

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Российской академии наук

на правах рукописи

**ТАН НАЙНГ СО**

**Облученные космическими лучами метеоритные оливнины как инструмент  
поиска сверхтяжелых элементов в природе**

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва, 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Научный консультант** СТАРКОВ Николай Иванович, доктор физико-математических наук (ФИАН)

**Официальные оппоненты**

**КАРПОВ Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук (Объединенный институт ядерных исследований)

**БОЛОЗДЫНЯ Александр Иванович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**МУХАМЕДШИН Рауф Агдамович**, доктор физико-математических наук (Институт ядерных исследований Российской академии наук)

**Ведущая организация**

ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится « 3 » октября 2022 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу:

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53

Телефон: 8 (499) 132-65-54 (Секретариат)

8 (499) 135-14-29 (Секретариат)

e-mail:[office@lebedev.ru](mailto:office@lebedev.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте <https://www.lebedev.ru/ru/fian-dissertation-councils/posts.html>.

Автореферат разослан “\_\_” июня 2022 г.

Электронная версия автореферата размещена: <https://www.lebedev.ru/ru/fian-dissertation-councils/posts.html>»

Учёный секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук      Баранов Сергей Павлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Настоящая работа связана с актуальными задачами современной физики, решаемыми на основе использования трековых детекторов. В частности, в ней детально описывается реализуемый автором в составе фиановской группы эксперимент по поиску сверхтяжелых элементов в природе - треков ядер в оливинах из метеоритов. В работе изложена оригинальная методика работы с оливинами, представлены результаты исследования в виде зарядового распределения ядер галактических космических лучей. Разработанные авторские методики работы с трековыми детекторами (в том числе, с ядерной фотоэмульсией) успешно применяются также в исследованиях на ускорителях элементарных частиц - в международных экспериментах по поиску явлений Новой физики [1,2].

Проблема существования и регистрации частиц темной материи – одна из важнейших проблем Новой физики. В последние десятилетия проводятся эксперименты по поиску этих частиц, но пока надёжного доказательства их существования нет [3-15]. Автор настоящей работы является участником двух международных экспериментов, в которых, в частности, предполагается проводить поиск частиц тёмной материи – SHiP и NEWSdm. В состав аппаратуры этих экспериментов входят детекторы на основе ядерных фотоэмульсий, в том числе, производимых российской компанией ОАО «АВК Славич». В настоящее время эмульсия этой компании абсолютно соответствует мировому уровню качества, тем не менее, для сверхчувствительных экспериментов по поиску тёмной материи необходимы дополнительные проверки ее характеристик. Более того, специфические задачи таких экспериментальных исследований потребовали модернизации технологии производства эмульсии на российском предприятии. Автором настоящей работы была разработана методика и созданы программы на языке C++ для оценки качества эмульсии, которые позволили целенаправленно менять химические и технологические параметры ее технологии изготовления.

Основной целью работы было исследование зарядового распределения тяжёлых и сверхтяжёлых космических ядер - одной из самых актуальных задач физики XXI века. Это задача связана с предсказаниями теории о возможном существовании «острова стабильности» трансфермиевых элементов и успешными работами на ускорителях по синтезу новых искусственных элементов. Поэтому поиски таких ядер в природе ведутся уже много лет. Ядра первичного космического излучения не доходят до поверхности Земли, поэтому эксперименты по их регистрации проводятся на большой высоте – на баллонах и спутниках. К сожалению,

время экспозиции детекторов на спутниках не более нескольких лет, которых недостаточно для регистрации слабых потоков тяжелых ядер и набора достаточной статистики. В то же время в космосе существуют природные детекторы ядер - метеориты.

Большим преимуществом метеоритов при их использовании в качестве детекторов космических ядер является огромное время экспозиции - сотни миллионов лет. Все это время они подвергаются облучению космическими лучами, в том числе тяжёлыми и сверхтяжёлыми ядрами. Для поиска и исследования треков космических ядер на оптическом микроскопе больше всего подходят палласиты, в которых содержатся кристаллы оливина – полупрозрачного минерала. В месте прохождения ядра через оливин возникают треки- области повреждений, обладающие повышенной скоростью травления по сравнению с неповреждёнными областями. В результате после травления специальными химическими растворами – травителями, в оливине возникает полый канал, повторяющий траекторию движения ядра и видимый в оптический микроскоп. Геометрические и динамические характеристики протравленного канала связаны с зарядом ядра.

Полученные автором в составе фиановской группы результаты позволяют говорить о существовании и распространенности сверхтяжелых элементов в природе, и утверждать, что изучение треков галактических космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов открывает новые возможности в исследовании потоков и спектров космических лучей, имеющих большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

**Целью диссертационной работы** является поиск и идентификация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- Поиск и идентификация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов.
- Разработка алгоритмов и создание программ на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
- Построение зарядового спектра, исследование его особенностей.
- Исследование влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов.
- Анализ возможных причин возникновения треков особой формы.
- Анализ фрагментации сверхтяжёлых ядер при их прохождении через вещество метеорита.
- Изучение особенностей треков ядер в метеорите Сеймчан.

- Адаптация созданного программного обеспечения для обработки данных трековых детекторов с целью анализа характеристик высокочувствительной ядерной фотоэмульсии.

#### **Научная новизна работы и практическая значимость работы**

Научная новизна работы проделанной работы заключается в следующем:

- Создана уникальная, не имеющая аналогов, база экспериментальных данных о зарядовом составе галактических космических лучей, включающая около 26000 треков ядер с  $Z > 40$ .
- Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для успешно реализованного автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.
  - Выполнены оценки распределений вторичных частиц, возникающих при прохождении через метеорит тяжелых ионов и оценки влияния фрагментации ионов на зарядовый спектр на основе расчетных моделей, разработанных на базе программного пакета Geant4.
  - Разработана программа на языке C++ для демонстрации влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей.

#### **Личный вклад**

Все используемые в диссертации экспериментальные результаты были получены автором лично или при его определяющем непосредственном участии. Автором были найдены и идентифицированы около 26000 треков ядер с  $Z > 40$ . Автором разработаны алгоритмы и создана программа на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах, создана программа вычисления толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов галактических ядер, реализован алгоритм оценки влияния отжига треков на зарядовый спектр ядер галактических космических лучей. На основе пакета Geant4 автором были построены модели используемых детекторов и успешно выполнено моделирование для анализа возможных причин возникновения треков особой формы. Автор успешно использовал свой опыт и созданные программные комплексы для международных проектов SHiP (Search for hidden particle) в ЦЕРНе, Женева, Швейцария и NEWSdm (Nuclear emulsion for WIMP search –directional measurement) в Национальной лаборатории Гран-Сассо Национального института ядерной физики (LNGS, INFN), Италия.

#### **Основные положения, выносимые автором на защиту:**

1. Получены данные о зарядовом составе около 26000 ядер космических лучей с зарядом  $> 40$ , в том числе более 22000 с  $Z > 55$ , которые согласуются с данными других

экспериментов. Обнаружены три ядра космических лучей с зарядом  $119_{-6}^{+10}$ .

2. Разработана новая методика исследования характеристик треков ядер космического излучения в полном объеме кристаллов оливина из метеоритов (включая процедуры травления, автоматизированные алгоритмы измерения и анализа).

3. Выполнены модельные расчеты прохождения тяжелых ядер через оливин, проведен анализ фрагментации сверхтяжелых ядер при их прохождении через вещество метеорита. По калибровочным измерениям подтверждена правильность модельных расчетов и измерений.

4. Исследовано влияние отжига треков на зарядовый спектр ядер космических лучей и проведен анализ возможных причин возникновения треков особой формы в оливинах.

### **Апробация работы**

Результаты излагаются в 27 печатных публикациях, 25 из которых были изданы в журналах, рекомендованных ВАК, Scopus, Web of Science. В базы данных Scopus включены 10 публикаций автора, в базы данных Web of Science — 9, 6 были изданы в журналах, рекомендованных ВАК и 4 работы в виде препринтов.

Основные результаты диссертации представлялись и докладывались на семинарах и многих международных и национальных конференциях:

1. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova, N. M. Okat'eva, T.A. Pavlova, N. G. Polukhina, N. I. Starkov, **Than Naing Soe**//Search for Superheavy Elements in Galactic Cosmic Rays //International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2015, Athens, Greece, March 20-23, 2015)
2. POLUKHINA, Natalia , VOLKOV, Alexander; SHCHEDRINA, Tatyana ; STARKOV, Nikolai; **SOE, Than Naing Soe**; VLADYMYROV...//A study of the composition of galactic cosmic rays based on meteorite olivine data//SHIM 2015 (Swift heavy ions in matter conference, May 18-21,2015,Darmstadt,Germany).
3. Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, А.Б. Александров, Н.М.Окатьева, Л.А. Гончарова,**Тан Найнг Со** // ПОИСК ТРЕКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В КРИСТАЛЛАХ ОЛИВИНА ИЗ МЕТЕОРИТОВ//XVI Международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле",28 сентября 2015 г., ГЕОХИ им. В.В. Вернадского.
4. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova, N. M. Okat'eva, T.A. Pavlova, N. G. Polukhina, N. I. Starkov, **Than Naing Soe**,

- M.S.Vladymyrov, A.E.Volkov//Search for Nuclei of Galactic Cosmic-Ray Superheavy elements in olivine crystals from meteorites//18<sup>th</sup> international conference on Radiation Effects In Insulators (REI-18, Jaipur, Rajasthan, India October 26 to 31,2015), Proceedings, page 17.
5. 13th SHiP Collaboration meeting, 14 - 16 March 2018, CERN, Geneva, Switzerland.
  6. **Тан Найнг Со**//Исследование особенностей протравленных треков сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов//13-е Черенковские чтения "Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц",14 апреля 2020 г, ФИАН, Москва.
  7. Andrey Alexandrov, Victor Alexeev, Alexander Bagulya, Aigerim Dashkina, Mikhail Chernyavsky, Alexei Gippius, Lyudmila Goncharova, Sergei Gorbunov, Victor Grachev, Galina Kalinina, Nina Konovalova, Tatiana Pavlova, Ruslan Rymzhanov, Nikolai Starkov, **Than Naing Soe**, Tatiana Shchedrina, Alexander Volkov and Natalia Polukhina//Investigations of the tracks of galactic cosmic ray nuclei in olivines from meteorites //43rd COSPAR scientific assembly, International convention centre, 28.1.2021-4.2.2021 Sydney, Australia.
  8. **Тан Найнг Со**//Аномалия зарядового спектра ядер галактических космических лучей в оливинах // Одиннадцатые Зацепинские Чтения, 28 Май 2021, ИЯН РАН, Москва.
  9. **Тан Найнг Со** //Зарядовый спектр тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов //Семинар отдела космических излучений, 29 марта 2022, ОЯФА ФИАН, Москва
  10. **Тан Найнг Со** //Методика поиска и исследования треков тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов// Семинар, 6 апреля 2022, ОИЯИ, Дубна.

### **Структура и объём диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 203 страниц машинописного текста, 92 рисунка, 13 таблиц и список цитируемой литературы из 149 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

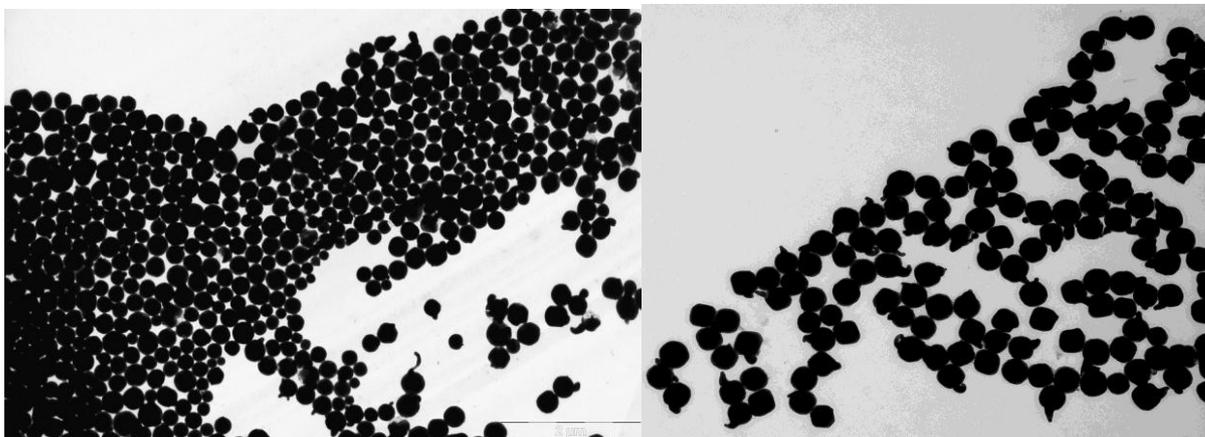
Во **введении** отмечается актуальность исследований, цель работы, научная новизна и практическая значимость, личный вклад, основные положения, выносимые автором на защиту и апробация работы.

В **первой главе** обсуждается физика космических лучей, происхождение, состав, распространенность. Сверхтяжелые элементы – синтез в земных условиях и поиск в природе.

Во второй главе описываются метеориты как природные детекторы космических лучей, типы и особенности работы с ними.

В третьей главе дается описание процессов прохождения ядер через вещество трековых детекторов. В разделе 3.1 описаны физические процессы при прохождении ионов через вещество. В разделе 3.2 представлены модели возникновения травимых треков. В разделе 3.3 описаны характеристики протравленных каналов, условия их возникновения и методы их измерения. В разделе 3.4 представлены типы трековых детекторов, обрабатываемых на оптических микроскопах (стекло, пластик, минералы, ядерная фотоэмульсия). В разделе 3.5 дается описание авторского программного комплекса для анализа характеристик российской ядерной эмульсии.

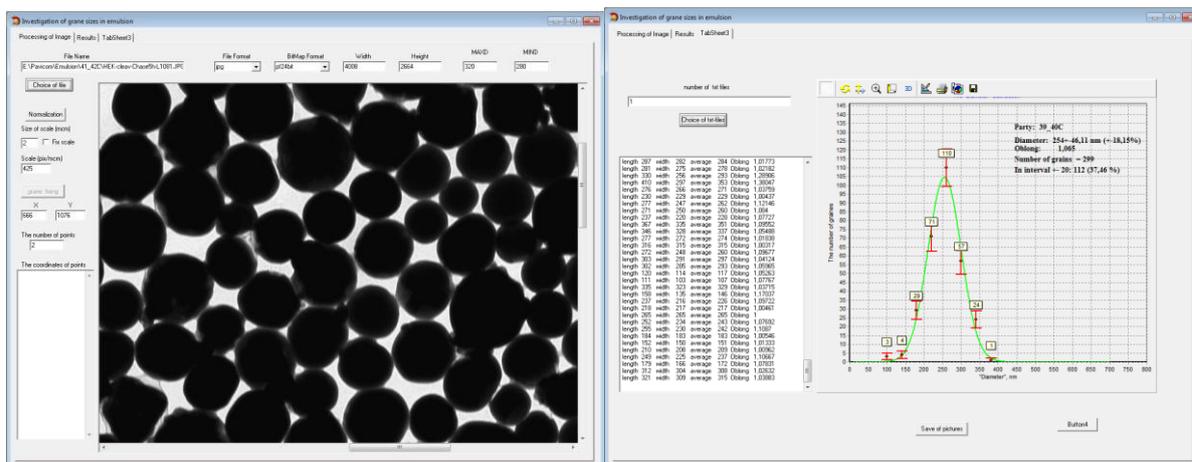
В частности, в разделе 3.5 сообщается о том, что ФИАН совместно с ОАО «АВК Славич» в г. Переяславль-Залесский с 2012 года вёл работу по восстановлению утраченной в девяностые годы технологии изготовления ядерной фотоэмульсии с требуемыми характеристиками. Важными показателями, в частности, являются размеры зерен AgBr, а также их однородность по размерам и форме. Оценка этих показателей производится по микрофотографиям не облучённой и не проявленной эмульсии, полученным на электронном микроскопе методом углеродной репликации (Рис 1). Ввиду большого количества образцов их визуальная обработка и анализ качества были невозможны по причине большой трудоёмкости и, соответственно, долговременного анализа. Для автоматизации обработки автором была разработана программа выделения на изображении отдельных зёрен эмульсии и определения их характеристик. На рисунке 2а показано рабочее окно программы с изображением зёрен эмульсии партии С42. Результаты по каждому образцу приводятся в виде распределений и средних величин (рис. 2б). Распределение по диаметру аппроксимируется функцией Гаусса с помощью метода наименьших квадратов.



а.

б.

Рис. 1. Микрофотографии микрокристаллов эмульсии партии 14С (а), и кристаллов японской эмульсии (б). Увеличение 15000 раз.



а

б

Рис. 2. Рабочее окно программы по измерению гранулометрических характеристик эмульсии (а). Окно программы с результатами измерений (б).

Были обработаны реплики семнадцати партий эмульсии, начиная с 12С и заканчивая 608С, которая в итоге была выбрана в качестве базовой для продолжения разработки технологии, как обладающая наилучшими характеристиками. Таким образом, благодаря быстрым оценкам качества эмульсии и её чувствительности, проведённым автором на основе разработанных им программ, удалось намного ускорить поиск технологической цепочки по приготовлению ядерной фотоэмульсии с необходимыми свойствами.

Разработанная ОАО «АВК Славич» ядерная фотоэмульсия в настоящее время широко используется в экспериментах по ядерной физике, физике элементарных частиц, мюонной радиографии и других работах. Авторские методики работы с ядерной фотоэмульсией оценки ее качества успешно применяются в исследованиях на ускорителях элементарных частиц - для эмульсионных детекторов экспериментов SHiP, SND@LHC, NEWSdm. Участие автора настоящей работы в этих экспериментах заключается в предварительной проверке качества эмульсии.

**В четвертой главе** представлен подробный обзор эксперимента ОЛИМПИА и характеристик комплекса ПАВИКОМ для автоматизированной обработки данных трековых детекторов. Детально описана методика исследований в кристаллах оливина из палласитов. В разделе 4.1 описан эксперимент ОЛИМПИА. В разделе 4.2 описана установка ПАВИКОМ, её состав, характеристики и эксперименты, данные которых обрабатывались на ПАВИКОМ. В разделе 4.3 описана авторская методика последовательного среза и травления, используемая при измерении характеристик треков ионов в оливинах из метеоритов.

Метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой "матрицы", в объеме которой имеются включения кристаллов оливина - полупрозрачного минерала жёлтого цвета размером до 1-2 см (рис. 3). Доступные для обработки кристаллы имеют размер 0,5-2 мм вследствие их растрескивания. Возможность проведения поиска, регистрации и идентификации ядер тяжелых элементов с помощью метеоритов основана на том, что тяжелые ядра, проходя через оливин, создают в его кристаллической решетке структурные нарушения. В результате вдоль следа торможения ядра образуется сквозной канал области повреждений с поперечным размером  $\sim (30-70) \text{ \AA}$ . Существенным при этом является огромное (до  $\sim 200$ - кратного) различие скорости травления вещества оливина вдоль следа ядра по сравнению с радиационно ненарушенной областью кристалла. При этом, травление проводится с помощью специально подобранного химического раствора в определенных температурных условиях [16, 17]. В результате при травлении поверхности кристалла оливина в местах прохождения тяжелого ядра образуется пустотелый канал, длина и ширина которого зависит от степени повреждений кристаллической решетки. На рисунке 4 схематически представлена геометрия образующегося при травлении канала трека [17].



Рисунок 3. Образец метеорита Eagle Station, сфотографированный на фоне транспорта, используемый для исследований в эксперименте ОЛИМПИА.

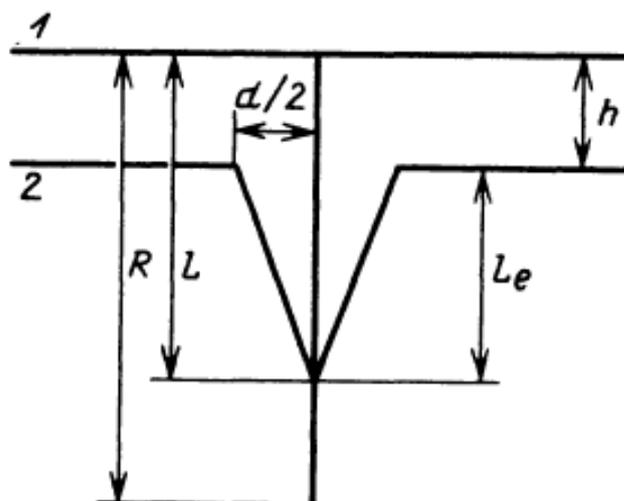


Рисунок 4. Простейшее схематическое изображение геометрии травимого канала, образующегося вдоль следа прохождения заряженной частицы КЛ в кристалле оливина

Таким образом, возможность исследования треков путём травления основана на том, что повреждения материала, возникающие при прохождении ядра, приводят к повышенной растворимости в области трека. Это явление связано с величиной ионизационных потерь.

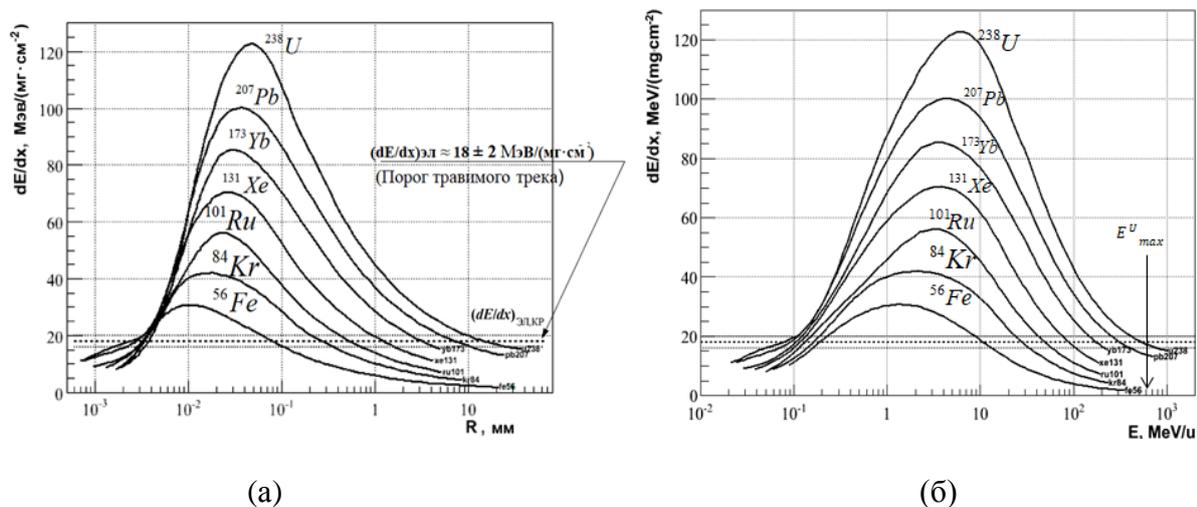


Рисунок 5. Ионизационные потери энергии ядер  $^{56}_{26}\text{Fe}$ ,  $^{84}_{36}\text{Kr}$ ,  $^{101}_{44}\text{Ru}$ ,  $^{131}_{54}\text{Xe}$ ,  $^{173}_{70}\text{Yb}$ ,  $^{207}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$  в оливине в зависимости от остаточного пробега (а) и их энергии  $E$  (б).

На этих графиках 5 (а) и (б), полученных в программе SRIM, показаны дифференциальные ионизационные потери ядер при прохождении через оливин как функции их энергии и пробега. В оливине существует порог ионизационных потерь, только выше которого можно получить протравленный канал. Величина этого порога для оливина  $I \sim 18 \text{ МэВ}/(\text{мг}\cdot\text{см}^2)$ . Для разных ядер этот порог достигается при разных энергиях. Видно, что этот

порог «преодолевается» только ядрами железа и более тяжёлыми.

Основная масса треков ядер находится внутри объёма кристалла, а травление происходит с поверхности. Поэтому существует проблема доступа растворителя на глубину. В ОИЯИ в ранних работах с оливинами решали эту проблему, предварительно проделывая искусственные каналы (путем облучения пучками частиц на ускорителе или лазерными лучами). В данной работе используется авторский метод послойного травления и среза кристалла оливина.

Основные этапы оригинального авторского метода послойного травления и среза кристалла оливина:

- готовятся эпоксидные таблетки размером  $20 \times 10 \times 5$  мм (Рис.6(a));
- начинается процесс травления кристаллов оливина;
- после травления очередного слоя поверхность полируется;
- производится измерение координат начала и концов треков X, Y и Z и их запись;
- срезается слой толщиной  $d \sim 50-70$  мкм, кристаллы травятся и продолжается процедура поиска новых и продления обнаруженных ранее треков ядер.

Таким образом, просматривается весь объем кристалла.

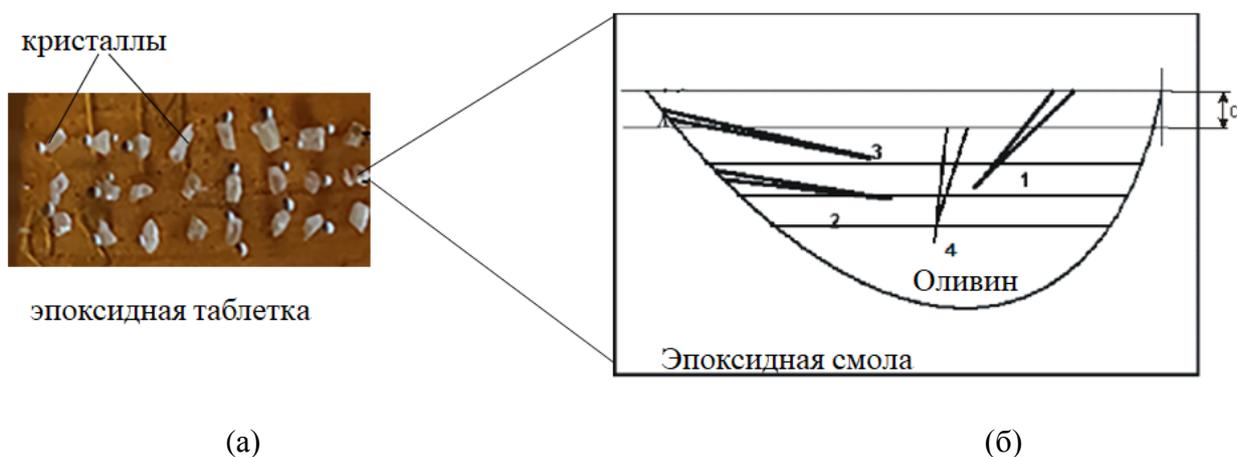


Рисунок 6. Эпоксидная таблетка с вмонтированными в нее кристаллами оливина (а), Последовательные этапы обработки кристалла оливина для разного положения (1-4) треков в кристалле (б).

На рисунке 6(б) схематично изображены последовательные этапы выявления треков в объеме кристалла. Травящий раствор может достичь трека либо с поверхности (трек 1), либо с краёв, примыкающих к эпоксидной смоле (треки 2 и 3). Трек под номером 4 начнёт травиться

на следующей стадии, т.к. до этого частица не достигла порога ионизации и трек не выходит на поверхность кристалла. В разделе 4.4 описана обработка изображений треков ядер КЛ из кристаллов оливина на ПАВИКОМ. В разделе 4.5 описаны ошибки измерения длин треков ядер КЛ. Полная длина треков складывается из результатов измерений длин на отдельных этапах травления. На каждом этапе длина определяется по формуле

$$R = [X_{\Delta}^2 + Y_{\Delta}^2 + (kZ_{\Delta})^2]^{1/2} \quad (1)$$

В разделе 4.6 описан алгоритм определения толщины срезаемого слоя оливина при определении зарядов галактических ядер. В формулу вычисления длины трека входит величина срезаемого слоя, неточность которой может достигать несколько микрон. Для повышения точности этой величины выполняется специальная процедура, которая позволяет повысить точность. Для реализации этого алгоритма была разработана программа на языке С++. Эта программа считывает координаты концов треков, имеющих продолжение на нескольких стадиях, находит оси треков и точки их пересечения. По точкам пересечения определяется вектор смещения и производится соответствующий сдвиг треков.

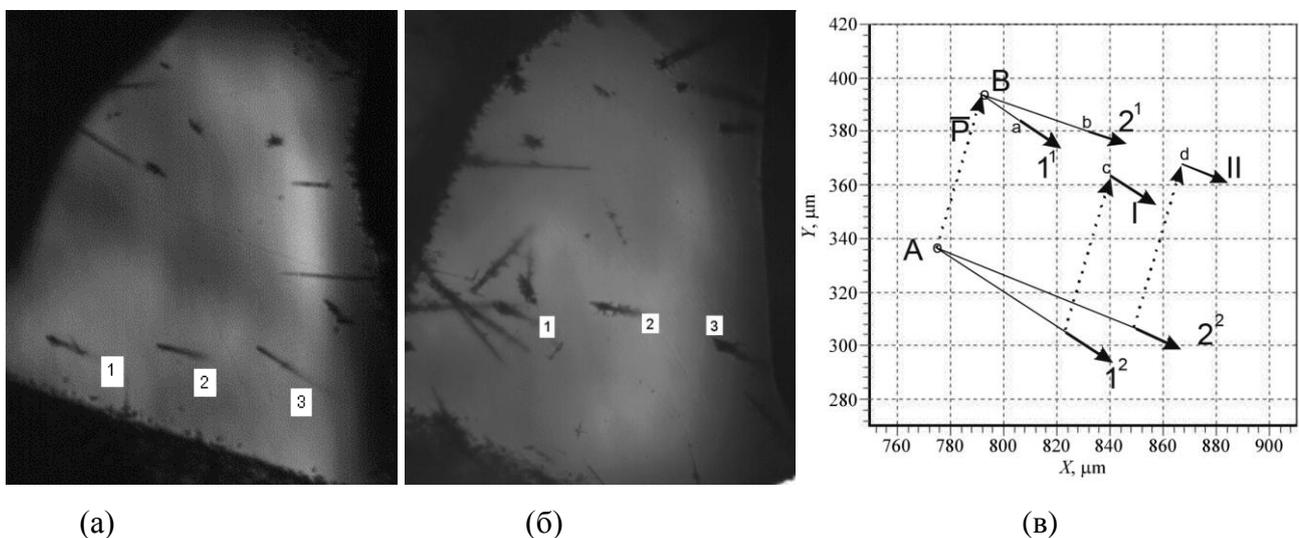


Рис. 7: Изображения одного и того же кристалла после первой (а) и второй (б) стадий травления. Цифрами обозначены треки, имеющие продолжение на второй стадии. Схематичное изображение положения треков 1 и 2, приведённых на рис. 7, в координатной системе микроскопа в.

Для демонстрации возможностей указанной процедуры использовались треки 1 и 2, приведенные на рисунке 7а, 7б. На рис. 7в в системе координат микроскопа стрелками схематично изображены положения этих двух треков. По координатам концов треков 1 и 2 на

двух стадиях травления положение прямых, связанных с треками, определяется с большой точностью. Затем определяются их точки пересечения. По положению этих точек можно определить вектор смещения координатных систем кристалла на двух стадиях по отношению к системе микроскопа и затем перевести все протравленные треки к одной системе координат. По смещению треков в плоскости XY можно найти расстояния между поверхностями кристалла на разных стадиях, то есть толщину среза, т.к. угол трека к поверхности кристалла известен из измерений. Расчёты, проведённые для треков 1 и 2, дают для величины Z значения  $Z_{ac} = 48,6$  мкм  $Z_{bd} = 47,3$  мкм при номинальном значении толщины 50 мкм. Если учесть третий трек на этом кристалле, а также треки, имеющие продолжение, на других кристаллах этой таблетки, получим оценку толщины среза  $Z = 49,6 \pm 0,5$  мкм. Таким образом, рассмотренный механизм работает с хорошей точностью и может быть использован для контроля операций среза при поиске следов галактических ядер в оливинах из метеоритов и, соответственно, для увеличения точности определения длины трека ядра. В разделе 4.7 описаны калибровочные эксперименты.

В разделе 4.8 представлены результаты измерений в виде зарядовых распределений ядер. Для сравнения с результатами других других экспериментов приведён график распространённости.

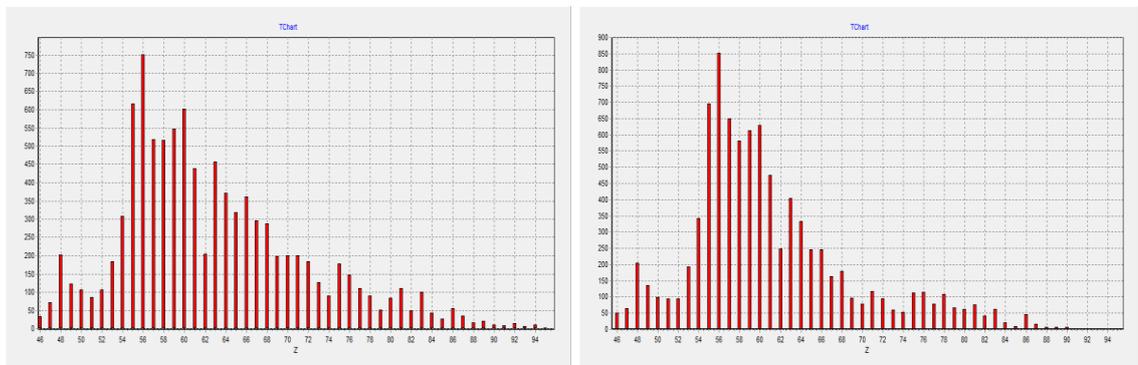


Рисунок 8. Зарядовые распределения метеоритов Марьялахти (а) и Eagle Station (б).

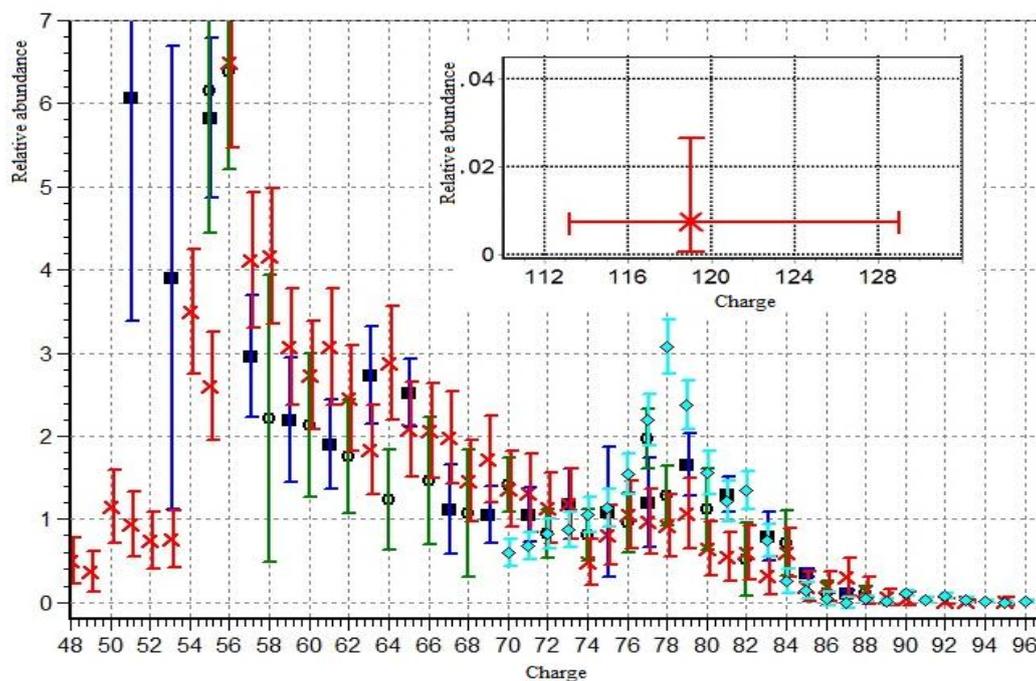


Рисунок 9. Распространённость ядер космических лучей. Кружки – Ariel-6, квадраты – НЕАО-3, ромб – UNCRES, кресты – ОЛИМПИА, данные по левым метеоритам [18]. В разделе 4.9 описаны оценки времени жизни ядер трех сверхтяжелых ядер.

В **пятой главе** описаны особые случаи при анализе треков ядер космических лучей в оливинах из метеоритов. В разделе 5.1 описано изучение радиационной истории палласита по данным о градиенте плотности треков ядер солнечных космических лучей. В частности, методика изучения протравленных треков в кристаллах оливина из палласитов позволяет получать сведения об истории космического объекта и глубине расположения кристалла от первоначальной поверхности метеорита, в том числе, путем измерения плотности треков из ядер группы железа [19]. При анализе экспериментальных распределений плотности треков тяжелых ядер в кристаллах оливина палласитов используются расчетные скорости образования треков  $\rho/t$ , где  $\rho$  - плотность треков,  $\text{см}^{-2}$ , а  $t$  – радиационный возраст метеорита, млн лет. Зависимости плотности треков от глубины залегания кристалла ( $d$ , см) в метеоритах разных доатмосферных размеров были получены для пироксена хондритов [20] и, впоследствии, скорректированы для оливина из палласитов. На основе результатов [20] участниками проекта ОЛИМПИА были выполнены расчеты глубинного распределения скорости образования треков ядер группы железа (ядер VH с зарядами  $24 \leq Z \leq 28$ ) в оливине палласитов разных доатмосферных размеров R (рис. 10).

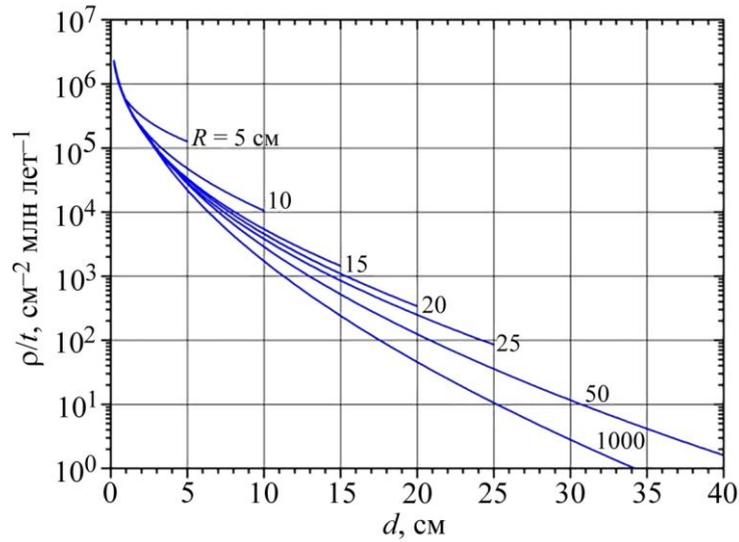


Рис. 10. Зависимость скорости образования треков VH-ядер космических лучей  $\rho / t$  от глубины залегания кристалла  $d$  в палласитах разного доатмосферного радиуса  $R$ .

Как было показано в [21], кривые, характеризующие изменение величины  $\log(\rho/t)$  с глубиной  $d$  в расчетах [20], могут быть с точностью до нескольких процентов описаны зависимостью вида (2):

$$\log\left(\frac{\rho}{t}\right) = A + Bd^C \quad (2)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  рассчитывались путем минимизации суммы квадратов отклонений значений  $\log(\rho/t)$ , полученных по формуле (2), от соответствующих значений в работе [20]. Найденные зависимости параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$  от доатмосферного радиуса палласитов  $R$  позволили получить распределения глубины скорости образования треков в палласитах для нескольких выбранных значений  $R$  (5, 10, 15, 20, 25, 50 и 1000 см). Аналогичная процедура пересчета была выполнена для глубинной зависимости  $\rho/t$  в интервале значений  $d$  от 0,001 до 1 см для  $R = 5$  см. На основе этих данных для значений  $d$  в диапазоне 0,001 - 1 см была получена функция  $\varphi(\rho)$ , характеризующая относительные изменения плотности треков в диапазоне глубин от  $d_1$  до  $d_2$ :

$$\varphi(\rho) = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)/2} \times 100, \% \text{ см}^{-1} \quad (3)$$

В этом диапазоне глубин  $d$  (от 0,001 см до 1 см) градиент плотности образования треков

VH-ядер уменьшается от  $\sim 10^5$  %  $\text{см}^{-1}$  до  $100\%$   $\text{см}^{-1}$ . Столь высокий градиент плотности треков для малых значений  $d$  может сформироваться при облучении поверхности кристалла VH-ядрами космических лучей во время солнечных вспышек. Случаи такого облучения наблюдаются, в частности, в кристаллах пироксена каменных метеоритов на ранних этапах формирования родительских тел [22]. В этом случае такой градиент появляется только при малых толщинах экранирующего слоя менее  $\sim 500$  мкм. Рассчитанные аналогичным методом градиенты плотности для показанных на рис.10 глубинных зависимостей скоростей образования треков в палласитах разных размеров составили  $100\%$   $\text{см}^{-1}$  для значений  $d > 1$  см.

В общей сложности, за время проведения эксперимента ОЛИМПИЯ, было обработано и исследовано 853 кристалла оливинов из палласитов Марьялахти и Игл Стейшин. Распределение плотности треков в этих кристаллах приходится на широкий интервал значений  $\rho$  от  $1,0 \times 10^3$  до  $6,3 \times 10^6$   $\text{см}^{-2}$ , причем для большей части кристаллов (около 90%) плотность треков лежит в пределах от  $6,3 \times 10^5$  до  $6,3 \times 10^6$   $\text{см}^{-2}$  с максимумом в районе  $(2,5 \div 4,0) \times 10^6$   $\text{см}^{-2}$ .

Согласно предыдущим исследованиям [19,23], доатмосферный размер палласита Марьялахти оценивается в 20 см, а его радиационный возраст  $t$ , по разным оценкам, составляет от 178 до 205 млн лет. В приведенных расчетах используется значение  $t = 185 \pm 19$  млн лет из работы [24]. Эти значения дают глубину залегания большей части исследованных в данной работе кристаллов оливина Марьялахти  $d = 9 \pm 2$  см. Это значение близко к оценкам  $d$ , полученным для этого метеорита другими исследованиями [19]. В подавляющем большинстве исследованных кристаллов наблюдается практически равномерное распределение треков, без заметного градиента плотности (в пределах  $\pm 20\%$ ). В этой связи особый интерес представляет найденный нами образец с очень высоким градиентом плотности треков (кристалл ML-11-10). Часть поверхности этого кристалла с высокой плотностью треков ядер железа показана на рис. 11. На поверхности кристалла были выделены две смежные области (1 и 2) размером  $200 \times 800$  мкм, в которых плотность треков при расстоянии 800 мкм изменяется на два порядка, от  $3 \times 10^6$  до  $4 \times 10^4$   $\text{см}^{-2}$ .



Рис. 11. Фотография поверхности кристалла ML-11-10 из палласита Марьялахти с высоким градиентом плотности треков ядер железа. Размер изображения составляет  $284 \times 226$  мкм.

Для каждой области плотности треков рассчитывали с шагом 20 мкм; результаты показаны на рис. 12. Распределения для обеих областей характеризуются линейным фрагментом в диапазоне  $\ell = 0,017 \div 0,051$  см, где  $\ell$  - расстояние до края с максимальной плотностью трека. Средние градиенты плотности ядер следов железа для обеих областей, рассчитанные на основе этой линейной зависимости по формуле (3), идентичны,  $\sim 5 \times 10^3 \text{ \% см}^{-1}$ . Чтобы проверить полученные данные, поверхность кристалла ML-11-10 с записанными треками была отшлифована, а затем снова протравлена. Плотность треков ядер была вновь измерена на обработанной поверхности (см. Вставку на рис. 12). Средний градиент плотности треков, полученный с помощью этой процедуры, практически не изменился,  $\sim 4 \times 10^3 \text{ \% см}^{-1}$ .

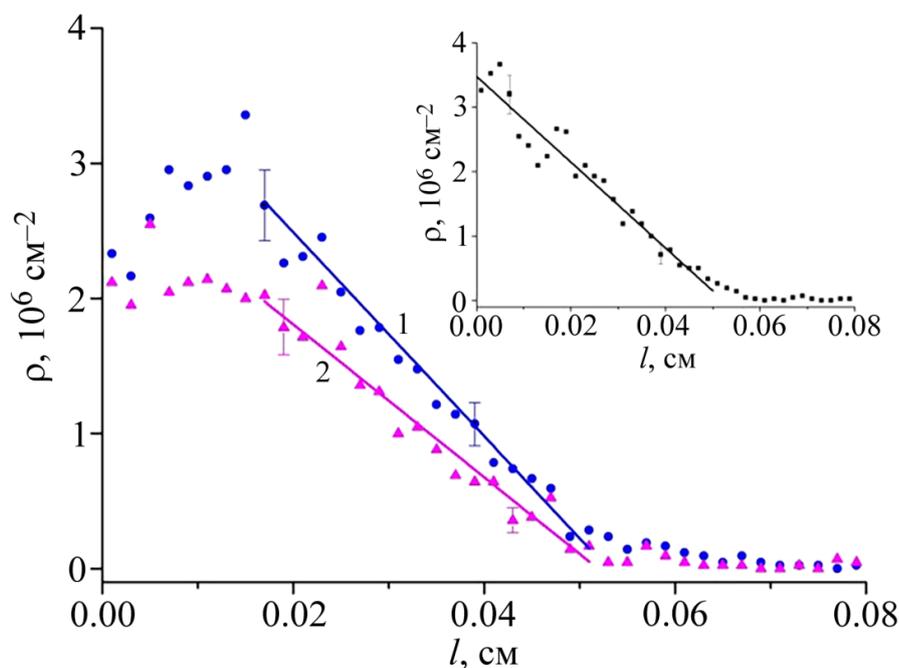


Рис. 12. Плотность треков ядер железа  $\rho$  на поверхности кристалла ML-11-10 в зависимости от расстояния  $l$  от края области с максимальной плотностью треков для двух смежных областей  $200 \times 800 \text{ мкм}^2$  (кружки и треугольники). 1 и 2-линии регрессии для линейных фрагментов. На вставке показана та же зависимость после сошлифовки поверхностного слоя кристалла с протравленными треками и повторного травления.

Полученные данные дают возможность предложить следующий сценарий космической истории палласита Марьялахти. Находясь в границах Солнечной системы, незадолго до вхождения в атмосферу Земли метеорит Марьялахти развалился на несколько фрагментов, в результате чего обнажилась поверхность с кристаллами ML-11-10, ML-20-8 и ML-21-1, которая подверглась дальнейшему воздействию космических лучей, преимущественно солнечного происхождения. До развала метеорита эти кристаллы находились ближе к его центру, и плотность треков в них к этому моменту была невысокой. Когда в результате развала родительского тела они оказались вблизи вновь образовавшейся поверхности, на глубине не более 500 мкм от ее границы, за относительно короткий период времени до вхождения в земную атмосферу в них сформировался градиент треков ядер солнечных космических лучей. Стабилизированный пролет через земную атмосферу фрагмента конусообразной формы [23] и или особенности его доатмосферной поверхности (каверны и углубления) препятствовали разрушению кристаллов ML-11-10, ML-20-8 и ML-21-1, что позволило зафиксировать в них высокий градиент плотности треков ядер.

Таким образом, эти результаты исследования градиента плотности треков ядер солнечных космических лучей были получены при измерениях в трех кристаллах оливина палласита

Марьялахти. На основе рассчитанных глубинных распределений скоростей образования треков тяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина из палласита была сформулирована гипотеза о доатмосферной истории родительского тела метеорита в Солнечной системе.

В разделе 5.2 описаны особенности зарядовых спектров ядер из некоторых кристаллов метеоритного оливина. В процессе работы были обнаружены спектры ядер необычной формы. При обработке образцов из метеорита Marjalahti (ML) после 24 часов травления в некоторых таблетках ML и нашли более 7000 треков, у которых зарядовое распределение имеет необычный вид.

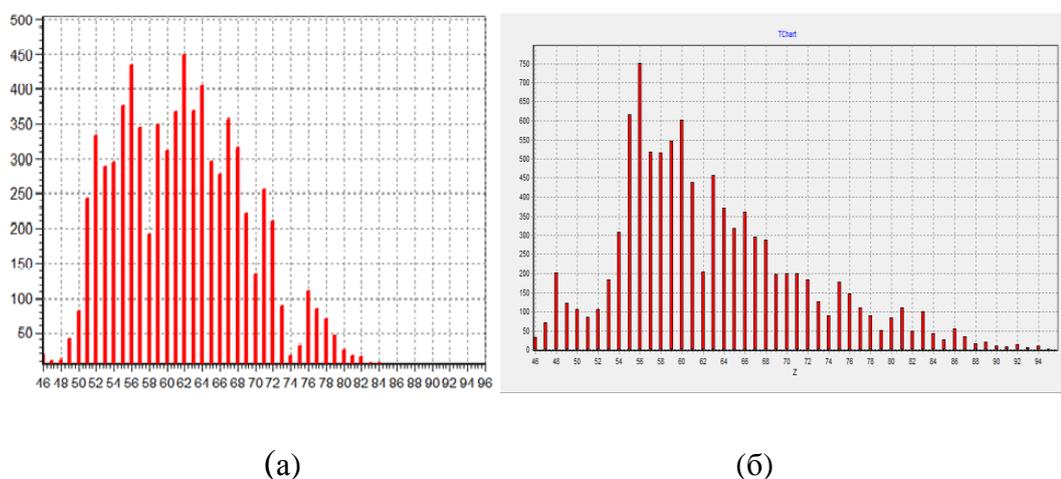


Рис. 13. Сравнение количества ядер по измерениям в некоторых кристаллах оливинов из метеорита Marjalahti. а) "Необычный" спектр (7126 треков, по оси X– заряд, по оси Y – количество треков); б) "Обычный" спектр (9766 треков, по оси X– заряд, по оси Y – количество треков).

Здесь собраны результаты из двух групп треков, первая (слева) включает те треки, где распределение необычное, а вторая (справа) треки с распределением обычного вида. Основное различие в том, что кристаллы взяты из разных мест метеорита. Кристаллы со спектром необычной формы взяты из лунки, находящейся вблизи края метеорита.

Во время падения метеорита на его поверхности создаётся очень большая температура вплоть до 2000°C, которая могла привести к отжигу треков вблизи поверхности, изменению их длины и ошибочному определению зарядов. Чтобы проверить это предположение были проведены расчеты по распространению тепла в метеорите. Сначала мы рассмотрели железный полубесконечный стержень, распространение тепла в котором описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

Если коэффициент температуропроводности  $a(T)$  постоянен, то это уравнение имеет аналитическое решение в виде функции вероятности. Однако в нашем случае коэффициент температуропроводности сильно зависят от температуры (Рис. 14). Поэтому уравнение (4) решалось численно. Задачей расчёта являлась оценка прогрева материала на определённой глубине за время падения метеорита.

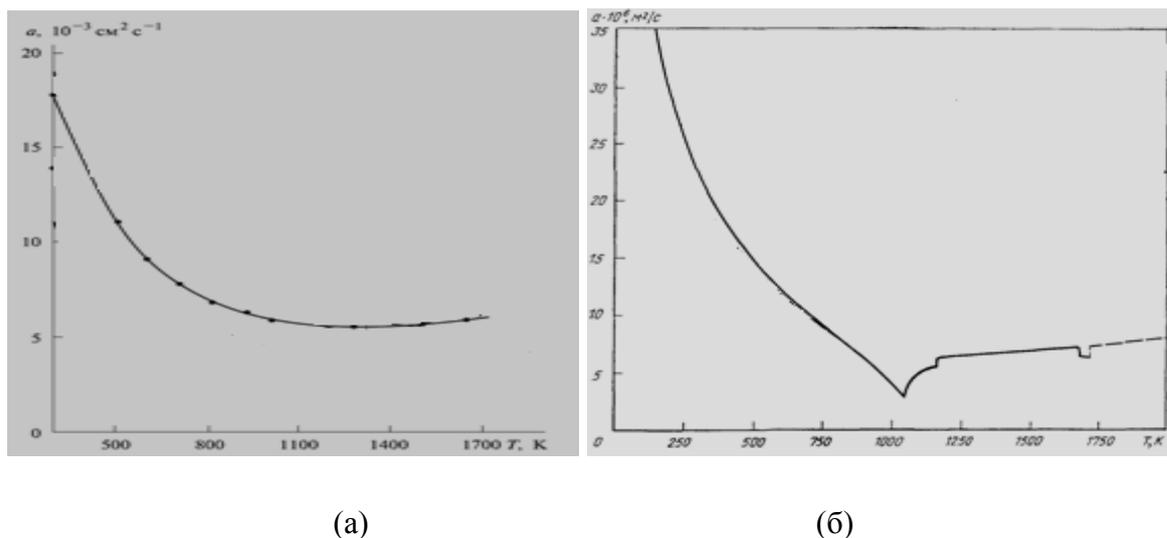


Рис. 14. Зависимость коэффициента температуропроводности  $a(T)$  для оливина [24] (а) и железа [25] (б).

Чтобы подтвердить правильность гипотезы о возможном отжиге треков и, соответственно, их укорочении, вначале была рассмотрена модель в виде полубесконечного железного стержня и показано, что на глубине в 1 см за время 20 секунд температура достигнет величины в 1400 градусов. Однако, полубесконечный стержень слишком упрощенная модель железной матрицы метеорита, тем не менее, позволившая подтвердить правильность выбранного подхода. Далее были произведены расчёты для более сложной модели - железной решётки с оливинами в её ячейках. На рис 15 приведена схема заложенной в расчет решётки с ее размерами и системой координат. Красные области соответствуют железу, светлые оливину. В «нуле» координат решетка в начальном состоянии нагрета до температуры 2000°C. Остальные части решетки в начальном состоянии имеют температуру 0 градусов. Двумерная модель распространения тепла описывается уравнением в частных производных

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

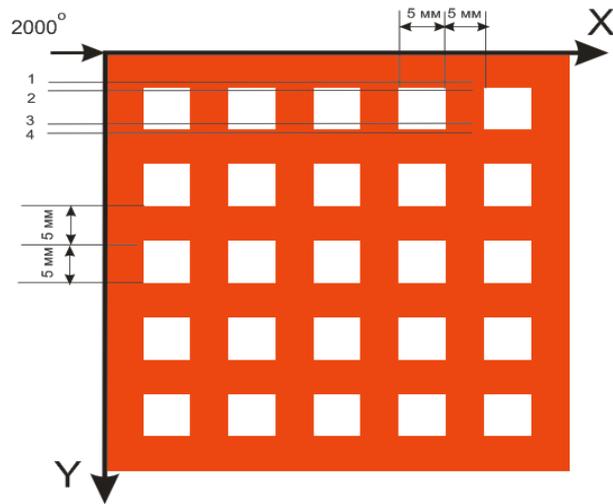


Рис. 15. Схема железной решётки с ячейками оливины.

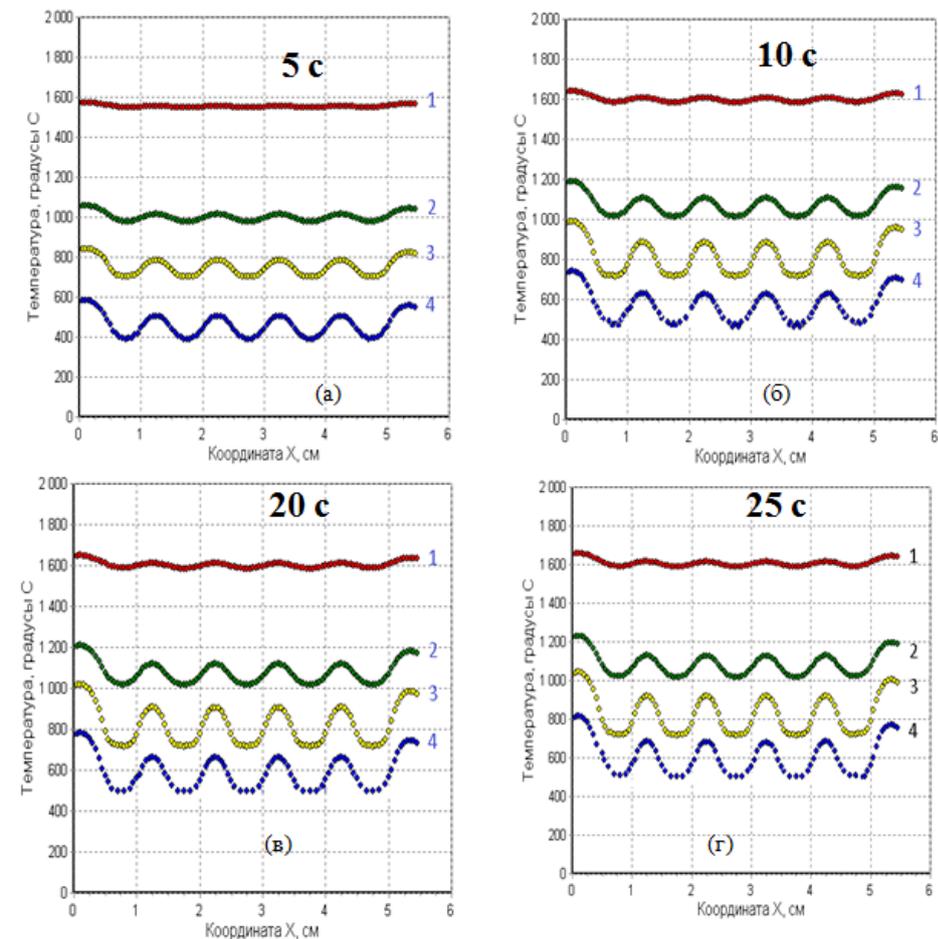


Рис. 16. Распределение температуры вдоль координаты X при фиксированных

расстояниях до нагретого края при разных значениях времени. Номера рядом с кривыми соответствуют расстояниям: 1 – 3мм, 2 – 7мм, 3 – 9мм, 4 – 12 мм.

На рисунках (16) показана температура в модельном объекте как функция координаты X в зависимости от расстояния до нагретого края и времени. Кривые в виде волн отражают различие в теплопроводности. Минимумы соответствуют оливину, где тепло распространяется медленнее. Видно, что на расстоянии 7 мм от края температура доходит до 1200-1300 градусов, что близко к температуре плавления оливина (1400 градусов) и может привести к отжигу. Таким образом, появление зарядовых распределений необычной формы в кристаллах оливина из метеоритов происходит из-за близости отдельных кристаллов оливина к расплавленному и по этой причине сильно нагретому краю метеорита, в результате чего происходит отжиг треков. Это приводит к существенному изменению геометрических особенностей треков и искажению их зарядового распределения.

В разделе 5.3 обсуждаются возможные причины возникновения треков необычной формы. К настоящему времени найдено около 26000 тысяч ядер с зарядом Z более 40. Среди них около 2% ядер имеют необычную форму протравленных каналов [26]. На рисунке 17 (а) показан типичный протравленный канал ядра, а на рисунке (б) показан протравленный канал, имеющий необычную форму “шприца”. Это канал начинается с узкого участка, который затем резко переходит в широкую часть. Природа такого поведения протравленных каналов была не ясна.

Было высказано предположение о влиянии области энергий вблизи пика Брега, где во много раз увеличивается ионизационная способность ядер. Критерием возможности получить протравленный канал является плотность выделенной энергии J. Пороговая величина J, выше которой можно получить протравленный канал, составляет  $J \sim 10^{12}$  рад  $\sim 10^8$  МэВ/мкм<sup>3</sup>

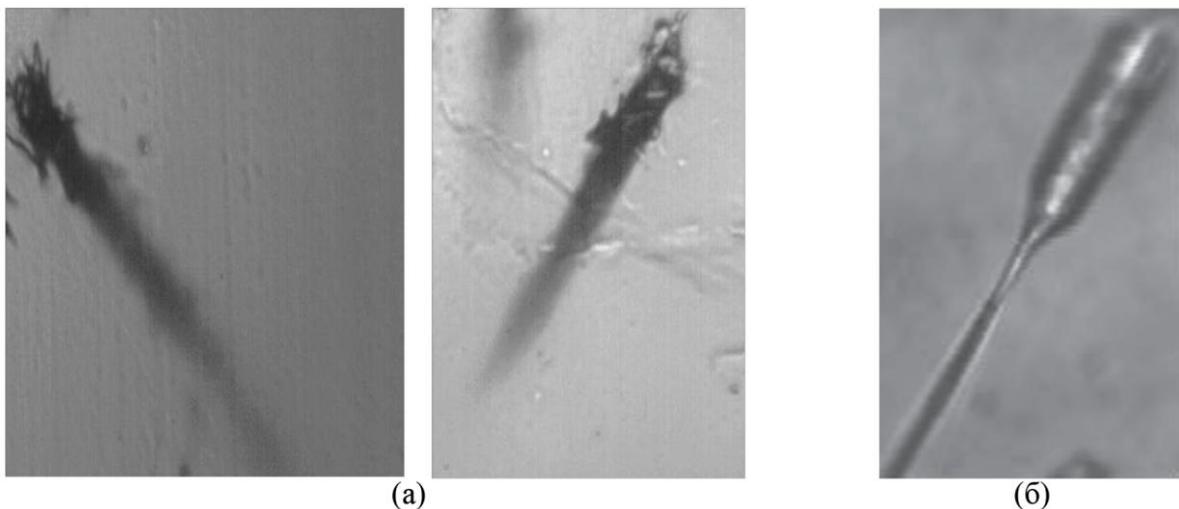


Рис. 17. Протравленные треки ядер в оптическом микроскопе (увеличение  $\times 40$ ): (а)

обычные треки и (б) трек шприца.

С целью проверки этой гипотезы автором было проведено детальное изучение пространственно-временной картины этого процесса прохождения ионов через оливин. Расчёты проведены с использованием программного пакета GEANT4 [27], который позволяет провести моделирование прохождения первичных и вторичных частиц через установку и проследить траекторию каждой из них на всём пути вплоть до точки останова. Материал детектора – оливин. В качестве налетающей частицы были взяты несколько ядер Ва, Au, U с энергиями от 1 до 100 МэВ/нуклон. В результате были получены различные распределения как функции времени и расстояния от иона (плотность выделенной энергии, плотность числа электронов, спектры первичных и вторичных электронов и т.д.). Диапазон расстояний от 2 нм до 6 мкм, а времени от 5 до 60 фс. Показано, что в некоторых случаях электроны могут достигать расстояний в несколько мкм, имея достаточно большую энергию.

Однако, полученные результаты показывают, что на расстоянии несколько микрон плотности выделенной энергии недостаточно для создания резкого изменения условий травления и образования “шприцов” диаметром в несколько микрометров. Таким образом, потребовались дополнительные исследования для выяснения причин образования необычных треков в кристалле оливина.

Поэтому исследована роль ядер отдачи и их способность создать условия для возникновения “шприцов”. В частности, была выяснена возможная роль ядерного канала взаимодействий при прохождении тяжелых ионов через оливин. При взаимодействии тяжелые ионы в оливине могут значительно трансформироваться (распасться на фрагменты, развалиться, подхватить кластеры и т.д.). Фрагменты налетающего ядра имеют большую скорость и будут разлетаться под малым углом друг к другу. При этом травящий раствор может захватить область между фрагментами, образуя по ширине “двойной” трек. Для проверки этой возможности были проведены расчёты прохождения тяжелых ионов через оливин для нескольких ядер при нескольких энергиях с помощью программного пакета Geant4. Были разыграны события взаимодействия ядер W, Pb и U при четырёх значениях энергии: 10, 50, 100 и 200 МэВ/А.

При каждом значении энергии были разыграны тысячи событий, среди которых отбирались только неупругие ядерные взаимодействия. Результаты расчётов показывают, что доля неупругих ядерных взаимодействий очень сильно зависит от энергии и в меньшей степени от заряда налетающего ядра (таблица 1).

Ядро	Энергия (МэВ/А), число разыгранных событий			
	10, 50000	50, 10000	100, 10000	200, 5000
W	17	172	374	502
Pb	16	169	430	535
U	29	179	416	532

Таблица 1. Количество неупругих событий для ядер W, Pb и U при различных энергиях и количество разыгранных событий

Были исследованы распределения фрагментов ядер по заряду и массе. На рисунке 18 представлены для примера результаты для ядер свинца и урана. Видно, что фрагментация происходит по-разному. Свинец, после неупругого взаимодействия, в основном, фрагментирует на ядро, по заряду и массе близкое к исходному, а примерно, в 25 % случаев - на два фрагмента почти одинаковых по массе. Уран, наоборот, распадается на два близких по массе фрагмента в большинстве случаев.

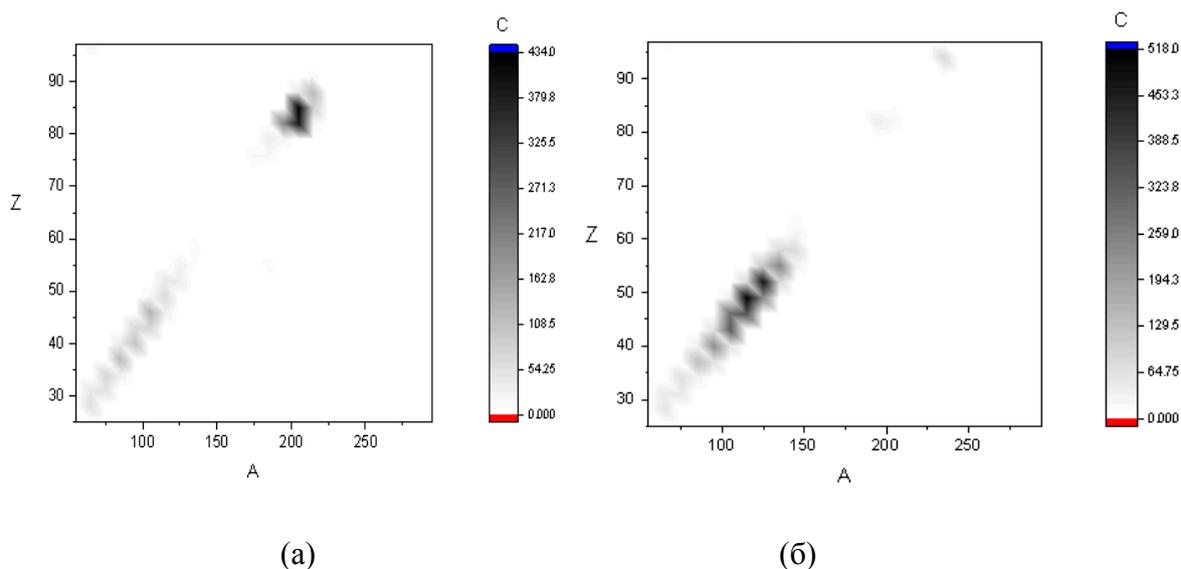


Рис. 18. Распределение по заряду и массе фрагментов свинца (а) и урана (б) при энергии 100 МэВ/нуклон.

Два фрагмента при достаточно больших энергиях летят под небольшим углом, и поэтому при травлении могут дать единый широкий канал, что приводит к появлению трека в форме шприца. Пробег фрагментов составляет 30-100 мкм, что сравнимо с длиной широкой части шприца. Угол в 8 градусов на этой длине приводит к ширине разлёта к 7-10 мкм, близкой к ширине шприца.

В разделе 5.4 описано выполненное исследование особенностей треков ядер в оливинах из метеорита Сеймчан.



Рис. 19. Метеорит Сеймчан в музее Татарстана

В 2020 году были получены из ГЕОХИ образцы метеорита Сеймчан, возраст которого 4-4,5 млрд. лет, а вес до падения оценивается в 60 тонн. Он упал на Землю, образовав метеоритный дождь. К настоящему времени найдены тысячи его осколков.

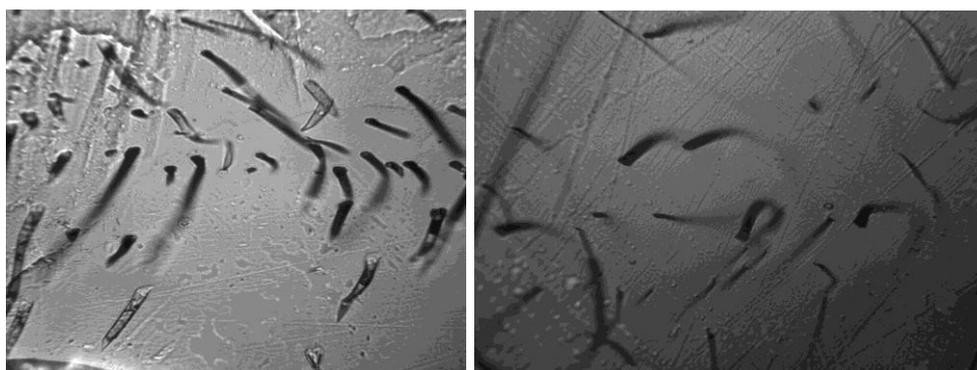


Рис. 20. Протравленные треки необычной формы в оптическом микроскопе

На рисунке 20 представлены изображения протравленных треков из разных мест метеорита Сеймчана в микроскопе (увеличение X40). Полученные треки кривые, поэтому для определения заряда они не подходят. Было высказано предположение, что искривление треков является результатом сильного нагрева и последующей конвекции слоёв оливина. Эта гипотеза нашла подтверждение в работе [28], в которой изучается ударная история этого метеорита. Полученные авторами данные свидетельствуют о наложенном импактном событии в истории Сеймчана. При соударении высвобождается огромное количество кинетической энергии, часть которой конвертируется в тепловую энергию. Структура метеоритов-палласитов крайне неоднородна. В них чередуются участки железа с плотностью  $8 \text{ г/см}^3$  и оливина с плотностью  $3,4 \text{ г/см}^3$ . При прохождении ударной волны через гетерогенную среду ударный нагрев вещества происходит крайне неравномерно с возникновением резких температурных градиентов на

границах между фазами, которые имеют разную плотность.

Пространственно-хаотический характер распространения ударной волны и неоднородный нагрев вещества при прохождении ударной волны способствуют локальному плавлению в участках вещества на границах между фазами, имеющими разную плотность. В результате происходит перемещение слоёв оливина и искривление треков. Важное значение имеет то, что остывание происходит крайне медленно. Так скорость остывания в космическом пространстве составляет около 20 градусов за миллион лет. В результате обсуждения этого явления с авторами приведённой выше статьи было получено подтверждение нашей гипотезы о расплавлении оливина и последующем перемещении его слоёв.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту. В ходе диссертационной работы:

1. Получены данные о зарядовом составе около 26000 ядер ГКЛ с зарядом  $> 40$ , в том числе более 22000 с  $Z > 55$ , которые согласуются с данными других экспериментов. Результаты работы являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер в природе. Зарегистрировано три ядра, заряд которых оценивается как  $119_{-6}^{+10}$ , оцененное время жизни этих сверхтяжелых ядер – минимум, десятилетия - на много порядков превышает время жизни трансфермиевых ядер, синтезированных на ускорителях. Полученные результаты являются аргументами в пользу теоретической гипотезы о существовании острова стабильности трансфермиевых природных ядер.

2. Разработаны алгоритмы и созданы программы на языке C++ для автоматизированного анализа и идентификации следов частиц в трековых детекторах.

3. Исследовано влияние отжига треков на зарядовый спектр ядер галактических космических лучей по результатам измерений в оливинах из метеоритов.

4. Проведен анализ фрагментации сверхтяжёлых ядер при их прохождении через вещество метеорита.

5. Изучена радиационная история палласитов по данным трекового анализа.

6. Проведен анализ возможных причин возникновения треков особой формы в оливинах из метеоритов.

7. Проведён анализ особенностей треков в метеорите Сеймчан.

8. На основе программных пакетов для автоматизированной обработки изображений в кристаллах оливинов создано программное обеспечение для оценки качества

ядерной фотоэмульсии и обработки изображений зёрен AgBr полученных на электронном микроскопе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Walter M. Bonivento/The SHiP experiment at CERN// 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 878 012014
- [2] Gorbunov, S.A., Konovalova, N.S. New Experiment NEWSdm for Direct Searches for Heavy Dark Matter Particles. *Phys. Atom. Nuclei* **83**, 83–91 (2020)
- [3] Rubin V C, Ford Jr. W K, Thonnard N *ApJ* **238** 471 (1980)
- [4] Borriello A, Salucci P, Danese L, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **341** 1109 (2003); astro-ph/0208268
- [5] Křížek M, Křížek F, Somer L *Bulg. Astron. J.* **25** 64 (2016)
- [6] Sofue Y, Rubin V *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **39** 137 (2001); astro-ph/0010594
- [7] Roberts M S, Rots A H, *Astron. Astrophys.* **26** 483 (1973)
- [8] Battaglia G et al. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **364** 433 (2005); astro-ph/0506102
- [9] Stewart G C et al. *ApJ* **278** 536 (1984)
- [10] Fabricant D, Gorenstein P *ApJ* **267** 535 (1983), Stewart G C et al. *ApJ* **278** 536 (1984)
- [11] Jeltema T E, Profumo S *ApJ* **686** 1045 (2008); astro-ph/0805.1054
- [12] Pretzl K *Spatium* 7 (2001); [http://www.issibern.ch/PDF-Files/Spatium\\_7.pdf](http://www.issibern.ch/PDF-Files/Spatium_7.pdf)
- [13] Jee M J et al. *ApJ* **661** 728 (2007); astro-ph/0705.2171
- [14] Press Release of NASA/ESA HUBBLE Space Telescope. Images: Dark matter ring in galaxy cluster Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652), <https://www.spacetelescope.org/images/heic0709a>
- [15] Ade P A R et al. *A&A* **594**, A13 (2016); astro-ph.CO/1502.01589
- [16] С.Дюррани, Р.Балл «Твердотельные ядерные детекторы» М., Энергоатомиздат, 1990,
- [17] Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М., Треки заряженных частиц в твёрдых телах, в 3-х частях, 1981, М., Энергоатомиздат.
- [18] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., *Astrophys. J.* 829(2), 120 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/829/2/120
- [19] В. П. Перелыгин, Ш. Б. Виик, О. Отгонсурэн, Препринт № P13-8359 ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1974).
- [20] S. K. Bhattacharya, J. N. Goswami and D. Lal, *J. Geophys. Res.* 78(34), 8356 (1973).
- [21] В. А. Алексеев, *Астрономический вестник* 38(3), 225 (2004).
- [22] J. N. Goswami, D. Lal, L. Willkening, *Space Sci. Rev.* 37, 111 (1984).
- [23] Е. М. Колесников, О.Отгонсурэн, В. П. Перелыгин, А. В. Фисенко, *Метеоритка* 36, 82 (1977).

- [24] G. I. Petrunin and E. V. Orlik, Vest. Mosk. Univ., Ser.Fiz. Astron., No. 6, 52 (2007).
- [25] V. E. Zinov'ev, Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures (Metallurgiya, Moscow, 1989) [in Russian].
- [26] N. Polukhina, N. Starkov, T. Soe, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, Vol. 46, No. 12, 2019, pp. 383.
- [27] J.Allison et al (GEANT4 collaboration), *Nuclear Instrument Methods A*, 506 (2003) 250
- [28] Н.Р.Хисина и др,ГЕОХИМИЯ,2020,том 65,№ 9,с.849-860

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. А.С.Барабаш, В.Я.Браднова, В.В.Дубиница, Н.П.Егоренкова, С.И.Коновалов, Е.А.Пожарова, Н.Г.Полухина, В.А.Смирнитский, Н.И.Старков, Тан Найнг Со, В.И.Юматов, М.М.Чернявский//Определение точности измерения энергии заряженных частиц по их пробегу в ядерной фотоэмульсии// Журнал«Краткие сообщения по физике»2012,№ 10,стр.35-42.
2. В.Д. Ашитков, А.С. барабаш, В.Я. Браднова, Л.А. Гончарова, О.И. Орурк, Е.А. Пожарова, Н.Г. Полухина, В.А. Смирнитский, Н.И.Старков, Тан Найнг Со, В.И.Юматов//Результаты разработки методики использования ядерной фотоэмульсии для эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада//Журнал«Краткие сообщения по физике»2013,№ 12,стр.49-61.
3. А.В.Багуля, М.С.Владимиров, А.Е.Волков, Л.А.Гончарова, С.А.Горбунов, Г.В.Калинина, Н.С.Коновалова, Н.М.Окательева, Т.А.Павлова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков,Тан Найнг Со, М.М.Чернявский,Т.В.Щедрина//Зарядовый спектр сверхтяжелых ядер галактических космических лучей, полученный в эксперименте Олимпия// Журнал«Краткие сообщения по физике»2015, № 5,стр.49-56
4. А.В. Aleksandrov, A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, V.I. Galkin, L.G. Dedenko, N.V. Fomenko, N.S. Konovalova, G. De Lellis, A.K. Managadze,O.I. Orurk, N.G. Polukhina, T.M. Roganova, T.V. Shchedrina, C. Sirignano, N.I. Starkov, Than Naing Soe, V.E. Tioukov, M.S. Vladimirov, S.G. Zemskova//Test Experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia// Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 713–719.
5. A.V. Bagulya, M.M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, G.M. Granich, M.V.Gorshenkov, G. V. Kalinina, N. S. Konovalova1, N. M. Okateva, T.A. Pavlova,N. G.

Polukhina, T.V. Shchedrina<sup>1</sup>, E.S.Savchenko<sup>4</sup>, N. I. Starkov, Than Naing Soe, M.S.Vladymyrov//Charge distribution of Superheavy Elements in Galactic Cosmic Rays on base of Investigations in Olivine Crystals from Meteorites//AIP Conference Proceedings, volume 1702.Issue 1, AIP Conference Proceedings 1702, 110005 (2015)

6. Victor Alexeev, Alexander Bagulya, Mikhail Chernyavsky, Alexei Gippius, Lyudmila Goncharova, Sergei Gorbunov, Mikhail Gorshenkov, Galina Kalinina, Nina Konovalova, Jie Liu, Pengfei Zhai, Natalia Okatyeva, Tatyana Pavlova, Natalia Polukhina, Nikolai Starkov, Than Naing Soe, Christina Trautmann, Elena Savchenko, Tatyana Shchedrina, Alexander Vasiliev, and Alexander Volkov// Charge Spectrum of Heavy and superheavy components of galactic cosmic rays results of the OLIMPIYA experiment// The Astrophysical Journal, 829(2):120 (18pp), 2016 October 1.

7. В. В. Дубинина, Н. П. Егоренкова, А. С. Кобякин, Е. А. Пожарова, Н. Г. Полухина, В. А. Смирнитский, Н. И. Старков, Н. С. Тан, М. М. Чернявский, Т. В.// Применение ядерной фотоэмульсии для поиска легкой темной материи// Журнал «Краткие сообщения по физике»2016, № 4,стр.52-58.

8. В.А.Алексеев, А.В.Багуля, А.Е.Волков,А.А.Гиппиус, Л.А.Гончарова, С.А.Горбунов, Г.В..Калинина, Н.С.Коновалова, Н.М.Окатыева, Т.А.Павлова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков,Тан Найнг Со, М.М.Чернявский,Т.В.Щедрина//Поиск Острова стабильности сверхтяжёлых ядер с помощью природных трековых детекторов// Журнал «Краткие сообщения по физике»2017, № 11,стр.41-47

9. Алексеев В.А., Багуля А.В., Волков А.Е., Гончарова Л.А., Горбунов С.А., Калинина Г.В.1, Коновалова Н.С., Окатыева Н.М., Павлова Т.А., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Тан Найнг Со, Чернявский М.М., Щедрина Т.В.//Изучение следов сверхтяжелых ядер галактических космических лучей в оливинах палласитов трековым методом//Труды ВЕСЭМПГ-2017, стр.180-183.

10. Alexeev V.A., Bagulya A.V., Volkov A.E., Goncharova L.A., Gorbunov S.A., Kalinina G.V.1, Konovalova N.S., Okateva N.M., Pavlova T.A., Polukhina N.G., Starkov N.I., Than Naing Soe, Chernyvsky M.M., Shchedrina T.V.//The track studies of olivine crystals in the pallasites//Problems of Planetology, Cosmochemistry and Meteoritica//Institute of Experimental Mineralogy//Experiment in Geosciences 2018,Volume 24 N 1,стр.6-9.

11. В. А. Алексеев, А. В. Багуля, А. Е. Волков, А. А. Гиппиус, Л. А. Гончарова, С. А.

Горбунов, В. М. Грачев, А. Б. Дашкина, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Т. А. Павлова, Н. Г. Полухина, Н. И. Старков, Тан Найнг Со, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина//Изучение радиационной истории палласитов методом трекового анализа// Журнал «Краткие сообщения по физике»2019, № 8,стр.15-22

12. A. B. Aleksandrov , V. A. Alekseev , A. V. Bagulya , A. B. Dashkina ,M. M. Chernyavskiy , A. A. Gippius a , L. A. Goncharova ,S. A. Gorbunov , V. M. Grachev g, G. V. Kalinina e , N. S. Konovalova ,N. M. Okateva , T. A. Pavlova , N. G. Polukhina ,N. I. Starkov , T. N. Soe , T. V. Shchedrina , and A. E. Volkov // Determination of Charges of Superheavy Nuclei in Finding them in Nature// Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2019, Vol. 46, No. 12, pp. 383-386

13. Y. Suzuki,S. Takahashi, N. Starkov ,S. Than Naing, C. Ahdida, R. Albanese,a A. Alexandrov, A. Anokhina, S. Aoki, G. Arduini,E. Atkin, N. Azorskiy, F. Baaltasar Dos Santos J.J. Back, V. Bayliss G. Bencivenni Y.A. Berdnikov, A.Y. Berdnikov, I. Berezkina//Sensitivity of the SHiP experiment to Heavy Neutral Leptons//journal of high energy physics, 2019. Vol. 1904. No. 77. JHEP 04 2019 077,<https://arxiv.org/abs/1811.00930>

14. S. Takahashi<sup>1</sup>, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini<sup>44</sup>, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov., S. Ulin et al., //The experimental facility for the Search for Hidden Particles at the CERN SPS, Journal of Instrumentation (JINST), 2019, Volume 14, P03025, DOI 10.1088/1748-0221/14/03/P03025

15. Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev et al., //Fast simulation of muons produced at the SHiP experiment using Generative Adversarial Networks, Journal of Instrumentation (JINST), 2019, Volume 14, P11028, DOI 10.1088/1748-0221/14/11/P11028 .

16. M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille et al., //The Magnet of the Scattering and Neutrino Detector for the SHiP experiment at CERN, Journal of Instrumentation,Volume 15, January 2020, P01027 , <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/01/P01027>

17. S. Takahashi, J. L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi et al., // Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons

interacting in a thick molybdenum tungsten target// The European Physical Journal C volume 80, Article number: 284 (2020) // <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-7788-y>

18. Than Naing Soe, N. Poluhina, and N. Starkov// Investigation of the Features of Etched Tracks of Superheavy Nuclei in Olivines from Meteorites // Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 9, pp. 1297–1303.

19. A. B. Alexandrova, A. V. Bagulya, A. E. Volkova, A. A. Gippiusa, L. A. Goncharovaa, S. A. Gorbunova, V. M. Gracheve, G. V. Kalininaf, N. S. Konovalovaa, N. M. Okatevaa, T. A. Pavlova, N. G. Polukhinaa, N. I. Starkova, Than Naing Soe, M. M. Chernyavskii, and T. V. Shchedrinaa// Anomaly of the Charge Spectrum of Galactic Cosmic Ray Nuclei in Olivines as Evidence of Meteorite Radiation History// Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2020, Vol. 47, No. 12, pp. 381–384.

20. Than Naing Soe, N. G. Polukhina & N. I. Starkov//Algorithm for Determining the Thickness of the Cut Olivine Layer when Determining Charges of Galactic Nuclei//Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2021, volume 48, pp.131–134.

21. Г.В.Калинина, Тан Найнг Со, Н.И. Старков// Аномалия в спектре ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов// Ядерная физика, 2021, том 84, №6, стр. 490–495.

22. Than Naing Soe, N. G. Polukhina, and N. I. Starkov//Investigation of Dynamics of Heat Propagation in Meteorite Matter and Its Influence on Geometric Features of Tracks of Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites// Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 5, pp. 643–648.

23. Тан Найнг Со, Полухина Н.Г., Старков Н.И.//Роль ядерного канала взаимодействий при прохождении тяжелых ионов через оливин//Журнал «Краткие сообщения по физике»2021, № 12,стр.42-48.

24. A. Sokolenko, E. Solodko, N. Starkov, L. Stoel, M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov et al.//Sensitivity of the SHiP experiment to dark photons decaying to a pair of charged particles// Eur. Phys. J. C (2021) 81: 451// <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09224-3>

25. A. Sokolenko, E. Solodko, N. Starkov, L. Stoel, M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii//Sensitivity of the SHiP experiment to light dark matter//Journal of High

26. J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, et al., //Track reconstruction and matching between emulsion and silicon pixel detectors for the SHiP-charm experiment// Journal of Instrumentation, Volume 17, March 2022//<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/P03013>

27. П. А. Бабаев , А. В. Багуля , А. Е. Волков , С. А. Горбунов , Г. В. Калинина , Н. С. Коновалова , Н. М. Окатьева , Н. Г. Полухина , Ж. Т. Сады ков , Н. И. Старков , Е. Н. Старкова , Тан Найнг Со , М. М. Чернявский , Т. В. Щедрина//ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ФРАГМЕНТАЦИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПАЛЛАСИТАХ//ЖЭТФ, 2022, том 161, вып. 4, стр. 610–615

### Препринты

28. A. Alexandrov V. Alexeev, A. Bagulya, A. Dashkina, M. Chernyavsky, A. Gippius, a L. Goncharova S. Gorbunov, V. Grachev, f G. Kalinina, d N. Konovalova, a N. Okateva, T. Pavlova, N. Polukhina, R. Rymzhanov, N. Starkov, T. N. Soe, T. Shchedrina, and A. Volkova//Natural superheavy nuclei in astrophysical data// arXiv:1908.02931 [nucl-ex]

29. M.E. Stramaglia, D. Sukhonos, Y. Suzuki, S. Takahashi, J.L. Tastet, P. Teterin, S. Than Naing, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov et al., // Measurement of the muon flux for the SHiP experiment // arXiv:2001.04784 [physics.ins-det]

30. A. Sokolenko , E. Solodko , N. Starkov , L. Stoel , M.E. Stramaglia , D. Strelalina , D. Sukhonos , Y. Suzuki , S. Takahashi , J.L. Tastet , P. Teterin, S. Than Naing , I. Timiryasov , V. Tioukov, D. Tommasini , M. Torii , N. Tosi, F. Tramontano, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin , E. Ursov, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev, G. Vankova-Kirilova, F. Vannucci et al., //SND@LHC //arxiv.org/abs/2002.08722

31. E. Solodko, N. Starkov , L. Stoel, M.E. Stramaglia, P. Teterin, Than Naing Soe, I. Timiryasov, V. Tioukov, D. Tommasini, M. Torii, N. Tosi, D. Treille, R. Tsenov, S. Ulin, E. Ursov, A. Ustyuzhanin, Z. Uteshev et al., //The SHiP experiment at the proposed CERN SPS Beam Dump Facility// arXiv:2112.01487v1 [physics.ins-det] 2 Dec 2021