

ИСПАРЕНИЕ ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ХОНДРИТ-БАЗАЛЬТ

Яковлев О. И., Диков Ю. П.*, Герасимов М. В. **

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

yakovlev@geokhi.ru

* Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

dikov@igem.ru

** Институт космических исследований РАН, г. Москва

mgerasim@mx.iki.rssi.ru

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 01-05-64564-а)

Вестник Отделения наук о Земле РАН, № 1(20) 2002

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2002/informbul-1.htm#planet-8

Настоящая работа посвящена изучению испарительных потерь железа из высокотемпературного расплава, что может быть приложимо к решению проблем петрохимии ударных продуктов на Луне. Известно, что основная масса стеклянных частиц лунного реголита образовалась в результате ударного плавления материковых и морских пород. Сложная комбинация перемешивания расплавов различных веществ, включающих частично и вещество ударников – метеоритов, обусловила широкие химические вариации состава лунных стекол. Кроме импактных образований в реголите была выделена особая группа мафических стекол (т. н. зеленые (низкотитанистые) и оранжевые (высокотитанистые) стекла), которым, в силу их особых физических и химических свойств, приписывают вулканическое происхождение [1]. Эти стекла имеют важное петрогенетическое значение, поскольку считается, что они отражают состав наиболее примитивного вещества Луны. В литературе, однако, можно найти отдельные работы, в которых высказывается мнение, что уникальные физические и химические свойства мафических стекол можно объяснить и в рамках традиционного импактного подхода [2,3]. С целью проверки этой альтернативной гипотезы мы провели серию экспериментов по импульсному плавлению смесей пород, имитируя тем самым ударное взаимодействие веществ хондритового ударника с вероятными мишенными породами Луны – анортозитовым габбро и Ti-базальтом. Наибольшее внимание при изучении расплавных продуктов эксперимента было уделено отношению $Mg/(Mg+Fe)$, высокое значение которого является одним из главных отличительных признаков зеленых и оранжевых стекол.

Импульсное плавление смесей было выполнено на лазерной установке со следующими характеристиками: длина волны излучения $\lambda=1.06$ мкм, энергия импульса 400-600 Дж, плотность мощности излучения $\sim 10^6$ - 10^7 Вт/см², длительность импульса $\sim 10^{-3}$ сек, диаметр пучка фокусировки ~ 3 мм. Характерная температура вещества в области лазерного пучка составляла ~ 4000 К. Образец с запрессованной смесью пород (таблетка $d=1$ см) закреплялся в герметичной камере с внутренним объемом ~ 500 см³. Эксперименты проводились в атмосфере He при давлении 1 атм. Пучок лазерного излучения расплавлял и испарял несколько десятков мг образца. На пути разлета облака силикатного пара и капель расплава на расстоянии ~ 7 см от образца устанавливался медный экран, на поверхности которого происходила конденсация пара и закалка расплава. Образование капель расплава (после закалки – сферул стекла) объясняется диспергацией расплава, выброшенного под давлением струи испаренного пара из кратерной полости образца. Диаметр сферул находился в пределах от 0.5 до 20 мкм. Диаметр основной массы сферул ($\sim 90\%$) попадал в интервал $0.5 \div 1.5$ мкм.

Эксперименты были выполнены с двумя смесями. Первая смесь имитировала “удар” (т.е. быстрое плавление, перемешивание и испарение) хондритового ударника по “материковой мишени” и состояла из двух главных частей – анортозитового габбро и углистого хондрита Murchison (CM2) в весовой пропорции 1:1. Образец был тщательно перемешан и растерт в яшмовой ступке до размера частиц ~ 1 -5 мкм. Состав смеси был рассчитан исходя из весовых долей и известных составов анортозитового габбро и хондрита Murchison. Содержание главных элементов в исходном образце составило (мас.%): Si 18.4; Ti 1.3; Al 7.7; Mg 9.4; Fe 14.8; Ca 6.9; O 41.5. Вторая смесь имитировала “удар” хондритового ударника по “морской мишени” и также состояла из двух частей – титанистого базальта и хондрита Murchison. Рассчитанное содержание главных элементов в исходной смеси составило (мас.%): Si 20.4; Ti 1.0; Al 4.4; Mg 8.8; Fe 21.0; Ca 3.5; O 40.9.

Количественный химический анализ стеклянных сферул на главные элементы был выполнен рентгеновским методом на сканирующем электронном микроскопе (метод SEM-EDS). Для анализа выбирались только однородные стекла или участки стекол. Чтобы исключить примесь конденсатного материала, поверхность сферул перед анализом протравливалась ионами Ag^+ . В опыте со смесью анортозитовое габбро-Murchison было проанализировано 104 сферулы; в опыте со смесью Ti-базальт-Murchison - 72.

Изучение морфологии сферул показало, что некоторые из них на поверхности имеют микроликоваты металлического железа (рис. 1) с характерным размером глобул от 10 до 100 Å. Важно заметить, что в исходной смеси металлическое железо отсутствовало, и, следовательно, его появление – результат восстановления из закисного состояния. При этом процесс восстановления и обособления железа прошел практически мгновенно, за время ~0.01 сек.

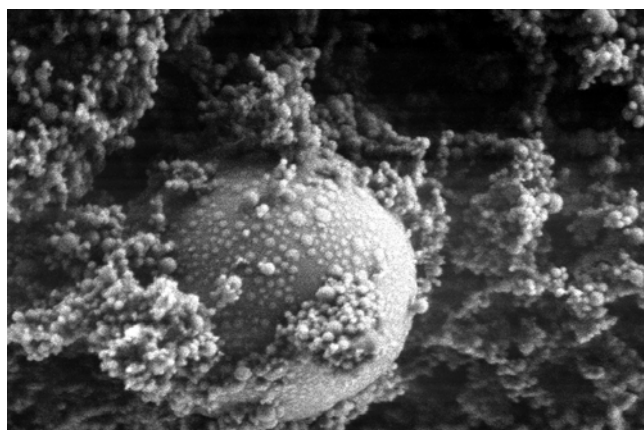


Рис. 1. Сферула стекла ($d \approx 1.5$ мкм) с микроликоватами Fe на поверхности.

Образование легколетучей металлической формы железа (при $T \sim 2800-3000^\circ\text{C}$ упругость пара Fe^0 составляет ~1атм) приводит к быстрому его испарению и, как следствие, к удалению из силикатного расплава. Химические анализы силикатных сферул стекла наглядно это подтверждают. На рис. 2, 3 приведены гистограммы распределения содержания железа в сферулах стекла по сравнению с содержанием Fe в исходной смеси. Хорошо видно, что в большинстве стекол содержание железа значительно уменьшилось (примерно в~2 раза).

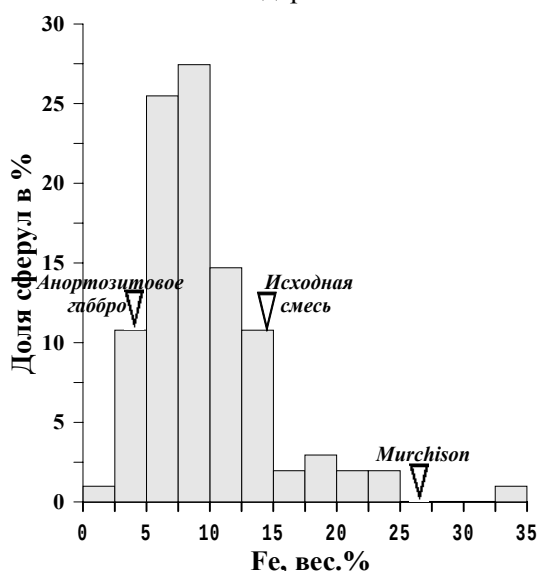


Рис. 2.

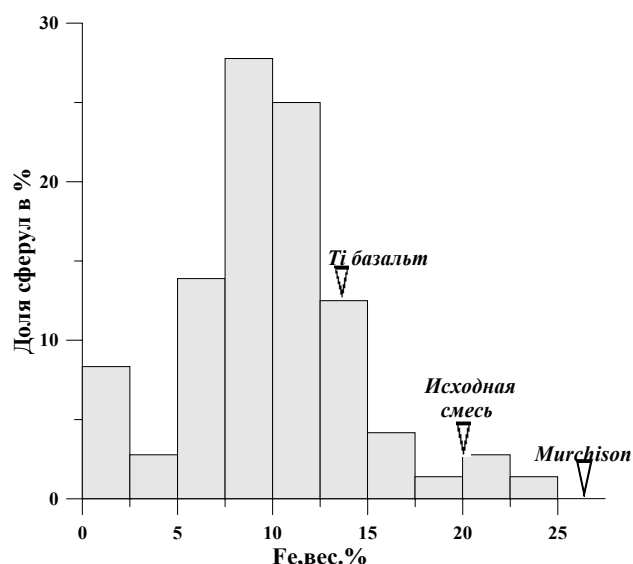


Рис. 3.

Значительные испарительные потери железа по сравнению с менее летучим магнием приводят к росту магниальности силикатного расплава. На рис. 4,5 приведены гистограммы

распределения магнезиальности в сферулах стекла. Можно видеть, что по сравнению с исходным значением магнезиальность стекла в среднем возросла на ~10% в опыте со смесью анортзитовое габбро-Murchison и на ~25% в опыте со смесью Ti-базальт-Murchison.

Полученные экспериментальные данные позволяют дать иное толкование высокой магнезиальности лунных мафических стекол. В работе [1] проведено сравнение отношения $Mg/(Mg+Fe)$ в зеленых и оранжевых стеклах с лунными морскими базальтами. Средняя молярная величина этого отношения в зеленых стеклах составляла 0.61, в оранжевых 0.52, а диапазон магнезиальности морских базальтов находился в пределах от 0.39 до 0.55. В среднем магнезиальность стекол была на ~10% выше, чем в морских базальтах. Поскольку данная петрохимическая характеристика чувствительна к фракционированию кристалл/расплав, то автором работы делается вывод о меньшей фракционированности составов стекол по сравнению с составами морских базальтов. Высокая магнезиальность мафических стекол вместе с другими их свойствами, входящими в так называемый список критериев «первичности» [1,4], позволило многим исследователям Луны предполагать, что исходная для образования этих стекол магма поступала из зоны нижней мантии, не испытывавшей глобальной дифференциации. По нашему мнению высокая магнезиальность «первичных» стекол может быть обусловлена селективным испарением железа из высокотемпературного ударного расплава. В наших опытах магнезиальность основной массы сферул возрастает на те же 10 и более процентов и может превышать высокие значения, наблюдаемые в зеленых стеклах. Таким образом, данные модельных экспериментов показывают, что составы мафических стекол на Луне могут быть ударного генезиса, то есть образоваться при ударном сплавлении вещества хондритового ударника и базальтовой лунной мишени при интенсивном испарении железа.

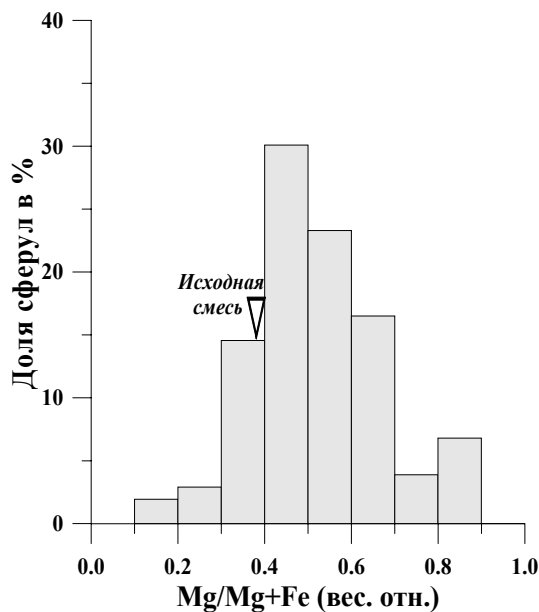


Рис. 4. Смесью анортзитовое габбро-Murchison

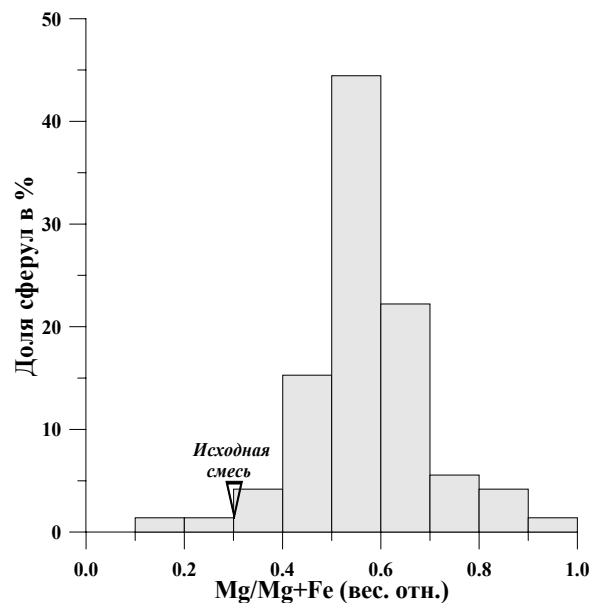


Рис. 5. Смесью Ti-базальт-Murchison

Литература:

1. Delano J.W. Pristine lunar glasses: criteria, data, and implications // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 16th. 1986. In: JGR. V.91. № B4. P. D201-D213.
2. Roedder E., Weiblen P.W. Apollo 17 "Orange Soil" – a result of meteorite impact on liquid lava ? // Nature. 1973. V. 244. № 5413. P.210-212.
3. Fudali R.F., Kreutzberger M., Kurat G., Brandstatter F. Aspect of a glassy meteorite from the Moon bearing on some problems in extraterrestrial glass-making // Journal Non-Crystalline Solids. 1984. V. 67. P.383-396.
4. Heiken G.H., McKay D.S., Brown R.N. Lunar deposits of possible pyroclastic origin // Geochim. Cosmochim. Acta. 1974. V.38. P.1703-1718.