

УДК 550.41

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОФАЗНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

© 2020 г. Е. М. Сорокин^{1,*}, О. И. Яковлев¹, Е. Н. Слюта¹, М. В. Герасимов², М. А. Зайцев², В. Д. Щербаков³, К. М. Рязанцев¹, С. П. Крашенинников¹

Представлено академиком РАН Галимовым Э.М. 27.02.2020 г.

Поступило 28.02.2020 г.

После доработки 18.03.2020 г.

Принято к публикации 19.03.2020 г.

Одним из признаков “космического выветривания” на Луне, а это действие солнечного ветра и микрометеоритной бомбардировки, является формирование в реголите Луны нанофазного металлического железа (np-Fe⁰), наблюдаемого в конденсатных пленках на поверхности минеральных зерен реголита и в стеклах агглютинатов. Описываются результаты импульсных лазерных экспериментов, имитирующих микрометеоритный “удар” по базальтовой мишени. В его расплавных продуктах обнаружены наноглобулы железа, структурированные в цепочки, маркирующие, по всей видимости, фронт прохождения ударной волны. Эксперименты наглядно показали, что np-Fe⁰ может формироваться без участия восстановителя — имплантированных ионов водорода солнечного ветра, а также минуя процесс конденсации железа из ударно-образованного пара. Аналогичные цепочечные структуры из np-Fe⁰ наблюдались в импактном стекле лунного реголита.

Ключевые слова: Луна, космическое выветривание, микрометеоритная бомбардировка, нанофазное железо, термическое восстановление

DOI: 10.31857/S2686739720060201

ВВЕДЕНИЕ

Сильное влияние на спектральные характеристики реголита Луны и других безатмосферных тел, оказывает наличие в минеральных частицах нанофазного металлического железа (np-Fe⁰) [1–3], которое образуется в процессе космического выветривания. Такое железо повсеместно встречается в образцах реголита в виде глобул размером ~5–20 нм. Особенно часто нанофазное железо (np-Fe⁰) наблюдается в тонкой аморфной пленке на поверхности минеральных частиц [4]. Предполагается, что при микрометеоритной бомбардировке глобулы железа образуются в результате конденсации пара, возникшего при ударном испарении лунных пород [1]. Наноглобулы в виде отдельных образований или в виде цепочек наблюдаются также в стеклах агглютинатов [5], по-

видимому, попав туда при захвате железа, первоначально сконденсированного на поверхности частиц реголита.

Как показали экспериментальные исследования, в образовании нанофазного железа на Луне, помимо солнечного ветра и конденсации железа из пара, образованного в результате удара, задействован еще один механизм, который мы определили, как термовосстановление железа в расплаве. Кроме того, цепочечные структуры из np-Fe⁰, наблюдаемые в импактном стекле лунного реголита, хорошо воспроизводятся в эксперименте.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для моделирования микрометеоритных ударных процессов на Луне был использован импульсный лазер на Nd-стекле с плотностью потока излучения ~10⁶–10⁷ Вт/см² и длительностью импульса 10⁻³ с. Расчетная температура в точке лазерного “удара” составляла ~4000–5000 К, что соответствовало температуре возникающей при скоростях соударения порядка 10–15 км/с [6]. В герметичную камеру, имеющую форму цилиндра объемом ~500 см³, помещалась мишень — образец из базальтового стекла 1.5 × 1.5 см. [7]. Для эксперимента был взят образец стекла, получен-

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

²Институт Космических Исследований Российской академии наук, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: egorgeohim@ya.ru

Таблица 1. Химический состав исходной пробы, темной и светлой области (см. рис. 1)

Мас. %	Исх.	Темная область	Светлая область
SiO ₂	51.3	53.8	36.4
TiO ₂	1.1	1.0	1.6
Al ₂ O ₃	14.7	13.3	22.0
MgO	6.8	6.8	9.7
FeO	11.6	10.2	10.7
CaO	12.1	11.6	17.8
Na ₂ O	2.1	2.0	0.6
K ₂ O	0.3	0.3	0.1
Σ	100.0	99.0	98.9

ного из толеитового базальта. Базальт был расплавлен в кварцевом тигле при 1300°C в течение 30 мин. Химический состав образца, представленный в табл. 1, был получен по результатам рентгено-флуоресцентного анализа.

Необходимо отметить, что лазерное моделирование не в состоянии в точности отразить все характерные особенности ударных процессов. Например, в рассматриваемом эксперименте энергия лазерного импульса соответствует энергии частиц, чей размер варьирует в пределах микрон–десятки микрон, а скорости до первых десятков км/с. Но удар таких частиц образует кратер в десятки и сотни микрон, а экспериментальный лазерный “удар” оставляет кратер на порядок больший, в данном случае примерно 6 мм в диаметре и 0.6 мм глубиной [8]. Тем не менее, при соответ-

ствующем подборе параметров взаимодействия лазерного излучения с веществом мишени удается воспроизвести определенные условия микрометеоритного удара как по температуре, так и по давлению. Особый интерес вызывает высокое давление, возникающее за счет импульса отдачи расширяющейся парогазовой смеси, что приводит к формированию ударной волны, распространяющейся вглубь мишени [9]. Согласно теоретической модели И.Н. Бурдонского [8], величину импульса давления можно оценить по формуле

$$P^{\frac{3}{2}} = I \sqrt{\frac{\rho(\gamma + 1)}{2}},$$

где I – интенсивность лазерного излучения; ρ – плотность вещества мишени; γ – коэффициент адиабаты. При заданных в экспериментах параметрах – $I = 10^7$ Вт/см², $\rho = 3$ г/см³ и γ (для вулканических пород) ≈ 2 , можно достигнуть импульсного давления ~ 3.5 кб. Таким образом, в распространяющейся в расплаве ударной волне возникают градиенты температуры и давления и соответствующие диффузионные потоки компонентов расплава, что неизбежно должно приводить к их разделению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В стекле кратера наблюдаются светлые и темные области (рис. 1). Как показал микрозондовый анализ, если темные области слабо отличаются от исходного состава стекла, то светлые области отличаются значительно (табл. 1). Светлые области заметно обогащены труднолетучими оксидами (Al₂O₃, CaO, TiO₂), обеднены легколетучими (Na₂O, K₂O) и, особенно, умеренно летучим SiO₂ (разница составляет более 15 мас. %). Изменение содержания труднолетучих и легколетучих полностью соответствует рядам летучести петрогенных оксидов (за исключением FeO) [10] и поэтому состав светлых областей кратерного стекла легко объясним испарением легко- и умеренно летучих оксидов и соответствующим накоплением труднолетучих.

Наличие в кратерном стекле многочисленных глобул нанофазного железа, местами упорядоченных в тонкие, протяженные цепи (рис. 1, 2), является главным результатом 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. Предполагается, что формирование крупных частиц в сотни нанометров происходит при коалесценции в жидкой фазе – крупные частицы собираются из мелких. Цепоч-

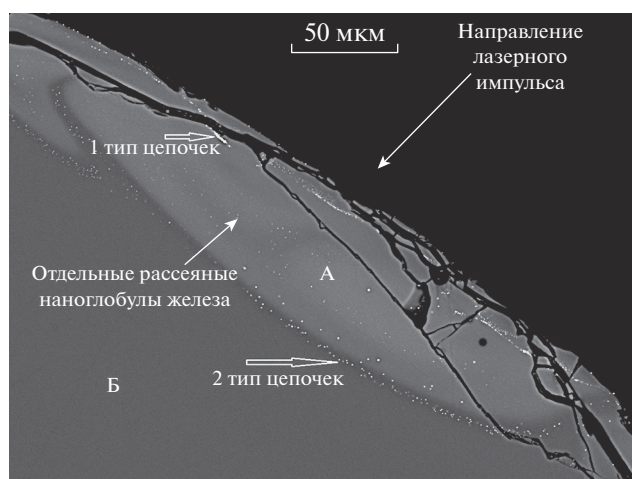


Рис. 1. Снимок со сканирующего электронного микроскопа (приближенный участок светлой области, приведенной на рис. 2). Два типа цепочек нанофазного железа в кратерном стекле. Светлые (А) и темные (Б) области стекла.

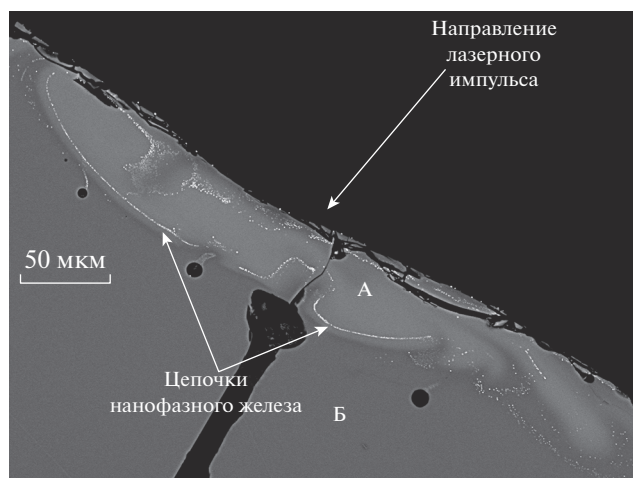


Рис. 2. Снимок со сканирующего электронного микроскопа. Цепочки нанофазного железа в стекле кратера. Светлые (А) и темные (Б) области стекла.

ки из наноглобул железа второго типа локализируются в объеме кратерного стекла, формируя дугообразные, выпуклые сторону дна кратера структуры. Хорошо заметна определенная взаимосвязь цепочек железа с параллельно идущими вдоль них осветленными участками стекла. Следует подчеркнуть, что 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) [11], либо в результате конденсации ударно-образованного пара, содержащего уже восстановленное железо [1, 4]. В данном случае образование железа в металлическом состоянии происходит в результате термовосстановительного процесса, также активно влияющего на механизм испарительной дифференциации [12, 13]. Похожие результаты в лазерном эксперименте с обычным хондритом были получены недавно в работе [14]. Что касается пространственной корреляции цепочек железа с контурами светлых и темных областей стекла, то, по-видимому, такая структурированная форма расположения наносферул может быть обусловлена прохождением фронта ударной волны. В многокомпонентном расплаве, а тем более в гетерогенной среде (глобулы железа в расплаве), ударная волна может возбудить бародиффузионные потоки, что неизбежно должно привести к разделению вещества по массе. В случае сильного различия масс ($m_2/m_1 \gg 1$), а в данном случае глобул железа (m_2) и атомно-моле-

кулярных частиц расплава (m_1), эффект разделения может быть значительным [15].

Таким образом, экспериментально показан механизм образования нанофазного железа в толще расплава термовосстановительным путем при прохождении ударной волны. Данный механизм также должен учитываться при описании np-Fe^0 , широко распространенного в частицах лунного реголита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hapke B.* Space Weathering from Mercury to the Asteroid Belt // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 10039–10073.
2. *Pieter C.M., Noble S.K.* Space Weathering on Airless Bodies // *J. Geophys. Res. Planets.* 2016. V. 10. P. 121.
3. *Moroz L.V., et al.* Space Weathering of Silicate Regoliths with Various FeO Contents: New Insights from Laser Irradiation Experiments and Theoretical Spectral Simulations // *Icarus.* 2014. V. 235. P. 187–206.
4. *Keller L.P., McKay D.S.* The Nature and Origin of Rims on Lunar Soil Grains // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. P. 1–11.
5. *Basu A., McKay D.S., Wentworth S.J.* A Critical Examination of Relative Concentrations of Volume-correlated and Surface-correlated Submicron Globules of Pure Fe^0 in Lunar Soils // *Lunar and Planetary Science.* 2003. V. 34. № 1159.
6. *Gerasimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., et al.* Physics and Chemistry of Impacts // (P. Ehrenfreund, K. Krafft, H. Kochan, V. Pirronello eds.). *Laboratory Astrophysics and Space Research. Astrophys. Space Sci.* 1999. № 236. P. 279–330.
7. *Сорокин Е.М., Яковлев О.И., Слюта Е.Н. и др.* Экспериментальное моделирование микрометеоритного удара на Луне // *Геохимия.* 2020. Т. 65. № 2. С. 107–122.
8. *Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г. и др.* Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2013. Т. 36. Вып. 2. С. 8–18.
9. *Clauer A.H., Holbrook J.H., Fairand B.P.* Effects of Laser Induced Shock Waves on Metals // *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals.* 1981 (M.A. Meyers, L.E. Murr, Eds). Plenum Publishing Corporation, New York. P. 675–702.
10. *Маркова О.М., Яковлев О.И., Семенов Г.А. и др.* Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена // *Геохимия.* 1986. № 11. С. 1559–1569.
11. *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.
12. *Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В. и др.* Экспериментальное изучение факторов, определяющих состав стекол лунного реголита // *Геохимия.* 2003. № 5. С. 467–481.

13. *Gerasimov M.V., Safonova E.N., Dikov Yu.P., et al.* Chemical Effects of High-temperature Processing of Silicates // Workshop on Chondrites and Protoplanetary Disk. 2004. P. 9011.
14. *Li Y., Li S.J., Xie Z.D., Li X.Y.* Lazer Irradiated Impact Experiments Show that Nanophase Iron Particles Formed by Shock-induced Melting rather than Vapor Deposition // 79th Ann. Meet. Meteoritical Soc. 2016. № 6338.
15. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963. 632 с.

EXPERIMENTAL MODEL FORMATION OF NANOPHASE METAL IRON IN THE REGOLITH OF THE MOON

E. M. Sorokin^{a,#}, O. I. Yakovlev^a, E. N. Slyuta^a, M. V. Gerasimov^b, M. A. Zaitsev^b, V. D. Shcherbakov^c, K. M. Ryazantsev^a, and S. P. Krasheninnikov^a

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

^b *Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: egeorgehim@ya.ru*

Presented by Academician of the RAS Galimov E.M. February 28, 2020

One of the signs of “space weathering” on the Moon, and this is the effect of the solar wind and micrometeorite bombardment, is the formation of nanophase metallic iron (np-Fe⁰) in the regolith of the Moon, observed in condensate films on the surface of regolith mineral grains and in agglutinate glasses. The article describes the results of pulsed laser experiments simulating a micrometeorite “impact” on a basalt target. Iron nanoglobules, structured into chains, marking, apparently, the front of the passage of the shock wave, were found in the melt products of the “impact”. The experiments clearly showed that np-Fe⁰ can be formed without the participation of a reducing agent – implanted hydrogen ions of the solar wind, as well as bypassing the process of iron condensation from shock-generated vapor. Similar chain structures of np-Fe⁰ were observed in the impact glass of lunar regolith.

Keywords: moon, space weathering, micrometeorite bombardment, nanophase iron, thermal reduction