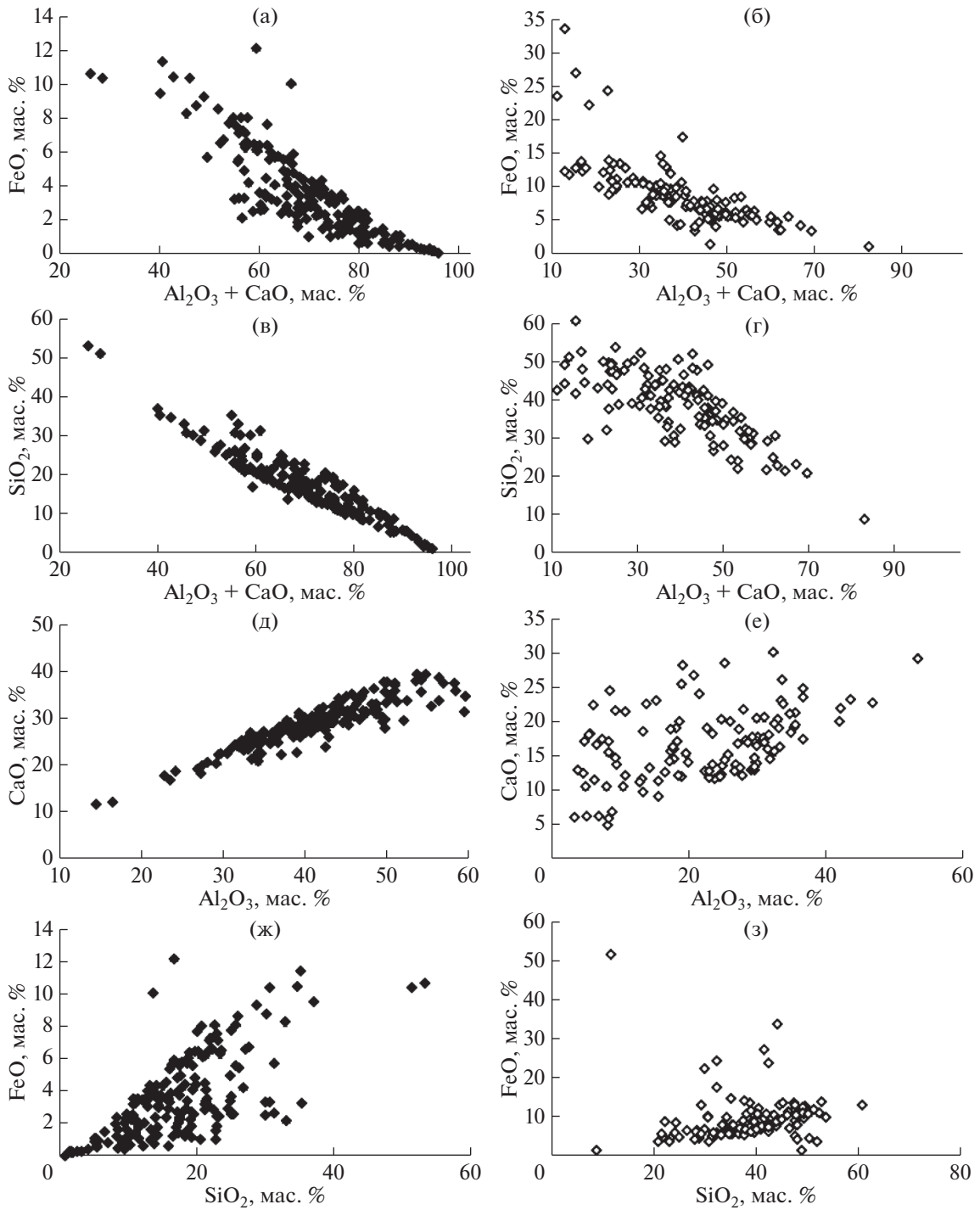


Рис. 6. Распределения оксидов в зависимости от содержания труднолетучих компонентов в стеклянных сферулах: а, в, д, ж – сферулы, полученные из базальтового стекла; б, г, е, з – сферулы, полученные из базальта.

мишени, т.е. наличием различных минеральных фаз. Как следует из рассмотренных выше распределений компонентов, между оксидом железа и кремнеземом также наблюдается прямая корреляционная зависимость (рис. бж, бз). В последнем случае разброс значений характерен не только для базальтовой мишени, но и в опыте с базальтовым

стеклом, особенно при высоких содержаниях железа. Значительный разброс значений в опыте с базальтовой мишенью наблюдается и на диаграмме испарительного изменения химического состава продуктов выброса из кратера, на которой составы минеральных фаз разделены на три группы – рудные минералы, пироксены и плагиоклазы (рис. 7).

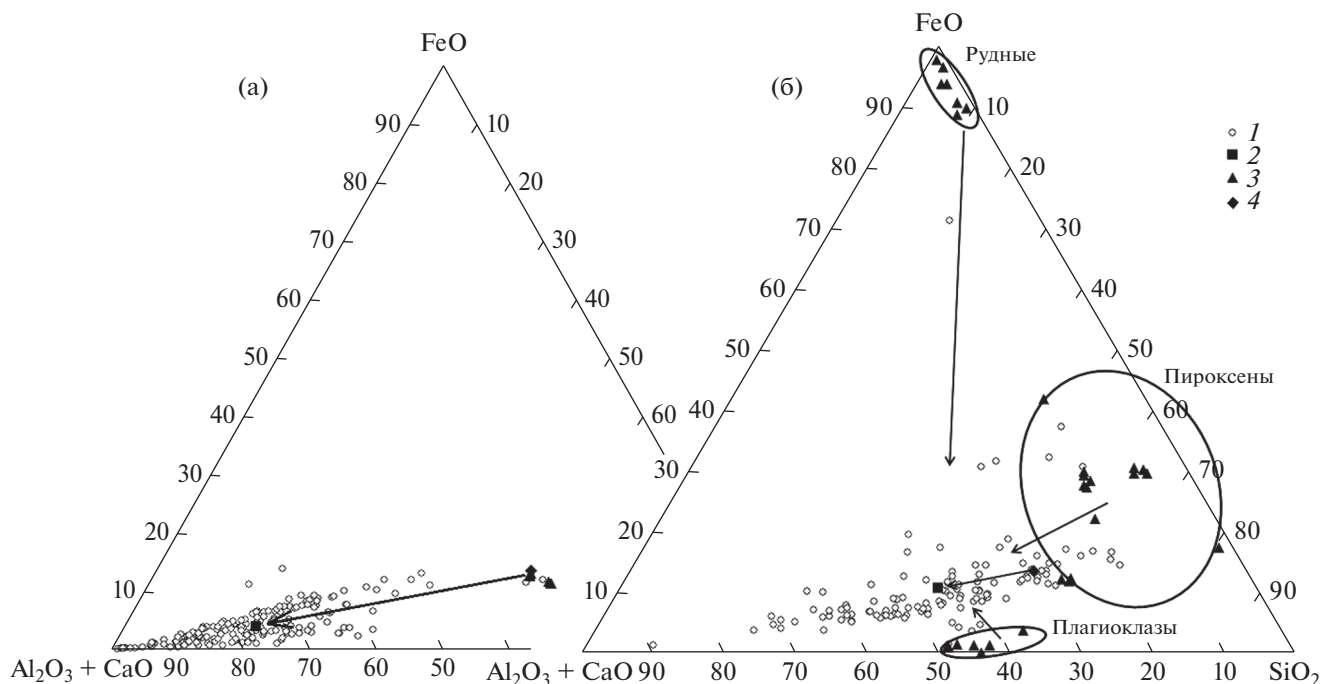


Рис. 7. Тройные диаграммы химического состава сферул. (а) Сферулы, полученные из базальтового стекла. (б) Сферулы, полученные из базальта. Стрелками показаны тренды изменения исходного химического состава после плавления и испарения материала мишени.

(а): 1 – сферулы из опыта с базальтовым стеклом; 2 – среднее по сферулам из опыта с базальтовым стеклом; 3 – исходное базальтовое стекло; 4 – РФА (рентгенофлуоресцентный анализ) исходного базальта. (б): 1 – сферулы из опыта с базальтом; 2 – среднее по сферулам из опыта с базальтом; 3 – минералы мишени (базальт); 4 – РФА (рентгенофлуоресцентный анализ) исходного базальта.

Помимо смещения разных расплавов, также отчетливо прослеживается тенденция обеднения легколетучих элементов и смещение среднего состава в тугоплавкую область (к вершине $Al_2O_3 + CaO$) (рис. 7). Общий ход испарения в эксперименте типичен для большинства базальтовых расплавов (Яковлев и др., 1972; Маркова и др., 1986; Казенас, Цветков, 1997). По мере увеличения температуры испарения расплав теряет компоненты в следующей последовательности: ($K_2O + Na_2O$)– FeO – SiO_2 – MgO –($CaO=TiO_2$)– Al_2O_3 . Результаты эксперимента позволяют подразделить петрогенные компоненты базальтовых пород по их летучести на три класса: относительно летучие – K_2O , Na_2O и FeO ; умереннолетучие – SiO_2 , MgO и труднолетучие – CaO , TiO_2 и Al_2O_3 (Яковлев и др., 2011а).

Необходимо отметить, что в опыте с базальтовым стеклом по сравнению с базальтовой мишенью наблюдается гораздо более глубокая дифференциация химического состава в продуктах выбросов из кратера (рис. 6, 7, 8). Более выраженная зависимость и упорядоченность значений в продуктах плавления мишени из базальтового стекла, по-видимому, объясняется тем, что в случае аморфного состояния вещества в силу меньшей

энергии связи испарение оксидов происходит легче и быстрее. Несмотря на короткое время импульса около 10^{-3} с, капли базальтового расплава успевают пройти глубокую испарительную дифференциацию. В опыте с базальтовым стеклом в каплях расплава, выброшенных из кратера, содержание SiO_2 может изменяться от исходного в 49 до 0.1 мас. %. Средний химический состав сферул в опытах с базальтовой мишенью и с базальтовым стеклом также различается. При одинаковом исходном содержании кремнезема в 49 мас. %, в сферулах среднее содержание SiO_2 в первом случае составляет 38 мас. %, а в опыте с базальтовым стеклом около 17 мас. % (рис. 7, 8).

Кратерное стекло

Образец стекла в кратере, образованного при ударе лазером, разрезался пополам по центру кратера, заливался в шашку и анализировался на сканирующем электронном микроскопе. В образце хорошо видны следы плавления различных минеральных зерен и переход из кристаллического состояния в расплавленное (текстуры течения) (рис. 9). Аналогичные текстуры течения обнаружены в лунных образцах, которые испытали ударное давление в пределах 50–70 ГПа (Basu, 2005;

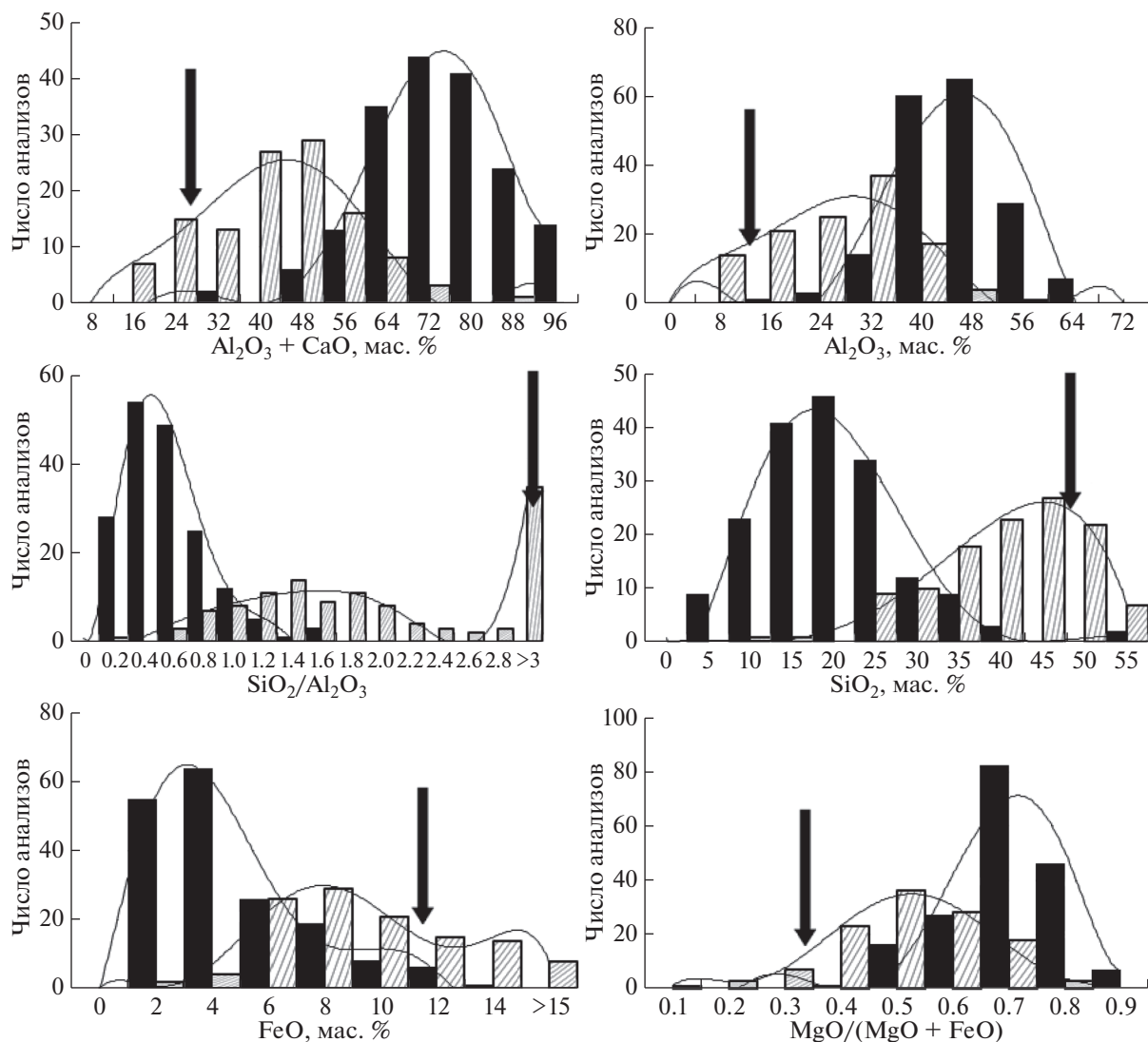


Рис. 8. Гистограммы сравнения двух экспериментов. Заштрихованные столбики отвечают эксперименту с кристаллическим базальтом, а черные – с базальтовым стеклом. Стрелкой показаны исходные содержания.

Heiken, 1991), и высокие постударные температуры (Stöffler, 1972; Schaal, Hörz, 1977) (рис. 10). В кратере также наблюдаются “пузыри пены” образующейся при резком вскипании воды и других летучих. Быстрая закалка расплавов, по-видимому, не дала гомогенизироваться расплавам. По течению расплавов располагаются маленькие пузырьки летучих компонентов, которые присутствуют в исходном базальте (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнение результатов двух серий экспериментов (с кристаллическим базальтом и базальтовым стеклом), позволяет сделать вывод, что стекло подвергается более легкому испарению и расщеплению связей, кроме того, гомогенность

такого стекла отвечает за гомогенность продуктов выброса из кратера – более равномерное распределение и более четкие испарительные корреляции оксидов расплава по их летучести (рис. 6, 7, 8).

В целом в эксперименте поведение оксидов при испарении находится в согласии с данными ряда летучести оксидов (K_2O , Na_2O , FeO , SiO_2 , MgO , CaO , Al_2O_3) (Яковлев и др., 2011; Казенас, Цветков, 1997; DeMaria et al., 1971). Тем не менее, были отмечены некоторые нарушения вышеуказанного порядка. Например, присутствие во многих образцах стекла труднолетучих (CaO и Al_2O_3) и легколетучих (Na_2O) компонентов (табл. 3, рис. 10), которое может быть обусловлено кластерным испарением. При таком типе испарения в облаке пара могут образовываться кластеры типа $NaAlSiO_4$ (Герасимов и др., 2016). По крайней мере, этот во-

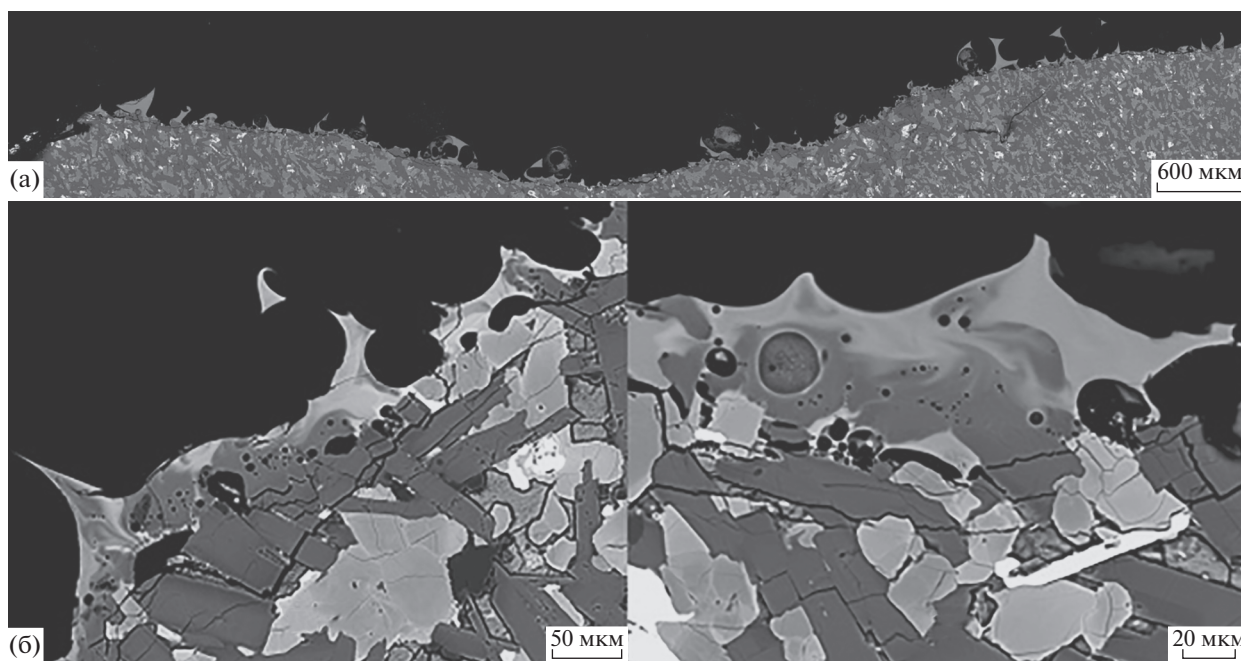


Рис. 9. Изображение образованного в базальтовой мишени после лазерного “удара” кратера под микроскопом в отраженном свете. (а) изображение всего кратера разрезе. Диаметр кратера – ~6 мм, глубина – ~0.6 мм. (б) Изображение текстуры плавления кратерного стекла на контакте с минеральными фазами.

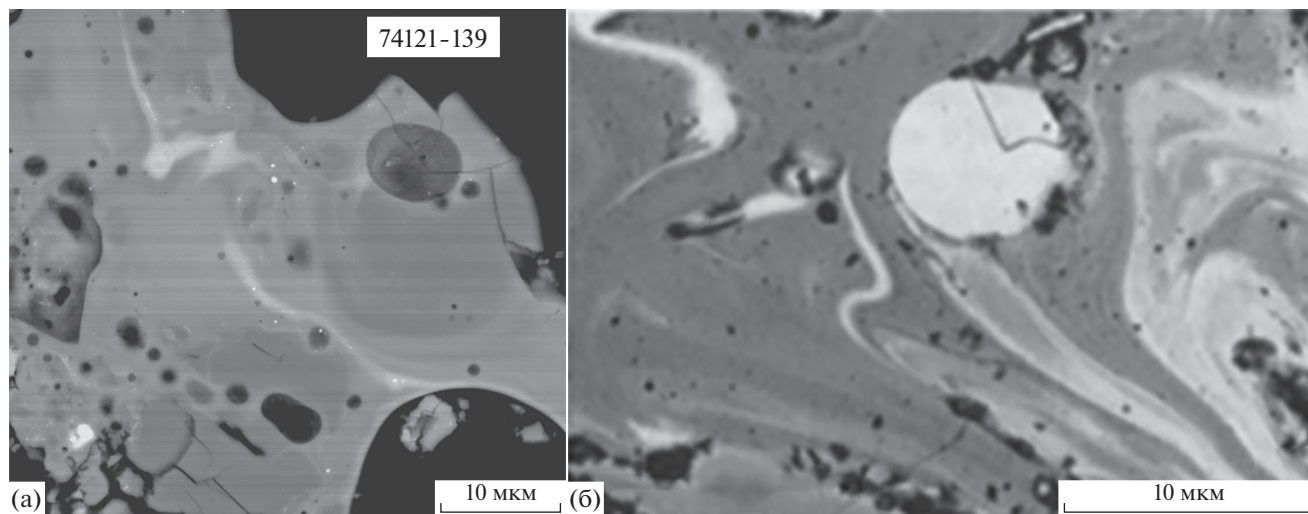


Рис. 10. Текстуры течения, обнаруженные в доставленных образцах лунного грунта (по данным Basu, 2005 – (а) и Horz, 1991 – (б)).

прос требует в дальнейшем более тщательного исследования.

Наблюдается разброс отношения MgO/SiO_2 в зависимости от суммы труднолетучих элементов, обусловленный различной термической историей и неоднородностями исходного состава (рис. 11). Расплав из центра кратера подвергался более высоким температурным нагрузкам и, соответственно, претерпевал более глубокую испари-

тельную дифференциацию. Ближе к периферии кратера температуры были ниже, и испарительная дифференциация была менее выраженной. Вероятно, неоднородное распределение температуры в расплавах должно создавать непрерывную серию химических составов стекол, отражая прогрессирующее испарение, как функцию высокотемпературной переработки (Gerasimov et al., 2005).

В процессе испарительной дифференциации важную роль также играет отношение площади

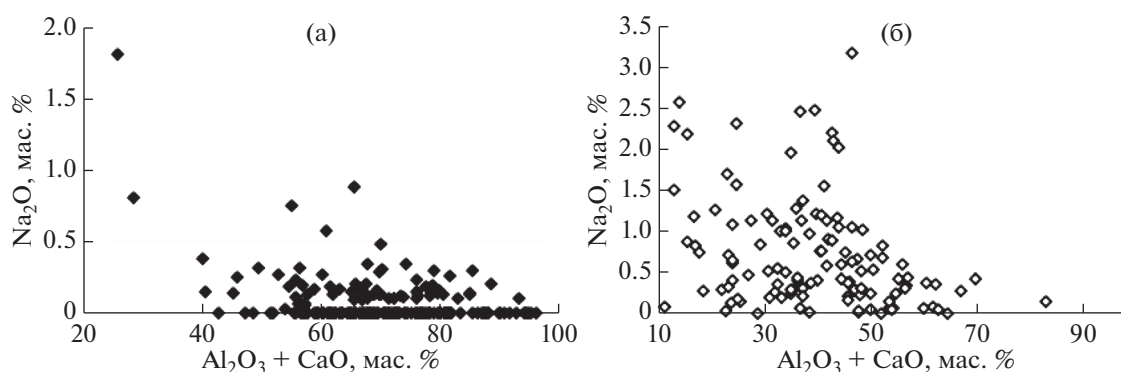


Рис. 11. Распределение оксида натрия в сферах в зависимости от труднолетучих компонентов в мишени из базальтового стекла (а) и в базальтовой мишени (б).

поверхности к объему капли расплава. Чем выше это отношение, тем более высокую степень испарительной дифференциации приобретают сферулы расплава. Следовательно, мелкие сферулы должны характеризоваться более высокой степенью испарительного процесса, что также согласуется с результатами эксперимента, поскольку сферулы размером более 20 мкм имеют более высокие содержания умеренно и легколетучих компонентов.

Экспериментальные исследования показали, что в ударном процессе заложен важный механизм дифференциации вещества (Яковлев и др., 2003; Герасимов и др., 2012). Глубокий процесс испарительной дифференциации проявляется и в так называемых HASP-стеклах (High Alumina - Silica Poor). Они обнаружены в тонкой фракции лунного реголита (Warren 2008) и в земных ударных кратерах (Горностаева, 2015; Горностаева и др., 2016). Высокоглиноземистые стекла ($Al_2O_3 >$

Таблица 3. Химический состав сферул стекла – аналогов HASP-стекел Луны

<i>Мишень: базальтовое стекло</i>										
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	мкм
5.56	3.4	54.23	0.74	0.57	н.п.о	35.5	н.п.о	н.п.о	100	4
3.28	3.24	54.27	0.67	0.27	н.п.о	38.27	н.п.о	н.п.о	100	4
1.49	3.33	54.84	0.87	0.24	н.п.о	39.23	н.п.о	н.п.о	100	6
8.46	2.75	55.44	0.34	0.44	н.п.о	32.59	н.п.о	н.п.о	100	6
5.46	3.34	56.38	0.6	0.51	н.п.о	33.7	н.п.о	н.п.о	100	7
1.26	3.16	56.44	0.3	0.19	н.п.о	38.65	н.п.о	н.п.о	100	8
1.79	3.22	57.01	0.26	0.18	н.п.о	37.54	н.п.о	н.п.о	100	6
0.78	3.29	58.34	0.01	0.01	н.п.о	37.53	н.п.о	н.п.о	100	7
1.96	3.34	58.44	0.19	0.21	н.п.о	35.85	н.п.о	н.п.о	100	6
5.49	2.64	59.49	0.62	0.54	н.п.о	31.23	н.п.о	н.п.о	100	6
1.79	3.48	59.72	0.17	0.28	н.п.о	34.56	н.п.о	н.п.о	100	5
<i>Мишень: кристаллический базальт</i>										
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Сумма	мкм
8.78	1.62	53.19	1.58	1.12	н.п.о	29.31	0.04	0.15	95.88	3
20.98	1.22	46.58	2.82	3.44	0.1	22.8	0.06	0.43	98.51	4
21.55	0.84	42.01	9.04	5.52	0.21	22.06	0.01	н.п.о	101.26	5
23.26	1.54	43.37	3.69	4.32	0.12	23.35	0.05	0.28	99.99	8
22.19	1.65	34.68	13.5	8.52	н.п.о	18.46	0.01	0.15	99.18	5
21.77	2.52	33.49	10.65	4.7	0.11	26.22	0.03	0.06	99.58	17
24.95	2.42	36.46	4.72	4.68	0.06	24.98	0.02	0.09	98.41	9
23.03	1.25	32.11	9.01	3.56	н.п.о	30.25	0.02	0.05	99.31	8
24.16	1.73	32.79	12.81	5.86	0.14	20.46	0.03	0.06	98.05	9
30.84	1.17	41.76	2.27	3.65	н.п.о	20.1	0.06	0.36	100.22	7
29.31	2.58	36.43	3.87	5.59	0.08	23.67	0.04	0.37	101.94	6

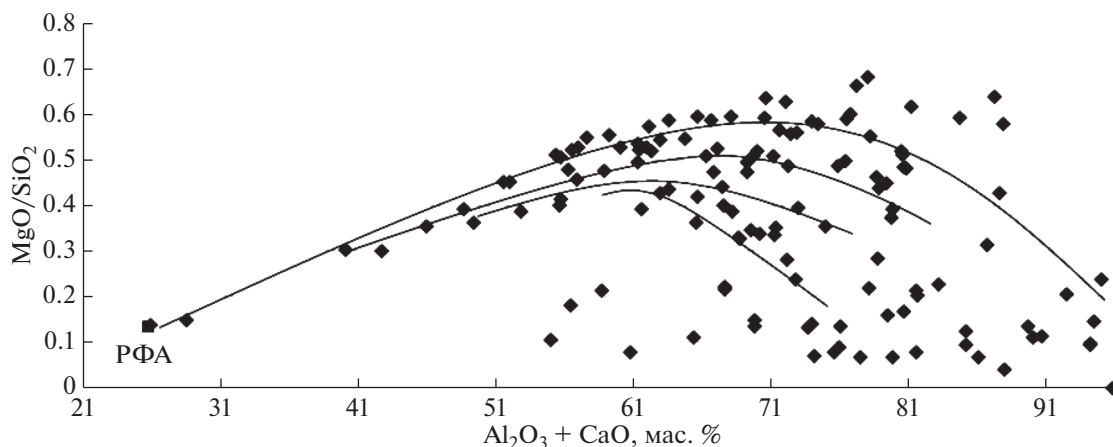


Рис. 12. Распределение отношения MgO/SiO_2 в зависимости от суммы труднолетучих оксидов. Линиями показаны предполагаемые тренды индивидуальной термической истории сферул (Gerasimov et al., 2005).

> 34 мас. %, $SiO_2 < 32$ мас. %) образовались на поверхности Луны при ударном кратерообразовании в процессе высокотемпературного плавления пород и испарения расплавов. При испарении происходит улетучивание легко и умереннолетучих компонентов N_2O , K_2O , FeO , SiO_2 и накопление в расплавленном остатке Al_2O_3 и CaO . Этот процесс удалось воспроизвести в нашем эксперименте, то есть воссоздать те химические и физические условия, наблюдающиеся на поверхности Луны при микрометеоритной бомбардировке.

Анализ сферул закалки в экспериментах с кристаллическим базальтом и базальтовым стеклом, показал, что около 25% этих образований в эксперименте с кристаллическим базальтом испытали глубокую испарительную дифференциацию. Доля таких сферул полученных в эксперименте со стеклом существенно выше, около 90% (рис. 12). Их химические (табл. 3) отвечают составам HASP-стекло найденным на Луне.

Стекла HASP обычно характерны для материковой АНТ серии лунных пород (Warren, 2008; Naney et al., 1976; Vaniman et al., 1977; Яковлев и др., 2018). Аналогичная тенденция получения аналогов HASP-стекло продемонстрирована для мишени базальтового состава в нашем эксперименте (рис. 13), отличаясь лишь меньшим содержанием оксида кремния. Вероятно, это небольшое расхождение в содержании SiO_2 , может в дальнейшем служить индикатором испарительной дифференциации, происходившей в процессе метеоритной бомбардировки в морских районах Луны, заполненных базальтами (Keller, McKay, 1992).

Отношение SiO_2/Al_2O_3 в стеклах HASP уменьшается почти линейно, по мере увеличения концентрации оксидов кальция и алюминия (рис.13). Существует нижнее значение отношения SiO_2/Al_2O_3 для магматических лунных пород в целом, из-

вестного в качестве петрохимического предела и равного 1.18, ниже которого составы магматических лунных пород маловероятны (Яковлев и др., 2018). Следовательно, породы с отношением ниже этого предела могут образоваться только в процессе испарительной дифференциации при ударно-взрывной переработке лунных пород, при которой температура испарения HASP стекол существенно превышает температуру плавления базальтов и составляет ~1750–1870°C (Яковлев и др., 2011б). Химический состав большинства полученных в эксперименте с базальтовым стеклом сферул соответствует составу HASP-стекло (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Экспериментально продемонстрирована возможность имитации микрометеоритной бомбардировки на поверхности Луны. В двух сериях экспериментов были получены сферулы претерпевшие испарительную дифференциацию. При этом в эксперименте с базальтом только около 25% сферул испытали глубокую испарительную дифференциацию, а в опыте с базальтовым стеклом доля таких шариков оказалась существенно выше — около 90% (рис. 12). Сравнение результатов двух серий экспериментов с базальтовой мишенью и с базальтовым стеклом позволяет сделать вывод, что стекло подвергается более легкому испарению и расщеплению связей. Однородность базальтового стекла по химическому составу обусловила однородное распределение химического состава в продуктах выброса из кратера, а также формирование более выраженных корреляций и трендов испарительной дифференциации. В случае с базальтовой мишенью доминирует процесс смешения в различных пропорциях расплавов исходных минералов.

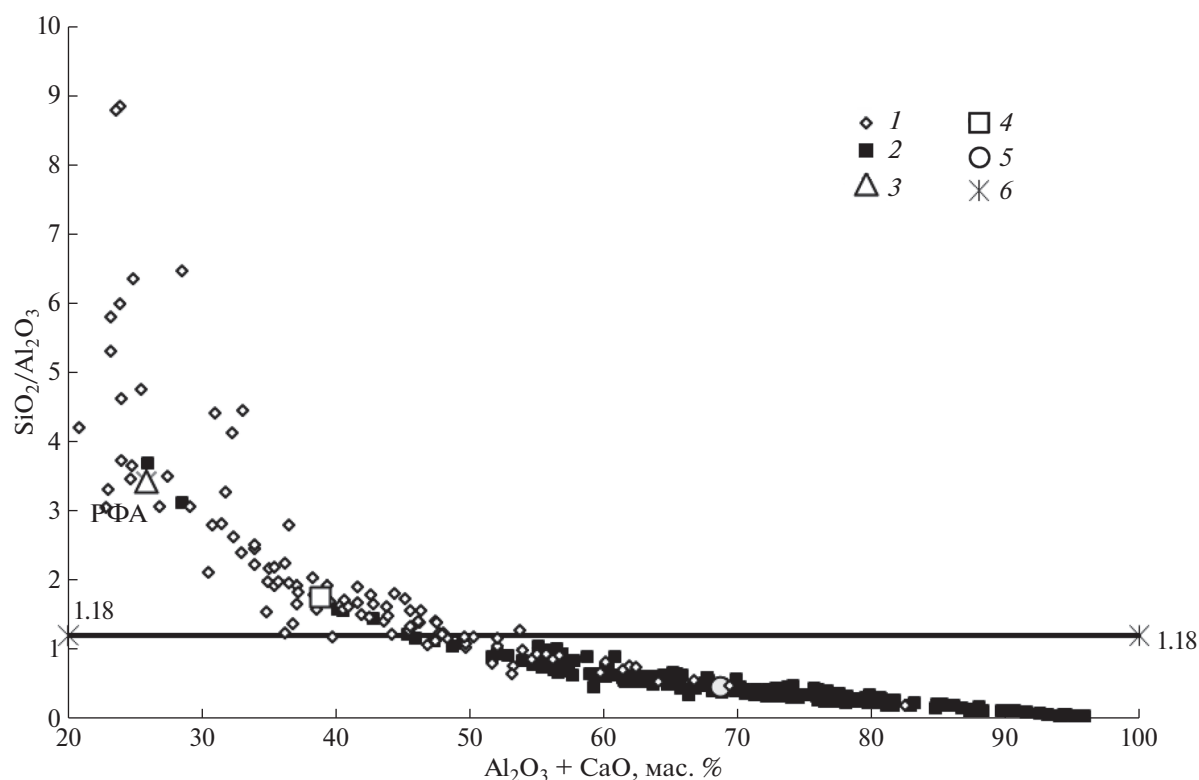


Рис. 13. Распределение отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в стеклянных сферах в зависимости от труднолетучих оксидов $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$. 1 – сфераулы из опыта с базальтом; 2 – сфераулы из опыт с базальтовым стеклом; 3 – среднее содержание в сфераулах из базальта; 4 – среднее содержание в исходном образце породы; 5 – среднее содержание в сфераулах из базальтового стекла; 6 – линии ниже которой состав лунных магм маловероятен.

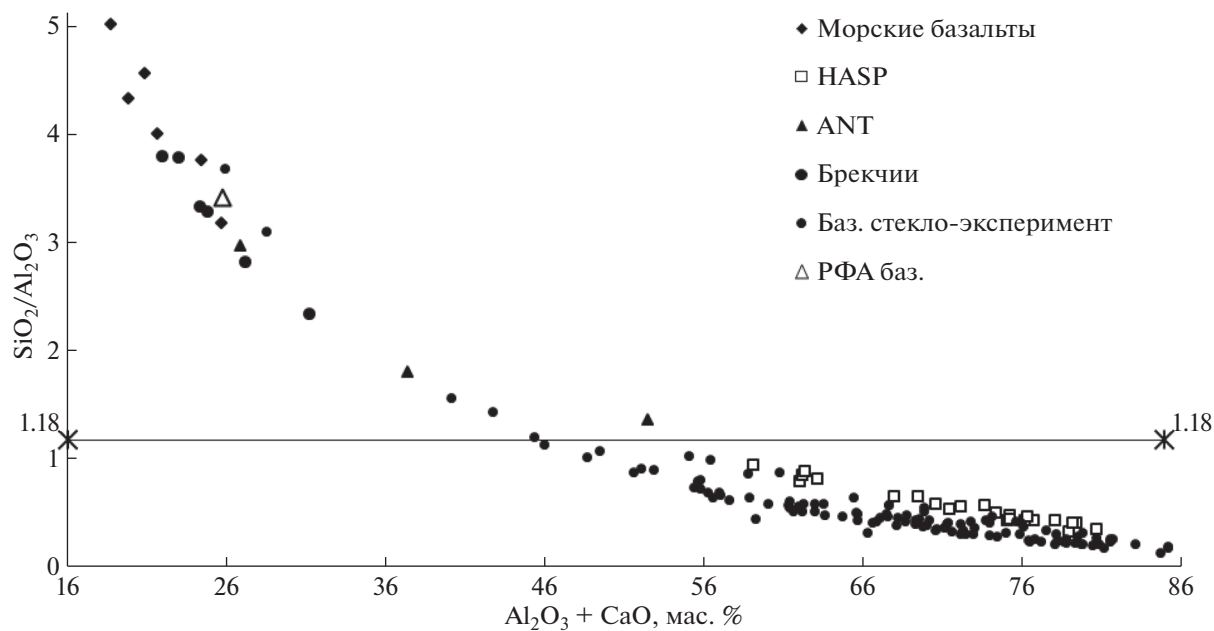


Рис. 14. Распределение отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от суммы труднолетучих оксидов $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ в образцах лунных пород (Heiken, 1991; Warren, 2008; Naney et al., 1976; Vaniman et al., 1977), а также в базальте мишени и в сфераулах, полученных в результате эксперимента. Линией при 1.18 обозначен петрохимический предел, ниже которого составы магматических лунных пород невозможны (Яковлев и др., 2018).

Корреляции компонентов расплава подтверждают экспериментально предсказанный ряд летучести. В первую очередь теряются легко и умереннолетучие компоненты (N_2O , K_2O , FeO , SiO_2), в то время как CaO , TiO_2 и Al_2O_3 накапливаются в остатке.

Учитывая масштабы всей поверхности Луны можно вполне представить важность и масштабность процесса испарительной дифференциации в ударно-взрывной переработке подстилающих лунных пород с момента их образования (в морских районах возраст наиболее древних базальтов может достигать 3.8 млрд лет, в материковых районах возраст пород коры может превышать 4.4 млрд лет).

Следует также отметить, что в период наиболее интенсивной тяжелой метеоритной бомбардировки (Greg et al., 2017), т.е. фактически на завершающей стадии аккреции Луны (Walker et al., 2004) и, соответственно, Земли, и прежде всего на стадии существования магматического океана (Benz, Cameron, 1990), ударно-взрывная испарительная дифференциация также, по-видимому, внесла определенный вклад в процесс химической дифференциации вещества ранней первичной коры (Яковлев и др., 2000), которая сохранилась на Луне и не сохранилась на Земле.

Исследования поддержаны грантом РФФ № 17-17-01279.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондаренко Н.В., Шкуратов Ю.Г. (1998) Карта толщины реголитового слоя видимого полушария Луны по радиолокационным и оптическим данным. *Астрономический Вестник* **32**(4), 301-309.
- Герасимов М.В., Диков Ю.П., Яковлев О.И. (2012) Кластерный тип испарения силикатов: новые экспериментальные данные. *Петрология* **20**(5), 439-448.
- Герасимов М.В., Диков Ю.П., Яковлев О.И. (2016) Новые экспериментальные результаты изучения кластерного испарения полевых шпатов. *Петрология* **24**(1), 55-82.
- Горностаева Т.А. (2015) Земные аналоги HASP и GASP стекол из кратера Жиманшин. *16-я международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"*. Москва. 78-81.
- Горностаева Т.А., Мохов А.В. (2016) Сходство земных и лунных импактных стекол. *17-я международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"*. Москва. 70-73.
- Зайцев М.А., Герасимов М.В., Сафонова Э.Н., Васильева А.С. (2016) Особенности синтеза сложных органических веществ в азотно-метановой атмосфере при высокоскоростных ударных событиях. *Астрономический вестник* **50**(2), 123-140.
- Казенас Е.Л., Чижигов Д.М. *Давление и состав пара над окислами химических элементов*. М.: Наука, 1976. 342 с.
- Куликов И.С. *Термическая диссоциация соединений*. М.: Металлургия, 1969. 574 с.
- Маркова О.М., Яковлев О.И., Семенов Г.А., Белов А.Н. (1986) Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена. *Геохимия* (11), 1559-1569.
- Слюта Е.Н., Иванов А.В., Иванов М.А. (1995) *Сравнительная планетология: Основные понятия, термины и определения*. М.: Наука, 141 с.
- Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (Обзор). (2014) *Астрономический Вестник* **48**(5), 358-382.
- Яковлев О.И., Косолапов А.И., Кузнецов А.В., Нусинов М.Д. (1972) Результаты исследования фракционного испарения базальтового расплава в вакууме. *ДАН СССР* **206**(4), 970-973.
- Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В., Влотска Ф., Хут Й. (2003) Экспериментальное изучение факторов, определяющих состав стекол лунного реголита. *Геохимия* (5) 467-481.
- Yakovlev O.I., Dikov Yu.P., Gerasimov M.V., Vlotska F., Khut Y. (2003) Experimental study of factors determining the composition of the glasses of the lunar regolith. *Geochem. Int.* **41**(5) 467-481
- Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. (2011a) Оценка температурных условий образования HASP- и GASP-стекол лунного реголита. *Геохимия* (3), 227-238.
- Yakovlev O.I., Dikov Yu.P., Gerasimov M.V. (2011a) Estimation of Temperature Conditions for the Formation of HASP and GASP Glasses from the Lunar Regolith. *Geochem. Int.* **49**(3), 213.
- Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. (2011b) Условия образования пленочных конденсатов на поверхности частиц лунного реголита. *Геохимия* (10), 1025-1031.
- Yakovlev O.I., Dikov Yu.P., Gerasimov M.V. (2011b) Conditions of Condensate Rim Formation on the Surface of Lunar Regolith Particles. *Geochem. Int.* **49**(10), 947.
- Яковлев О.И., Рязанцев К.М., Шорников С.И. (2018) Инверсия летучести оксидов кремния и магния при испарении hasp-стекол на луне. *Геохимия* (1), 77-81.
- Yakovlev O.I., Ryazantsev K.M. and Shornikov S.I. (2018) Volatility Inversion of Silicon and Magnesium Oxides during the Evaporation of HASP Glasses on the Moon. *Geochem. Int.* **56**(1), 71.
- Adams J.B., McCord T.B. (1971) Optical properties of mineral separates, glass, and anorthositic fragments from Apollo mare samples. *Proc. Lunar Sci. Conf. 2th*, 2183-2195.
- Basu A. (2005) Nanophase Fe^0 in lunar soils. *J. Earth Syst. Sci.* **114**(3), 375-380.
- Benna M., Hurley D.M., Stubbs T.J., Mahaffy P.R., Elphic R.C. (2019) Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts. *Nature Geoscience* (12), 33-338.
- Benz W., Cameron A.G.W. (1990) Terrestrial effects of the giant impact. In: Newsom, H.E., Jones, J.H. (Eds.), *Origin of the Earth*. Oxford University, New York. 61-67.
- Cintala M.J. (1992) Impact-induced thermal effects in the lunar and mercurian regoliths. *J. Geophys. Res.* **97**(E1), 947.
- Cremonese G., Borin P., Lucchetti A., Marzari F., Bruno M. (2013). Micrometeoroids flux on the Moon. *A&A* **551**(A27).

- De Maria G., Balducci G., Guido M., Piacente V. (1971) Mass spectrometric investigation of the vaporization process of Apollo 12 lunar samples. *Proc. Lunar Sci. Conf. 2nd*, The M.I.T. Press, (2), 1367-1380.
- Delano J.W. (1981) Major-element composition of volcanic green glasses from Apollo 14. *Proc. Lunar Sci. Conf 12 (Abstracts)*, 217-219.
- Gerasimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Yu.P. (1999) Physics and Chemistry of Impacts. (Ehrenfreund P., Krafft K., Kochan H., Pirronello V. eds.) Laboratory Astrophysics and Space Research. *Astrophys. Space Sci.* (236), 279-330.
- Gerasimov M.V., Dikov Yu.P., Yakovlev O.I., Wlotzka F. (2001) Reduction of Iron During an Impact. In: *Impact markers in the stratigraphic record (abstract)*. CSIC-UGR, Granada (Spain), 31-32.
- Gibbons R.V., Morris R.V., and Hörz F. (1975) Petrographic and ferromagnetic resonance studies of experimentally shocked regolith analogues. *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th* 3, 3143-3171.
- Hapke, B., Cassidy W., and Wells E., (1975). Effects of vapor-phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of the lunar regolith, *The Moon* 13, 339-353.
- Hartung J.B., Horz F., Gault D.E. 1972. Lunar microcraters and interplanetary dust. Proc. of the 3-d Lunar Science Conf. Suppl. 3, *Geochem. Cosmochem. Acta*, 3, 2733-2753.
- Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. (1991) *Lunar Sourcebook*, Cambridge University Press. 778.
- Housley, R.M., Grant, R.W., Paton, N.E., 1973. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates. *Proc. Lunar Sci. Conf. 4*, 2737-2749.
- Hörz F., Grieve R., Heiken G., Spudis P., Binder A. Lunar surface processes. In *The lunar sourcebook*, edited by Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. New York: Cambridge University Press. 61-120.
- Ivanov A.V., Florensky K.P. (1975) The role of vaporization processes in lunar rock formation. *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th*, 1341-1350.
- Keller L.P., McKay D.S. (1992) Apollo 11 Soil 10084. *Proc. Lunar and Planetary Science Conf.* 23, 137-141.
- King E.A. (1983) Reduction, partial evaporation, and sputtering: possible chemical and physical processes in fluid drop chondrule formation. In: *Chondrules and their origin* (Ed. E.A. King), LPI. Houston, 180-187.
- Langevin Y. and Arnold J. R. (1977) The evolution of the lunar regolith. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 5, 449-489.
- Langevin Y. (1982) Evolution of an asteroidal regolith: Granulometry, mixing and maturity. In Workshop on Lunar Breccias and Soils and Their Meteoritic Analogs (Taylor G.J. and Wilkening L.L., eds.), *LPI Tech. Rpt.* Lunar and Planetary Institute, Houston. 82-02, 87-93
- McKay D.S., Fruland R.M., Heiken G.H. (1974) Grain size and evolution of lunar soils. *Proc. Lunar Sci. Conf. 5th*, 887-906.
- McKay D.S., Heiken G.H., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B.M., Papike J. (1991) The lunar regolith. In *The lunar sourcebook*, edited by Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. New York: Cambridge University Press. 284-356.
- Michael G., Basilevsky A., Neukuma G. (2017) On the history of the early meteoritic bombardment of the Moon: Was there a terminal lunar cataclysm. *Icarus* 302, 80-103.
- Moroz L.V., Fisenko A.V., Semjonova L.F. (1996) Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials. *Icarus* 122, 366-382.
- Morris R.V. (1976), Surface exposure indices of lunar soils: A comparative FMR study, in *Proc. Lunar Planetary Sci. Conf. 7th*, Pergamon, New York. 315-335.
- Morris R.V. (1978) The surface exposure (maturity) of lunar soils: Some concepts and Is/FeO compilation, in *Proc. Lunar Planetary Sci. Conf. 9th*, Pergamon, New York. 2287-2297.
- Morris R.V. (1980) Origins and size distribution of metallic iron particles in the lunar regolith, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th*, 1697-1712.
- Naney M.T., Growl D.M., Papike J.J. (1976) The Apollo 16 drill core: statistical analysis of glass chemistry and the characterization of a high alumina-silica poor (HASP) glass. *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th*, 155-184.
- Peeples W.J., Sill W.R., May T.W., Ward S.H., Phillips R.J., Jordan R.L., Abbott E.A., Killpack T.J. (1978) Orbital radar evidence for lunar subsurface layering in Maria Serenitatis and Crisium. *J. Geophys. Res.* 83, 3459-3468.
- Pieters C.M., Noble S.K. (2016) Space weathering on airless bodies, *J. Geophys. Res. Planets* 10, 121.
- Stöffler D. (1972) Deformation and transformation of rock forming minerals by natural and experimental shock processes. I. Behavior of minerals under shock compression. *Fortschr. Mineral.* (49), 5477-5488.
- Schaal R.B., Hörz F. (1977) Shock metamorphism of lunar and terrestrial basalts. *Proc. Lunar Sci. Conf. 8th*, 1697-1729.
- Schaal R.B., Hörz F., Thompson T.D., Bauer J.F. (1979) Shock metamorphism of granulated, lunar basalt. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th*, 2547-2571.
- Starukhina L.V., Shkuratov Yu.G. (2001) A Theoretical Model of Lunar Optical Maturation: Effects of Submicroscopic Reduced Iron and Particle Size Variations. *Icarus* 152, 275-281.
- Taylor S.R. (1982) *Planetary Science: A Lunar Perspective*. Lunar and Planetary Institute, Houston. 481.
- Vonneguth B., McConnel R.K.Jr., Allen R.V. (1966) Evaporation of lava and its condensation from the vapour phase in terrestrial and Lunar volcanism. *Nature* 20(5022), 445-448.
- Warren P.H. (2008) Lunar rockrain: Diverse silicate impact vapor condensates in an Apollo14 regolith breccias. *Geochim. Cosmochim. Acta* (72), 3562-3585.