———— МИНЕРАЛОГИЯ ————

УДК 550.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УДАРНОГО ИСПАРЕНИЯ СЕРПЕНТИНИТА

© 2021 г. О. И. Яковлев¹, А. В. Мохов^{1,*}, Т. А. Горностаева¹, А. П. Рыбчук¹

Представлено академиком РАН Э.М. Галимовым 29.10.2020 г. Поступило 29.10.2020 г. После доработки 11.11.2020 г.

Принято к публикации 13.11.2020 г.

Приводятся экспериментальные данные ударного испарения серпентинита. Эксперимент проведен на двухступенчатой легко-газовой пушке при скорости соударения медного ударника с мишенью ~6 км/с. Испаренный материал в виде конденсатной пленки анализировался на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610. По данным анализа отношение Mg/Si в конденсате резко уменьшилось (в ~1.8 раза) по сравнению с исходным отношением в серпентинитовой мишени. Таким образом, показано, что при ударном испарении происходит глубокая дифференциация вещества – пар обогащается относительно летучим SiO₂, оставляя в остаточном расплаве менее летучий MgO.

Ключевые слова: ударное испарение, ударный эксперимент, конденсат, СЭМ, ЭДС, EBSD **DOI:** 10.31857/S2686739721020201

ВВЕДЕНИЕ

На аккреционной стадии развития Земли ударно-взрывные процессы могли играть важную роль в дифференциации ее вещества. Однако вклад этих процессов в геохимию планеты практически не изучен. Одним из наиболее эффективных и быстро развивающихся методов их изучения является ударный эксперимент, проводимый на легко-газовых метательных установках (см., например, последние работы [1-3]). В публикациях зарубежных авторов основное внимание концентрируется на вопросах ударной дегазации водо-, карбонат- и сульфат-содержащих пород и минералов. При этом вопросы ударного испарения и конденсации силикатного вещества по причине отсутствия соответствующих экспериментальных методик не рассматриваются. Разработанные нами в 80-е годы приемы сбора сконденсированного пара и его анализа с последующим сравнением с исходным веществом мишени позволяют выйти из возникающих методических трудностей [4].

В настоящей статье мы представляем новые экспериментальные данные по ударному испарению серпентинита. Основная задача нашего исследования состояла в решении общей проблемы дифференциации силикатного вещества и, в частности, серпентинита при ударном испарении. Результаты данного исследования могут подсказать и общее направление возможной эволюции состава планеты на сталии глобальной метеоритной бомбардировки. Мишень из серпентинита была выбрана не случайно, так как это вещество близко к составу матрицы примитивных хондритов, где серпентин является главным минералом. Кроме того, серпентинит представляет собой водосодержащую породу и рассматривается как основной носитель воды в процессах ударной дегидратации [5]. Образец мишени имел состав (среднее из 3 анализов в мас. %): SiO₂ 37.3; TiO₂ 0.1; Al₂O₃ 0.6; FeO 6.9; MnO 0.1; MgO 39.1; СаО 0.6; Сг₂О₃ 0.2; п.п.п. 14.5; Сумма: 99.4. Для изучения тренда изменения состава при испарении мы использовали отношение Mg/Si, которое в исходном образце равнялось 1.57 (отношение в атомных процентах).

УДАРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОД АНАЛИЗА

Была проведена серия ударных экспериментов (более 20 выстрелов) на двухступенчатой легкогазовой пушке в НИИ механики МГУ с мишенями разного состава. Результаты одного из экспериментов представлены в настоящей статье. Выстрел был произведен медным сферическим ударником массой ~0.5 г со скоростью ~6 км/с. Полет ударника проходил в 13-ти метровой гер-

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

^{*}E-mail: avm8okhov@gmail.com



Рис. 1. Схема ударной камеры.

метизированной баротрассе, заполненной воздухом при давлении $\sim 5 \times 10^3$ Па. Мишень из серпентинита в форме цилиндра высотой ~7 см и диаметром ~10 см устанавливалась в ударную камеру. Схема ударного эксперимента представлена на рис. 1. Ударник, попадая в камеру, разрушал мишень. При этом происходило дробление, плавление, испарение вещества мишени и ударника. Обломочный материал мишени был представлен фракциями от сантиметрового до субмикронного размера. В нем находились отдельные ошлакованные частицы размером ~1-5 мм, содержащие в виде включений ударное стекло. Медный ударник был полностью расплавлен и частично испарен. Для сбора испаренного вещества (конденсата) использовали металлические полированные



Рис. 2. Общий вид подложки с конденсатной пленкой (выделено окружностью). *1* – фиксирующий скотч; *2* – Си-подложка.

подложки из меди, закрытые диафрагмой, с отверстиями диаметром ~2 мм, и металлической сеткой для отсекания частиц пыли. Подложки устанавливались на расстоянии 6—8 см от места удара. Испаренное вещество достигало подложки и образовывало на его поверхности аморфную пленку конденсата мощностью ~0.1–0.2 мкм.

Продукты конденсации исследовались методами аналитической электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-5610. В качестве аналитического блока использовался энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) "Oxford Aztec". Так как на подложке находился очень тонкий пленочный слой и часть падающего электронного пучка проходила сквозь вещество конденсата, возбуждая рентгеновское излучение в мишени, то в ЭДС-спектрах наблюдались пики Си различной интенсивности. Чтобы учесть погрешность анализа тонкопленочного образца на медной подложке, измеренные в конденсатах отношения Mg/Si сопоставлялись с таковыми на фрагментах различной толщины синтетического эталона флогопита, приклеенного на медную подложку. В результате сравнения вычислялся поправочный коэффициент, позволяющий внести поправку и выполнить корректный анализ конденсата. Были исследованы конденсаты на трех медных подложках. Пятно конденсата имело форму, близкую к окружности диаметром 1-2 мм (рис. 2).

Микроскопический осмотр конденсатной пленки показал, что ее поверхность преимущественно ровная, хотя в центральных зонах пятна наблюдались микрократеры, образовавшиеся от ударов проникших через защитную сетку отдельных пылевых частиц (рис. 3). Заметим, что микрократеры возникли при попадании пылевых частиц на уже образованное конденсатное покрытие, что свидетельствует о бо́льшей скорости распространения фронта пара относительно фронта пылевых частиц.



Рис. 3. Микрократеры на поверхности конденсатной пленки.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ВЫВОДЫ

На каждой из 3 подложек было выполнено 35, 27 и 33 анализа конденсатов. В результате усреднения аналитических данных отношения Mg/Si в них соответственно равнялись: 0.86, 0.84 и 0.86. 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 кремния по сравнению с магнием. Экспериментальные данные однозначно показали селективный характер испарения ударного расплава. Показано также, что при ударном испарении может происходить глубокое разделение вещества между паром и остаточным расплавом. Тем самым в общем виде получен ответ на важный вопрос, поставленный нами в начале статьи: каков тренд изменения состава задает ударное испарение силикатного расплава и, в частности, расплава серпентинита.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет бюджетных средств по госзаданию в рамках темы "Радиогенные и стабильные изотопы в исследовании эволюции внеземного вещества, мантии Земли и системы корамантия" 0137-2019-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Kurosawa K., Ohno S., Sugita S., Mieno T., Hasegawa S.* Shock-induced Decarbonation in an Open System Using a 2-stage Light Gas Gun // 43rd Lunar and Planetary Science Conference. 2012. № 1730.pdf.
- 2. Sommer F.D., Winkler R., Poelchau M.H., Deutsch A., Kenkmann T. Jetting in Experimental Impacts // 45th Lunar and Planetary Science Conference. 2014. № 1804.pdf.
- 3. Ramkissoon N.K., Price M.C., Kearsley A.T., Cole M.J., Burchell M.J. Examining Impact Induced Mineral Devolatilisation Using Raman Spectroscopy // 45th Lunar and Planetary Science Conference. 2014. № 1891.pdf.
- 4. Яковлев О.И., Файнберг В.С., Казначеев Е.А., Пилюеин Н.Н., Баулин Н.Н., Тихомиров С.Г. Экспериментальное изучение испарения при высокоскоростном ударе // Геохимия. 1988. № 12. С. 1698–1707.
- Lange M.A., Ahrens T.J. Impact Induced Dehydration of Serpentine and the Evolution of the Planetary Atmospheres // Journal of Geophysical Research. 1982. V. 87. S01. P. A451–A456.

EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT VAPORIZATION OF SERPENTINITE

O. I. Yakovlev^a, A. V. Mokhov^{b,#}, T. A. Gornostaev^b, and A. P. Rybchuk^b

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: avm8okhov@gmail.com

Presented by Academician of the RAS E.M. Galimov October 29, 2020

Experimental data on impact vaporization of serpentinite are presented. The experiment was carried out using 2-stage light gas gun with impact velocity ~ 6 km/c. Copper with mass up to 0.5 g was used as projectile. Impact-generated vapor in the form of a condensate film was analyzed using a scanning electron JSM-5610. The analysis showed that the Mg/Si ratio in the condensate decreased sharply (by ~ 1.8 times) compared to the initial ratio in the serpentinite target. Thus, it is shown that the evaporation of the impact melt of the silicate target is selective: the vapor is enriched with relatively volatile SiO₂, leaving a relatively nonvolatile MgO in the residual melt.

Keywords: impact evaporation, impact experiment, condensate, SEM, EDS, EBSD