

На правах рукописи



Сорокин Егор Максимович

**Экспериментальное моделирование химической
дифференциации вещества лунного реголита
при микрометеоритной бомбардировке**

Специальность 1.6.4 - Минералогия, кристаллография. Геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва.

**Научный
руководитель:**

Яковлев Олег Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сравнительной планетологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), г. Москва.

**Официальные
оппоненты:**

Ширяев Андрей Альбертович, доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, г. Москва.

Бритвин Сергей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры кристаллографии Геологического факультета и Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «**16**» **декабря 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета 24.1.195.02 в Большом Конференц-зале Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН по адресу 119991, Москва, ул. Косыгина, 19 (тел. (495) 939-70-17, факс (495) 938-20-54).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГЕОХИ РАН и на сайте www.geokhi.ru в разделе Диссертации.

Автореферат разослан « » октября 2026 года.

Учёный секретарь диссертационного совета, кандидат химических наук

Е.В. Кронрод

Общая характеристика работы

Актуальность. Космическое выветривание и, в частности, микрометеоритная бомбардировка являются одним из ключевых факторов эволюции поверхностного слоя Луны и других безатмосферных тел, определяющих как физические свойства реголита, так и его химический и изотопный состав (Langevin, Arnold, 1977; Taylor, 1982; McKay et al., 1974). При типичных скоростях микрометеороидов 10–20 км/с (Gerasimov et al., 1999) ударные события приводят к дроблению, плавлению и частичному испарению вещества, формированию ударных стёкол и конденсатных кайм, а также к систематической потере летучих и умеренно летучих компонентов с поверхности Луны (Naney et al., 1976; Papike et al., 1991; Korotev, 1998). На примере HASP-стёкол (High Alumina Silica Poor) и аморфных кайм показано, что ударно-индуцированное частичное испарение и последующая конденсация создают ярко выраженные тренды испарительной дифференциации, однако количественные оценки масштабов этого процесса и его вклада в глобальный баланс основных петрогенных элементов остаются дискуссионными.

Другой важной составляющей космического выветривания является образование нанофазного металлического железа (npFe^0), которое радикально изменяет оптические свойства реголита и служит индикатором его зрелости (Housley et al., 1973; Napke et al., 1975; Pieters et al., 2000; Napke, 2001). Несмотря на десятилетия исследований, остаётся неясным, какова относительная роль микрометеоритной бомбардировки и спаттеринга в генерации npFe^0 и в каких условиях доминируют испарительно-конденсационные механизмы над термовосстановлением Fe^{2+} in situ, а также какова реальная локализация этих наночастиц в матрице реголита (в стекле агглютинатов, аморфных каймах, конденсатных плёнках) (Keller, McKay, 1993, 1997; Allen et al., 1993, 1995; Starukhina, Shkuratov, 2001; Wang et al., 2012).

Поскольку npFe^0 существенно влияет на спектральные и оптические свойства поверхностного слоя, уточнение его генезиса имеет важное значение как для интерпретации данных дистанционного зондирования, так и для понимания эволюции реголита на Луне и других безатмосферных телах.

Химический состав наночастиц изучен гораздо хуже, чем их морфология. Большинство работ трактуют npFe^0 как «почти чистое» железо, а сведения о поведении примесных элементов - Ni, P, S, Si и др. - носят фрагментарный характер (McKay et al., 1991; James et al., 2003; Pieters et al., 2016; Shen et al., 2024).

На этом фоне актуальными становятся контролируемые экспериментальные модели, воспроизводящие ключевые физико-химические условия микрометеоритного удара. Импульсное лазерное воздействие на природное вещество зарекомендовало себя как эффективный подход для имитации локального ударного плавления, испарения и конденсации в режиме сверхбыстрого нагрева–охлаждения (Kissel, Kruger, 1987; Gerasimov et al., 1999; Sasaki et al., 2001, 2003). Такие эксперименты позволяют воссоздать некоторые аспекты микрометеоритного удара.

Данное исследование, основанное на лазерном моделировании микрометеоритного удара и изучении химического состава npFe^0 и ударных стёкол, позволяет получить ряд важных сведений о химической дифференциации лунного реголита, а именно: (1) даёт количественные оценки испарительной дифференциации при кратковременном ударном плавлении, (2) раскрывает механизм восстановления железа в силикатном расплаве и формирования npFe^0 без

участия внешних восстановителей и (3) демонстрирует способность наносферул железа концентрировать сидерофильные и некоторые другие элементы. Это важно не только для интерпретации оптических и геохимических свойств лунного реголита и поверхности астероидов S-типа, но и для оценки миграции и возможного перераспределения ресурсов (летучих компонентов и сидерофильных элементов) в поверхностных зонах безатмосферных тел.

Цель исследования:

Экспериментально исследовать химическую дифференциацию лунного вещества, включая испарительное фракционирование петрогенных элементов и механизмы формирования нанофазного железа, в условиях, имитирующих микрометеоритный удар.

Задачи исследования:

1. Обосновать применимость импульсного лазера как инструмента для моделирования удара по лунным породам и минералам. Провести серию лазерных экспериментов на мишенях - аналогах лунного вещества (базальт, пироксен, оливин, ильменит и др.), с получением микрократеров и продуктов выброса.
2. Определить химический состав кратерных стёкол и продуктов выброса (капель расплава), выявить тренды испарительной дифференциации основных оксидов и сопоставить с данными по стёклам реголита Луны.
3. Получить и охарактеризовать наносферулы металлического железа (npFe^0), образовавшиеся в ходе экспериментов, и установить их связь с процессами ударного плавления и закалки.
4. Исследовать распределение Ni, P, S и других элементов между npFe^0 и окружающим стеклом, оценить роль npFe^0 как концентратора этих элементов.
5. Верифицировать экспериментальные данные на естественном лунном веществе (агглютинаты «Луна-20», частицы «Chang'e-5») для подтверждения применимости лабораторных результатов к реальным условиям космического выветривания.

Научная новизна диссертационной работы заключается в комплексном экспериментальном и аналитическом исследовании ударной переработки лунного вещества, которое впервые в единой постановке связывает испарительную дифференциацию силикатного расплава, формирование наносферул металлического железа и перераспределение сидерофильных и летучих элементов. Показано, что короткий импульс твердотельного лазера в лабораторных условиях способен за время порядка 10^{-3} с приводить к глубокой испарительной дифференциации базальтовых мишеней: в опытах воспроизводится классический ряд летучести петрогенных оксидов с выделением групп труднолетучих (Al_2O_3 , CaO , TiO_2), умеренно летучих (FeO , SiO_2 , MgO) и легколетучих петрогенных компонентов (Na_2O , K_2O), причём степень фракционирования систематически зависит от исходного состояния вещества (кристаллический базальт против базальтового стекла). Для базальтового стекла показано более глубокое удаление летучих и умеренно летучих компонентов и формирование составов, непосредственно сопоставимых с лунными HASP- и «Ultra-HASP»-стёклами. На этой основе предложен и экспериментально обоснован петрохимический критерий выделения продуктов ударного селективного испарения по отношению $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$, ниже

которого магматическое происхождение стекол маловероятно, а их генезис связан именно с испарительной переработкой импактного вещества.

Существенно новым является показанный в работе переход от морфологического к геохимическому уровню описания нанофазового металлического железа: крупные (субмикронные и микронные) сферулы npFe^0 , сформировавшиеся в кратерном стекле и продуктах выброса, детально охарактеризованы по содержанию Ni, Si, P, S и ряду других примесных элементов, для которых предложен единый механизм термовосстановления в силикатном расплаве с последующим растворением в металлической фазе. Впервые экспериментально показано образование нуль-валентных форм Si, P, Ni и S в расплаве железа при ударном нагреве и продемонстрировано, что сферулы npFe^0 действуют как эффективные локальные концентраторы и потенциальные переносчики этих компонентов, и вероятно, способны уносить значимую долю сидерофильных и халькофильных элементов при выбросе в паровое облако. Дополнительной новизной работы является прямое сопоставление состава и текстур npFe^0 , полученных в лазерных опытах, с наносферулами металлического железа в лунном реголите, включая образцы миссии «Chang'e-5», что позволяет экстраполировать лабораторные результаты на реальные условия микрометеоритной бомбардировки и уточнить представления о роли космического выветривания в химической эволюции лунной поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в уточнении представлений о механизмах микрометеоритной переработки лунного реголита: в диссертации количественно описаны процессы ударной испарительной дифференциации, термовосстановительного образования npFe^0 и сопряжённого перераспределения сидерофильных и других элементов между силикатным расплавом, паровой фазой и металлическими наносферулами. *Практическая значимость* заключается в разработке и апробации доступной лазерной методики моделирования микрометеоритных ударов, а также в предложении геохимических критериев и диагностических признаков ударных стёкол и npFe^0 , которые могут быть использованы при интерпретации данных о лунном реголите и результатов дистанционного зондирования и при оценке ресурсного потенциала безатмосферных тел для задач использования ресурсов на месте (ISRU).

Фактический материал и методы исследования.

Фактической основой работы служат результаты серии лабораторных экспериментов по лазерному воздействию на минералы и породы – аналоги лунного вещества, а также данные по естественным образцам лунного реголита. Моделирование микрометеоритного воздействия осуществлялось на импульсном лазере на неодимовом стекле ($\lambda = 1,06$ мкм, длительность импульса 10^{-3} с, энергия 600–700 Дж), обеспечивающем плотность мощности на поверхности порядка 10^6 – 10^7 Вт/см² и температуры в зоне «удара» до 3000–4000 К. Облучение проводилось в герметичной камере объёмом ~500 см³. После одиночного импульса в мишени формировался кратер диаметром порядка 6 мм, а продукты выброса (расплавы и пары) осаждались на медную подложку.

В качестве мишеней использовались толеитовый кристаллический базальт океанического типа (MORB), базальтовое стекло, несколько типов оливинов, пироксенов, а также ряд дополнительных пород и минералов (дунит, перидотит,

ильменит, пирротин, лабрадорит и др.). Для сопоставления с реальным лунным веществом были изучены агглютинаты из сборов «Луна-20» и частицы реголита миссии Chang'e-5. Все продукты выброса классифицировались на три морфологические группы: хлопья конденсата, неоднородные капли стекла и гомогенные стеклянные сферулы.

Комплекс методов включал оптическую микроскопию, сканирующую электронную микроскопию с ЭДС-анализом, электронно-зондовый микроанализ исходных мишеней и продуктов выброса, рентгеновскую дифракцию для фазового анализа базальта, а также высокоразрешающую ПЭМ/СТЭМ (сканирующе-просвечивающую электронную микроскопию) с электронной дифракцией и FIB-подготовкой ламелей для наноразмерных объектов. Для количественной характеристики prFe^0 в экспериментальных продуктах и лунных агглютинатах использовалась специальная методика: каждая сферула анализировалась четырежды с поворотом столика на 90° , при пониженном ускоряющем напряжении (≤ 10 кВ), что позволяло получать репрезентативные составы частиц размером до ~ 1 мкм.

Личный вклад автора.

Цель и задачи исследования сформулированы совместно автором и научным руководителем. Автор проводил эксперименты на лазерной установке совместно с коллегами из Института Космических Исследований. Автор проводил исследования на сканирующем электронном микроскопе как совместно с оператором, так и самостоятельно на инструментальной базе ГЕОХИ РАН и МГУ (кафедра петрологии). Автор обрабатывал и интерпретировал результаты анализа. Автор непосредственно проводил анализ на ИК-микроскопе (ИГЕМ РАН), с оператором исследовал кратеры на просвечивающем электронном микроскопе (на инструментальной базе СМА, Сколково). Подготовка проб, сбор материала после эксперимента также выполнялись непосредственно автором.

Защищаемые положения

1. За время миллисекундного импульса ($\sim 10^{-3}$ с) в базальтовом расплаве происходит глубокая испарительная дифференциация: стеклянные сферулы и кратерные стёкла обогащены тугоплавкими оксидами (Al_2O_3 , CaO , TiO_2) и обеднены умеренно летучими и щелочными компонентами (SiO_2 , FeO , Na_2O , K_2O), что соответствует ряду летучести главных петрогенных оксидов. Большинство полученных стёкол по составу сопоставимы с лунными HASP-стёклами (высокоглинозёмистые стёкла). Для стёкол предложен критерий $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$, указывающий на их ударно-испарительное, а не магматическое происхождение.
2. Нанофазное железо формируется преимущественно *in situ* в ударном силикатном расплаве в результате термического восстановления железосодержащего вещества при высоких температурах, без участия имплантированного водорода солнечного ветра и без участия процессов испарения–конденсации.
3. Металлические сферулы, образующиеся в ударном расплаве, содержат нульвалентные формы Ni, P, S, Si, Cr и др., возникающие в результате термического восстановления. Сферулы prFe^0 можно рассматривать как эффективные селективные концентраторы и переносчики сидерофильных и некоторых других элементов на поверхности Луны и других безатмосферных тел.

Публикации и апробации работы

Апробация работы проведена на различных конференциях, в том числе международных. Результаты представлены на серии международных конференций: Lunar and Planetary Science Conference (LPSC), Houston, USA, 2018-2025; Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ), Москва, ГЕОХИ РАН, 2018-2025; международный Moscow Solar System Symposium, Москва, ИКИ РАН, 2018-2025; Минералы: строение, свойства, методы исследования, Екатеринбург, ИГГ УрО РАН им. академика А.Н. Заварицкого, 2024-2025 и некоторые другие.

По теме диссертации в реферируемых журналах (в том числе из перечня ВАК) опубликовано 6 статей.

Объем и структура работы

В диссертации всего 188 страниц, 225 источников используемой литературы, 99 рисунков и 17 таблиц.

Благодарности

Автор выражает крайнюю признательность своему научному руководителю О.И. Яковлеву за постановку цели исследования, за обсуждения всех результатов, за научные консультации и ценные советы. Автор благодарен своему заведующему лабораторией Е. Н. Слюте за помощь в написании статей и советы. Также автор благодарен соавторам своей работы, коллегам из ИКИ РАН к.ф.-м.н. Герасимову М.В. и Зайцеву М.А., а также чл.-корр. О.И. Короблёву, за помощь при проведении экспериментов, обсуждение результатов и написании статей. Выражает благодарность Рязанцеву К.М. за анализ на сканирующем электронном микроскопе, обсуждения результатов и советы. Выражает благодарность д.г.-м.н. Н.Р. Хисиной за обсуждения результатов и ценные советы. Д.г.-м.н. М.А. Ивановой за ценные советы и помощь в написании статей. Выражает признательность сотрудникам ГЕОХИ РАН: д.г.- м.н. Иванову М.А., д.г.-м.н. Базилевскому А.Т., к.г.-м.н. Бадюкову Д.Д., к.г.- м.н. Лоренцу К.А., к.г.-м.н. Демидовой С.И., к.ф.-м.н. Шорникову С.И., д.х.н. Дорофеевой В.А., д.ф.-м.н. Новосадову Б.К., к.г.-м.н. Николаеву Г.С., к.х.н. Кронрод Е.В., к.г.-м.н. Шиловской С.Н. за ценные советы. Автор выражает благодарность академику Костицыну Ю.А. за возможность исследования лунного вещества, доставленного миссией Chang'e-5 и ценные советы. Выражает благодарность рецензентам своих статей д.г.-м.н. чл.-корр. Шацкому А.Ф., д.г.-м.н. Луканину О.А., а также к.т.н. Гроховскому В.И. (УрФУ, Екатеринбург) за ценные советы. Автор благодарен Крашенинникову С.П., Плечовой А.А., к.г.-м.н. Асафову Е.В. за возможность использования высокотемпературной печи и советы. Выражает признательность сотрудникам своей лаборатории за поддержку. Автор признателен сотрудникам МГУ к.г.-м.н. Щербакову В.Д. за помощь в проведении анализов на сканирующем и микрозондовом электронных микроскопах, а также д.г.-м.н. Бычкову А.Ю., д.х.н. Ерёмину Н.Н., к.г.-м.н. Марченко Е.И. за ценные советы. Автор благодарит сотрудников ИГЕМ РАН к.г.-м.н. Крупскую В.В. и к.г.-м.н. Доржиеву О.В. за помощь в осуществлении съёмок на ИК-микроскопе, а также ценные советы. Автор благодарит сотрудников ВИМС им. Федоровского д.г.-м.н. Ожогину Е.Г. за ценные советы, а также к.г.-м.н. Быстрова И.Г. за проведение микрозондовых исследований. Автор выражает благодарность сотрудникам компании «Системы для микроскопии и анализа», Сколково – Шкловеру В.Я., Бондареву А.В., Маряеву И.Г. за помощь в проведении исследований на сканирующем и просвечивающем электронном микроскопах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи, показывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описывается фактический материал, аналитические методы, выносятся защищаемые положения диссертационной работы, личный вклад, представлена апробация работы, ее структура и объем.

Глава 1 (Литературный обзор) посвящена современным представлениям о химических эффектах микрометеоритной бомбардировки на поверхности Луны и других безатмосферных тел, а также роли космического выветривания в формировании реголита и его оптических, минеральных и геохимических свойств. Реголит состоит из обломков коренных пород, минеральных зёрен и вторичных частиц – агглютинатов, стеклянных шариков и брекчий, а его химический состав определяется главным образом составом подстилающих пород, небольшими примесями метеоритного вещества и перераспределением материала между морскими и материковыми областями (Бондаренко, Шкуратов, 1998).

Совокупность процессов дробления, плавления, испарения, облучения и переотложения вещества в поверхностном слое определяется термином «космическое выветривание» и контролирует степень зрелости реголита, влияющую на его спектральные характеристики (Housley et al., 1973; Hapke et al., 1975; McKay et al., 1991; Pieters, Noble, 2016). Основными факторами космического выветривания являются микрометеоритная бомбардировка и облучение ионами солнечного ветра и космическими лучами. Микрометеороиды со скоростями от 4–5 до 70 км/с и типичными значениями около 10–20 км/с образуют микрократеры диаметром от единиц микрон до сантиметра (Hartung et al., 1972; Cintala, 1992; Cremonese et al., 2013).

Важным аспектом микрометеоритной и метеоритной бомбардировки является селективное испарение основных петрогенных компонентов силикатных пород. В 1970–1980-е годы на основе испарительных экспериментов был установлен ряд летучести основных оксидов для базальтовых расплавов: к высоколетучим относили Na_2O , K_2O , к умеренно летучим – FeO , SiO_2 , MgO ; к труднолетучим – CaO , TiO_2 , Al_2O_3 (DeMaria et al., 1971; Яковлев и др., 1976; Donaldson, 1979; Ulyanov et al., 1981, Маркова и др., 1986). Было показано, что частичное испарение расплавов при быстром нагревании и охлаждении может приводить к формированию остаточного стекла, обогащенного глиноземом и оксидом кальция и обедненного кремнезёмом и оксидом железа. Эти результаты были экстраполированы на природные системы, где испарительная дифференциация рассматривается как важный механизм в формировании коры и в перераспределении летучих элементов на Земле и Луне (Яковлев и др., 1988, 1992, 1997, 2000).

Глубокая испарительная дифференциация особенно ярко проявляется в так называемых HASP-стеклах (High Alumina, Silica Poor) лунного реголита, впервые описанных в образцах Apollo-16 (Naney et al., 1976; Vaniman, 1990; Warren, 2008). Эти стекла характеризуются повышенным содержанием Al_2O_3 (часто более 34 мас.%) и резко пониженным содержанием SiO_2 , FeO и щелочных оксидов. Для объяснения их состава была предложена модель высокотемпературного частичного испарения базальтовых и анортозитовых расплавов, при котором в паровую фазу преимущественно переходят умеренно и высоколетучие компоненты (SiO_2 , FeO , Na_2O , K_2O , MgO), тогда как в остатке накапливаются труднолетучие Al_2O_3 , CaO и TiO_2 (Parfitt et al., 1991; Korotev, 1998).

Важнейшей составляющей космического выветривания является образование наносферул металлического железа (npFe^0), определяющих оптические и магнитные свойства реголита и служащих индикатором его зрелости. Одним из первых свидетельств присутствия тонкодисперсной металлической фазы в лунном грунте были получены советскими исследователями — акад. А.П. Виноградовым, акад. В.С. Урусовым, А.В. Ивановым и др. (Виноградов и др., 1972). Первые данные магнитных измерений и мёссбауэровской спектроскопии лунного грунта выявили повышенное содержание металлического железа (0,5–1 мас.%) по сравнению с изверженными породами Луны и суперпарамагнитный характер части этого железа (Runcorn et al., 1970; Tsay et al., 1971; Housley et al., 1972). Позднее просвечивающая электронная микроскопия показала наличие равномерно распределённых нанометрических сферических частиц $\alpha\text{-Fe}$ в стекле агглютинатов, размеры которых варьируют от единиц до десятков нанометров (Housley et al., 1973). Было предложено использовать содержание тонкодисперсного металлического железа, нормированное на содержание FeO , как количественный индикатор зрелости реголита (Morris, 1986).

Ранние модели связывали образование npFe^0 с восстановлением Fe^{2+} за счёт имплантированных газов солнечного ветра и последующим сверхбыстрым закаливанием стекла (Housley et al., 1973). Наряду с этим широкое распространение получил испарительно-конденсационный механизм, согласно которому при микрометеоритном испарении и спаттеринге Fe -содержащее вещество переходит в паровую фазу или распыляется, а восстановленное железо затем переосаждается на поверхности соседних зёрен в форме тонких плёнок и аморфных кайм, содержащих npFe^0 (Harpe et al., 1975; Keller, McKay, 1997; Keller, Clemett, 2001; Pieters et al., 2000; Harpe, 2001; Taylor, 2002). Таким образом, длительное время основными обсуждаемыми механизмами были восстановление при воздействии солнечного ветра и образование металлической фазы при испарении, переносе и последующей конденсации вещества. В настоящей работе рассматривается возможность непосредственного термического восстановления Fe -содержащего вещества *in situ* в силикатном расплаве.

Лабораторное моделирование космического выветривания подтвердило принципиальную возможность образования восстановленного железа при ионном воздействии. Облучение силикатных мишеней ионами H^+ и He^{2+} приводило к потемнению и «покраснению» спектров отражения, ослаблению диагностических полос поглощения и формированию наночастиц металлического железа в поверхностных слоях (Allen et al., 1995; Dukes, Baragiola, 1999; Loeffler et al., 2009, 2016). Численные модели спаттеринга и молекулярно-динамические расчёты описывают диффузию дефектов и особенности аморфизации и восстановления в оливине и пироксене, демонстрируя зависимость скорости космического выветривания от структуры минерала и миграции катионов и анионов (Starukhina, 2003; Quadery et al., 2015; Escobar-Cerezo et al., 2018).

Другим широко используемым подходом в изучении изменения спектральных характеристик вещества и формирования npFe^0 является моделирование микрометеоритных ударов импульсным лазером (Kissel, Kruger, 1987; Moroz et al., 1996; Sasaki et al., 2004; Loeffler et al., 2008a, b; Gerasimov et al., 1999;). В этих экспериментах при облучении порошков метеоритов и модельных минералов лазерными импульсами наносекундной длительности наблюдаются типичные спектральные эффекты космического выветривания и образование аморфных кайм с

нанофазным железом. Показано, что количество и размер npFe^0 прямо коррелируют с изменениями спектров отражения, а минеральный состав мишени (оливин против пироксена) существенно влияет на выраженность этих изменений.

Изначально нанофазные частицы интерпретировались как практически чистое железо (McKay et al., 1991; James et al., 2003; Pieters et al., 2016; Pang et al., 2024), а примеси Ni, P, S, Si и других элементов фиксировались лишь в относительно крупных силицидах и подобных ультравосстановленным фазам (Anand et al., 2004; Nazarov et al., 2012; Gopon et al., 2017; Noguchi et al., 2014; Yan et al., 2024). Однако данные высокоразрешающих исследований и экспериментального лазерного моделирования показали, что даже субмикронные сферулы npFe^0 могут быть существенно обогащены сидерофильными и летучими компонентами по сравнению с силикатной матрицей, а их формирование связано с термовосстановлением и кипением расплава в условиях ударного плавления (Sorokin et al., 2023, 2025; Shen et al., 2024; Xiong et al., 2024). Это открывает возможность рассматривать npFe^0 не только как оптически активную фазу, но и как важный носитель и концентратор Ni, P, S, Si и других элементов в реголите Луны и на других безатмосферных телах.

Таким образом, литературный обзор показывает, что микрометеоритная бомбардировка и связанные с ней плавление, частичное испарение и конденсация вещества, а также формирование npFe^0 являются важными факторами химической эволюции лунной поверхности. Для задач настоящей работы ключевыми являются глубина селективного испарения при кратковременном высокотемпературном воздействии, возможность образования npFe^0 непосредственно в силикатном расплаве и перераспределение Ni, P, S, Si и других элементов между силикатной и металлической фазами. Эти вопросы определяют постановку задач диссертационной работы и последующее сопоставление экспериментальных продуктов с лунным реголитом.

В главе 2 диссертации представлены экспериментальные методы, описание лазерной установки, характеристики использованных образцов-мишеней, комплекс аналитических методик, применённых для изучения продуктов выброса и кратеров, а также численное сопоставление высокотемпературных состояний при лазерном и микрометеоритном воздействии. Основное внимание сосредоточено на тех стадиях преобразования вещества, которые определяют его последующую химическую эволюцию: быстром нагреве, плавлении, частичном испарении, образовании и расширении паро-капельного облака, закалке расплава и формировании восстановленных металлических фаз.

Основой экспериментальной части служит импульсный лазер с длиной волны 1,06 мкм (рис. 1 А), длительностью импульса порядка 10^{-3} с и энергией 600–700 Дж. При диаметре пятна лазера 3–4 мм это соответствует поверхностной плотности мощности порядка 10^6 – 10^7 Вт/см² и температурам в зоне «удара» около 3000–4000 К, характерным для плавления и интенсивного испарения силикатного вещества при высокоскоростном ударном воздействии (Gerasimov et al., 1999). Мишень закреплялась в латунном держателе под углом к оптической оси, что одновременно обеспечивало устойчивую геометрию облучения и вынос формирующегося паро-капельного облака из зоны прямого лазерного луча. Испарение проводилось в герметичной камере объёмом около 500 см³ с кварцевым окном в атмосфере аргона при атмосферном давлении (Зайцев и др., 2016). Внутренние стенки цилиндрической камеры были выстланы медной фольгой, выполнявшей роль улавливателя конденсата и капель расплава (рис. 1 Б).

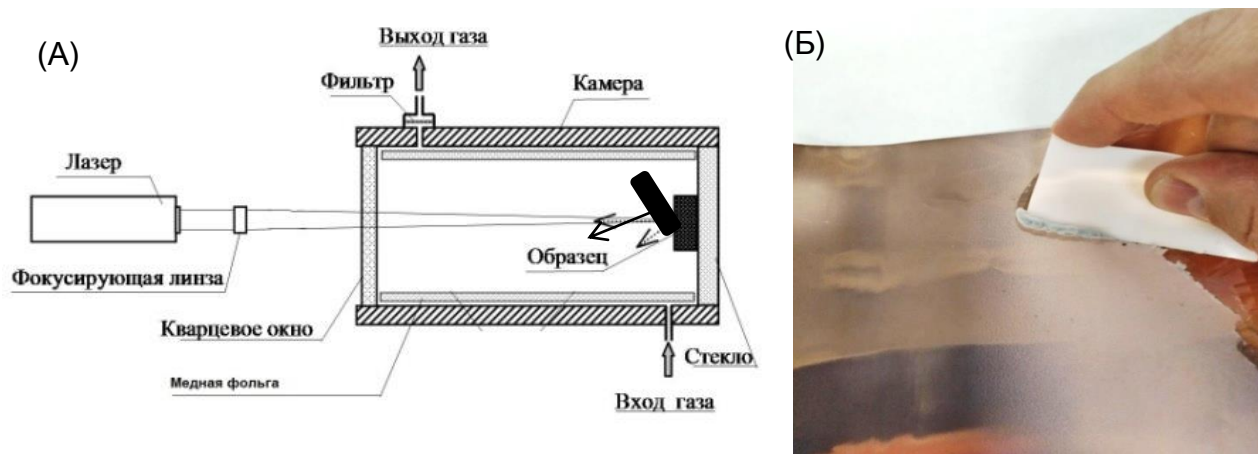


Рис.1. (А) Схема экспериментальной установки для лазерного испарения. (Б) Процесс сбора продуктов выброса с медной фольги.

После одиночного лазерного «удара» в мишени формировался кратер диаметром порядка 6 мм и глубиной около 0,6 мм, а продукты выброса (пар и расплав) осаждались на медную подложку (рис. 1 Б). В осаждённом материале устойчиво выделялись три морфологические группы продуктов: хлопья конденсата, представляющие собой субмикронные агрегаты неправильной формы; капли стекла различной морфологии и размеров (от десятков до сотен микрон), часто гетерогенные по составу; и стеклянные сферулы — относительно гомогенные капли расплава сферической формы размером от единиц до десятков микрон (такие «шарики» расплава в дальнейшем использовались для исследования процессов испарительной дифференциации).

Лазерное воздействие в настоящей работе используется для воспроизведения высокотемпературной постударной стадии преобразования силикатного вещества — плавления, частичного испарения, образования и расширения паро-капельного облака и последующей закалки. При естественном ударном процессе в эту область состояний вещество переходит после ударного сжатия и разгрузки, тогда как в лазерном эксперименте нагрев осуществляется непосредственно за счёт поглощения излучения; начальная ударно-компрессионная стадия при этом не моделируется. На ранней стадии, при высокой плотности и температуре, возможно установление локального термодинамического квазиравновесия между конденсированной и газовой фазами. По мере расширения облака характерное время релаксации возрастает, и в момент, когда оно становится больше времени гидродинамического расширения, наступает «закалка» — фиксация химического состава продуктов (Kissel & Krueger, 1987; Gerasimov et al., 1999). Эта общая схема эволюции состояния вещества при ударе и последующем расширении паро-капельного облака иллюстрируется p – V –диаграммой на рис. 2.

Применимость такого подхода дополнительно оценивалась численным сопоставлением с моделью микрометеоритного удара частицей диаметром 100 мкм со скоростью 10 км/с и экспериментального лазерного импульса длительностью 1 мс и энергией 600 Дж. Для сформировавшегося постударного и лазерного расплава автором получены близкие средние температуры — 1710 и 1760 К соответственно. Доли жидкости с $T \geq 1900$, 2000 и 2200 К составляли 24,7; 20,5 и 9,7 % после микрометеоритного удара и 25,8; 18,4 и 7,0 % при лазерном воздействии. Таким образом, лазерное воздействие воспроизводит близкое температурно-фазовое

состояние постударного силикатного расплава. При этом высокотемпературное состояние лазерного расплава сохраняется дольше: массово-взвешенная экспозиция зон 1900–2200 К больше примерно в 85–350 раз, что способствует более глубокой испарительной и восстановительной переработке вещества.

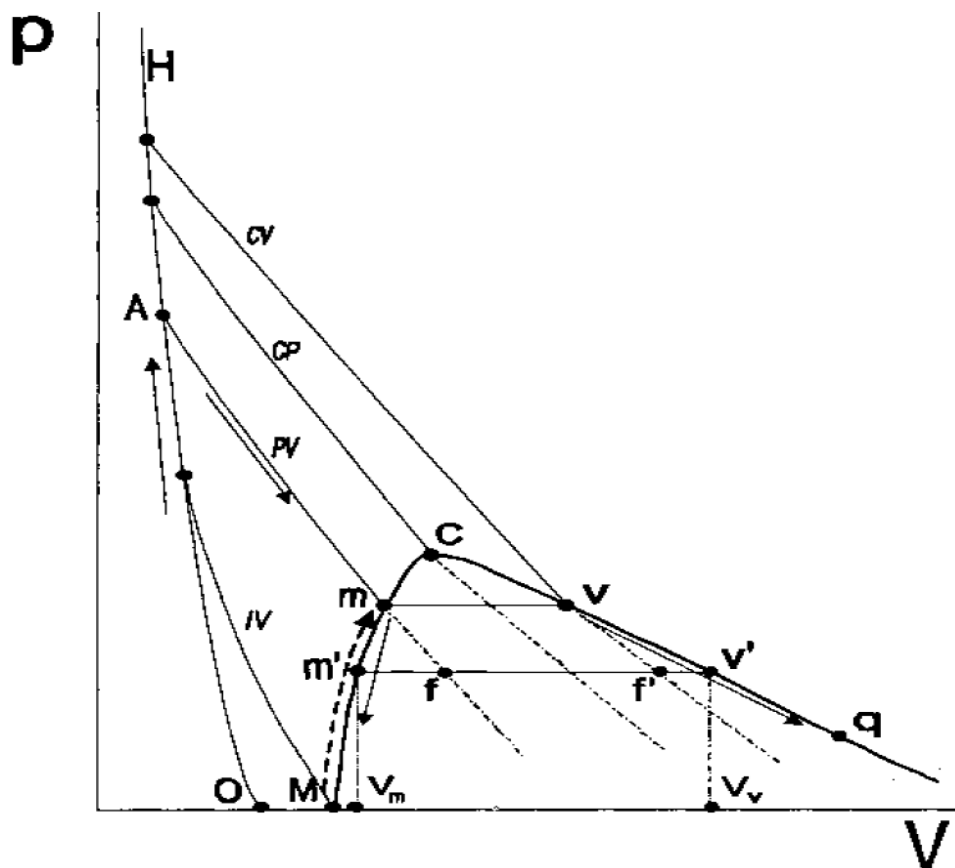


Рис.2. Диаграмма давления-удельного объема (pV), схематически показывающая путь эволюции вещества во время цикла ударной нагрузки-разгрузки. Кривая ОАН представляет собой адиабату Гюгонио; IV, PV, CP и CV являются изоэнтропными кривыми; кривая $Mm'mCvv'q$ представляет собой кривую равновесия между расплавом и паром.

Для моделирования испарения базальтового вещества использовался тонкозернистый толеитовый кристаллический базальт MORB-типа, дроблённый на фрагменты размером порядка $1,5 \times 1,5$ см. Часть материала была истёрта до ~ 70 мкм и проанализирована методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), что позволило получить средний массовый состав по основным оксидам. Рентгенодифракционный анализ (XRD) на приборе PanAnalytical X'Pert Pro выявил присутствие плагиоклаза (преимущественно лабрадора), пироксенов, гематита, кварца ($Pl \sim 55\%$, $Px \sim 39\%$, $Qrz \sim 2\%$, $Hem \sim 2\%$) и некоторых слоистых алюмосиликатов. Дополнительно часть фрагментов базальта была исследована на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100, что позволило получить локальные составы минералов.

Кроме того, в эксперименте использовалась мишень из базальтового стекла: порошковый базальт переплавлялся при $1300\text{--}1400$ °С в кварцевом тигле в атмосфере азота, после чего полученный стеклообразный материал исследовался на СЭМ.

Для изучения влияния минерального состава на испарительную дифференциацию и образование $prFe^0$ был использован набор мономинеральных и полиминеральных мишеней. Использовались несколько типов оливинов с разным

содержанием железа, несколько пироксенов (ортопироксен и клинопироксен). В дополнение использовались мишени из дунита, перидотита, магнетита, ильменита, пирротина, лабрадорита, геденбергита и хромита, что позволило охватить широкий спектр силикатных и оксидных систем, характерных в том числе для лунного реголита. Для сопоставления с лунным веществом дополнительно изучались агглютинаты из коллекции миссии «Луна-20» и образцы реголита, доставленные миссией Chang'e-5, что позволяет напрямую сравнить морфологию и химический состав экспериментальных продуктов с естественными объектами (рис. 3).

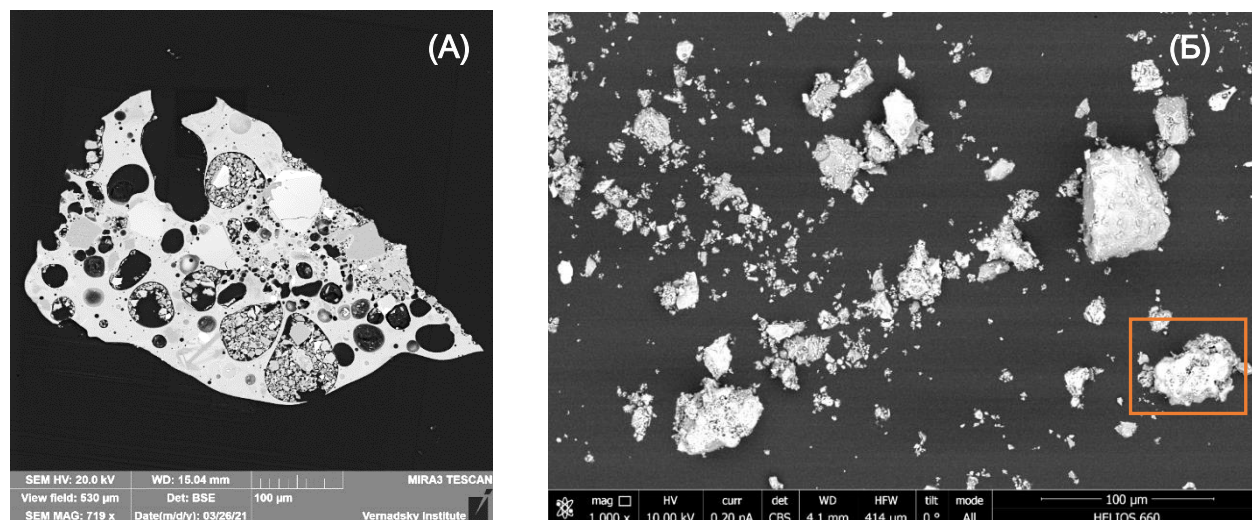


Рис.3. (А) Общий вид исследованных частиц агглютинатов из сборов Луна-20 (СЭМ, обратно-рассеянные электроны). (Б) Общий вид пробы из сборов миссии «Чанье-5» выбранный для исследования (СЭМ, обратно-рассеянные электроны). Красным прямоугольником обведена частица агглютината, выбранная для прецизионного анализа методом ПЭМ.

Сортировка и отбор продуктов выброса сопровождалась многоуровневой аналитикой. На первом этапе образцы в виде шлифов и эпоксидных «шашек» изучались в отражённом свете оптического микроскопа для оперативного выявления крупноразмерных капель, микротрещин, пузырьков и зон смешения расплавов. Далее применялась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) в режимах SE/BSE (вторичные и обратно-рассеянные электроны) на установках JEOL JSM-6480LV и TESCAN MIRA 3, оснащённых энергодисперсионными спектрометрами Oxford X-MaxN. Ускоряющее напряжение составляло, как правило, 15–20 кВ для ЭДС-анализа и 5–10 кВ для мелких и приповерхностных объектов. Практический предел обнаружения методом ЭДС для основных и ряда примесных элементов составлял порядка 0,1 мас.%; WDS обеспечивал более высокую чувствительность — до ~0,01 мас.% для ряда компонентов.

Нанофазные объекты, в первую очередь сферулы металлического железа npFe^0 , исследовались методами просвечивающей и сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (TEM/STEM) на микроскопе FEI Tecnaï G20 F20 S-TWIN при 200 кВ с ЭДС-системой EDAX Apollo. Тонкие ламели для ПЭМ изготавливались методом фокусированного ионного пучка (ФИП) на двулучевом микроскопе Helios NanoLab 660 с нанесением защитного Pt-слоя и последовательным утонением до толщины менее 200 нм, с финальной низкоэнергетической обработкой для уменьшения аморфизованного слоя. STEM-режим (сканирующе-просвечивающий режим) с размером зонда около 1 нм обеспечивал картирование распределения

элементов на наномасштабном уровне, а SAED (дифракция электронов) и HRTEM (просвечивающая микроскопия высокого разрешения) позволяли идентифицировать кристаллическую структуру нанофаз, оценивать межплоскостные расстояния и отличать металлическое железо от оксидных и сульфидных фаз.

Для измерения химического состава наносферул железа в экспериментальных продуктах и в агглютинатах «Луны-20» использовался специальный методический приём: каждая сферула анализировалась не менее четырёх раз с поворотом столика на 90°, что позволяло уменьшить геометрические эффекты, связанные с частичным перекрытием пучка и вкладом окружающей матрицы. Ускоряющее напряжение при этом не превышало 10 кВ, а высокопрецизионная настройка размера пучка позволяла получать полуколичественные и количественные данные для сферул диаметром примерно от 0,8–1 мкм и более.

Таким образом, во второй главе диссертации сформирован и обоснован комплексный методический подход, включающий специальную лазерную установку, репрезентативный набор мишеней, стандартизованный отбор и классификацию продуктов выброса, микро- и наноаналитические методы и численное сопоставление с моделью микрометеоритного удара. Этот комплекс служит основой для последующего количественного анализа испарительной дифференциации вещества, механизма образования нанофазного железа и сопоставления экспериментальных продуктов с образцами лунного грунта.

В главе 3 диссертации рассматривается испарительная дифференциация базальтового вещества при ударном плавлении, моделируемом миллисекундным лазерным импульсом, и сопоставление полученных результатов с данными по лунным ударным стёклам типа HASP. Исходным мотивом служат экспериментальные данные показывающие, что при высокотемпературном плавлении и частичном испарении базальтов происходит систематическое обеднение расплава умеренно- и легколетучими оксидами (K, Na, Fe, Si и др.) и обогащение остаточного расплава труднолетучими (Ca, Ti, Al), установленные в экспериментах по испарению (DeMaria et al., 1971; Яковлев и др., 1972; Naney, 1976; Ulyanov et al., 1981; Маркова и др., 1986; Казенас, Цветков, 1997). В условиях лазерного «удара» эти процессы должны разворачиваться за время импульса порядка 10^{-3} с, и задача эксперимента заключалась в том, чтобы проследить, насколько глубокой может быть испарительная переработка расплава за столь короткий промежуток и насколько получающиеся продукты сопоставимы с ударными стёклами лунного реголита.

При воздействии мощного лазерного импульса на базальтовую мишень (кристаллический базальт и базальтовое стекло) в зоне кратера формируется высокотемпературный парогазовый фронт, который, расширяясь, диспергирует расплав и выбрасывает его из кратерной полости. В полёте капли расплава под действием поверхностного натяжения приобретают сферическую форму, а затем быстро закаляются, превращаясь в стеклянные шарики различного размера, от единиц до десятков микрометров (рис. 4 А). Одновременно на холодных подложках осаждаются хлопьевидные конденсатные плёнки, состоящие из агломератов субмикронных частиц (рис. 4 Б). Химический состав конденсата, оцененный методом СЭМ–ЭДС, показывает его обогащение SiO_2 и щелочными компонентами (Na_2O , K_2O) по сравнению с исходным базальтом, что уже на качественном уровне указывает на комплементарность конденсата и остаточного расплава.

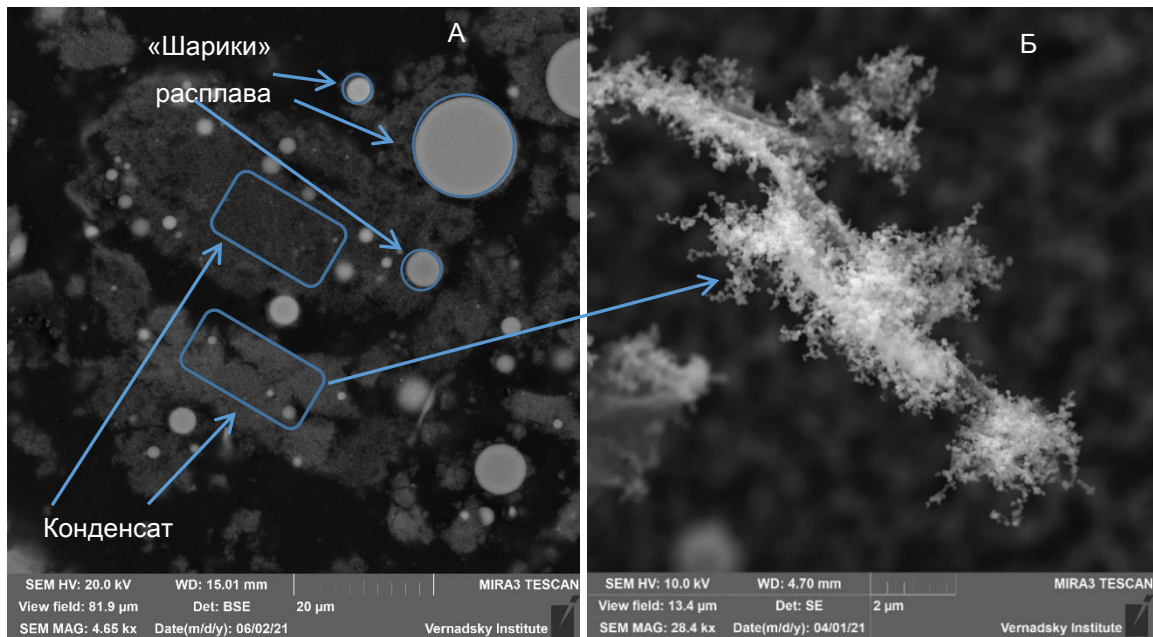


Рис. 4. (А) Изображение гомогенных стеклянных шариков в продуктах выброса из кратера кристаллического базальта, полученное сканирующим электронным микроскопом. Сплошные серые массы — конденсатные плёнки. (Б) Морфология хлопьев конденсата.

Основной объект количественного анализа — стеклянные шарики, прошедшие через стадию ударного нагрева, плавления, частичного испарения и последующей закалки. Всего было проанализировано 110 шариков размером приблизительно 1–45 мкм, образовавшихся при воздействии на кристаллический базальт, и 179 шариков размером около 1–60 мкм, полученных из базальтового стекла (рис. 5, 6, 7).

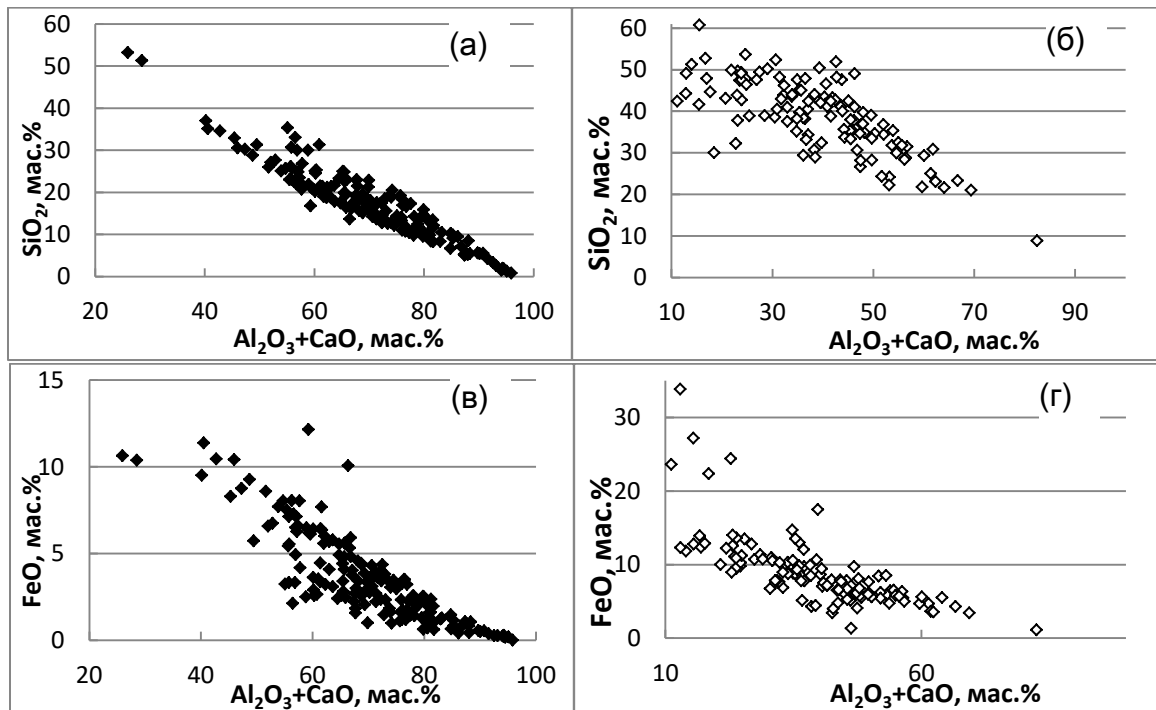


Рис. 5. Распределения оксидов SiO_2 и FeO в зависимости от содержания труднолетучих компонентов в стеклянных шариках: а, в — шарики из базальтового стекла; б, г — шарики из базальта кристаллического.

Состав шариков в опытах с базальтом показывает чрезвычайно широкий диапазон вариаций основных оксидов: в продуктах кристаллического базальта содержание FeO изменяется приблизительно от 1 до 52 мас.%, а SiO₂ — примерно от 9 до 60 мас.%; среди шариков из базальтового стекла при наиболее глубокой переработке FeO уменьшается до ~0,2 мас.%, а SiO₂ — до ~0,7 мас.%. На диаграммах «FeO–(CaO + Al₂O₃)» и «SiO₂–(CaO + Al₂O₃)» для обеих серий опытов хорошо выражена обратная корреляция между более летучими и труднолетучими компонентами (рис. 5): по мере роста суммы Al₂O₃ + CaO содержание FeO и SiO₂ падает. Между CaO и Al₂O₃, наоборот, наблюдается прямая корреляция, что отражает сходство их поведения при испарении как труднолетучих оксидов. В продуктах из кристаллического базальта разброс составов заметно шире, чем в опытах с базальтовым стеклом, что связано, прежде всего, с исходной минеральной неоднородностью мишени и неполной гомогенизацией расплавов различных фаз (рис. 5).

Анализ тройных диаграмм и гистограмм (рис. 6, 7) позволяет сопоставить экспериментальные тренды с известным рядом летучести оксидов базальтового расплава, полученным в испарительных экспериментах (Яковлев и др., 1972; Маркова и др., 1986).

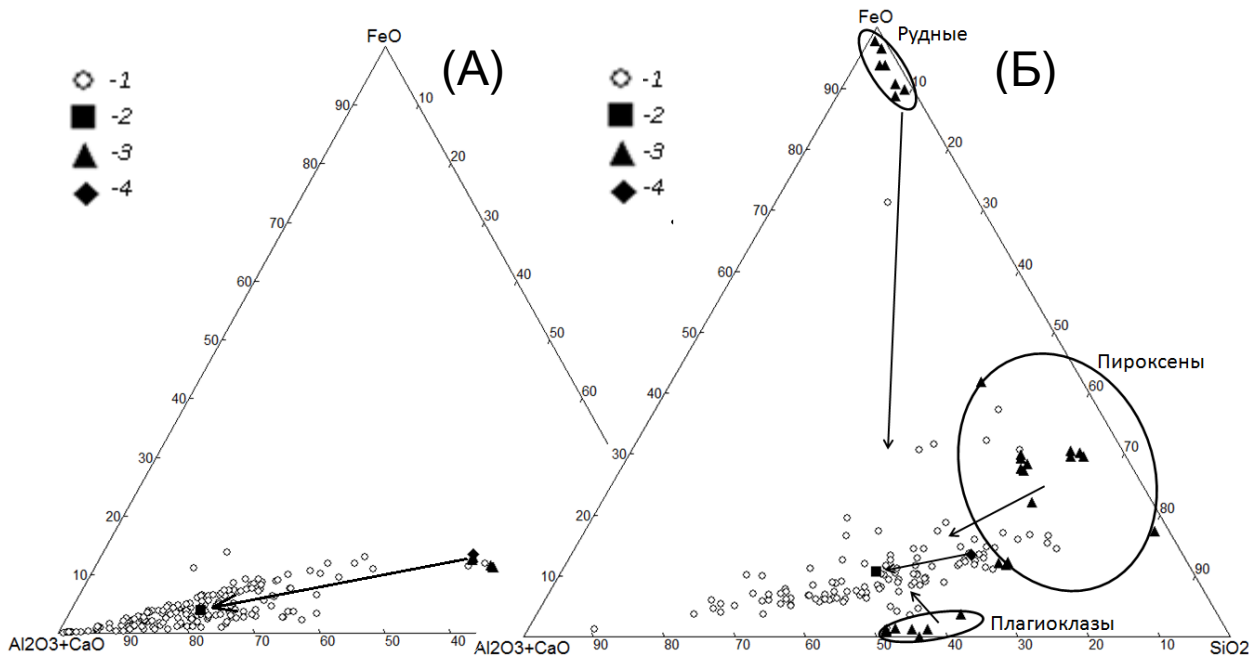


Рис. 6. Тройные диаграммы химического состава шариков расплава. (А) Шарик, полученные из базальтового стекла. (Б) Шарик, полученные из базальта. Стрелками показаны тренды изменения исходного химического состава после плавления и испарения материала мишени. (А): 1 - шарик из опыта с базальтовым стеклом; 2 - среднее по шарикам из опыта с базальтовым стеклом; 3 - исходное базальтовое стекло; 4 - РФА (рентгенофлуоресцентный анализ) исходного базальта. (Б): 1 - шарик из опыта с базальтом; 2 - среднее по шарикам из опыта с базальтом; 3 - минералы мишени (базальт); 4 - РФА исходного базальта.

Показано, что по мере роста температуры и продолжительности воздействия расплав теряет компоненты в последовательности $(K_2O + Na_2O) \rightarrow FeO \rightarrow SiO_2 \rightarrow MgO \rightarrow (CaO \approx TiO_2) \rightarrow Al_2O_3$, что позволяет разделить главные петрогенные оксиды на три класса по летучести: легколетучие (K_2O , Na_2O , FeO), умеренно летучие (SiO_2 , MgO) и труднолетучие (CaO , TiO_2 , Al_2O_3). В опытах с базальтовым стеклом, по сравнению с кристаллическим базальтом, испарительная дифференциация выражена

значительно сильнее: при близком исходном содержании SiO_2 порядка 49–52 мас.% среднее содержание кремнезёма в шариках из кристаллического базальта составляет ~38 мас.%, тогда как в шариках из базальтового стекла ~17 мас.% (рис. 6, 7). Различие связано прежде всего со структурным состоянием исходного вещества: в кристаллическом базальте химический эффект испарения накладывается на неоднородность исходных минеральных фаз и отличных от стекла теплофизических свойств кристаллического состояния, тогда как в гомогенном стекле собственно испарительный тренд проявляется значительно отчётливее. Лазерный эксперимент показал, что даже за время импульса $\sim 10^{-3}$ с базальтовый расплав успевает пройти глубокое испарительное фракционирование.

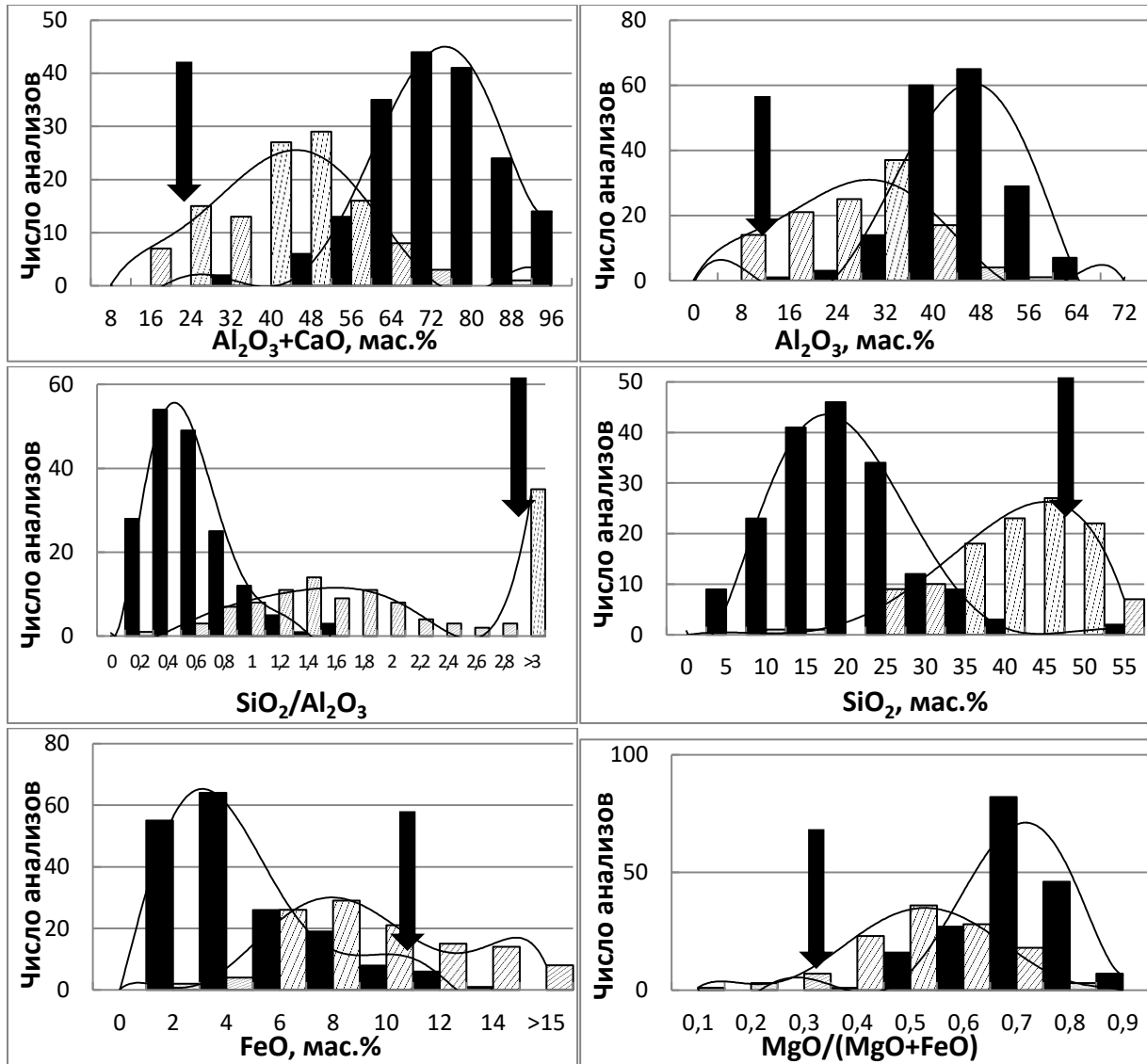


Рис. 7. Гистограммы сравнения двух экспериментов: заштрихованные столбики соответствуют опыту с кристаллическим базальтом, чёрные — с базальтовым стеклом. Стрелкой показаны исходные содержания в базальте.

Полученные данные были сопоставлены с составами ударных стёкол лунного реголита, прежде всего высокоглинозёмистых, бедных кремнезёмом стёкол типа HASP (High Alumina, Silica Poor), представленных в коллекциях миссий «Аполлон» (Naney et al., 1976; Vaniman et al., 1977; Warren, 2008). Характерные признаки HASP-стёкол — $\text{Al}_2\text{O}_3 > 34$ мас.% и $\text{SiO}_2 < 32$ мас.%. Анализ показал, что в опытах с кристаллическим базальтом около 25 % стеклянных шариков прошли глубокую

испарительную дифференциацию, тогда как в опытах с базальтовым стеклом доля таких составов достигает ~90 % (см. рис. 6). Диаграммы отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ к сумме $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ (рис. 8) демонстрируют единый тренд для экспериментальных стёкол и лунных HASP-стёкол: по мере роста содержания труднолетучих компонентов отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ монотонно снижается. В работах по лунным породам установлен петрохимический предел $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 1,18$ (отношение в чистом анортите), ниже которого составы обычных лунных магматических пород маловероятны (Яковлев и др., 2018). В рассматриваемых силикатных системах отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$ может использоваться как диагностический признак глубокой ударно-испарительной переработки.

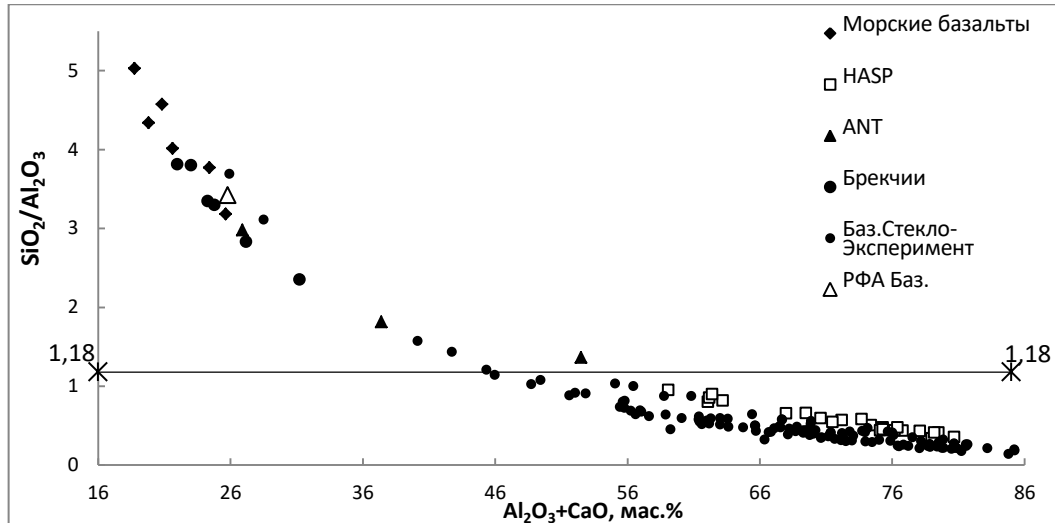


Рис. 8. Отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от суммы труднолетучих оксидов $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ в образцах лунных пород (Heiken, 1991; Warren, 2008; Naney et al., 1976; Vaniman et al., 1977), а также в базальтовой мишени и шариках, полученных в эксперименте. Линией при 1,18 (отношение оксидов в чистом анортите) обозначен петрохимический предел, ниже которого составы магматических пород маловероятны.

Морфология кратерного стекла, формирующегося в мишени, также согласуется с ударной природой структур, наблюдаемых в лунном реголите. Разрез кратера (рис. 9) демонстрирует зону плавления с ярко выраженными текстурами течения и переходом от кристаллического материала к стеклу. Аналогичные текстуры описаны в лунных продуктах ударной переработки (Stöffler, 1972; Schaal, Hörz, 1977; Basu, 2005; Heiken, 1991; Hörz, 1991). Их сходство показывает общность конечной высокотемпературной стадии — образования подвижного силикатного расплава и его быстрой заделки.

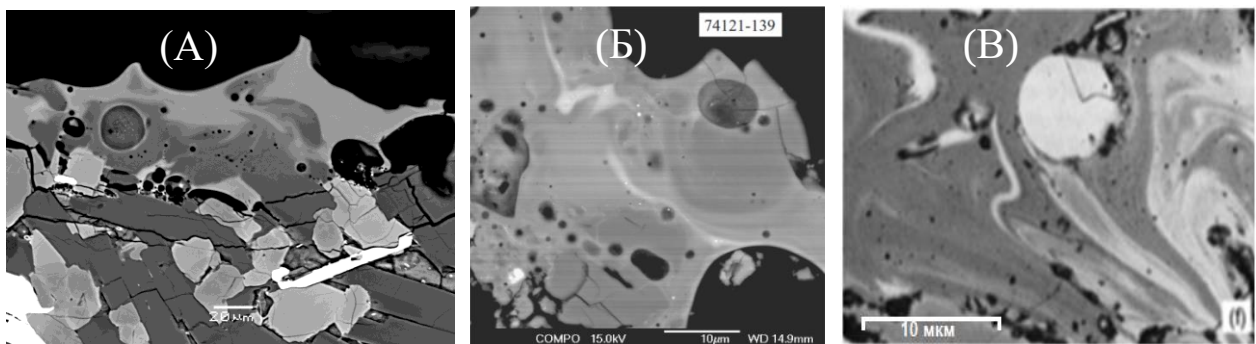


Рис. 9. (А) Изображение текстуры плавления на контакте с минеральными фазами в зоне разреза кратера по кристаллическому базальту. (Б) и (В) Текстуры течения, обнаруженные в доставленных образцах лунного грунта (по данным Basu, 2005 — (Б) и Hörz, 1991 — (В)).

В совокупности результаты главы показывают, что миллисекундный лазерный «удар» по базальтовым мишеням воспроизводит ключевые черты испарительной дифференциации, наблюдаемой в лунном реголите. Корреляции между оксидными компонентами в стеклянных шариках соответствуют экспериментально установленному ряду летучести: первично теряются лёгко- и умеренно летучие оксиды (Na_2O , K_2O , FeO , SiO_2), тогда как труднолетучие CaO , TiO_2 и Al_2O_3 накапливаются в остаточном расплаве. Тот же тренд фиксируется в HASP-стёклах лунного реголита, где остаточные стёкла комплементарны конденсатным фазам, обогащённым более летучими компонентами (Warren, 2008). Показано, что уже за время порядка 10^{-3} с возможно формирование высокоглинозёмистых, бедных кремнезёмом составов, аналогичных HASP-стёклам лунного реголита. Отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$ предлагается использовать как диагностический критерий глубокой ударно-испарительной переработки силикатного вещества.

В главе 4 рассматриваются условия и механизм формирования наносферул металлического железа (npFe^0) в условиях импульсного лазерного нагрева, моделирующего микрометеоритное воздействие на различные минеральные и стекловидные мишени, и сопоставление полученных текстур с нанофазным железом в лунном реголите. Показано, что npFe^0 может образовываться непосредственно *in situ* в силикатном расплаве за счёт термически индуцированного восстановления Fe-содержащего вещества при высоких температурах, без обязательного участия восстановителя и без обязательного прохождения Fe через стадию испарения и последующей конденсации.

Лазерные эксперименты с кристаллическим базальтом и базальтовым стеклом показали резкий контраст в эффективности образования npFe^0 . В кратере по кристаллическому базальту фиксируются лишь единичные железные сферулы. Структура кратера характеризуется тонкой зоной стекловидного расплава, подстилаемой областью интенсивной трещиноватости и пузырьчатости, но объём гомогенизированного высокотемпературного расплава невелик. При одинаковом валовом содержании FeO в кристаллическом базальте и изготовленном из него стекле такое различие показывает существенную роль структурного состояния исходного вещества и степени гомогенизации расплава. В отличие от этого, кратер по базальтовому стеклу (рис. 10) демонстрирует развитую зону расплава, в которой на кромке кратера выделяются светлые области, обогащённые тугоплавкими оксидами Al_2O_3 , CaO , TiO_2 и обеднённые умеренно и легколетучими компонентами, прежде всего SiO_2 , Na_2O и K_2O . ЭДС-профили через эти зоны фиксируют резкие провалы по SiO_2 и сопряжённый рост Al_2O_3 и частично CaO и TiO_2 , что согласуется с механизмами испарительной дифференциации, рассмотренными в третьей главе (Sorokin et al., 2020). В тех же светлых зонах и на их границах выявляются многочисленные цепочки и россыпи npFe^0 , представленные глобулами от десятков нанометров до ~ 2 мкм (рис. 10, 11).

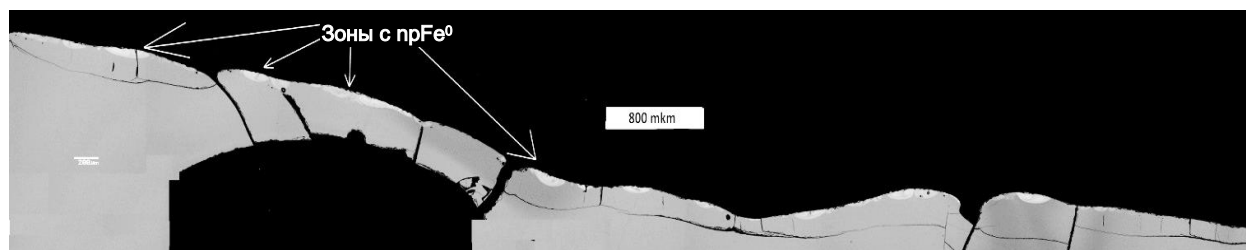


Рис. 10. Поперечное сечение ударного кратера в образце базальтового стекла (SEM, BSE).

На поверхности кратера видны светлые участки с цепочками и россыпями prFe^0 . Диаметр кратера ≈ 6 мм, глубина 0,6 мм.

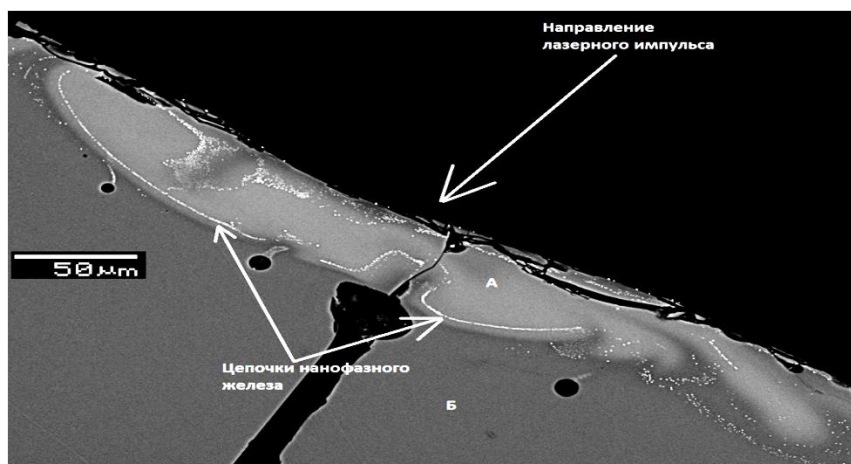


Рис. 11. Сечение кратера в базальтовом стекле с цепочками наножелеза (SEM): А – светлая зона, обеднённая умеренно и легколетучими компонентами; Б – область исходного базальтового стекла.

Морфология нанофазного железа в базальтовом стекле включает два основных типа: тонкие упорядоченные цепочки вытянутой формы, приуроченные к границам зон, претерпевших испарительную дифференциацию, и разобщённые россыпи изолированных сферул, иногда образующих плёнки-покровы на поверхности кратера (рис. 12). Структурирование prFe^0 в цепочки и полигональные образования может быть связано с перераспределением металлической фазы в подвижном расплаве при закалке и, вероятно, также участие термокапиллярных потоков (эффект Марангони). Во многих участках наблюдается пространственная сопряжённость скоплений prFe^0 с газовыми пузырьками (рис. 13), что указывает на тесную связь образования металлической фазы с дегазацией высокотемпературного расплава. Газовая фаза могла включать продукты дегазации и испарения исходного материала, а также кислород, выделяющийся при восстановлении железа.

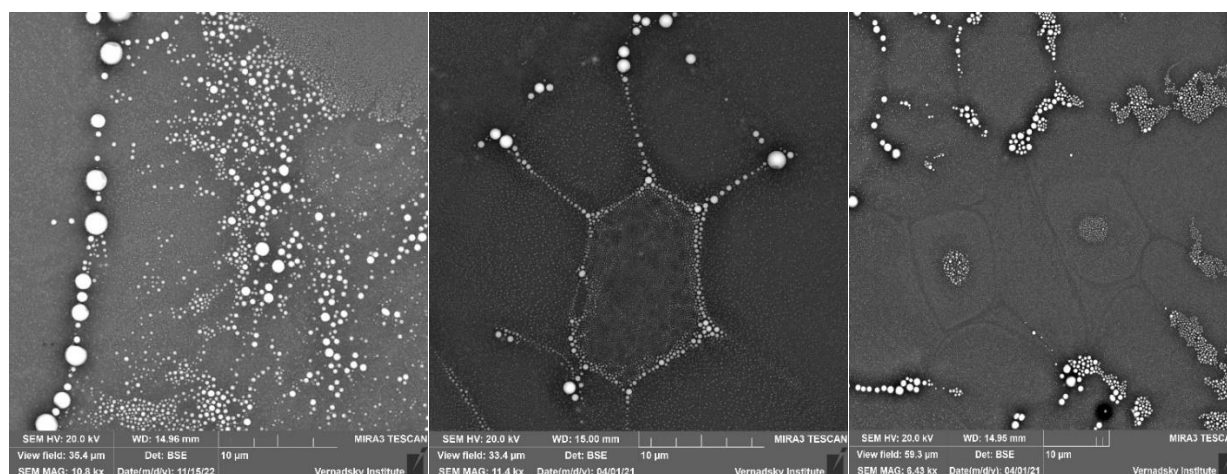


Рис. 12. Текстуры распределения prFe^0 на поверхности кратера в базальтовом стекле в разных участках кратера (СЭМ, BSE).

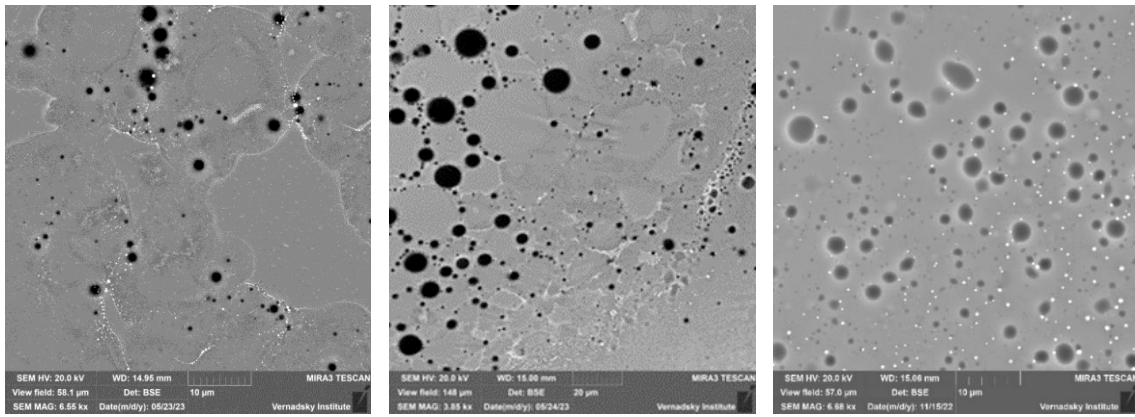


Рис. 13. Структуры, содержащие и prFe^0 и пузырьки на поверхности кратера в базальтовом стекле в разных участках кратера (СЭМ, BSE).

Серия опытов с ультраосновными мишенями показала, что эффективность генерации prFe^0 сильно зависит как от минерального состава, так и от исходного содержания FeO . В *перидотитовых* мишенях ($\text{FeO} \approx 11$ мас.%), где в условиях импульсного нагрева формируется смешанная зона рекристаллизованного материала и аморфного стекла, обнаруживаются россыпи и цепочки железных наноглобул на границах этих зон и в сопровождении скоплений газовых пузырьков. В *олиивине* (с содержанием $\text{FeO} \approx 12,9$ мас.%) кратер характеризуется высокой степенью раскристаллизации: поверхность кратера покрыта многочисленными микрокаплями, по составу близкими к исходному оливину, что свидетельствует о чрезвычайно быстром росте кристаллов из маловязкого расплава. На гранях кристаллов и в новообразованных расплавах фиксируются как единичные, так и плотные россыпи металлических сферул, причём значительная часть prFe^0 располагается вдоль вытянутых граней в виде одной–двух параллельных цепочек (рис. 14 А). В *железистом олиивине* (с содержанием $\text{FeO} \approx 26$ мас.%) при тех же условиях наблюдается наиболее интенсивное выделение металлической фазы: поверхность кратера почти сплошь покрыта плотными скоплениями сферул диаметром от единиц до десятков микронетров (рис. 14 Б).

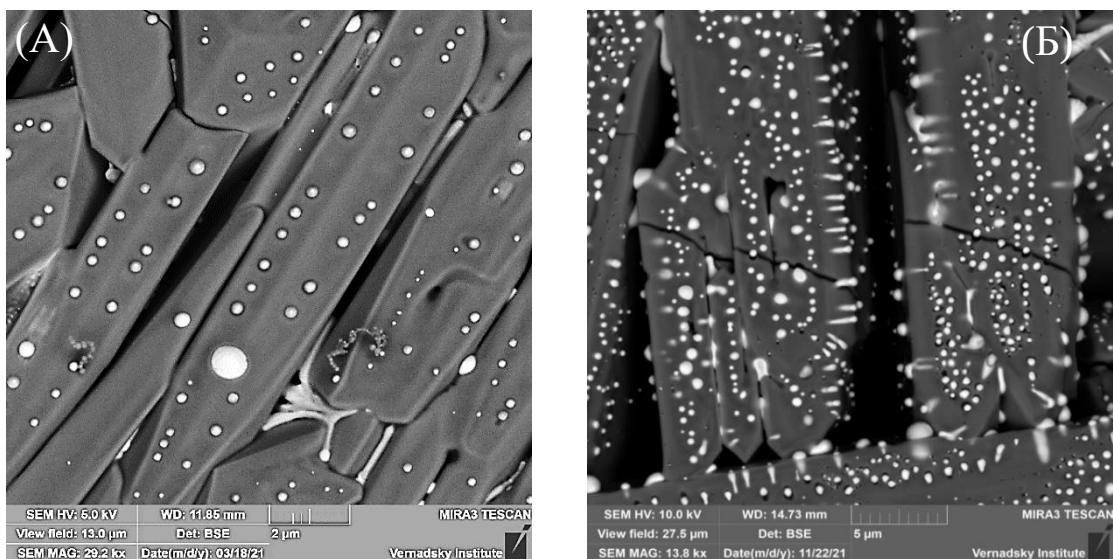


Рис. 14. Зоны кратера в олиивине (вид в плане, сверху): (А) — зона кратера олиивина (хризолита) во вторичных электронах. Металлические железные сферулы, расположенные вдоль граней кристаллов олиивина, образовавшиеся из расплава (SEM). (Б) Кристалл железистого олиивина с многочисленными россыпями prFe^0 .

Здесь фиксируются как округлые, так и вытянутые железные включения, ориентированные перпендикулярно граням кристаллов, а также многочисленные полости и поры, интерпретируемые как усадочные или газовые.

В опытах с менее железистым *оливином-хризолитом* (с содержанием $\text{FeO} \approx 9$ мас.%) npFe^0 образуется заметно в меньшем количестве, что связывается с более низким исходным содержанием железа.

В разрезе кратера выделяются несколько зон (рис.15): раскристаллизованный оливиновый расплав со средним содержанием FeO , более глубинная зона весьма магнезиального оливина с пониженным FeO и максимальными концентрациями россыпей npFe^0 и, наконец, исходный монокристалл с более высоким содержанием FeO . Такая зональность по железу и магнию согласуется с моделями термовосстановления и истощения расплава по FeO (Арискин и др., 2008; Yakovlev et al., 2009).

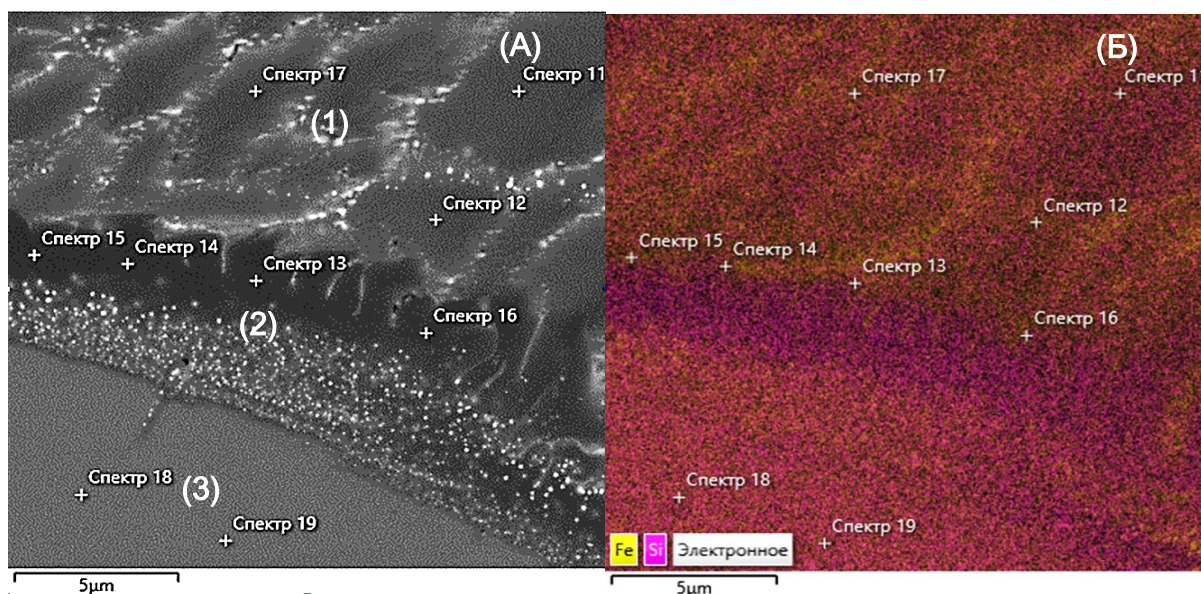


Рис.15. (А) Снимок зоны разреза кратера, включающий зоны: (1) раскристаллизации оливинового расплава; (2) зону частичной раскристаллизации с россыпями npFe^0 ; (3) исходный монокристалл оливина. (Б) Карта распределения атомов Fe и Si (СЭМ, BSE).

Пироксеновые мишени демонстрируют морфологическое разнообразие npFe^0 , частично аналогичное оливину. На поверхности кратеров выявляются цепочки и россыпи наноглобул, образующие полигональные, часто шестиугольные узоры, а в ортопироксене дополнительно развиты дендритные структуры металлического железа. Цепочечные и полигональные текстуры отражают перераспределение металлической фазы в подвижном расплаве и могут быть связаны с кристаллизационными и термокапиллярными процессами, тогда как дендритные структуры характерны для быстрого неравновесного охлаждения.

Обобщение результатов по всем типам мишеней показывает, что образование npFe^0 в рассматриваемых условиях контролируется преимущественно термовосстановлением Fe-содержащего вещества в зоне высокотемпературного расплава при пониженном химическом потенциале кислорода. Процесс можно представить равновесием $\text{FeO(распл.)} = \text{Fe}^0 + \frac{1}{2}\text{O}_2$. Удаление кислорода из локально нагретой зоны — как с газовой фазой, так и путём диффузионного переноса — способствует смещению равновесия в сторону восстановленного железа. Диаграмма устойчивости оксидов в координатах $T\text{--}p\text{O}_2$ (рис. 16) показывает расширение области устойчивости металлического Fe при высоких температурах и низком

кислородном потенциале. В модельных системах с температурами значительно выше ликвидуса оливина при фиксированной фугитивности кислорода наблюдается накопление металлического железа и параллельное истощение расплава по FeO и обогащение по Mg (Яковлев и др., 1987; Аriskин и др., 2008), что хорошо согласуется с зональностью в оливиновых мишенях (см. рис. 15).

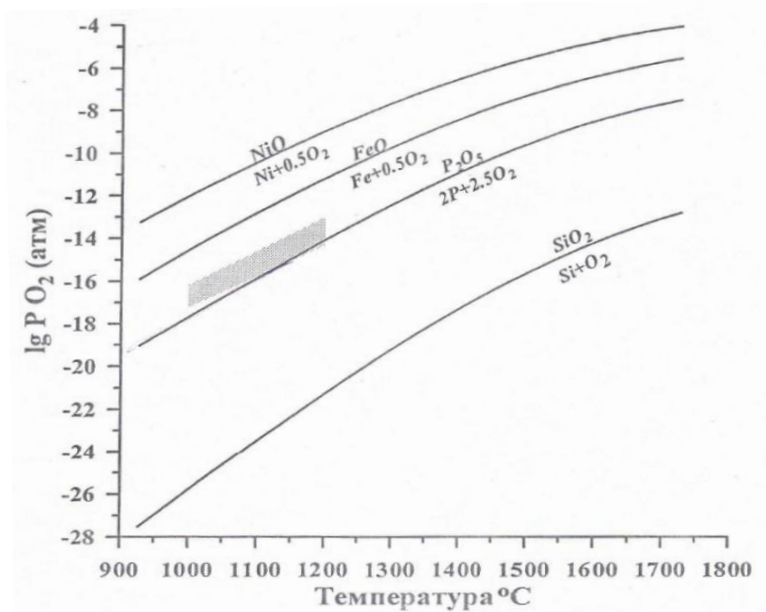


Рис. 16. Диаграмма устойчивости оксидов металлов в координатах «температура — парциальное давление кислорода». Закрашенная область иллюстрирует диапазон P_{O_2} , характерный для лунной поверхности. При высоких температурах это соответствует условиям диссоциации FeO и выделения металлического железа

Кинетически рост наночастиц железа реализуется через сочетание нуклеации мелких доменов, диффузионного притока Fe к зародышам, столкновения и коалесценции металлических капель в силикатном расплаве, после чего быстрая закалка фиксирует цепочки, дендритные и полигональные структуры. Существенное значение имеет длительность лазерного импульса: при миллисекундном нагреве время жизни расплава и, следовательно, время диффузии и коалесценции больше, чем при наносекундных импульсах или реальных микрометеоритных ударах, что способствует укрупнению части сферул до микронных размеров по сравнению с типичными наночастицами в лунном реголите (McKay et al., 1991; Thompson et al., 2017). Это различие относится прежде всего к кинетике последующего роста уже сформировавшейся металлической фазы.

Сопоставление экспериментальных текстур с текстурами лунных агглютинатов, доставленными миссией «Луна-20» и Chang'e-5, показало близкое сходство форм и характера распределения $npFe^0$ (рис. 17). В лунных образцах также выделяются цепочки и россыпи металлических наноглобул, расположенные внутри стеклянной матрицы, вдоль границ микрокристаллитов и текстур течения. Это сходство поддерживает возможность образования или перераспределения по крайней мере части лунного $npFe^0$ непосредственно во время существования ударного расплава. Эксперимент, таким образом, показывает самостоятельный механизм формирования металлического Fe *in situ* в силикатном расплаве, для которого не обязательно предварительное участие ионов солнечного ветра или перенос Fe через паровую фазу.

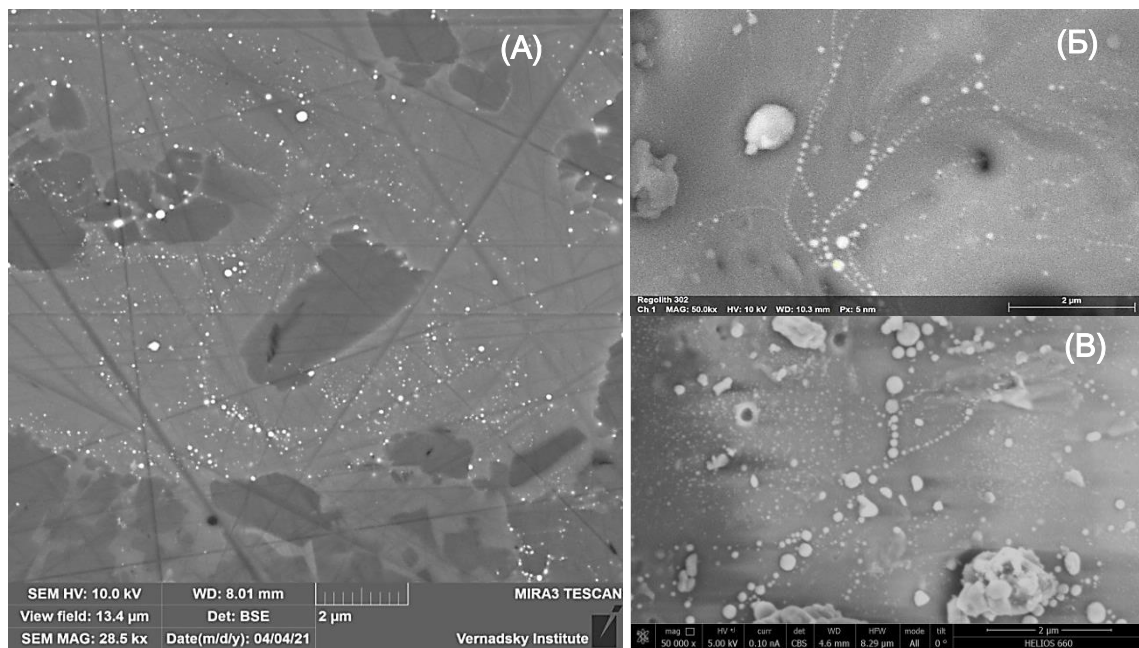


Рис. 17. (А) Зерно лунного агглютината с зонами, содержащими россыпи и цепочки prFe^0 . Образец лунного грунта, доставленный космическим аппаратом «Луна-20». (Б-В) - Зоны россыпей и цепочек наносферул металлического железа в частицах лунного грунта доставленных миссией Chang'e-5 (СЭМ, BSE). Материал предоставлен С.И. Демидовой (лаборатория метеоритики, ГЕОХИ РАН).

В главе 5 рассматривается примесный состав наносферул металлического железа, сформировавшихся в лазерно-ударных экспериментах на разных типах мишеней, с целью проследить закономерности перераспределения элементов между металлической фазой и силикатным расплавом и сопоставить экспериментальные результаты с prFe^0 лунного реголита, доставленного миссиями «Луна-20» и Chang'e-5.

Наиболее детально изучен состав prFe^0 , сформировавшихся в эксперименте по **базальтовому стеклу**. В поверхностной зоне кратера было проанализировано 28 сферул, а в профиле кратера – ещё 15. Сферулы по сравнению с окружающей их стеклянной матрицей демонстрируют резкое обогащение Ni, P и, в меньшей степени, Cr. Содержание Ni в prFe^0 достигает 0,46 мас.% (среднее около 0,25 мас.%), притом, что в стеклянной матрице Ni часто на уровне или ниже порога обнаружения. Фосфор в сферулах достигает 13 мас.% (в среднем ~5 мас.%), тогда как в стекле его среднее содержание составляет 0,13 мас.% при максимуме 0,36 мас.%. Хром в prFe^0 достигает 0,16 мас.% (среднее ~0,05 мас.%), тогда как в матрице его содержание, как правило, на уровне предела обнаружения. Таким образом, металлические сферулы выступают эффективными концентраторами Ni и P (обогащение в десятки раз) и в меньшей степени Cr по отношению к силикатному расплаву.

Важной примесью в prFe^0 по базальтовому стеклу оказался кремний. В ряде сферул содержание Si превышает 15 мас.% (среднее около 8,5 мас.%). Такие частицы можно рассматривать как Fe–Si-обогащённые, или силицидоподобные, металлические образования, сходные по общему направлению состава с силицидами железа (хапкеитом, суисситом и родственными фазами), описанными в лунном веществе (Nazarov et al., 2012; Gopon et al., 2017). Высокое содержание Si показывает возможность его перехода в Fe-содержащую фазу при сильном локальном восстановлении.

Сравнение составов prFe^0 и матрицы позволяет уверенно установить сам факт и направление перераспределения элементов: никель, фосфор и частично хром концентрируются в металлической фазе, тогда как литофильные компоненты (Al_2O_3 , CaO) остаются преимущественно в стекле. Аналогичные тенденции прослеживаются и в сферах из профиля кратера, что указывает на устойчивость обогащения Ni и P в металлической фазе независимо от глубины в расплавленной зоне.

ПЭМ-STEM-картирование показало, что даже сферулы диаметром в несколько десятков нанометров (порядка 50–70 нм) остаются заметно обогащёнными Ni, P и S по сравнению с окружающим стеклом (рис. 18). Таким образом, накопление этих примесей проявляется уже в наномасштабной металлической фазе и начинается на ранних стадиях формирования prFe^0 .

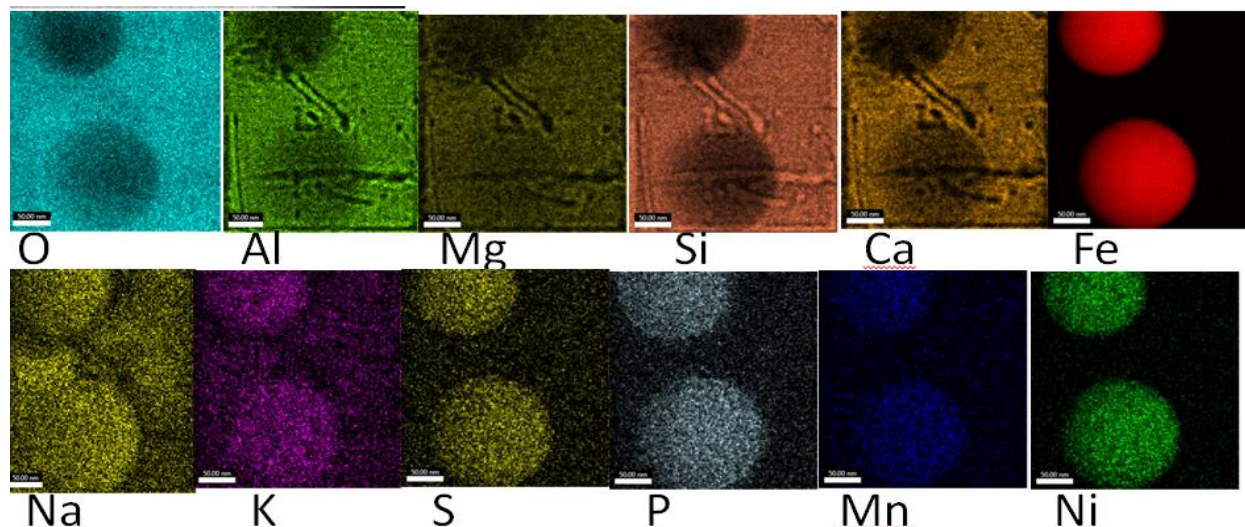


Рис. 18. Карты распределения химических элементов внутри prFe^0 и в окружающей их стеклянной матрице по данным ПЭМ-STEM-EDS.

В кратере по *железистому оливину* была зафиксирована обильная генерация prFe^0 , однако для количественного анализа СЭМ ЭДС были отобраны преимущественно наиболее крупные сферулы. Основным элементом-примесью в этих сферулах является Ni. При исходном содержании Ni в оливине порядка 0,1 мас.% в металлических каплях его среднее содержание возрастает до 0,3 мас.% (максимум 0,6 мас.%). Содержание P и S в prFe^0 по оливину, как правило, минимально, что подчёркивает прежде всего примесный состав материала-мишени. В опытах с *ортопироксеном* к Ni добавляется фосфор: среднее содержание Ni в сферулах достигает 1 мас.% (максимум 4 мас.%), а P – около 0,3 мас.% (максимум 0,5 мас.%). Это свидетельствует о том, что и никель, и фосфор обладают высокой склонностью к переходу в металлическую фазу при ударном плавлении ортопироксена, даже если их исходные содержания в минерале невелики.

Особенно показателен опыт с *Cr-диопсидом*. Здесь в сферулах prFe^0 , помимо Ni, обнаруживаются значительные количества Cr и S. Среднее содержание никеля составляет около 4,5 мас.% (максимум до 9 мас.%) при исходном содержании около 0,05 мас.%; серы — порядка 0,15 мас.% (максимум ~0,45 мас.%), тогда как в исходном образце она находилась ниже порога обнаружения; хрома — около 9,5 мас.% (максимум 14 мас.%) при ~0,7 мас.% в исходном образце. На этом фоне фосфор практически отсутствует. Такие данные показывают интенсивное перераспределение Ni и Cr в сферулы prFe^0 Cr-диопсидовой мишени, а также присутствие в них серы.

В опытах с *ильменитом* картина существенно отличается. Согласно результатам опробования исходной мишени ($\text{TiO}_2 \sim 56$ мас.%, $\text{FeO} \sim 43,5$ мас.%, $\text{MnO} \sim 1,4$ мас.% и Co, Zn, Nb на уровне десятых долей процента), при лазерном воздействии в кратере образуется сравнительно небольшое число сферул prFe^0 размером 0,7–2 мкм. Основным элементом-примесью в этих сфераулах становится Co: его среднее содержание в prFe^0 увеличивается примерно вдвое по сравнению с матрицей (0,4 мас.% против 0,15 мас.%). Хорошо выражено также резкое падение концентраций Mn, Nb и V при переходе от стекла к металлической фазе: для Mn — примерно с 1,1 до 0,17 мас.%, для Nb — с 0,3 до 0,03 мас.%; V преимущественно остаётся в оксидной фазе.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что сфераулы prFe^0 являются селективными концентраторами примесных компонентов. Наиболее устойчиво в нескольких изученных системах накапливается Ni; P особенно интенсивно концентрируется в металлической фазе базальтового стекла и присутствует в ортопироксене; S выявлена в prFe^0 базальтового стекла и Cr-диоксида; Co концентрируется в ильменитовой системе. В отдельных системах частицы prFe^0 также обогащаются Cr и Si, тогда как Mn, Nb и V преимущественно остаются в оксидно-силикатной фазе. Набор концентрирующихся элементов при этом зависит от химического и минерального состава мишени. Переход к наномасштабным частицам не отменяет этих закономерностей: даже наноглобулы диаметром в первые десятки нанометров обогащены Ni, P и S.

Далее в главе 5 представлены результаты исследования примесного состава наносферул металлического железа в частицах лунного реголита, доставленного миссиями «Луна-20» и «Chang'e-5», с использованием комплекса методов СЭМ, FIB и ПЭМ-STEM. Это позволяет непосредственно сопоставить установленные в лазерных экспериментах закономерности с природным лунным веществом.

В частицах агглютинатов «Луны-20» обнаружены обильные россыпи и цепочки prFe^0 , для которых применялась та же методика многократного СЭМ-ЭДС-анализа при пониженном напряжении. Всего было проанализировано 15 сферул. В их составе уверенно фиксируются P, S, Co, Ni, а также Cu. Средние содержания этих элементов (мас.%) составляют: P — 0,4 (максимум 1,2), S — 0,6 (максимум 1,75), Co — 0,85 (максимум 2,1), Ni — 5 (максимум 19), Cu — 0,01 (максимум 0,16), при этом окружающая стеклянная матрица значительно беднее этими компонентами. Таким образом, Fe-содержащие сфераулы в агглютинатах «Луны-20», как и в экспериментах, концентрируют Ni, Co, P и S относительно окружающего силикатного вещества.

Проба грунта, доставленного миссией «Chang'e-5», была предварительно охарактеризована в обратно-рассеянных электронах СЭМ. Для детального изучения prFe^0 была выбрана частица агглютината размером до 40 мкм, сложенная обломками минералов в силикатном стекле с содержанием SiO_2 порядка 50 мас.%. Из частицы методом FIB была подготовлена электронно-прозрачная ламель для исследования методом ПЭМ/STEM. В ней выявлены многочисленные частицы prFe^0 размером от первых десятков до первых сотен нанометров; электронная дифракция и HRTEM подтвердили для исследованных частиц структуру $\alpha\text{-Fe}$.

Картирование основных пороодообразующих (Si, Al, Fe и др.) и примесных элементов (S, P, Ni) по срезу агглютината «Chang'e-5» показало, что на масштабе единиц-десятков микрометров стеклянная матрица и мелкообломочный материал химически неоднородны по главным компонентам, тогда как S, P и Ni вне металлических частиц по данным STEM-EDS равномерно распределены и находятся

преимущественно около порога обнаружения порядка 0,1 мас.%. В то же время максимумы Ni, P и S пространственно приурочены к сферам наножелеза, что указывает на их накопление непосредственно в металлической фазе.

Химический состав наносферул в частицах реголита «Chang'e-5» изучался методом STEM-EDS по точкам, расположенным вблизи видимого центра частиц. Всего было исследовано 46 сферул наножелеза. Из-за вклада окружающей стеклянной матрицы абсолютные значения отдельных точечных анализов имеют полуколичественный характер, однако массив данных позволяет выделить устойчивые тенденции. Содержание P достигает 6 мас.% при среднем уровне около 1 мас.%, S — до 5 мас.% (в среднем порядка 1,5 мас.%), Ni — до 3 мас.% (в среднем около 1 мас.%).

Обсуждая механизмы образования npFe^0 , можно сопоставить три основных сценария: конденсацию восстановленного железа из ударно-образованного пара с последующим осаждением на поверхности частиц (Harke et al., 1975; Harke, 2001; Pieters et al., 2016; Xiong et al., 2024), восстановление оксидов железа имплантированным водородом солнечного ветра *in situ* (Housley et al., 1973; Xiong et al., 2024) и прямое термовосстановление FeO в расплаве при высоких температурах (Яковлев и др., 1987; Sorokin et al., 2025). В реальном реголите эти процессы могут сочетаться, однако положение изученных сферул внутри стеклянной матрицы и их связь с газовыми полостями согласуются с формированием Fe^0 непосредственно в расплаве. При термической диссоциации Fe-содержащих компонентов расплава кислород может удаляться из локальной восстановительной зоны двумя взаимодополняющими путями: переходить в газовую фазу с образованием пузырьков либо диффундировать из наиболее нагретой области расплава при наличии градиента химического потенциала. Граница газ–жидкость может служить одним из участков зарождения металлических частиц, но формирование Fe^0 возможно и непосредственно в объеме расплава при снижении кислородного потенциала. Это согласуется с моделью Pang et al. (2024), показывающей, что диффузия кислорода в силикатном расплаве примерно в 20 раз быстрее диффузии FeO. После возникновения металлической фазы Ni, P, S и другие компоненты могут перераспределяться в неё из окружающего силикатного расплава (Dikov et al., 2005; Zajacz et al., 2013; Lierenfeld et al., 2018; Луканин и др., 2020; Li et al., 2025).

Для количественной оценки масштаба области расплава, из которой металлическая сфера могла «собрать» примесные элементы, была использована простая модель «зоны питания». Предполагается, что наблюдаемое содержание Ni, P или S в сферуле радиуса $R_{\text{сф}}$ (радиус сферулы) связано с переходом этих элементов из окружающего объема стекла радиуса $R_{\text{зп}}$ (радиус зоны питания) при начальной концентрации $C_{\text{зп}} \approx 0,1$ мас.% (уровень порога обнаружения). По закону сохранения массы и при отсутствии потерь элементы концентрируются в металлической фазе с конечной концентрацией $C_{\text{сф}}$, что позволяет оценить отношение $R_{\text{зп}}/R_{\text{сф}}$. Для большинства исследованных частиц оно составляет приблизительно 1,5–4, то есть необходимое перераспределение происходит на расстояниях всего нескольких радиусов самой металлической сферулы.

Для оценки времени, за которое сера может перераспределиться из силикатной матрицы в металлическую сферулу, автором была разработана кинетическая модель диффузии в концентрической сферической системе «металлическое ядро — силикатная оболочка». Коэффициент диффузии описывался уравнением Аррениуса ($D = D_0 \times \exp(-E_a/(R \times T))$) с предэкспоненциальным множителем $D_0 = 10^{-5}$ м²/с и

энергией активации $E_a = 130$ кДж/моль, а преимущественное распределение S в металлическую фазу задавалось коэффициентом $K^{\text{met/silic}} \sim 90$ (Zhang et al., 2010; Zajacz et al., 2013; Lierenfeld et al., 2018; Li et al., 2025). Расчёты показывают, что при $T \sim 2200\text{--}2300$ К и выше перенос S на нанометровых расстояниях происходит в диапазоне сотни наносекунд, а при температурах около 2600 К и выше достижение содержания S порядка 1 мас.% (наблюдаемое среднее содержание в наночастицах грунта «Chang’e-5») в наносфере Fe возможно за десятки наносекунд (рис. 19).

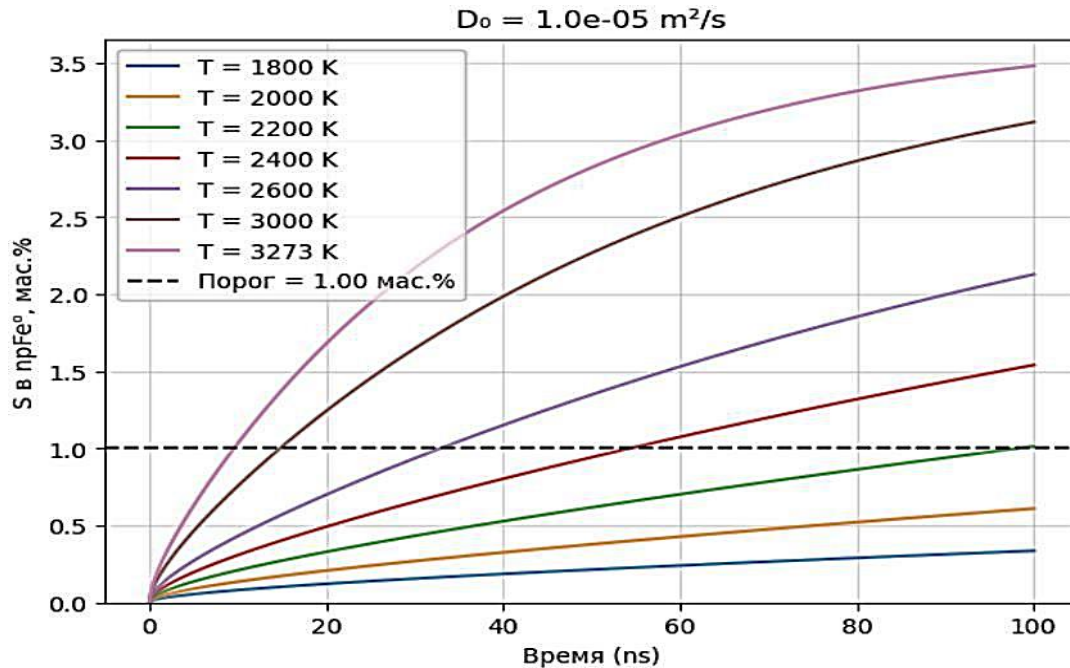


Рис. 19. Расчётная зависимость концентрации серы в металлической сферуле радиусом 20 нм от времени при её питании из силикатной области радиусом 80 нм с исходным содержанием S 0,1 мас.% ($D_0 = 10^{-5}$ м²/с).

Сопоставление полученных данных с усреднённым составом реголита лунных морей ($P \approx 0,11$ мас.%, $Ni \approx 0,03$ мас.%, $S \approx 0,09$ мас.%; Heiken et al., 1991) и оценками содержания прFe⁰ на уровне десятых долей процента и первых процентов в лунных образцах (Housley et al., 1971; Tsay et al., 1971) показывает, что при средних содержаниях отдельных примесей в металлической фазе порядка единиц мас.% потенциально может приводить к понижению содержания в силикатной части реголита этих компонентов на десятки — первые сотни ppm.

Обогащение экспериментальных и лунных сферул прFe⁰ одними и теми же элементами показывает, что установленная в лазерных опытах закономерность селективного перераспределения примесей воспроизводится и в природном лунном веществе. Нанофазное железо, таким образом, следует рассматривать не только как носитель оптических эффектов космического выветривания, но и как локальный геохимический резервуар, способный концентрировать Ni, P, S и другие элементы и потенциально переносить их при повторной импактной переработке реголита.

Краткие выводы:

1. Миллисекундное лазерное воздействие воспроизводит высокотемпературную физико-химическую стадию микрометеоритного воздействия — быстрое плавление, частичное испарение, выброс и последующую закалку силикатного

- вещества — и может использоваться для моделирования геохимических последствий микроимпактов.
2. За время порядка 10^{-3} с в силикатном расплаве развивается глубокая испарительная дифференциация: преимущественно теряются Na_2O , K_2O , FeO и SiO_2 , тогда как CaO , TiO_2 и Al_2O_3 концентрируются в остатке. В опытах с кристаллическим базальтом около 25 % сферул достигают области HASP-составов, а в опытах с базальтовым стеклом — до ~90 %; отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,18$ может использоваться как один из признаков глубокой ударно-испарительной переработки.
 3. npFe^0 формируется непосредственно *in situ* в высокотемпературном силикатном расплаве: металлические частицы обнаружены внутри закалённого расплава, вдоль текстур течения и границ новообразованных кристаллов, а также в выброшенных стеклянных каплях. Эффективность их образования зависит от химического и минерального состава мишени; в исследованном ряду оливинов она возрастает с увеличением содержания FeO .
 4. Металлические сферулы выступают селективными концентраторами примесных компонентов: в экспериментах в них накапливаются Ni, P, S, Co, а в отдельных системах также Cr и Si. Набор примесей зависит от состава мишени: в базальтовом стекле особенно выражены P и Ni, в оливине — Ni, в ортопироксене — Ni и P, в Cr-диопсиде — Ni, Cr и S, в ильмените — Co; Mn, Nb и V преимущественно остаются в оксидной фазе.
 5. Природный лунный материал демонстрирует сходные закономерности примесного обогащения npFe^0 . В Fe-содержащих сферулах агглютинатов «Луны-20» установлены повышенные содержания Ni, Co, P и S. В агглютинате «Chang'e-5» электронная дифракция и HRTEM подтверждают α -Fe в частицах размером в десятки–сотни нанометров, а STEM-EDS показывает выраженную приуроченность к ним Ni, P и S.
 6. Оценка зоны питания показывает, что для накопления наблюдаемых концентраций Ni, P и S достаточно перераспределения элементов из области радиусом примерно 1,5–3–4 радиусов металлической частицы. Кинетическая модель для S показывает, что при температурах порядка 2200–2600 К и выше такой перенос может происходить за субмикросекундные времена, а при наиболее высоких температурах — за десятки наносекунд.

Список публикаций по теме диссертации:

1. **Сорокин Е.М.**, Герасимов М.В., Шкловер В.Я., Бондарев А.В. (2026) Химический состав сферул металлического железа в лунном грунте «Чанъэ-5», *Геохимия*, Т. 71. № 3. С. 181–205.
2. **Сорокин Е.М.**, Герасимов М.В., Зайцев М.А., Щербаков В.Д., Рязанцев К.М., Крашенинников С.П., Яковлев О.И., Слюта Е.Н. (2025) Экспериментальные данные по образованию нанофазного железа в лунном грунте. *Геохимия*, 2 (70), 107-125.
3. **Sorokin E. M.** (2023) Reduced Iron in the Regolith of the Moon: Review. V. P. Kolotov and N. S. Bezaeva (eds.), *Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences*, p. 425-442.
4. **Сорокин Е.М.**, Яковлев О.И., Слюта Е.Н., Герасимов М.В., Зайцев М.А., Щербаков В.Д., Рязанцев К.М., Крашенинников С.П. (2020) Экспериментальное моделирование микрометеоритного удара на Луне. *Геохимия*, №2 (58).
5. **Сорокин Е.М.**, Яковлев О.И., Слюта Е.Н., Герасимов М.В., Зайцев М.А., Щербаков В.Д., Рязанцев К.М., Крашенинников С.П. (2020) Экспериментальная модель

образования нанофазного металлического железа в лунном реголите. Доклады Российской Академии Наук. Науки о земле, том 492, № 2, с. 49–52.

6. Шкловер В.Я., Слюта Е.Н., Загвоздин В.П., Дмитриева Т.Г., Казанский П.Р., Рашковский А.Ю., Маряsev И.Г., **Сорокин Е.М.** (2020) Комплексное структурное исследование частицы лунного реголита методом мультимасштабной и мультимодальной объемной микроскопии. Журнал аналитической химии, том 75, № 10, с. 942–953.

Избранные тезисы докладов и материалы конференций:

1. Сорокин Е.М., Рязанцев К.М., Лоренц К.А., Демидова С.И., Шкловер В.Я. Микро- и нанофазы железа в реголите луны из океана бурь // Труды двадцать седьмой международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле». 267-270. Москва. 2026. УДК 550.3:550.4:550.8:552:11 2. Sorokin E.M., Gerasimov M.V., Shklover V.Ya., Bondarev A.V. Chemical composition of metallic iron spherules in the lunar soil of Chang'e-5 // The sixteenth Moscow Solar System symposium 2025. 16MS3-MN-PS-09. IKI RAS, Moscow, 2025.
3. Sorokin E.M., Yakovlev O.I., Sluta E.N., Gerasimov M.V., Zaitsev M.A., Shcherbakov V.D., Ryazantsev K.M. Experimental data on the occurrence and chemical composition of metallic iron nanospherules and comparison with data from the chang'e-5 lunar soil // The fifteenth Moscow Solar System symposium 2024. 15MS3-MN-18. IKI RAS, Moscow, 2024.
4. Sorokin E.M., Yakovlev O.I., Sluta E.N., Gerasimov M.V., Zaitsev M.A., Shcherbakov V.D., Ryazantsev K.M., Krasheninnikov S.P. Chemical composition of the nanophase iron (npFe0) obtained in the laser experiment. 54th Lunar and Planetary Science Conference 2023 (LPI Contrib. No. 2806), #2156. Houston, Texas, USA, 2023.
5. Сорокин Е.М., Герасимов М.В., Зайцев М.А., Щербаков В.Д., Рязанцев К.М., Яковлев О.И., Слюта Е.Н., Крашенинников С.П. Термически восстановленные Si и P в наносферах металлического железа: экспериментальные данные // Труды всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2023). 319-323. Москва. 2023. УДК 550.42
6. Sorokin E. M., Yakovlev O. I., Slyuta E. N., Gerasimov M. V., Zaitsev M. A., Shcherbakov V. D., Ryazantsev K. M., Krasheninnikov S. P. Laser experimental modeling of the formation of nanophase iron (np-Fe0). 53nd Lunar and Planetary Science Conference 2022 (LPI Contrib. No. 2548). #1389