

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

На правах рукописи  
УДК 539.171+539.126.6

ОКАТЬЕВА  
Наталья Михайловна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ЯДЕР  
ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛЫ  
ОЛИВИНА ИЗ МЕТЕОРИТА

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Лаборатории элементарных частиц Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,

Багуля

Александр Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

Роганова

зав. лабораторией НИИЯФ МГУ

Татьяна Михайловна

доктор физико-математических наук,

Зарубин

начальник сектора

Павел Игоревич

Лаборатории физики высоких энергий

им. В.И.Векслера и А.М.Балдина ОИЯИ

Ведущая организация:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Защита диссертации состоится “ 24 ” июня 2013 г. 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 г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

Факс: 8(495)135-78-80

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан “ 22 ” мая 2013 г.

Электронная версия автореферата размещена: <http://www.lebedev.ru>

Учёный секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Серов

Александр Васильевич

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена расчетному моделированию процессов прохождения ядер галактических космических лучей в веществе метеорита-палласита.

### **Актуальность диссертации**

В рамках уникального эксперимента ОЛИМПИА («Оливия из Метеоритов – Поиск тяжелых И сверхтяжелых Ядер») по поиску и идентификации природных сверхтяжелых ядер группами сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН была разработана методика идентификации заряда ядер галактических космических лучей (ГКЛ) по трекам, травимым в кристаллах оливина из метеоритов [1]. Методика основана на определении заряда ядра по расчетной зависимости заряда от величины остаточного пробега и экспериментально установленной зависимости между зарядом и скоростью травления трека вдоль следа торможения ядра [1][2]. Выполнение исследований зарядового спектра сверхтяжелых ядер ГКЛ по их трекам, регистрируемым в кристаллах оливина из палласитов, привело к необходимости оценки дополнительных поправок, связанных с учетом процесса фрагментации первичных ядер ГКЛ в веществе исследуемых метеоритов. Существенным при этом является то, что в результате фрагментации тяжелых ядер ГКЛ происходит как занижение числа регистрируемых ядер ГКЛ данного сорта, так и увеличение потока более легких вторичных ядер – продуктов фрагментации.

В данной работе проведено полномасштабное моделирование реального эксперимента по поиску и идентификации природных сверхтяжелых ядер с использованием программного пакета SRIM [3] и программного комплекса GEANT4 [4]. Выполнены модельные расчеты зависимостей потерь энергии и пробегов от энергии для большого набора ядер, ставшие основой методики идентификации зарядов частиц.

### **Цель диссертационной работы**

Для исследования ядер тяжелых (VH-группы с зарядом  $23 < Z < 29$ ) и сверхтяжелых (VVH,  $Z \geq 30$ ) элементов галактических космических лучей (ГКЛ) на протяжении последних десятилетий использовались различные методы. В рамках проекта ОЛИМПИА [1] исследуется зарядовый спектр ядер ГКЛ по их трекам в кристаллах оливина из метеоритов EagleStation (радиационный возраст 300 млн. лет) и Marjalahti (радиационный возраст 185 млн. лет). Группами

сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН была разработана методика идентификации заряда ядер в кристаллах оливина по двум параметрам: определению заряда ядра по расчетной зависимости заряда от величины остаточного пробега и экспериментально установленной зависимости между скоростью травления трека вдоль следа торможения и величиной его остаточного пробега [2].

Основной целью диссертационной работы было выполнение полномасштабного моделирования реального эксперимента по поиску и идентификации треков природных сверхтяжелых ядер в метеоритном оливине с использованием программного пакета SRIM [3] и программного комплекса GEANT4 [4]. Совместное использование программ позволило провести сравнение получаемых результатов, и тем самым повысить их надежность. Пакет SRIM в основном использовался для вычисления ионизационных потерь энергии ядер в веществе. Использование пакета GEANT4 для моделирования прохождения ионов в веществе позволило учесть все возможные процессы взаимодействия, в частности, фрагментацию [5].

В качестве основного инструмента моделирования был создан пакет *iion*, который представляет собой модернизированную в соответствии с задачами исследования версию пакета *Nadr01*, входящего в состав GEANT4 в качестве официального примера его применения.

Учет процессов взаимодействия тяжелых ядер с веществом метеорита, включая их фрагментацию, изучение влияния данных процессов на изменение зарядового состава ГКЛ стало также одной из главных целей выполненных модельных расчетов.

В число задач диссертационной работы входила обязательная проверка правильности выполненных расчетов, для чего были проведены калибровочные эксперименты по облучению кристаллов оливина ядрами  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{197}\text{Au}$  на ускорителе, продемонстрировавшие хорошее согласие расчетных и экспериментальных зависимостей. Успешно выполненные модельные расчеты позволили корректно идентифицировать примерно 6000 ядер с зарядом более 55 в кристаллах оливинов из метеоритов.

### **Научная новизна и практическая ценность работы**

В рамках проекта ОЛИМПИЯ решается одна из самых актуальных задач современной физики - поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер в природе. Эта проблема связана с вопросом о существовании «островов стабильности» в Периодической системе элементов. В.Л.Гинзбург считал проблему поиска

сверхтяжелых ядер в природе одной из самых важных для физики XXI в. и включил ее в свой знаменитый список первоочередных задач [6]. По инициативе В.Л.Гинзбурга в ФИАНе начали заниматься поиском следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в кристаллах оливинов из метеоритов. Работа выполняется вместе с сотрудниками ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, при поддержке и во взаимодействии с Лабораторией ядерных реакций имени Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

✓ разработан и оптимизирован программный пакет, входящий в состав GEANT4, для выполнения модельных расчетов зависимостей потерь энергии и пробегов от энергии для большого набора ядер, которые стали основой методики идентификации зарядов частиц уникального эксперимента по поиску сверхтяжелых ядер в галактических космических лучах по трекам в кристаллах метеоритных оливинов;

✓ проведено полномасштабное моделирование процесса фрагментации ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ ( $Z > 60$ ) при их прохождении в веществе метеорита-палласита.

Практическая ценность данной диссертационной работы заключается, прежде всего, в том, что исключительно на основе полученных расчетных зависимостей была выполнена успешная идентификация зарядов около 6000 ядер галактических космических лучей по их трекам, обнаруженным в кристаллах метеоритных оливинов.

Кроме того:

- показано, что расчетные оценки поправок, связанных с учетом процесса фрагментации первичных ядер ГКЛ в веществе исследуемых метеоритов дают дополнительную информацию для определения зарядового распределения первичного космического излучения;

- разработан и оптимизирован программный пакет, входящий в состав GEANT4, для получения целого набора параметров ядер, проникающих на различную глубину в тело облучаемого метеорита, и позволяющий генерировать энергетические, пространственные и угловые распределения первичных ядер;

- разработаны и реализованы критерии для полномасштабного моделирования процесса фрагментации ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ ( $Z > 60$ ) при их прохождении в веществе метеорита-палласита.

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

1) В рамках уникального эксперимента по поиску сверхтяжелых ядер в галактических космических лучах по трекам в кристаллах метеоритных оливинов выполнены модельные расчеты зависимостей потерь энергии и пробегов от энергии для большого набора ядер, ставшие основой методики идентификации зарядов частиц.

2) Проведено полномасштабное моделирование процесса фрагментации ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ ( $Z > 60$ ) при их прохождении в веществе метеорита-палласита.

3) Проведены калибровочные эксперименты по облучению кристаллов оливина ядрами  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{197}\text{Au}$  на ускорителе, подтвердившие правильность выполненных модельных расчетов.

4) На основе разработанной методики исследования треков галактических космических ядер в кристаллах оливинов из метеоритов обнаружены и идентифицированы 6000 ядер с зарядом более 55. Полученное зарядовое распределение ядер хорошо согласуется с данными экспериментов ARIEL-6 и HEAO-3.

## **Личный вклад**

Автор принимал непосредственное участие в реализации проекта ОЛИМПИА, выполняя измерения параметров треков ядер для разработки методики идентификации ядер галактических космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов. Автором были созданы алгоритм и программное обеспечение для обработки результатов измерения параметров треков, в составе группы подготовлены и проведены калибровочные эксперименты на ускорителе тяжелых ионов, выполнены модельные расчёты зависимостей потерь энергии и пробегов от энергии для большого набора ядер. Результаты, представленные к защите, получены при определяющем вкладе диссертанта.

## **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались автором на 72 ежегодной международной конференции Метеорологического общества (13-19 июля 2009, Нанси, Франция) [7], 22-ой Европейской конференции по космическим лучам (3-6 августа 2010, Турку, Финляндия) [8], Молодежной научной конференции по минералогии (15-18 марта 2011, Миасс) [9], Всероссийском ежегодном семинаре

по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (17-18 апреля 2013, ГЕОХИ РАН), на семинарах ФИАН.

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах [I-VI].

Общий список публикаций автора включает 22 статьи.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объём работы составляет 90 , включая 40 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 94 наименований.

### **Содержание диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность исследований, направленных на изучение распространенности химических элементов в составе космических лучей как в области легких, начиная с водорода и гелия, так и в области тяжелых ( $Z > 20$ ) и сверхтяжелых ( $Z > 50$ ) ядер. При этом особое значение имеют работы, направленные на исследование ядер ультратяжелой ( $82 \leq Z \leq 92$ ) компоненты. Регистрация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами  $Z \geq 100$  принадлежит к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [6].

**В первой главе** представлен подробный обзор известных методов исследования ГКЛ с целью решения вопросов:

- по проблемам собственно ядерной физики и физики элементарных частиц;
- о явлениях, связанных с взаимодействием космических лучей с космическими объектами, планетами, их атмосферой и магнитными полями;
- о процессах возникновения космических лучей и их ускорения в космическом пространстве.

Анализ существующих в настоящее время обобщенных данных и теорий механизмов образования элементов, свидетельствуют о том, что постановка экспериментов по поиску и регистрации ядер ультратяжёлых элементов в природе представляет собой реальную задачу, хотя поток этих ядер очень мал.

В обзоре известных трековых методов изучения зарядового состава ядер ГКЛ сообщается об основных этапах и переломных моментах в их развитии. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по измерению состава космических лучей свидетельствуют о ничтожно малом количестве тяжёлых элементов в их составе.

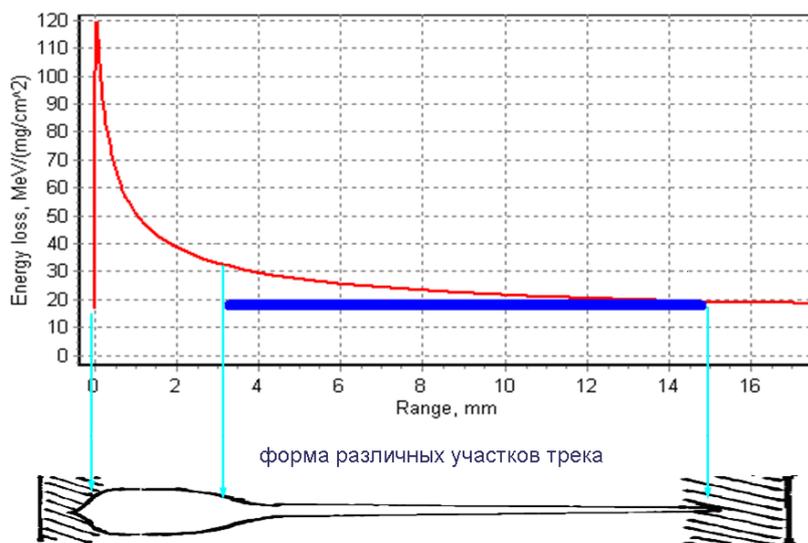
Группами сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН в ходе выполнения проекта ОЛИМПИА [1] разработана новая методика идентификации, и измерения параметров следов торможения ядер в объеме кристаллов оливина из метеоритов с использованием современного высокоэффективного Полностью Автоматизированного Измерительного КОМПлекса (ПАВИКОМ) [10]. Длительная экспозиция метеоритов в космосе приводит к значительному преимуществу данного метода по сравнению с другими.

**Во второй главе** изложены методические основы трековых исследований кристаллов оливина из метеоритов палласитов.

Возможность проведения поиска, регистрации и идентификации ядер тяжелых элементов в кристаллах оливина из 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 ротационно-ненарушенной областью кристалла. Для обеспечения возможности просмотра кристаллов на оптическом микроскопе проводится травление кристаллов с помощью специально подобранного химического раствора в определенных температурных условиях [11] [12].

Применяемая методика химического травления основана на том, что области траекторий торможения ядер в первую очередь подвергаются растворению химически агрессивным реагентом. Эффективность протравливания треков зависит от степени повреждений и определяется, в основном, величиной удельных ионизационных потерь энергии тормозящегося ядра. Для каждого силикатного минерала, который рассматривается как трековый детектор, существует минимальное значение этих потерь. Пороговая величина удельных ионизационных потерь энергии для оливина составляет  $(dE/dx)_{эл} \approx 18 \text{ МэВ}/(\text{мг}\cdot\text{см}^{-2})$ . С помощью программы SRIM [3] проведены расчёты потерь энергии ядер ( $Z \geq 26$ ) при взаимодействии с электронами тормозящей среды оливина и получена зависимость энергии частицы от остаточного пробега.

Характер кривой удельных ионизационных потерь энергии ядра соответствует структуре полностью протравленных каналов различных участков пути торможения тяжёлых ядер перед их остановкой, которые имеют форму "шприца" (см. Рис.1). Примеры микрофотографий реально наблюдаемых в оптический микроскоп треков сверхтяжелых ядер, протравленных в кристаллах оливина из метеорита служат иллюстрацией механизма формирования зон структурного нарушения кристалла вдоль следа торможения ядер (см. Рис.2).



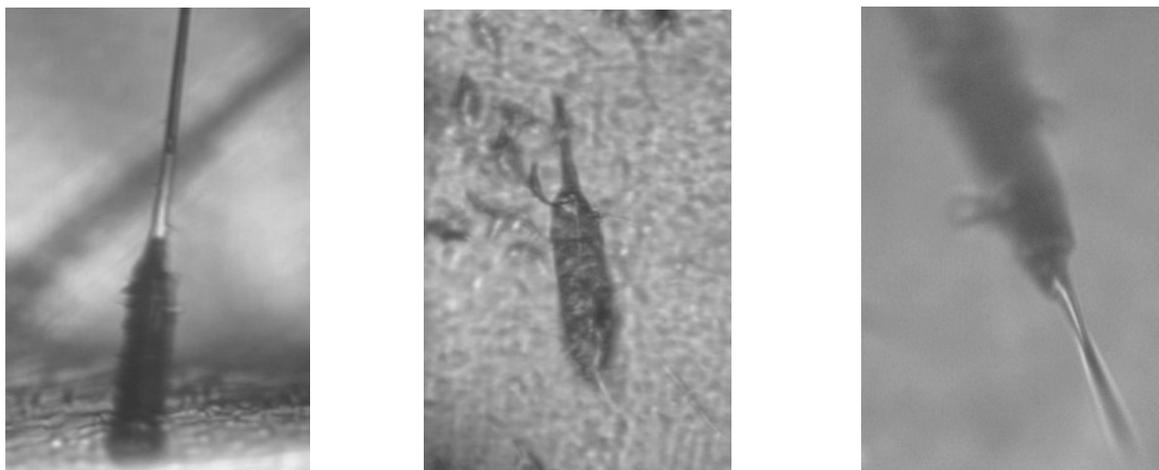
**Рис.1.** Схема формирования травимого участка трека в оливине.

Вверху – удельные ионизационные потери энергии ядра.

Внизу – геометрическая форма трека.

Как уже указывалось, основная задача проекта ОЛИМПИА [1] заключается в определении зарядового состава ГКЛ в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Величина заряда связана с характеристиками протравленного трека. Основной из них является травимая длина  $L_{тр}$ , однако для ядер с зарядом  $Z > 70$ , она превышает средние размеры исследуемых образцов кристаллов оливина и в большинстве случаев не может быть полностью измерена.

Для выхода из создавшегося положения было предложено использовать дополнительный параметр – скорость травления трека в длину ( $V_L$ ). Величина скорости при травлении разных участков трека изменяется существенным образом, возрастая в среднем в 5 раз при переходе от конусообразной зоны трека к его основной части (см. Рис.1).



**Рис.2.** Микрофотографии треков ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, травимых в кристаллах оливина из палласитов в области перехода от иглообразной к основной части. Размер поля зрения на всех микрофотографиях ~ (100×140) микрон.

Таким образом, методика основана на определении зарядов ядер по двум параметрам: зависимости заряда от остаточной длины трека и экспериментально установленной зависимости между скоростью травления трека вдоль следа торможения ядра и величиной его остаточного пробега.

Используемые в данной работе метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой матрицы, в объеме которой находятся поликристаллические включения оливина - полупрозрачного минерала желтоватого цвета. Размер отдельных включений достигает 1-2 см, причем они состоят из более мелких (в среднем 0.5-1 мм) индивидуальных кристаллов оливина. По своей кристаллографической структуре природный минерал оливин ( $Mg_{0.88}Fe_{0.12}$ ) $_2SiO_4$  относится к силикатам с изолированными кремнекислородными тетраэдрами ( $SiO_4$ ), соединёнными между собой с помощью катионов Mg или Fe [13]. Заряженные частицы до попадания в кристаллы оливина проходят некоторое расстояние через железо-никелевую матрицу тела метеороида (метеоритного тела доатмосферных размеров, находящегося в космическом пространстве). По результатам анализа плотности треков VH-ядер глубина залегания кристаллов оливина от ближайшей точки на доатмосферной поверхности метеороида составляет: для исследуемого образца метеорита Eagle Station (1,5 – 4) см, для метеорита Marjalahti (4 – 8) см.

**В третьей главе** проанализированы результаты расчётов и методики расчётов с использованием программ SRIM [3] и GEANT4 [4]. Совместное

использование программ позволило проводить сравнение получаемых результатов, и тем самым повысить их надежность.

SRIM включает в себя набор программ для вычисления различных параметров процесса взаимодействия ионов с веществом. Широкое использование SRIM-алгоритма в задачах моделирования движения ускоренных ионов в твердом теле во многом обусловлено простотой и вместе с тем достаточной корректностью описания процесса упругого рассеяния ионов на атомах мишени. Исходя из современных тенденций в численном моделировании желательно, чтобы программа была открыта для пользователя, что, во-первых, даст возможность ее тщательно отладить, найти ошибки, которых, как известно, в ранних программах SRIM было достаточно. Во-вторых, выбор языка программирования, операционной системы, построение современной базы данных материалов электронной техники с возможностью ее самостоятельного расширения, возможности распараллеливания вычислений – все эти факторы весьма важны для современного построения расчётов, но не нашли своего отражения в новых версиях SRIM. Программы с открытым доступом к исходным кодам, безусловно, более перспективны, так как могут быть доработаны другими коллективами авторов, имеющих определенные наработки по каким-то достаточно узким направлениям.

Основным конкурентом программы SRIM является в настоящее время программный комплекс с открытым исходным кодом GEANT4: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>. Открытость программного кода позволяет легко проводить его модернизацию.

Объектно-ориентированный пакет библиотек GEANT4 разработан международной научной коллаборацией в Европейском центре ядерных исследований (CERN – Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire) и предназначен для моделирования взаимодействия излучения с веществом на основе метода Монте-Карло. Встроенные средства GEANT4 позволяют полностью описать физический эксперимент: геометрию системы, химический состав образующих его материалов, типы частиц, участвующих в эксперименте, и физические процессы, происходящие при взаимодействии частиц. GEANT4 представляет собой объектно-ориентированную библиотеку программ на языке C++, включающую в себя описание всех известных частиц и физических процессов, протекающих при взаимодействии излучения с веществом. Использование объектно-ориентированной технологии программирования позволяет достигнуть прозрачности при создании различных программных

модулей. Например, алгоритм, с помощью которого вычисляются сечения взаимодействия, полностью отделен от алгоритма, отвечающего за использование этих сечений, что позволяет легко изменить или расширить физическую модель интересующих нас взаимодействий. Пакет состоит из набора классов, которые можно разделить на следующие категории:

- глобальный (global) – содержит систему единиц, констант, генераторы случайных чисел;
- материалы и частицы (materials & particles) – реализует функции необходимые для описания физических свойств частиц и материалов;
- геометрия (geometry) – позволяет описывать геометрию системы;
- процессы (processes) – содержит модели физических взаимодействий: электромагнитных и адронных;
- треки (track) – реализует функции необходимые для определения треков частиц, и передачи необходимой информации чувствительным объемам (детекторам);
- события (events) – управление событиями (запуском начальной частицы и управление всеми образовавшимися вторичными частицами);
- запуск (run) – управление группой событий происходящих при одной и той же конфигурации геометрии системы.

На каждой стадии процесса моделирования в рамках GEANT4 пользователю доступна полная информация о состоянии частицы: ее координаты, импульс, энергосодержание в элементарном объеме и многое другое. Эта информация и используется при дальнейшем анализе.

В качестве основного инструмента моделирования прохождения ядер ГКЛ через кристаллы оливина при выполнении диссертационной работы был создан пакет `iiop`, который представляет собой модернизированную в соответствии с задачами нашего исследования версию пакета `Nadr01`, входящего в состав GEANT4 в качестве официального примера его применения. В пакете `iiop` была добавлена возможность изучать многие параметры ядер, проникающих на различную глубину в теле облучаемого метеорита, и генерировать энергетические, пространственные и угловые распределения первичных ядер с использованием подпакета `G4GeneralParticleSource (GPS)` [14], который является частью пакета GEANT4. Результатом модельных расчётов являются распределения как первичных, так и вторично образованных в процессе фрагментации ядер по различным параметрам, позволяющие проводить дальнейший анализ.

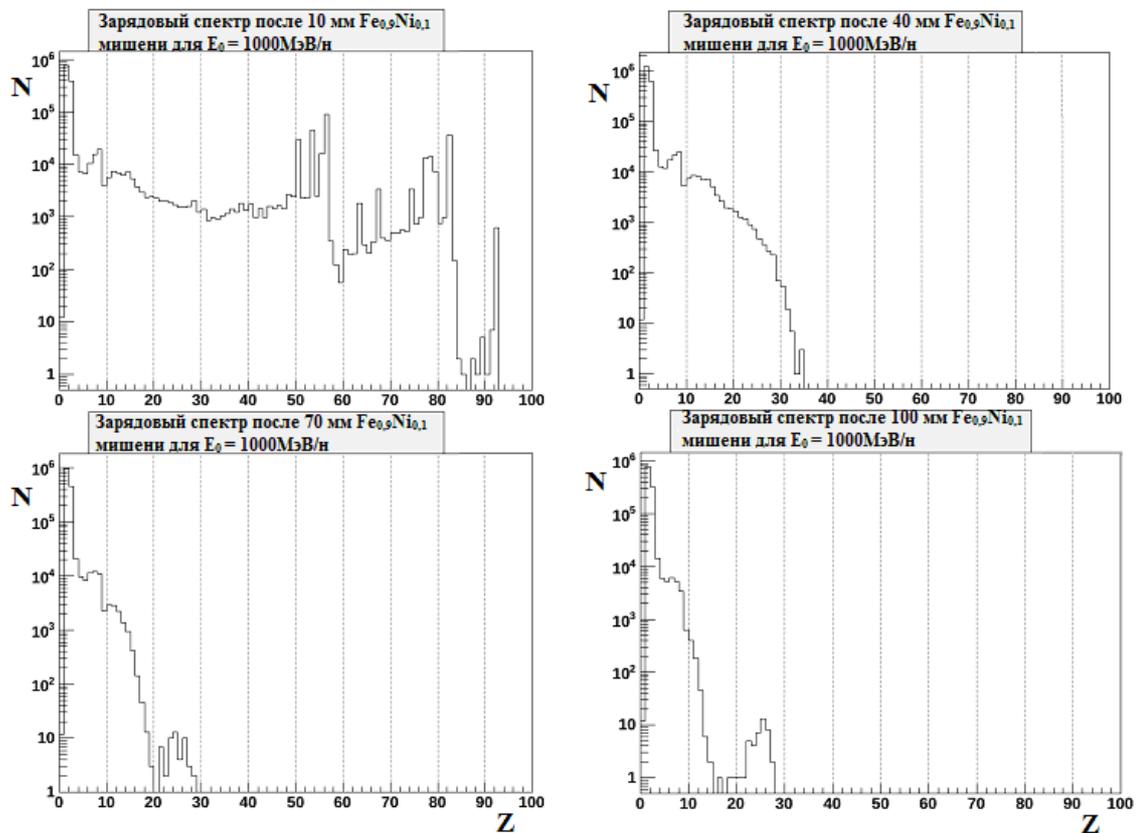
Для проверки правильности работы программ были проведены расчёты прохождения ядер  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}$  через вещество разного состава в широком диапазоне энергий [5]. Полученные результаты моделирования сравнивались с табличными данными [15], в которых представлены тормозные способности и пробеги ионов с зарядами  $2 \leq Z \leq 103$  для диапазона энергий от 2.5 до 500 МэВ/нуклон в различных материалах. Результаты расчётов показали хорошее согласие с данными калибровочных экспериментов в пределах статистических ошибок, что позволило сделать вывод о возможности использования разработанного пакета *iion* в GEANT4 для данного эксперимента.

**В четвёртой главе** представлены результаты полномасштабного моделирования реального эксперимента с использованием программного пакета SRIM и программного комплекса GEANT4. Пакет SRIM в основном использовался для вычисления ионизационных потерь энергии ядер в веществе. Использование пакета GEANT4 для моделирования прохождения ионов в веществе позволило учесть все возможные процессы взаимодействия, в частности, фрагментацию.

Для модельных расчётов использовался набор ядер из интервала зарядов ( $50 < Z < 92$ ), относительное содержание которых в Солнечной системе принято по данным Г.Зюсса, Г.Юри и А.Дж.У.Камерона [16]. Моделирование проводилось для каждого ядра отдельно, а затем вклад от отдельных ядер суммировался. Так как разброс значений относительной распространенности изучаемых ядер составляет два порядка величины, а проведение расчетов для одного сорта ядер, особенно для тяжелого, занимает довольно много времени, то для  $^{238}\text{U}$ , ядра с наименьшей в рассматриваемом диапазоне распространенностью, использовалось первоначальное количество ядер равное 1000. Количество других ядер было рассчитано пропорционально заданному числу ядер  $^{238}\text{U}$  и отношению их относительных распространенностей.

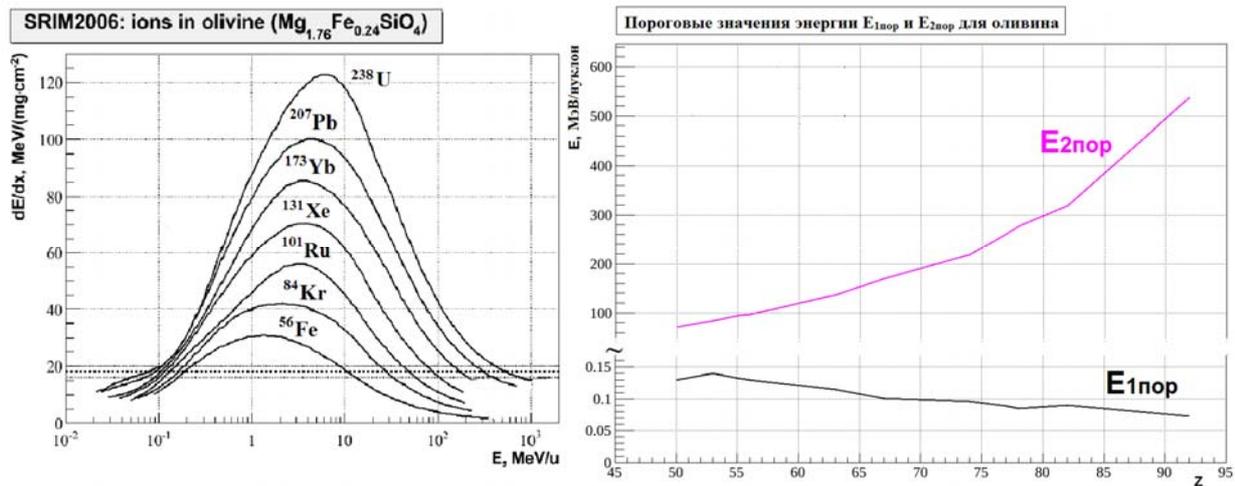
Для реализации возможности учета различных процессов взаимодействия ядер с целью анализа изменения их количества в зависимости от расстояния от поверхности облучаемого метеорита было смоделировано прохождение набора ядер (с одной энергией, заданной для всех ядер) через мишени из  $\text{Fe}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}$  (FeNi) с плотностью  $(7,9 \pm 0,1)$  г/см<sup>3</sup>. На Рис.3 представлены результаты моделирования прохождения таких ядер с энергией 1000 МэВ/нуклон через FeNi мишени различной толщины (10 мм, 40 мм, 70 мм и 100 мм). Из полученных результатов следует, что, например, ядра урана могут оставить след в оливине после

прохождения слоя толщиной более 10 мм вещества тормозящей среды метеорита, если они имеют энергию, превышающую 1000 МэВ/нуклон.



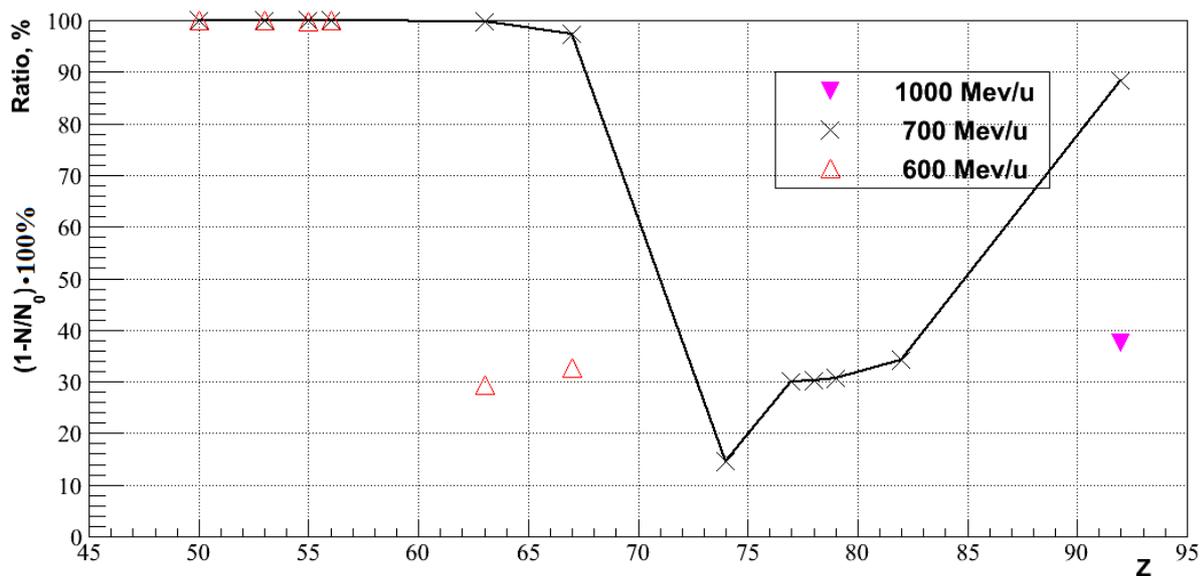
**Рис.3.** Зарядовые спектры ядер после прохождения различных толщин (10/40/70/100 мм) железо-никелевой мишени для набора ядер из интервала зарядов (50-92) с первоначальной энергией 1000 МэВ/нуклон.

Известно, что оливин является пороговым детектором. Критическая величина ионизационных потерь энергии для оливина 18 МэВ/(мг\*см<sup>-2</sup>) [17]. В ходе выполнения расчетов пороговые значения энергии E<sub>1пор</sub> и E<sub>2пор</sub> (см. Рис.4) определяли из кривой потерь энергии для соответствующего ядра.



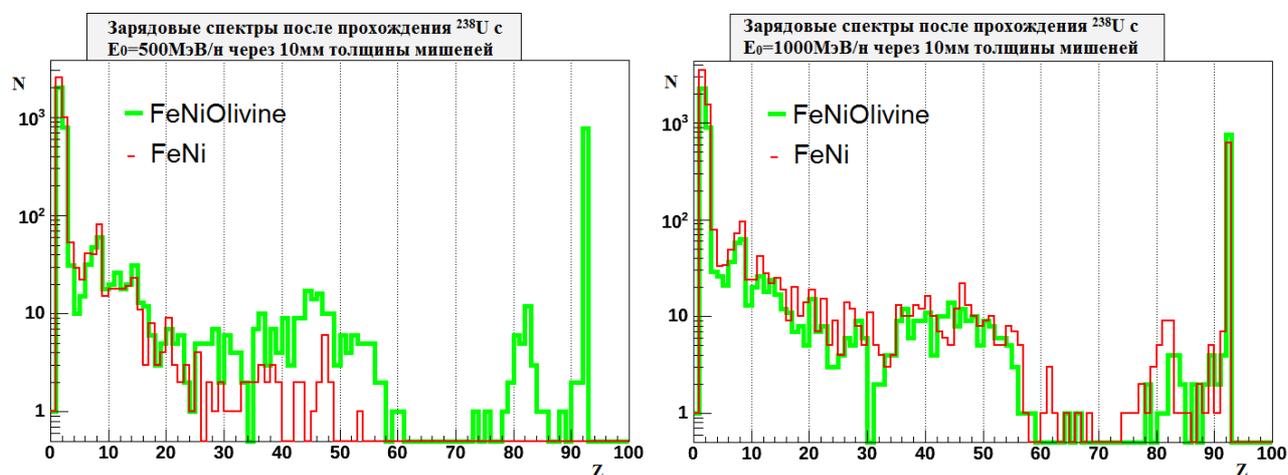
**Рис.4.** Зависимость потерь энергии  $dE/dx$  ядер различных элементов от энергии при торможении в оливине и пороговые значения энергии  $E_{1пор}$  и  $E_{2пор}$  для оливина, полученные для  $dE/dx = 18$  МэВ/(мг\*см<sup>-2</sup>) в интервале зарядов (50-92).

Таким образом, в оливине могут образовывать травимый канал только те ядра, энергия которых лежит в диапазоне ( $E_{1пор} - E_{2пор}$ ). Сделав такую оценку для ранее полученных результатов, следует отметить, что в рассчитанном интервале энергий от начального потока всех ядер остаётся порядка 30%. Таким образом, в большинстве случаев первичные ядра или полностью фрагментируют, или они проникают на большую глубину в теле метеороида, имея энергию, превышающую пороговое значение ( $E_{2пор}$ ) (см. Рис.5).



**Рис.5.** Процентное отношение доли ядер от первоначального количества после прохождения 10 мм вещества железо-никелевой мишени для всего набора промоделированных энергий.

Кристаллы оливина располагаются на разной глубине в теле метеороида, и первичные ядра ГКЛ и вторичные ядра-фрагменты тормозятся не только при прохождении железо-никелевой матрицы, но и окружающих исследуемый кристалл оливина соседних кристаллов оливина. Поэтому при моделировании прохождения ядер в теле метеороида были проведены также расчеты для среднего химического состава вещества метеороида-палласита: 65 об. %  $(Mg_x, Fe_{1-x})_2SiO_4$  и 35 об. %  $Fe_{0,7}Ni_{0,3}$  (FeNi-Olivine). Для сравнения было промоделировано прохождение ядер урана ( $^{238}U$ ) с энергиями 500 МэВ/нуклон, 700 МэВ/нуклон и 1000 МэВ/нуклон через мишень с таким средним химическим составом. Полученные данные сопоставляются с результатами для FeNi-мишени (см. Рис.6). Результаты показывают, что при энергии 500 МэВ/нуклон ядра урана фрагментируют полностью с образованием более лёгких ядер с зарядом  $Z < 55$  после FeNi-мишени, в то время как в спектре вторичных ядер для FeNiOlivine незначительная часть первичных ядер урана еще присутствует. Однако с возрастанием энергии первичных ядер урана заметно, что вклад вторичных частиц в группу ядер с  $Z = 60-75$  существенен только для FeNi-мишени. Дальнейшие расчёты были продолжены для обоих типов мишеней, однако большее внимание уделялось процессам прохождения ядер через FeNi-Olivine-мишень.



**Рис.6.** Зарядовые спектры после прохождения ядер урана с энергиями 500 и 1000 МэВ/нуклон через 10 мм толщину FeNi и FeNi-Olivine мишеней.

Для получения более точных оценок количественного вклада различных первичных ядер ГКЛ при прохождении через метеорит необходимо учитывать вид энергетического спектра космических лучей. При энергиях в исследуемом диапазоне экспериментальные данные о спектре частиц обычно представляют в

«степенном» виде  $N(E) \sim 1/E^\gamma$ , где  $N$  — число частиц с заданной энергией  $E$ ,  $\gamma$  — дифференциальный показатель спектра. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные о величине показателя спектра имеют значительный разброс. В данной работе принята величина  $\gamma = 2,5$ , которую иногда используют для процедуры «сглаживания» спектра по данным различных экспериментов [18].

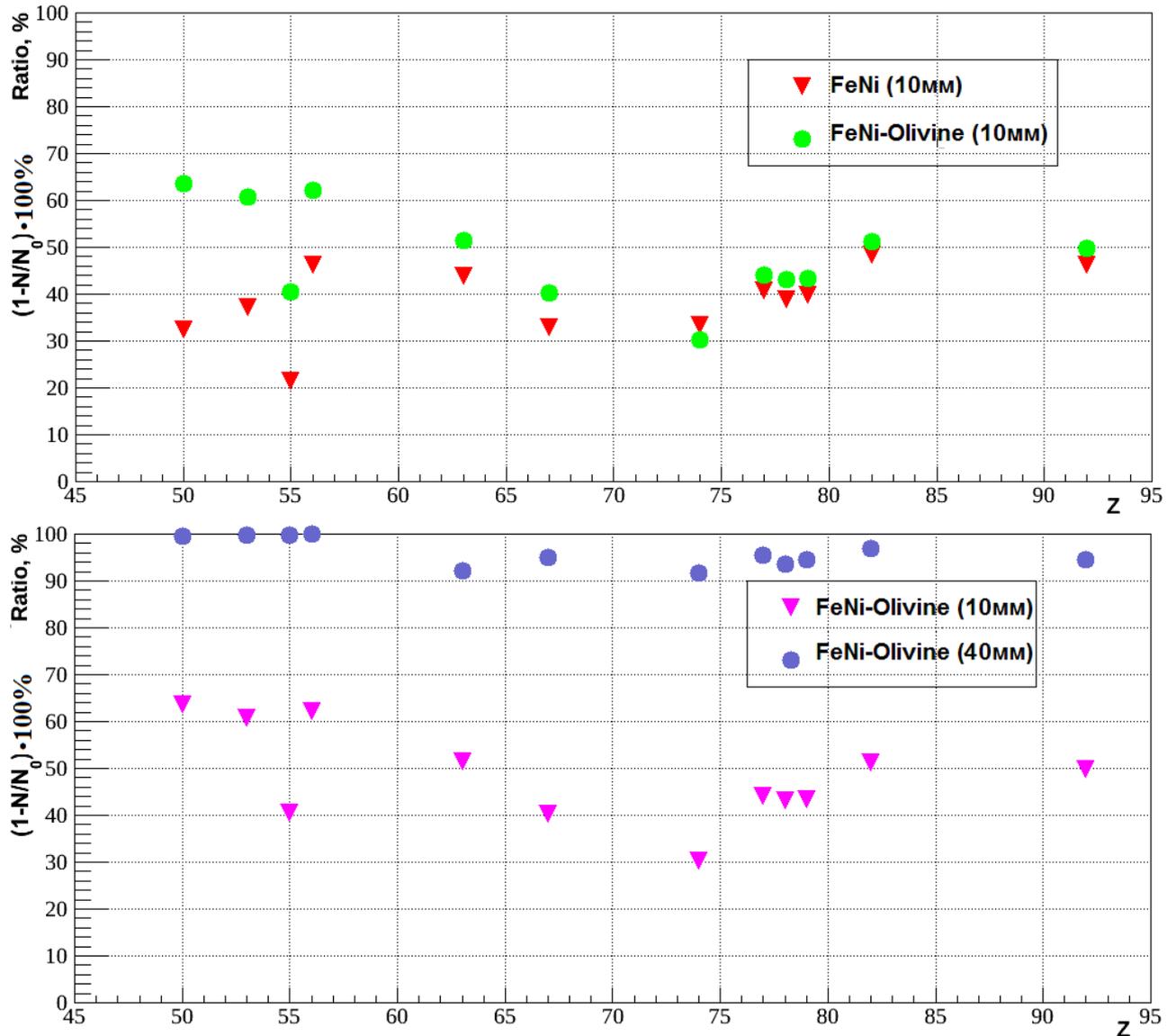
При регистрации треков в отдельных кристаллах оливина важно знать не только количество образовавшихся ядер – продуктов фрагментации – в слое тормозящего вещества метеорита определенной толщины, но и сколько этих ядер с определенной пороговой энергией (соответствующей формированию треков в оливине) вылетает с поверхности слоя никелистого железа, непосредственно прилегающего к кристаллу оливина-детектора (регистрация в условиях  $2\pi$ -геометрии). Согласно созданной для наших расчетов модели энергия каждого ядра, распределенная по закону  $\sim E^{-2,5}$ , в специально рассчитанном диапазоне должна соответствовать средней длине пробега ядра, превышающей конкретную расчетную толщину железо-никелевой матрицы метеорита. При этом энергия ядра на выходе из этой мишени должна находиться в пределах пороговых значений формирования треков для оливина ( $E_{1\text{пор}}$  -  $E_{2\text{пор}}$ ), т.е. такое ядро может быть зарегистрировано в кристаллическом оливине. Количество налетающих ядер каждого сорта задавалось пропорционально их распространенности в составе ГКЛ. Для расчета диапазона начальных энергий для каждого ядра использовалась зависимость обратных потерь энергии от энергии. Вычислялся интеграл:

$$L = \int_{E_{1\text{пор}}}^{E_{2\text{пор}}} \frac{dE}{(dE/dx)}, \text{ где } E_{1\text{пор}} \text{ — минимальное значение входной энергии.}$$

Зная заданную толщину мишени  $L$ , после нескольких итераций определяли  $E_{1\text{вх}}$ . Аналогично определялась величина  $E_{2\text{вх}}$ . Диапазоны входных энергий  $E_{1\text{вх}}$  -  $E_{2\text{вх}}$  отличаются для разных ядер, но, зная общий вид зависимости количества ядер от энергии можно определить пересчетный коэффициент, на который надо умножить число первичных ядер. Таким образом, мы значительно сократили время расчетов, исключив из них случаи, когда ядро, прошедшее сквозь железо-никелевую матрицу не сможет образовать трек в оливине. Рассчитаны значения энергии ядер из интервала зарядов  $50 < Z < 92$  на входе в FeNi- и FeNi-Olivine- мишеней различных толщин.

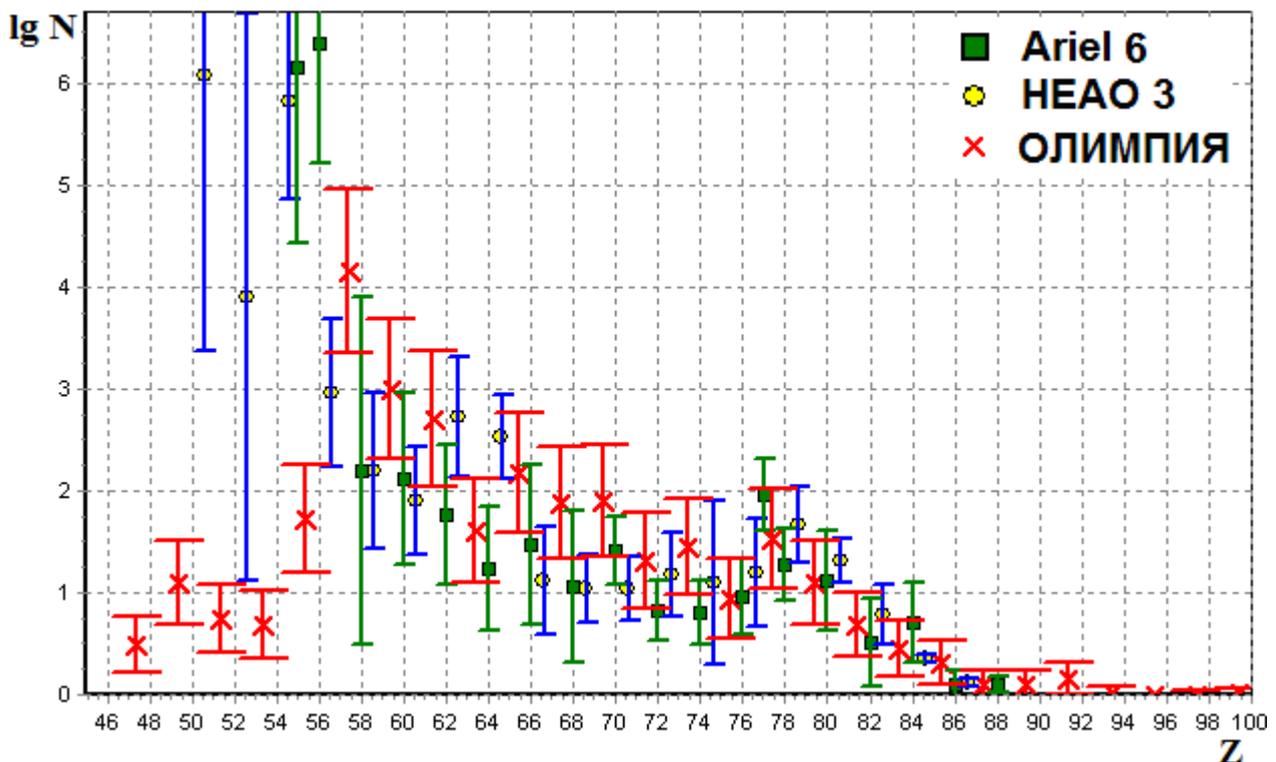
Задавая энергию в интервале рассчитанных значений для пакета  $i\text{ion}$ , удалось еще уменьшить время расчетов путем исключения случаев, когда ядро,

прошедшее сквозь железо-никелевую матрицу не сможет образовать трек в оливине. Дальнейшие расчёты с поправками были проведены для 10 мм толщины FeNi-мишени, а также для 10 мм и 40 мм толщины FeNi-Olivine-мишени (см. Рис.7). Результаты показывают, что теперь действительно во всех случаях при заданных таким образом начальных условиях все ядра могут быть зарегистрированы в оливине. Также можно оценить уменьшение потока ядер в зависимости от толщины мишени.



**Рис.7.** Процентное отношение доли ядер от первоначального количества после прохождения 10 мм FeNi-Olivine и FeNi мишеней для интервала энергий ядер, которые останутся в контактирующем оливине-детекторе треков.

На основе разработанной методики в исследованиях треков галактических космических ядер в кристаллах оливинов из метеоритов обнаружены и идентифицированы 6000 ядер с зарядом более 55. Полученное зарядовое распределение ядер хорошо согласуется с данными экспериментов ARIEL-6 [19] и HEAO-3 [20] (см. Рис.8). Существенным является то, что в результате фрагментации тяжелых ядер ГКЛ происходит как занижение числа регистрируемых ядер ГКЛ данного сорта, так и увеличение потока более легких вторичных ядер – продуктов фрагментации. Учет процессов взаимодействия тяжелых ядер с веществом метеорита, включая их фрагментацию, изучение влияния данных процессов на изменение зарядового состава ГКЛ стал одной из целей выполнения модельных расчетов.



**Рис.8.** Распределение ядер по зарядам относительно распространенности  ${}_{26}\text{Fe} = 10^6$  в логарифмическом масштабе, полученное в данной работе в сравнении с экспериментальными данными HEAO-3 и ARIEL-6 [21].

## Таким образом, в диссертационной работе:

1. Выполнен анализ существующих в настоящее время обобщенных экспериментальных данных и теорий механизмов образования элементов. Постановка экспериментов по поиску и регистрации ядер ультратяжёлых элементов в природе, прежде всего, в космических лучах, является одной из самых актуальных задач современной ядерной физики, хотя поток этих ядер очень мал. Длительная экспозиция метеоритов в космосе приводит к значительному преимуществу метода поиска треков сверхтяжелых стабильных ядер в метеоритах по сравнению с другими.

2. Создан и модернизирован с учётом экспериментальных данных программный пакет из комплекса GEANT4.

3. Проведено сравнение расчётов с использованием программ SRIM и GEANT4. Для этого были проведено моделирование прохождения ядер  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}$  через вещество разного состава в широком диапазоне энергий. Полученные результаты моделирования сравнивались с табличными данными, в которых представлены тормозные способности и пробеги ионов с зарядами  $2 \leq Z \leq 103$  для диапазона энергий от 2.5 до 500 МэВ/нуклон в различных материалах. Результаты расчётов показали хорошее согласие в пределах статистических ошибок.

4. Проведены калибровочные эксперименты по облучению кристаллов оливина ядрами  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{197}\text{Au}$  на ускорителе, подтвердившие правильность выполненных модельных расчетов.

5. Использование расчетных данных позволило определить изменения спектров заряженных частиц с целью внесения поправок в исследуемый спектр космического излучения. Получены расчетные характеристики зарядового и энергетического спектров ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ на входе в кристалл оливина после прохождения определенной толщины вещества метеороида.

6. Впервые детально проанализирована фрагментация тяжелых ядер ГКЛ ( $Z > 60$ ) при их прохождении в веществе метеорита-палласита. Показано, что в результате происходит как занижение числа регистрируемых ядер ГКЛ данного сорта, так и увеличение потока более легких вторичных ядер – продуктов фрагментации. Полученные результаты позволили провести анализ не только характера изменения выхода ядер - продуктов фрагментации с глубиной от поверхности облучаемого тела палласита, но и количественно

оценить вклад в группу ядер с  $Z = 60-75$  от ядер более тяжелых элементов ГКЛ, распавшихся при фрагментации в веществе метеорита-палласита. Учет процессов взаимодействия тяжелых ядер с веществом метеорита, включая их фрагментацию, изучение влияния данных процессов на изменение зарядового состава ГКЛ стал одним из основных результатов выполненных модельных расчетов.

7. Разработанная новая методика идентификации и измерения параметров следов торможения ядер ГКЛ в объеме кристаллов оливина из метеорита позволила обнаружить и идентифицировать 6000 ядер с зарядом более 55. Полученное зарядовое распределение ядер хорошо согласуется с данными спутниковых экспериментов ARIEL-6 и HEAO-3.

8. Результаты данной работы, могут дать объяснение целому ряду событий, наблюдавшихся в экспериментах на спутниках при изучении состава космических лучей в области сверхтяжёлых ядер  $Z > 65$  [22][23][24][25]. Помимо стабильных ядер с  $Z \leq 92$ , в этих экспериментах были зарегистрированы отдельные сигналы от частиц с зарядом в интервале  $94 < Z < 100$ . Частицы с таким зарядом не могут входить в состав первичного космического излучения в силу их очень малого времени жизни. Авторы указанных статей природу этих частиц не комментируют. По мнению авторов проекта ОЛИМПИА, события с  $Z > 92$  появляются не из-за методических неточностей или сбоя в работе аппаратуры, а являются результатом фрагментации более тяжёлых ядер из области "острова стабильности". Несколько таких событий было обнаружено и в наших исследованиях треков сверхтяжёлых частиц в оливинах из метеоритов.

## Список литературы

- [1] V.L. Ginzburg, N.G. Polukhina, E.L. Feinberg, et al., *Doklady Physics* 50(6), 283 (2005).
- [2] А. Б. Александров, А. В. Багуля, М. С. Владимиров и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН*, №7, 19 (2008).
- [3] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, NY, Oxford (1985).
- [4] GEANT4 Collaboration (S. Agostinelli et al.), *Nucl. Instr. And Meth.* A506, 250 (2003).
- [5] А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 9, 34-47 (2008).
- [6] Гинзбург ВЛ., *УФН* Т. 169, 419 (1999).
- [7] N.M. Okatyeva, .G. Polukhina, A.V. Aleksandrov et al., *Chemical composition of the galactic cosmic rays by the track investigation in olivine crystals from the Marjalahti pallasite*, *Meteoritics & Planetary Science* 2009, V.44 Supplement, p. A159, abstract №5081 (2009).
- [8] N.M. Okatyeva, A.V. Aleksandrov, A.V. Bagulya et all., *Energy of the galactic cosmic ray nuclei by the track data in olivine crystal from the Marjalahti pallasite*, *Abstracts 22nd European Cosmic Ray Symposium. 3-6 August 2010, Turku, Finland*. P. 270-271 (2010).
- [9] Н.М. Окатьева, А.Б. Александров, А.В. Багуля и др., *Параметры треков заряженных частиц в зернах оливина с разной кристаллической структурой из палласита Марьялахти*, *Материалы II-й Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования» Миасс 23-26 марта 2010г.*, 273-276 (2010).
- [10] A.V. Aleksandrov et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, A535, 542-545 (2004).
- [11] С.Дюррани, Р.Балл, *«Твердотельные ядерные детекторы»* М., Энергоатомиздат (1990).
- [12] Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М., *«Треки заряженных частиц в твёрдых телах»*, в 3-х частях, М., Энергоатомиздат (1981).

- [13] J. D. Birlle, G. V. Gibbs, P. B. Moore and J. V. Smith, *Amer. Min.*, 53, 807 (1968).
- [14] <http://reat.space.qinetiq.com/gps>
- [15] F. Hubert, R. Bimbot, H. Gauvin, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 46, 1 (1990).
- [16] А.Дж.У. Камерон, «Ядерная астрофизика» под ред. Ч.Бориса, Д.Клейтона, Д.Шрамма. М. Мир, с.33-52 (1986).
- [17] P. Horn et al. *Zeitschrift fur Naturforschung*, 22a (1967) 1793.
- [18] Мурзин В.С., «Введение в физику космических лучей»— М.: Изд. МГУ (1988).
- [19] Fowler P.H., Walker N.F., Mashed R.W. et al., ARIEL 6 measurements of the fluxes of ultraheavy cosmic rays, *Astrophys. J.*, v. 314, p. 746 (1987).
- [20] Binns W.R., Garrard T.L., Gibner P.S. et al., Abundances of ultra heavy elements in the cosmic 1radiation: results from HEAO, *Astrophys. J.*, v. 346, p. 997 (1989).
- [21] А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров и др., *УФН*, Т.180, №8, 839-842 (2010).
- [22] Shirk E.K., Price P.B., *Astrophys. J.*, v. 220, p. 719 (1978).
- [23] Donnelly J., Thompson A., O'Sullivan D. et al., *Proceedings of 27-th ICRC, Hamburg, Germany*, p. 1715 ( 2001).
- [24] Perelygin V.P., Bondar Yu.V., Brandt R. et al., *Ядерная физика*, т. 66, с. 1612 (2003).
- [25] A. Aleksandrov, A. Bagulya, M.Vladimirov, L.Goncharova, A. Ivliev, G.Kalinina, L.Kashkarov, N.konovalova, N.Okateva, N. Polukhina, A. Roussetski, N.Starkov, Discovery of the Traks due to Transuranic Galactic Cosmic Ray Nuclei in the Olivine Crystals from Meteorites, *Journal of Physics: Conference Series* 409 (2013) 012047, doi:10.1088/1742-6596/409/1/012047

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

I. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, В.А. Царев, *Методика*

определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов, Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008, №7, 19-27.

II. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, В.А. Царев, Изучение зарядового распределения галактических космических лучей и поиск следов сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливина из метеоритов, Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008, № 9, 34-47.

III. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, В.А. Царев, Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжелых элементов в кристаллах оливина из метеоритов, Приборы и техника эксперимента, 2009, №2, 38–42.

IV. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, Зарядовый спектр ядер галактических космических лучей в оливинах из метеоритов, УФН, 2010, Т.180, №8, 839-842.

V. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Л.А. Гончарова, А.И. Ивлиев, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, Методика определения энергии ядер сверхтяжелых элементов ( $Z>30$ ) галактических космических лучей по трекам в кристаллах оливина из палассита Марьялахти, Вестник ОНЗ РАН NZ6015, 2010, doi:10.2205/2010NZ000033, 110-119.

VI. А.Б. Александров, А.В. Багуля, М.С. Владимиров, Н.В. Галкина, Л.А. Гончарова, Г.В. Калинина, Л.Л. Кашкаров, Н.С. Коновалова, Н.М. Окатьева, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, Моделирование прохождения ядер галактических космических лучей в веществе метеорита-палассита, Краткие сообщения по физике ФИАН, 2013, т.40 (№ 5), 24-30.

VII. A. Aleksandrov, A. Bagulya, M.Vladimirov, L.Goncharova, A. Ivliev, G.Kalinina, L.Kashkarov, N.konovalova, N.Okateva, N. Polukhina, A. Roussetski, N.Starkov, Discovery of the Traks due to Transuranic Galactic Cosmic Ray Nuclei in the Olivine Crystals from Meteorites, Journal of Physics: Conference Series 409 (2013) 012047, doi:10.1088/1742-6596/409/1/012047