

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспертной комиссии, созданной диссертационным советом по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.1.195.02 на базе ФГБУН Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), по диссертационной работе Сорокина Егора Максимовича «Экспериментальное моделирование химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Экспертная комиссия в составе:

1. Доктора химических наук, главного научного сотрудника лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ РАН Дорофееву Веру Алексеевну (председатель комиссии);
2. Доктора геол.-мин. наук, член-корр. РАН, заведующего лабораторией геохимии мантии Земли ГЕОХИ РАН Шацкого Антона Фарисовича (член комиссии);
3. Доктора геол.-мин. наук, заведующего кафедрой геохимии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Бычкова Андрея Юрьевича (член комиссии).

рассмотрела диссертацию Сорокина Егора Максимовича «Экспериментальное моделирование химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

**Актуальность работы.** Космическое выветривание и микрометеоритная бомбардировка являются важнейшими факторами преобразования поверхностного слоя Луны и других безатмосферных тел. Высокоскоростные микроудары вызывают дробление, плавление, частичное испарение и последующую конденсацию вещества, изменяя химический состав реголита и формируя ударные стекла. Существенное значение имеет также образование нанофазного металлического железа ( $\text{npFe}^0$ ), определяющего оптические свойства и степень зрелости лунного реголита. При этом количественные масштабы испарительной дифференциации при кратковременном ударном нагреве, механизмы формирования  $\text{npFe}^0$  и закономерности перераспределения Ni, P, S и других элементов между силикатной и металлической фазами остаются важными задачами экспериментальной геохимии и минералогии внеземного вещества.

Использование контролируемого импульсного лазерного воздействия позволяет воспроизводить высокотемпературную постударную стадию микроимпакта - быстрое плавление, частичное испарение, образование паро-капельного облака и последующую закалку расплава. Поэтому выполненное исследование актуально для установления физико-химических закономерностей переработки лунного реголита и интерпретации состава природных ударных стекол и нанофазных металлических частиц.

**Объектами исследования** являются продукты импульсного лазерного воздействия на природные породы и минералы лунного типа - кристаллический базальт и базальтовое стекло, оливины, пироксены, ильменит и другие мишени, а также агглютинаты и частицы лунного реголита, доставленные миссиями «Луна-20» и Chang'e-5. Предмет исследования - химическая дифференциация силикатного вещества при кратковременном

высокотемпературном воздействии, формирование  $\text{npFe}^0$  и перераспределение примесных элементов между силикатной, металлической и газовой фазами.

**Результаты исследований.** В серии лазерных экспериментов показано, что за время порядка  $10^{-3}$  с в базальтовом расплаве развивается глубокая испарительная дифференциация. Стекланные сферулы и кратерные стекла обогащаются труднолетучими  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{TiO}_2$  и обедняются более летучими  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Установленный тренд соответствует известному ряду летучести главных петрогенных оксидов. Для кристаллического базальта около 25 % проанализированных стекланных сферул достигают области HASP-составов (High Alumina Silica Poor, характерных стёкол лунного реголита), а для гомогенного базальтового стекла до ~90 %. Предложено использовать отношение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$  как диагностический признак глубокой ударно-испарительной переработки силикатного вещества.

На мишенях различного минерального состава получены многочисленные сферулы металлического железа, локализованные непосредственно в кратерном стекле и продуктах выброса. Их пространственная связь с текстурами течения, новообразованными кристаллами и газовыми полостями, а также систематическое истощение прилегающих участков расплава по  $\text{FeO}$  обосновывают вывод о формировании значительной части  $\text{npFe}^0$  in situ в высокотемпературном силикатном расплаве вследствие термического восстановления Fe-содержащего вещества. Эффективность образования металлической фазы зависит от химического и минерального состава исходной мишени и возрастает, в частности, при увеличении содержания  $\text{FeO}$  в исследованном ряду оливинов.

Установлено селективное накопление примесных компонентов в металлических сферулах. Наиболее устойчиво в различных экспериментальных системах концентрируется Ni; P особенно интенсивно накапливается в  $\text{npFe}^0$  базальтового стекла и выявляется в ортопироксене; S обнаружена в металлических частицах базальтового стекла и Cr-диопсида; в отдельных системах сферулы обогащаются также Cr, Si и Co. ПЭМ/STEM-исследования показали, что обогащение Ni, P и S сохраняется и для частиц размером в первые десятки нанометров.

Сопоставление с природным лунным материалом показало сходство морфологии и состава  $\text{npFe}^0$ . В агглютинатах «Луны-20» Fe-содержащие сферулы обогащены Ni, Co, P и S, а в исследованном агглютинате Chang'e-5 электронной дифракцией и HRTEM подтверждено присутствие  $\alpha\text{-Fe}$  в частицах размером от десятков до первых сотен нанометров; максимумы Ni, P и S приурочены к металлической фазе. Расчетная оценка зоны питания и диффузионная модель показывают, что наблюдаемое накопление примесей может реализовываться на расстояниях нескольких радиусов металлической частицы и при высоких температурах за субмикросекундные интервалы.

**Работа имеет научную новизну и практическую значимость.** В единой экспериментальной постановке связаны три взаимосвязанных геохимических эффекта микрометеоритной переработки вещества: селективное испарение силикатного расплава, формирование нанофазного металлического железа и перераспределение примесных элементов в металлическую фазу. Экспериментально показана возможность формирования за миллисекундное время HASP-подобных составов из базальтового вещества, обоснован критерий  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$  для выделения продуктов глубокой ударно-испарительной переработки, а также продемонстрирована роль  $\text{npFe}^0$  как локального селективного концентратора Ni, P, S и ряда других элементов.

Практическая значимость заключается в разработке и апробации доступной лазерной методики моделирования геохимических последствий микрометеоритных ударов и в предложении диагностических признаков ударных стекол и  $\text{npFe}^0$ , которые могут быть использованы при исследовании лунного реголита, интерпретации данных дистанционного зондирования и оценке химической эволюции поверхностного вещества безатмосферных тел.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, в том числе в изданиях из перечня ВАК. Результаты работы апробированы на российских и международных научных конференциях, включая Lunar and Planetary Science Conference (LPSC), Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ), Moscow Solar System Symposium и конференцию «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Содержание автореферата соответствует диссертационной работе.

**Комиссия считает,** что по содержанию и направленности исследований диссертация «Экспериментальное моделирование химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке», представленная Сорокиным Егором Максимовичем на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», соответствует профилю диссертационного совета 24.1.195.02 при ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) и паспорту специальности 1.6.4, а именно следующим направлениям исследований, предусмотренным паспортом этой специальности:

1. Минералогия земной коры и глубинных геосфер Земли, ее поверхности и дна водоемов; минералогия внеземных объектов; минералогия техногенных образований; биоминералогия.
3. Генетическая минералогия, исследование парагенезисов минералов и эволюции минералогенеза в природных и техногенных системах; экспериментальная минералогия.
13. Изучение химического состава природного вещества в геологических и связанных с ними системах (земной коре, глубинных геосферах Земли, гидросфере, атмосфере, техносфере, внеземных объектах, живом веществе) и процессах, исследование состояния, форм нахождения, закономерностей распространенности и поведения (распределения, концентрирования, фракционирования) химических элементов и их изотопов.
14. Теория и методы оценки количеств, состояния и форм нахождения химических элементов и их изотопов в природе; разработка принципов и методов физико-химического моделирования геохимических систем и процессов, методов математической обработки геохимических данных и математического моделирования геохимических процессов.
15. Экспериментальные физико-химические исследования, направленные на выявление законов образования минеральных фаз и распределения химических элементов и их изотопов между различными фазами и минералообразующей средой; физико-химическое и математическое моделирование природных процессов массопереноса и поведения химических элементов и их изотопов.

Требования к публикации основных научных результатов, предусмотренные пп. 11-13, а также требования пп. 10 и 14 Положения о присуждении ученых степеней, выполнены полностью. Текст диссертации, представленный в диссертационный совет, идентичен тексту диссертации, размещенному на официальном сайте ГЕОХИ РАН.

По своей актуальности, уровню поставленных и решенных задач, объему и качеству экспериментальных данных, новизне и значимости полученных научных результатов работа Сорокина Е.М. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (в действующей редакции), и является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача установления закономерностей химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке, включающей селективное испарение силикатного расплава, формирование наноплазменного металлического железа in

Диссертационная работа Сорокина Егора Максимовича «Экспериментальное моделирование химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке» является законченной научно-квалификационной работой, отвечает требованиям ВАК и может быть принята диссертационным советом 24.1.195.02 к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

- 1) принять к защите диссертацию Сорокина Егора Максимовича «Экспериментальное моделирование химической дифференциации вещества лунного реголита при микрометеоритной бомбардировке», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»;

**Ширяева Андрея Альбертовича**, д.х.н., главный научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем ИФХЭ РАН, г. Москва;

3) назначить в качестве ведущей организации Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург.

Председатель комиссии:  Дорофеева В.А.

Члены комиссии:  Шацкий А.Ф.

БЫЧКОВ А.Ю.

« 5 » октября 2026 г.

Дорогой друг! Верю Алексея  
Ивановича Фарцова  
Подпись руки Алексея Андреевича  
установлено. Докладчик Н.В.  
Дорогой друг! Верю Алексея  
Ивановича Фарцова