# ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА КОНДЕНСАТА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ УДАРНОМ ИСПАРЕНИИ СЕРПЕНТИНИТА

© 2022 г. А. В. Мохов<sup>а,</sup> \*, О. И. Яковлев<sup>а,</sup> \*\*, Т. А. Горностаева<sup>а</sup>, А. П. Рыбчук<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия \*e-mail: avm8okhov@gmail.com

\*\**e-mail: yakovlev@geokhi.ru* Поступила в редакцию 01.06.2021 г. После доработки 28.03.2022 г. Принята к публикации 15.04.2022 г.

Приводятся экспериментальные данные по ударному испарению серпентинита. Эксперимент проведен на двухступенчатой легко-газовой пушке НИИ Механики МГУ. Выстрел был сделан медным ударником массой ~0.5 г со скоростью ~6 км/с. Испаренный материал в виде конденсатной пленки анализировался на сканирующем электронном микроскопе. Анализ показал, что отношение Mg/Si в конденсате резко уменьшилось (в ~1.8 раза) по сравнению с исходным отношением в серпентинитовой мишени. Тем самым показано, что испарение ударного расплава силикатной мишени селективно: пар обогащается относительно летучим SiO<sub>2</sub>, оставляя в остаточном расплаве относительно труднолетучий MgO. Опираясь на полученные данные, можно предполагать, что ударно-взрывная бомбардировка на стадии аккреции Земли смещала составы пород поверхности планеты от ультраосновных к более кислым. Дрейф кислотности пород по ходу аккреции возможен при условии накопления испаренного пара и/или конденсата на поверхности растущей планеты.

Ключевые слова: ударное испарение, ударный эксперимент, конденсат, СЭМ, ЭДС, EBSD DOI: 10.31857/S0016752522120044

### введение

Характер вещественной эволюции протокоры Земли в первые  $0.5 \times 10^9$  лет ее истории в значительной мере контролировался ударными процессами, которые на ранних этапах аккреции служили главным энергетическим источником нагрева прото-Земли и стимулировали плавление первичного вещества и связанную с ним его дифференциацию. Однако, до настоящего времени отсутствуют четкие данные, которые могли помочь оценить вклад этих процессов в эволюцию состава протокоры Земли в Хадейском эоне. С точки зрения геохимии вопрос о состоянии вещества на данной стадии планетной эволюции остается практически не изученным, хотя некоторыми авторами признается неизбежность дифференциации планеты одновременно с ее аккумуляцией (Витязев, 1982). Вряд ли разумно отрицать, что вызванная ударами падающих тел дегазация играла важную роль в образовании первичной атмосферы и гидросферы (Рингвуд, 1982). При этом обычно не рассматривается вопрос о возможном изменении состава твердой или расплавной поверхности планеты, что привело к устоявшимся представлениям о неизменности состава пород, пока планета не достигла в процессе своего роста современного размера и пока не начали действовать механизмы магматической дифференциации. Однако есть основания полагать, что на стадии аккреции высокотемпературные ударные расплавы в процессе селективного испарения могли обеспечить изменение состава силикатного вещества путем переноса пара и накопления его в конденсированном виде в верхних слоях растущей планеты, придавая ударной дифференциации глобальный характер (Яковлев и др., 2000). Таким образом, вопрос о трендах изменения состава силикатных пород в ударном процессе имеет принципиальное значение для понимания начального состояния вещества в геохимической эволюции Земли.

В последние десятилетия, особенно в связи с появлением в различных странах соответствующей техники по экспериментальному моделированию удара, значительно вырос поток работ и соответствующей информации об изменениях состава различных горных пород и минералов в процессах ударного испарения и конденсации пара. Экспериментальные исследования обычно проводятся на, так называемых, 2-х ступенчатых легкогазовых пушках, которые позволяют разгонять ударники до скоростей 6.7 км/с (Kurosawa et al., 2012, 2020; Sommer et al., 2014; Ramkissoon et al.,

2014; Karcz et al., 2016). Конечная цель большинства этих работ – определение роли ударных процессов в образование атмосферы и гидросферы в течение ранней истории Земли. Для изучения параметров декарбонизации используются мишени из карбонатов (кальцит) (Kurosawa et al., 2012), дегидратации — мишени из гипса и гетита (Ramkissoon et al., 2014). B pacote (Kurosawa et al., 2020) приведены новые результаты высокоскоростного ударного эксперимента на мишени близкой составу СІ хондритов. Скорость удара составляла 5.8—5.9 км/с, а пиковое давление в точке удара — 65 ГПа. В результате эксперимента было показано, что потеря воды, обусловленная ударным воздействием, была незначительна, так как постударная теплота поглощалась реакциями разложения органического материала. Выстрелы на легко-газовой пушке со скоростью ударника 4.6 км/с были сделаны по мишеням из песчаника и кварцита (Sommer et al., 2014). Ударники были изготовлены из стальных шариков диаметром 12 мм. В результате эксперимента было получено множество силикатных остеклованных частиц сферической формы диаметром 0.5–5 мкм, которые содержали примесь Fe и Mn от ударника, а также Si<sup>0</sup> от мишени.

Для имитации ударного воздействия на вещество с целью изучения ударного испарения используются также мощные лазерные установки (Герасимов и др., 1994; Yabuta et al., 2014; Hamann et al., 2018). В работе (Yabuta et al., 2014) для создания более реальных условий ударного события на лазерных установках были получены давления на метеоритных мишенях до 400 ГПа. (Hamann et al., 2018) представили геохимические характеристики конденсатов, полученных путем лазерного облучения различных пород: базальтов, диоритов, гранитов и хондритов. По оценкам авторов интенсивность облучения соответствовала ударным скоростям в пределах 10-25 км/с. Интересный метод ускорения ударников (стеклянных шариков диаметром 0.1 мм) на лазерной пушке описан в работе (Sugita et al., 2008), где скорости удара достигали ≥10 км/с. Такие скорости достаточны для ударного испарения силикатных мишеней.

В выше перечисленных работах усилия экспериментаторов были направлены, в основном, на изучение ударной дегазации водо-, карбонат- и сульфат-содержащих пород и минералов. При этом вопросы ударного испарения и конденсации силикатного вещества, возможно по причине отсутствия соответствующих экспериментальных методик, не рассматривались. Между тем, проведенные нами в 80-е годы ударные эксперименты и разработанные приемы сбора испаренного пара и его анализа с последующим сравнением с исходным веществом мишени позволяют выйти из имеющихся методических трудностей. В работе (Яковлев и др., 1988) показано, что уже при отно-

ГЕОХИМИЯ том 67 № 12 2022

сительно низких скоростях соударения ~5–6 км/с силикатные породы могли не только плавиться, но и частично испаряться, изменяя при этом свой состав.

Ударный эксперимент, о котором пойдет речь в настоящей статье, был проведен с образцом серпентинита. Результаты экспериментов с этим веществом уже были описаны в статьях (Герасимов и др., 1994; Яковлев и др., 1995), однако сегодня, имея в распоряжении новую аналитическую базу, материал этих уникальных экспериментов требует нового описания и подтверждения ранее полученных результатов. Как и прежде, мы видим основную задачу нашего исследования в поиске ответа на вопрос об изменении состава ударного расплава при испарении с последующей конденсацией пара, поскольку он может подсказать направление изменения состава вещества при ударно-испарительной дифференциации на стадии аккреции планеты. Выбор серпентинита для проведения ударного эксперимента был не случаен, так как серпентин входит в состав матрицы примитивных хондритов (например, хондриты типов CI, CM и CR) и где серпентин является одним из главных минералов. С большой долей вероятности можно предполагать, что вещество серпентинита было близко по составу телам, представляющим главную массу аккреционного роя примитивных хондритов. Кроме того, серпентинит представляет собой водосодержащую породу и рассматривается как основной носитель воды в процессах ударной дегидратации (Lange, Ahrens, 1982). Образец серпентинитовой мишени имел состав (среднее из 3-х анализов в мас. %): SiO<sub>2</sub> 37.34; TiO<sub>2</sub> 0.05; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.65; FeO 6.89; MnO 0.075; MgO 39.13; CaO 0.57; Na<sub>2</sub>O 0.00; K<sub>2</sub>O 0.00; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.01; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.201; п.п.п. 14.53; Сумма: 99.45. Для изучения тренда изменения состава при испарении мы использовали отношение Mg/Si, которое в исходном образце равнялось 1.57 (отношение в атомных процентах). Заметим, что если исходить из стехиометрии чистого серпентина, отношение равнялось бы 1.50. Поэтому, судя по несколько завышенному в анализах отношению Mg/Si, мы имели дело, по-видимому, с сильно серпентинизированным дунитом.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика ударного эксперимента подробно описана в работах (Яковлев и др., 1988; 1995). Здесь мы даем ее в кратком изложении. Эксперименты выполнены на пороховой двухступенчатой легко-газовой пушке НИИ Механики МГУ. Выстрел проводился медным сферическим ударником диаметром 5 мм, массой ~0.5 г со скоростью ~6 км/с. Полет ударника проходил в герметизированной баротрассе, наполненной воздухом при



Рис. 1. Схема ударной камеры.

давлении ~5 ×  $10^3$  Па. Мишень из горной породы (серпентинита) в форме цилиндра высотой ~7 см и диаметром ~10 см устанавливалась в ударную камеру, расположенную в торце трассы на расстоянии 13 м от дульного среза пушки. Угол встречи ударника с мишенью составлял 90°. Схема ударного эксперимента представлена на рис. 1.

Ударник, попадая в камеру, разрушал мишень. При этом происходило дробление, плавление, частичное испарение и выброс ~20% массы мишени. Обломочный материал был представлен фракциями от сантиметрового до субмикронного размера. В нем находились отдельные ошлакованные частицы размером ~1–5 мм, содержащие в виде



**Рис. 2.** Общий вид подложки с конденсатным покрытием (выделено окружностью). 1 — фиксирующий скотч; 2 — медная подложка. Вторичные электроны.

включений ударное стекло. Медный ударник был полностью расплавлен и частично испарен.

Для сбора испаренного вещества на пути распространения пара ставились металлические пластины-подложки (4 × 6 мм) из полированной меди, закрытые диафрагмой с отверстиями диаметром ~2 мм. Подложки устанавливались на расстоянии 6—9 см от места удара. За время ~ $10^{-5}$  с испаренное вещество мишени, общая масса которого по нашим оценкам составляла ~10-15 мг (Яковлев и др., 1988), достигало подложки и образовывало на ее поверхности конденсатное покрытие. Толщина конденсатного покрытия составляла сотни нм. Для предохранения конденсата от частиц пыли отверстия диафрагмы закрывались несколькими слоями металлической сетки. Пятно конденсата имело форму близкую к окружности диаметром около 2 мм (рис. 2).

#### МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Исследование продуктов конденсации проводилось методами аналитической электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-5610. В качестве аналитического блока использовался энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) Oxford AZtec. Конденсаты были исследованы на 3-х медных подложках. В ЭДС-спектрах конденсатного покрытия практически в любых его точках присутствовали пики Mg и Si, а также незначительные по интенсивности пики Al и Fe. Во всех анализах наблюдались пики Cu различной интенсивности (рис. 3).

Нормированные к 100% анализы за вычетом меди давали очень близкие результаты, но наличие пиков от материала подложки свидетельствовало о том, что толщина конденсатного покрытия оказалась незначительной, и падающий электронный пучок не полностью поглощался веществом конденсата. Таким образом, критерий применимости



Рис. 3. Спектр конденсатного покрытия.

анализа массивного тела не выдерживался, а метод анализа тонкой пленки в программном обеспечении спектрометра не был предусмотрен. В этом случае полученные значения содержаний элементов нельзя было использовать напрямую. Чтобы учесть погрешность анализа тонкопленочного образца, была применена специально разработанная методика для пересчета со стандартной программы Aztec (Мохов и др., 2020). Суть методики заключалась в следующем. На массивную медную подложку в качестве эталона сравнения были приклеены частицы синтетического флогопита с отношением Mg/Si = 1: одна заведомо массивная, а другие с различной толщиной отщепленных листочков. На всех частицах были измерены и зафиксированы интенсивности L-пика меди и, аналогично, для каждой точки анализа конденсата. Затем отбирались те измерения эталонных флогопитов разной толщины, где интенсивность пика меди наиболее точно совпадала с его интенсивностью в пленочном покрытии. Результаты анализов конденсатов на всех трех медных подложках были сгруппированы по толщине на основании интенсивности L-пика меди. Измеренные в конденсатах отношения Mg/Si сопоставлялись с таковыми на массивном фрагменте флогопита, в результате чего вычислялся поправочный коэффициент, позволяющий внести поправку в анализ конденсата. Интенсивности пика Мд корректировались на этот коэффициент, учитывая, что поправка для Si в условиях нормировки равнялась 1, как это и принято при анализе тонких пленок (Cliff et al., 1975). Пример пересчета с учетом такой поправки приведен в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА: МОРФОЛОГИЯ КОНДЕСАТА И ЕГО СОСТАВ

Визуальный осмотр конденсатного покрытия показал, что его поверхность преимущественно ровная, хотя в некоторых зонах наблюдалась шероховатость или, лучше сказать, мелкая комковатость (рис. 2). На рис. 2 пятно конденсата выделено окружностью диаметром 3 мм, что соответствовало диаметру окна на держателях пластинподложек.

При бо́льшем электронно-микроскопическом увеличении конденсатного покрытия можно лучше разглядеть комковатую поверхность конденсата (рис. 4). На рисунке можно также видеть отдельные микрократеры размером 5—20 мкм.

В центральной зоне конденсатного пятна было обнаружено множество подобных микрократеров (рис. 5) размером до 20 мкм, которые образовались от ударов потока пылевых частиц мишени, проникших через защитную сетку держателя подложек. Следует обратить внимание, что микрократеры возникли при попадании частиц на уже образованное конденсатное покрытие, что говорит о большей скорости распространения фронта испаренного пара относительно фронта выброса пылевых частиц. Микрократеры имеют хорошо выраженные крутые валы, что, по нашему мнению, свидетельствует об ударах по быстро застывающей, но еще не застывшей, маловязкой массе конденсата. Его "жидкоподобное" состояние могло быть обусловлено большим содержанием воды в конденсате, выделившейся при испарении серпентинита.

ГЕОХИМИЯ том 67 № 12 2022

Таблица 1. Пример расчета отношения Mg/Si в конденсате на одной из трех подложек с учетом поправки на толщину пленки

Mg*	К**(кор.)	Mg*(кор.)	Si*	Mg*(кор.)/Si
443	1.1	487	495	0.984
1347	1.2	1616	1914	0.844
1135	1.2	1361	1639	0.831
779	1.1	857	1019	0.842
2025	1.3	2632	3542	0.743
2587	1.4	3622	3771	0.961
1716	1.3	2230	2500	0.892
2919	1.3	3795	4289	0.885
2675	1.3	3477	4022	0.865
1236	1.2	1483	1507	0.984
604	1.1	665	904	0.735
2633	1.3	3423	3579	0.957
1845	1.2	2214	2555	0.866
2532	1.3	3292	4003	0.822
2048	1.1	2253	2597	0.867
1407	1.2	1688	2172	0.777
1573	1.2	1887	2135	0.884
341	1.1	375	549	0.684
1817	1.2	2181	2440	0.894
664	1.1	731	797	0.917
3108	1.3	4041	4411	0.916
415	1.1	457	520	0.878
1310	1.2	1572	1712	0.918
272	1.1	299	400	0.749
1075	1.2	1290	1351	0.954
6254	1.3	8130	10575	0.769
3150	1.2	3780	4303	0.878
9136	1.4	12791	13878	0.922
9302	1.4	13023	15169	0.859
6443	1.3	8376	9510	0.881
7398	1.3	9617	10340	0.930
1600	1.3	2080	2922	0.712
6438	1.4	9014	13195	0.683
4423	1.4	6192	7273	0.851
6199	1.3	8058	8957	0.900
Среднее:				0.858

\* Интенсивность пика элемента в относительных единицах; \*\* коэффициент пересчета на эталон толщины.

Интересно было также заметить, что энергии удара отдельных частиц было достаточно для образования кратерного вала, состоящего из материала подложки. На снимке в отраженных электронах (рис. 6а) хорошо заметен контрастный вал, состоящий из меди, атомный номер которой значительно превышает средний атомный номер силикатной пленки конденсата, что четко проявляется при отсутствие такого контраста на снимке во вторичных электронах (рис. 6б). Появление меди на валу микрократера объясняется малой толщиной конденсатного покрытия, что привело к пробою покрытия и выходу материала медной подложки на поверхность. Для получения дополнительной информации о вале микрократера был сделан его вертикальный разрез с помощью фокусированного ионного пучка.

Профиль сечения вала самого крупного микрократера (см. рис. 5) приведен на рис. 7. На этом рисунке хорошо просматриваются детали разреза, а на рис. 8 показан очерченный рамкой 2 фрагмент, на котором видна "выплеснутая" при микроимпакте часть медной подложки, нависающая, по-видимому, над чешуйками конденсатных частиц. Здесь же, по-видимому, присутствует тончайшая конденсатная пленка, выстилающая исходную поверхность подложки. Она выделена на рис. 8 сходящимися стрелками.

При еще бо́льшем увеличении неровной поверхности конденсата (рис. 9) можно видеть частицы преимущественно неправильной формы. Можно также видеть частицы близкие к идеальной сферической форме размером до 1 мкм (рис. 9). Некоторые сферические образования имеют признаки слипания. Сферическая форма частиц усиливает наше предположение об их конденсатной природе, так как аналогичные сферические по форме конденсаты были описаны в работах (Keller, McKay, 1992; Warren, 2008; Яковлев и др., 2008).

Как было сказано выше, состав конденсата был исследован на 3-х медных подложках. Отношение между пиками силикатной компоненты на спектрах ЭДС было практически одинаковое в разных участках конденсатного покрытия. Исключения были зафиксированы на отдельных частицах, которые были, как правило, несколько более крупные, стекловидные, неправильной формы, представляющие, по-видимому, остатки пылевых фрагментов серпентинитовой мишени. В ряде случаев их составы сильно различались. Среди них зафиксированы составы, близко отвечающие составам энстатита, омфацита и фазы с отношением Mg/Al/Si как 2/1/3.

Поскольку основной задачей являлось изучение изменения отношения Mg/Si, то на каждой из 3-х подложек было выполнено 35, 27 и 33 анализ конденсатов соответственно. В результате усреднения аналитических данных отношения Mg/Si в них соответственно равнялись: 0.86, 0.84 и 0.86 (табл. 1). Таким образом, отношение Mg/Si в конденсате резко уменьшилось (примерно в 1.8 раза) по сравнению с исходным отношением в серпентините, что свидетельствует о преимущественном испарении из ударного расплава кремния



Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение конденсатного покрытия с микрократерами на медной подложке. Отраженные электроны.



Рис. 5. Микрократеры на поверхности конденсата. Отраженные электроны.

по сравнению с магнием. Анализ конденсатной пленки аналогичного эксперимента проводился ранее методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (Яковлев и др., 1995). Результат прошлого анализа показал, что отношение Mg/Si в конденсате упало по сравнению с мишенью в 2 раза, что хорошо совпадает с результатами, полученными нами на СЭМ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Обобщая полученные данные можно определить порядок процессов, приведших к формированию покрытия конденсатом подложки. Судя по всему, вначале поверхности подложки коснулась самая высокотемпературная часть пара, возникшего при ударе медного шарика по серпентини-

ГЕОХИМИЯ том 67 № 12 2022



Рис. 6. Микрократер на поверхности конденсатной пленки. (а) – отраженные электроны; (б) – вторичные электроны.

товой мишени. При этом образовалась тончайшая пленка конденсата, точных данных о составе которой получить не удалось. Эту пленку, которая является составной частью покрывающую поверхность подложки конденсата, можно рассмотреть на рис. 7 и 8. Затем образовалась основная масса конденсата. При этом процесс, видимо, протекал на низкотемпературной фазе конденсационного окна, что приводило к слипанию образовавшихся частиц конденсата между собой. И последним актом процесса явился прилет частиц пыли, выполнявших роль ударников относительно подложки и создавших отдельные микрократеры на ее поверхности. Их энергии хватало не только на пробитие слоя конденсата, но и на создание кратера в медной матрице подложки. Некоторые частицы пыли сохранились на дне таких кратеров и их можно увидеть на рис. 5 и 6.



**Рис.** 7. FIB сечение вала микрократера. 1 – травленная поверхность медной подложки; 2 – увеличенный фрагмент см. на рис. 8; 3 – исходная поверхность медной подложки; 4 – уровень дна микрократера. Вторичные электроны.



Рис. 8. Увеличенный фрагмент снимка на рис. 7, помеченный на нем цифрой 2. 1 – осажденный слой платины для создания ламели; 2 – медная подложка; 3 – вал из выплеснутого при микроимпакте медного материала подложки; 4 – конденсат. Стрелками выделена подстилающая конденсатная пленка. Вторичные электроны.



Рис. 9. Морфология конденсатных частиц. Вторичные электроны.

Экспериментальные данные однозначно показали селективный характер испарения ударного расплава и подтвердили бо́льшую летучесть кремния по сравнению с относительно труднолетучим магнием. Это главный экспериментальный вывод проделанной работы и он полностью совпадает с выводом, сделанным ранее (Яковлев и др., 1995).

Говоря о летучестях кремния и магния, следует иметь в виду, что речь идет не о летучестях элементов, а о летучестях соответствующих оксидов. На основании экспериментальных данных (Маркова и др., 1986) можно предполагать, что оксиды, находясь в парообразном состоянии, диссоциируют. При этом магний преимущественно будет находиться в атомарном состоянии, а кремний в субоксидном – SiO.

Что касается атомно-молекулярных форм соединений магния и кремния в конденсате, то здесь можно сослаться на работу (Герасимов и др., 1994), в которой показано, что процесс регидратации при ударном испарении серпентинита является достаточно эффективным. Анализ структурно-химического состояния конденсата был проведен методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). О поглощении паров воды свидетельствует наличие значительного количества гидроксильных групп в конденсатной пленке. Ее анализ показал, что около 60% Mg и 10% Si в пленке образуют гидроксиды Mg(OH)<sub>2</sub> и Si(OH)<sub>4</sub>. Захват воды происходит, повидимому, уже в процессе разлета испаренного облака. Следует отметить, что регидратация идет

не с восстановлением серпентинитовой структуры, а в новообразованные формы, так как в ударном процессе происходит высокотемпературная трансформация силикатного вещества, характеризующаяся разрывом исходных межатомных связей и формированием вещества с новой структурой.

В заключение статьи отметим, что нами получен в общем виде ответ на вопрос, поставленный в начале статьи: каких изменений состава или каких трендов дифференциации следует ожидать при ударном испарении серпентинита. Опираясь на полученные данные, можно предположить, что ударно-взрывная бомбардировка на стадии роста планетного тела будет смещать составы пород поверхности планеты от ультраосновных к породам более кислого состава. Этот дрейф кислотности пород по ходу аккреции возможен при соблюдении условия, что выделяющийся при ударном испарении пар накапливался при конденсации на поверхности планеты.

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

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Витязев А.В. (1982) Фракционирование вещества в ходе образования и эволюции Земли. Физика Земли. (6), 52-68.

Герасимов М.В., Диков Ю.П., Яковлев О.И., Влотцка Ф. (1994) Захват водяного пара из атмосферы конденсированным силикатным веществом при импульсном испарении. *Геохимия*. (4), 597-608.

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.

Мохов А.В., Горностаева Т.А., Рыбчук А.П. Способ коррекции ЭДС-анализа силикатной тонкой пленки на массивной подложке в СЭМ. (2020) *XXVIII Российская конференция по электронной микроскопии*. Москва. 2020. Сборник тезисов. Т. 3. С. 112-113.

Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: "Недра", 1982. 293 с.

Яковлев О.И., Файнберг В.С., Казначеев Е.А., Пилюгин Н.Н., Баулин Н.Н., Тихомиров С.Г. (1988) Экспериментальное изучение испарения при высокоскоростном ударе. *Геохимия*. (12), 1698-1707.

Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. (1995) Экспериментальное исследование ударного и импульсного испарения ультраосновного вещества. *Геохимия*. (8), 1235-1247.

Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. (2000) Роль ударно-испарительной дифференциации на стадии аккреции Земли. *Геохимия*. (10), 1027-1045.

ГЕОХИМИЯ том 67 № 12 2022

Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П. (2008) Сравнительный анализ конденсатных образований на Луне и в эксперименте по испарению и конденсации хондрита Murchison. Девятая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". М.: ГЕОХИ РАН, ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, ИЭМ РАН, 346-348.

Cliff G., Lorimer G.W. (1975) The quantitative analysis of thin specimen. *J. Microscopy.* **103**, 203-207.

Hamann C., Hecht L., Schäffer S., Heunoske D., Salge T., Garbout A., Osterholz J., Greshake A. Impact vaporization and condensation: laser irradiation experiments with natural planetary materials. 49th Lunar and Planetary Science Conference, 2018, #2144.pdf, (LPI Contrib. No. 2083).

Karcz J.S., Bowling D., Cornelison C., Parrish A., Perez A., Raiche G., Wiens J.-P. (2016) The Ames vertical gun range. *47th Lunar and Planetary Science Conference.* #2599.pdf.

Keller L.P., McKay D.S. (1992) Micrometer-sized glass spheres in Apollo 16 soil 61181: Implication for impact volatilization and condensation. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 22*. 137-141.

Kurosawa K., Ohno S., Sugita S., Mieno T., Hasegawa S. (2012) Shock-induced decarbonation in an open system using a 2-stage light gas gun. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*. #1730.pdf.

Kurosawa K., Moriwaki R., Yabuta H., Ishibashi K., Komatsu G., Matsui T. (2020) Shock devolatilization of CI chondrite simulants. 51st Lunar and Planetary Science Conference. #2061.pdf.

Lange M.A., Ahrens T.J. (1982) Impact Induced Dehydration of Serpentine and the Evolution of the Planetary Atmospheres. *J. Geophysical Research*. 87(S01), A451-A456.

Ramkissoon N.K., Price M.C., Kearsley A.T., Cole M.J., Burchell M.J. (2014) Examining impact induced mineral devolatilisation using Raman spectroscopy. *45th Lunar and Planetary Science Conference*. #1891.pdf.

Sommer F.D., Winkler R., Poelchau M.H., Deutsch A., Kenkmann T. (2014) Jetting in experimental impacts. *45th Lunar and Planetary Science Conference*. #1804.pdf.

Sugita S., Kadono T., Shigemori K., Fujioka S., Otani K., Sano T., Sakawa Y., Azechi H., Ozaki N., Kimura T., Miyanishi K., Endo T., Arakawa M., Nakamura A.M., Matsui T. (2008) Acceleration of projectiles to >10 km/c with a laser gun: toward silicate impact vaporization experiments. *Lunar and Planetary Science XXXIX.* #2501.pdf.

Yabuta H., Sakaiya T., Kondo T., Ohno S., Nakabayashi M., Kadono T., Shigemori K., Hironaka Y., Yamanaka T. (2014) High power laser-shock experiment of chondrites: contribution of impacts to the early Earth atmosphere. *45th Lunar and Planetary Science Conference.* #2457.pdf.

Warren P.H. (2008) Lunar rock-rain: Diverse silicate impact vapor condensate in an Apollo-14 regolith breccias. *Geochim. Cosmochim Acta*. (72). 3562-3585.