

Экспериментальное моделирование микрометеоритного удара на Луне с помощью лазера

н.с. Сорокин Егор Максимович
Лаборатория геохимии Луны и планет

Введение

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. Совокупность физико-механических процессов происходящих на поверхности безатмосферного тела проявляющихся в изменении исходных пород (дробление, плавление и т.д.) поверхностного слоя называется космическим выветриванием. Среди различных факторов космического выветривания особо выделяют микрометеоритную бомбардировку. Исследование возможности процессов испарения и конденсации вещества, как в процессе вулканической активности, так и в процессе метеоритной бомбардировки на Луне имеет длительную историю [1,2], в результате которой было не только обнаружено явление глубокой испарительной дифференциации [3], но и оценена важность этого процесса в формировании, например, базальтовой и гранитной коры на Земле [4]. Одним из признаков «космического выветривания» на Луне, является формирование в реголите Луны нанофазного металлического железа (np-Fe^0), наблюдаемого в конденсатных плёнках на поверхности минеральных зёрен реголита и в стёклах агглютинатов. Его присутствие делает «красным» (падает в видимой области и усиливается в ближней ИК) отражённый спектр, нивелирует характеристические полосы поглощения и снижает общее альbedo. Таким образом, формирование и свойства такого железа так же являются актуальной задачей исследования.

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. Кроме того, в работе представлена новая модель формирования сферул металлического железа (np-Fe^0).

Основная часть

Для моделирования микрометеоритных ударных процессов на Луне был использован импульсный лазер на Nd-стекле с плотностью потока излучения $\sim 10^6$ - 10^7 Вт/см² и длительностью импульса 10^{-3} с. Расчётная температура в точке лазерного «удара» составляла ~ 4000 - 5000 К, что соответствовало температуре возникающей при скоростях соударения порядка 10 – 15 км/ч. Для эксперимента был взят образец толеитового базальта, а также, образец базальтового стекла, полученного из этого базальта, плавлением в кварцевом тигле при 1300°C в течение 30 минут. В герметичную камеру объемом ~ 500 см³ с оптическим окном из кварцевого стекла помещали мишень – образец. Камеру продували аргоном при атмосферном давлении.

Химический состав образца, был получен по результатам рентгено-флуоресцентного анализа.

Таким образом, в эксперименте были представлены две серии образцов - кристаллический базальт и базальтовое стекло.

Анализ продуктов выброса из кратера (сферулы расплава) производился на сканирующем электронном микроскопе в МГУ им. М.В.Ломоносова на кафедре петрологии.

Полученные результаты

Экспериментально продемонстрирована возможность имитации микрометеоритной бомбардировки на поверхности Луны с помощью лазера. 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%. Их химические составы отвечают составам НАSP-стекло найденным на Луне [5].

Сравнение результатов двух серий экспериментов с базальтовой мишенью и с базальтовым стеклом позволяет сделать вывод, что стекло подвергается более лёгкому испарению и расщеплению связей. Химическая однородность базальтового стекла также оказывает влияние на более равномерное распределение состава в продуктах выброса из кратера и на формирование более выраженных корреляций и трендов испарительной дифференциации. В случае с базальтовой мишенью доминирует процесс смешения в различных пропорциях расплавов исходных минералов [5].

Наличие в кратерном стекле многочисленных глобул нанофазного железа, местами упорядоченных в тонкие, протяжённые цепи (рис. 1), является одним из важных результатов эксперимента. Размер глобул варьирует от первых нанометров до микрона. Цепочки наноглобул подразделяются на два типа. Первый тип представлен частицами железа, расположенными на кромке кратера. Местами частицы сливаются в непрерывные металлические дорожки. Образование нанофазного железа происходило во внутреннем объеме базальтового расплава, в котором отсутствовали восстановительные агенты, а расположение самих глобул в толще кратерного стекла предполагает их формирование без испарительно-конденсационного механизма. Ранее считалось, что формирование np-Fe^0 происходит либо в результате реакции оксида железа с агентом восстановителем (водородом) [6], либо в результате конденсации ударно-образованного пара, содержащего уже восстановленное железо [7]. В нашем исследовании был экспериментально показан механизм образования нанофазного железа в толще расплава термовосстановительным путём при прохождении ударной волны. Данный механизм также должен учитываться при описании np-Fe^0 , широко распространённого в частицах лунного реголита [8].

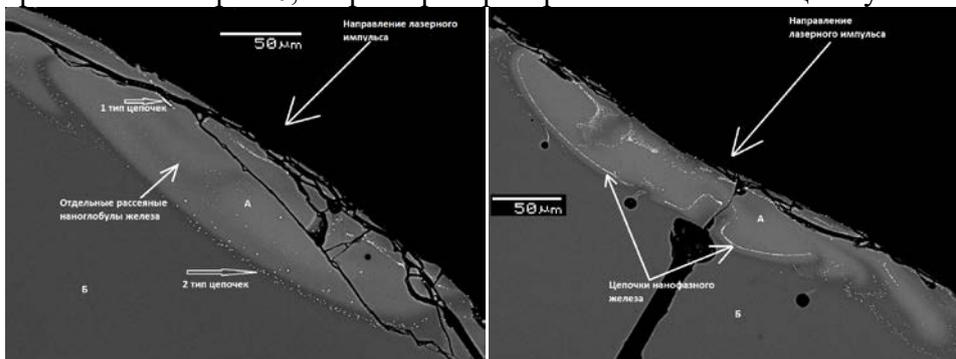


Рис.1. Снимки со сканирующего электронного микроскопа (приближенный участок светлой области приведённой на правом рисунке). Два типа цепочек нанофазного железа в кратерном стекле. Светлые (А) и (Б) тёмные области стекла, отличающиеся по элементному составу.

Список источников:

- 1) 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.
- 2) Pieters, C. M., and S. K. Noble (2016). Space weathering on airless bodies, *J. Geophys. Res. Planets* **10**, 121.
- 3) Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В., Влотска Ф. Особенности испарения алюминия из силикатных расплавов // *Геохимия*, 1997, № 12, стр. 1181-1195.
- 4) Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. Роль ударно-испарительной дифференциации на стадии аккреции Земли // *Геохимия*, 2000, № 10, стр. 1027-1045
- 5) Сорокин Е.М. и др. Экспериментальное исследование... *ГЕОХИМИЯ*, 2020, том 65, № 2, с. 107–122
- 6) Housley R.M., Grant R.W., Paton N.E. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates // *Proc. of the 4th Lunar Sci. Conf.*, 1973, v. 3, p. 2737-2749.
- 7) *Harpe B.* Space Weathering from Mercury to the asteroid belt // *J. Geophys. Res.*, 2001. v.106, p. 10039-10073.
- 8) Сорокин Е.М. и др. Экспериментальная модель образования нанофазного металлического железа в лунном реголите. *ДАН. НАУКИ О ЗЕМЛЕ*, 2020, том 492, N 2, с. 49–52.