

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

на правах рукописи
УДК 539.1.05, 524.1

ТАН НАЙНГ СО

Исследования на основе трековой методики элементарных частиц и ядер в экспериментах по поиску сверхтяжелых ядер в природе и в тестовых работах по изучению безнейтринного двойного бета-распада.

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2015 г.

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

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

СТАРКОВ Николай Иванович (ФИАН)

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук

ЗАРУБИН Павел Игоревич (Объединенный институт ядерных исследований)

кандидат физико-математических наук

АНОХИНА Анна Михайловна (Научно-исследовательский Институт Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова)

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита диссертации состоится « 15 » февраля 2016 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 г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

Факс: 8(495)135-78-80

e-mail: 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 “__” ноября 2015 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 ядерно-физическим исследованиям в экспериментах по поиску сверхтяжелых ядер в природе и в тестовых работах по изучению безнейтринного двойного бета-распада на основе трековой методики. Трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц.

Первые трековые детекторы были чрезвычайно просты: это были обычные фотографические пластинки, применяемые фотографами того времени (начало 20 века), а также электроскопы. Простота трековых детекторов обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Достоинство трековых детекторов как интегральных приборов, накапливающих информацию в условиях малых потоков частиц, использовалось, например, в аэростатных и в спутниковых экспериментах с космическими лучами [1]. Трековые детекторы (и в их числе ядерные фотоэмульсии, имеющие самое высокое и в настоящее время пространственное разрешение – 1 мкм) сыграли выдающуюся роль в развитии ядерной физики в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Благодаря этим детекторам были открыты ядерные распады и реакции, новые частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы).

Для регистрации ядер тяжелых (VН-группы с зарядом $23 \leq Z \leq 28$) и сверхтяжелых (VVН, $Z \geq 30$) элементов галактических космических лучей (ГКЛ) на протяжении последних десятилетий использовались различные типы детекторов, основными среди которых были фотоэмульсионные [2] и твердотельные пластиковые [3], в которых вдоль траектории движения заряженных частиц происходит формирование визуально наблюдаемых следов этих частиц.

Метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он не использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород [4-15].

В этой связи, первостепенное значение имеют методики, которые должны обеспечить быстрое и качественное извлечение информации из данных, получаемых с помощью трековых детекторов. Просмотр больших площадей детекторов, как правило, с большим

увеличением представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Обработка данных трековых детекторов, проводившаяся оператором на оптических микроскопах вручную, требовала огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому получаемые результаты плохо поддавались проверке на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки).

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу, который достигнут в производстве прецизионной техники, и созданию оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных CCD- и CMOS-видеокамер для регистрации и оцифровывания оптических изображений и вычислительным возможностям современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи видеокамер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки более чем на три порядка по сравнению с ее длительностью при использовании так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что раньше было практически нереально. Автоматизированные комплексы позволяют перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц, и существенно расширяют круг задач, где эта техника может быть эффективно использована. В мире существуют более полусотни таких автоматизированных комплексов. Для скоростной обработки данных трековых детекторов в ФИАНе был создан и успешно эксплуатируется высокотехнологичный автоматизированный комплекс, состоящий из трех микроскопов – ПАВИКОМ (Полностью АВтоматизированный Измерительный КОМПлекс).

В ФИАНе давно и успешно проводятся работы, связанные с ядерной фотоэмульсией, которая была и остается лучшим современным ядерно-физическим детектором по

пространственному разрешению (с 2000 года обработка данных ведется на ПАВИКОМ). Кроме того, ядерная фотоэмульсия позволяет определить целый ряд других характеристик частиц: энергию, заряд, массу, импульс. Она позволяет также проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора и изучать реакции со сложными топологиями распадов. В настоящее время в ФИАНе, в частности, ведется подготовка нового эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада, возможность существования которого является одним из важных вопросов нейтринной физики. Если нейтрино является майорановской частицей, то некоторые изотопы могут испытывать т.н. безнейтринный двойной бета-распад. В новом эксперименте предложено использовать изотоп 100-ого молибдена, путем введения его в состав трекового детектора - ядерной фотоэмульсии. При такой конфигурации будут максимально близко расположены излучатель и детектор, что является существенным условием успеха экспериментов по безнейтринному бета-распаду.

События двойного бета-распада довольно редки. Так период полураспада ^{100}Mo составляет $1,6 \times 10^{17}$ лет для нейтринного и $5,7 \times 10^{24}$ лет для безнейтринного распада. Это приводит к необходимости использовать большое количество исследуемого материала и эмульсии, что, в свою очередь, требует просмотра большого объема детектора. Например, при объеме эмульсии в несколько литров и толщине слоя 0,6 мм необходимо обработать сотни тысяч кадров при увеличении микроскопа 40x (размер кадра $500 \times 500 \text{ мкм}^2$). Такая процедура возможна только при наличии автоматизированных устройств обработки. В число задач диссертационной работы входила не только разработка программного обеспечения для поиска событий двойного бета-распада в эмульсионной камере с молибденовым наполнителем, но и программы прослеживания треков электронов от бета-распада.

Опыт работы автора на автоматизированных микроскопах ПАВИКОМ для обработки данных трековых детекторов в полной мере был также использован в фиановском эксперименте по поиску в природе сверхтяжелых ядер ГКЛ. Измерение потоков и спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах является чувствительным способом изучения состава источников космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в межзвездной среде. Поиск в составе этих лучей трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 100$ является одной из наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [16].

Уникальными природными детекторами для наблюдения тяжелых и сверхтяжелых ядер космического происхождения являются железо-каменные метеориты класса палласитов, представляющие собой пористую матрицу из никелистого железа с включениями кристаллов оливина ($(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$). Уникальность этих природных детекторов заключается в

длительном времени их экспозиции в космическом пространстве: в составе космических лучей необычайно мало сверхтяжелых ядер, их интенсивность в общем потоке – всего несколько частиц на квадратный метр в год, и поэтому для регистрации даже нескольких подобных событий надо располагать либо установкой гигантской площади, либо очень продолжительным временем экспозиции. Одним из неоспоримых преимуществ таких природных детекторов как метеориты является длительность экспозиции - они находятся в космическом пространстве десятки и сотни миллионов лет, подвергаясь облучению первичными космическими лучами, в том числе тяжелыми и сверхтяжелыми ядрами. Результаты исследований потоков ядер галактических космических лучей, естественными детекторами которых являются метеоритные кристаллы оливина, за счет хорошей статистической обеспеченности, могут ответить на вопросы о существовании «островов стабильности» сверхтяжелых элементов, о возможных условиях реализации в природе их синтеза, об объектах, в которых эти условия могли бы реализоваться и т.д. При непосредственном прямом и решающем участии автора в рамках решения задачи о поиске в природе сверхтяжелых ядер было разработано модифицированное программное обеспечение для оценки зарядов ядер галактических космических лучей по характеристикам их треков в оливинах из метеоритов, выполнен анализ калибровочных сеансов облучения оливинов на ускорителях, получено зарядовое распределение 11500 ядер галактических космических лучей с $Z > 40$.

Актуальность работы.

Изучение зарядового состава ядер галактических космических лучей (ГКЛ) имеет большое значение для понимания свойств ядерной материи, эволюции вещества Вселенной и процессов, происходящих в ней. Измерения величин потоков сверхтяжелых ядер ГКЛ и их энергетических спектров являются одними из самых актуальных проблем астрофизики на протяжении последних примерно пятидесяти лет [16]. Применяемая при этом методика регистрации следов торможения ядер ГКЛ в твердотельных трековых детекторах (ТТД) различного типа позволила получить большой объем экспериментальных данных по этой проблеме.

Для изучения зарядового состава ядер ГКЛ применялись не только ядерные фотоэмульсии, но и твердотельные трековые детекторы (ТТД) – пластиковые (ПТД) и стеклянные (СТД). Экспозиция таких детекторов осуществлялась на шарах-зондах и в открытом космосе на искусственных спутниках Земли, но время экспозиции по техническим причинам никогда не превышало нескольких лет. Одновременно активно развивались исследования, в которых в качестве трековых детекторов ядер ГКЛ использовались

естественные кристаллы силикатных минералов, входящие в состав вещества метеоритов [17]. Такие широко распространенные минералы, как плагиоклаз, пироксен и оливин, способные формировать и сохранять нарушения кристаллической решетки вдоль следа торможения высокоэнергичных ядер тяжелых элементов ГКЛ с зарядом $Z \geq 20$, оказались уникальными природными детекторами для наблюдения химически травимых треков.

Одним из наиболее перспективных и детально изученных к настоящему времени ТТД является оливин, кристаллы которого входят в состав метеоритов. Важным фактором является длительность экспозиции этих природных детекторов - метеориты находятся в космическом пространстве десятки и сотни миллионов лет. За это время они подвергаются облучению первичными космическими лучами, в том числе тяжелыми и сверхтяжелыми ядрами.

Трековая методика дает возможность получать приоритетные результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира. Полученные автором в составе фиановской группы результаты позволяют говорить о существовании и распространенности трансурановых 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 в области тяжелых и сверхтяжелых ядер, имеющих большое значение для ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики.

Важной задачей для автора стала подготовка тестовых экспериментов по изучению двойного бета-распада. Двойной бета-распад — общее название нескольких видов радиоактивного распада атомного ядра, которые обусловлены слабым взаимодействием и изменяют заряд ядра на две единицы. Особый интерес представляет экспериментальное изучение возможности безнейтринного двойного бета-распада, в результате которого лептонное число не сохраняется, что реализуемо только в случае, если нейтрино имеет массу и является майорановским, т.е. является собственной античастицей. В результате такого распада два нейтрона ядра испускают по электрону и антинейтрино, но два антинейтрино внутри ядра аннигилируют друг с другом, если они имеют противоположно направленные спины, и таким образом наружу «вылетают» только два электрона. Такой процесс выходит за рамки стандартной модели, т.к. он не сохраняет лептонное число, и, самое главное, в этой модели нейтрино и антинейтрино оказываются одной и той же частицей. Выяснение вопроса о дираковской или майорановской природе нейтрино имеет не только теоретический интерес, но важно также с точки зрения следствий для различных физических задач, в первую очередь в астрофизике, поэтому вопрос о природе нейтрино имеет фундаментальный характер. В настоящее время назрела необходимость проведения специальной R&D программы для

выяснения возможности применения ядерной фотоэмульсии в полномасштабных экспериментах по поиску двойного бета-распада, с чем была в полной мере связана работа автора.

Цель диссертационной работы.

Успех эксперимента по поиску двойного бета-распада во многом зависит от точности измерения энергии электронов в ядерной фотоэмульсии. В предлагаемом эксперименте по двойному бета-распаду энергия электронов определяется по их пробегу в эмульсионной камере. Измеряются координаты каждого зерна и вычисляется пробег, как сумма отрезков ломаной линии. При чувствительности эмульсии около 30 зерен/100мкм, ошибка определения энергии электрона будет не больше 2-3%. Перед автором была поставлена задача не только создания программного обеспечения для работы на комплексе ПАВИКОМ для поиска событий двойного бета-распада в эмульсионной камере с молибденовым наполнителем, но и программы прослеживания треков электронов от бета-распада. В ходе выполнения работы возникла необходимость стандартизированной оценки качества ядерной фотоэмульсии, напрямую влияющего на точность реализации прецизионных измерений случаев радиоактивного распада ^{100}Mo . С этой целью автором было разработано специальное программное обеспечение, которое теперь успешно применяется на предприятиях российского производителя фотоэмульсий.

В рамках решения задачи по поиску и идентификации природных сверхтяжелых элементов (входящих в состав т.н. «острова стабильности») в составе галактических космических лучей целью автора было накопление экспериментальных данных, а именно - поиск в кристаллах оливина из образцов палласитов Марьялахти и Игл Стейшн треков тяжелых и сверхтяжелых ядер галактических космических лучей – химически травимых участков следов торможения этих ядер перед их остановкой в кристаллах оливина - и измерение динамических и геометрических параметров этих треков с помощью современного полностью автоматизированного измерительного комплекса ПАВИКОМ. В процессе обработки проводилось определение скорости травления, длины и диаметры треков на различных участках до точки остановки или выхода ядра из кристалла, и на основе этих измерений определялись заряды ядер. Полученный таким образом зарядовый спектр дает информацию о распространенности ядер Pb и Th-U-группы в составе галактических космических лучей. С целью уточнения характеристик идентифицируемых ядер и экспериментальной проверки метода определения зарядов зарегистрированных ядер были выполнены сеансы калибровочного облучения кристаллов оливина на ускорителях тяжелых ионов с последующим измерением динамических и геометрических параметров треков, образованных ускоренными ядрами тяжелых элементов в кристаллах оливина из метеоритов.

Для реализации всех этих исследований автором было создано модифицированное программное обеспечение для оценки зарядов и проанализированы результаты калибровочных сеансов облучения оливинов на ускорителях.

Научная новизна и практическая ценность работы

Принципиальный вопрос о природе нейтрино, естественно, привлекает внимание экспериментаторов. Например, результаты двух последних экспериментов в настоящее время создали довольно интригующую ситуацию.

Первый из них это работа коллаборации Гейдельберг-Москва, в которой изучается двойной бета-распад ядра ${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{34}\text{Se} + 2e^-$. Энергия электронов безнейтринного распада этого ядра составляет около 2 МэВ, теоретическое время жизни порядка $T \sim 10^{25}$ лет. Для обычного двойного бета-распада $T = 10^{18}$ лет. В 2010 году эта коллаборация сообщила о наблюдении событий безнейтринного распада с оценкой времени жизни $T = (2,2 \pm 0,3) \times 10^{25}$ лет. По этой причине с большим интересом ожидалось результаты более позднего эксперимента GERDA, который исследует то же ядро. Авторы этого эксперимента летом 2013 сообщили свои первые результаты, которые не подтвердили ранее полученный результат. По их данным $T > 2,1 \times 10^{25}$ лет. В настоящее время GERDA совершенствует свою установку, планируя довести чувствительность до уровня 2×10^{25} лет через два года. Т.о. к сегодняшнему дню сложилась довольно неопределённая и противоречивая ситуация, которая требует своего разрешения. Группа ПАВИКОМ, в состав которой входит и автор диссертации, в сотрудничестве с ИТЭФ уже несколько лет готовит эксперимент по поиску $\beta\beta_{0\nu}$ распада. В качестве источника предполагается использовать ${}^{100}_{42}\text{Mo}$, а в качестве детектора ядерную фотоэмульсию. Предложена оригинальная идея поместить источник внутри объёма детектора. Предложенная методика изучения двойного бета-распада является новой и более эффективной по сравнению с ранее применявшимися. Оценка фоновых условий нового эксперимента показала возможность за один год измерений достичь чувствительности к 0ν -распаду ${}^{100}\text{Mo}$ на уровне $\sim 1,5 \times 10^{24}$ лет.

Регистрация тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск в их числе трансфермиевых ядер является экспериментальной базой для развития междисциплинарных направлений ядерной физики, астрофизики и физики космических лучей. Автор непосредственно занимался набором экспериментальных данных по распространенности тяжелых ядер ($Z > 40$) в галактических космических лучах, а также работой по построению спектров и оценке потоков этих ядер. Источником экспериментальных данных являются кристаллы оливина из палласитов Марьялахти (~ 200 млн лет) и Игл Стейшн (~ 70 млн лет), в

которых в результате прохождения тяжелых и сверхтяжелых ядер ГКЛ через входящие в состав метеоритов кристаллы оливина при экспозиции в космическом пространстве в течение миллионов лет сформировались их треки, доступные химической обработке и последующему измерению. В ходе работы автором было обнаружено, обработано и включено в итоговый спектр более 6000 треков ядер. В результате общий объем статистических данных, измеренных в 442 кристаллах оливина (264 кристалла из метеорита Марьялахти и 178 кристаллов из метеорита Игл Стейшн) составил более 11500 треков ядер с $Z > 40$, в том числе более 10000 треков с $Z > 55$. Полученный итоговый спектр хорошо согласуется с результатами других экспериментов - HEAO, ARIEL и UHCRE. В числе обработанных ядер идентифицировано: в диапазоне $30 < Z < 100$ - 11642 ядра; в диапазоне $40 < Z < 100$ - 11590 ядер; в диапазоне $50 < Z < 100$ - 10283 ядра; в диапазоне $55 < Z < 100$ - 6716 ядер; в диапазоне $Z > 75$ - 384 ядра; в диапазоне $Z > 80$ - 87 ядер; в диапазоне $Z > 85$ - 22 ядра; в диапазоне $Z > 90$ - 10 ядер; заряд трех ядер оценен в диапазоне $105 < Z < 130$, минимальное время жизни этих ядер – 3000 лет. Одним из мировых лидеров в работах по синтезу новых элементов в земных условиях является Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, где удалось синтезировать 12 из 18 трансфермиевых элементов (под руководством Г.Н. Флерова: 102, 103, 104, 105, 106; под руководством Ю.Ц. Оганесяна: 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118). Время жизни некоторых этих ядер составляет несколько секунд и даже минут, что в десятки тысяч раз превышает время жизни ядер с меньшими зарядами. Однако, согласно теоретическим оценкам, время жизни ядер в зоне «островов стабильности» должно быть на много порядков больше. Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, подтверждающие существование сверхтяжелых элементов из острова стабильности в природе, способствуют активным и направленным усилиям по синтезу сверхтяжелых элементов.

Общая статистика – 11642 сверхтяжелых ядра ГКЛ – позволяет оценить этот банк данных как самый большой из всех современных. Результаты работы являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер.

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. Модифицированное программное обеспечение, позволившее оценить заряды 6000 ядер галактических космических лучей по характеристикам их треков в оливинах из метеоритов.
2. Суммарное зарядовое распределение 11500 ядер галактических космических лучей с $Z > 40$, в том числе более 10000 с $Z > 55$.
3. Программное обеспечение для поиска событий двойного бета-распада в эмульсионной

камере с молибденовым наполнением и программа прослеживания треков электронов от бета-распада. Программа отделения фоновых событий.

4. Программное обеспечение для оценки качества ядерной фотоэмульсии и результаты обработки изображений зёрен AgBr, полученных на электронном микроскопе.

Личный вклад

Автором получен значительный объем экспериментальных данных о сверхтяжелых ядрах природного происхождения более 6000 с зарядом >40 . Обнаружено и обработано 1130 треков ядер с $Z>70$ (384 трека принадлежат ядрам $Z>75$), и набор данных продолжается. При непосредственном прямом и решающем участии автора создано модифицированное программное обеспечение, позволившее в короткий срок удвоить имеющуюся статистику по сверхтяжелым ядрам ГКЛ.

Автором создан программный комплекс, реализующий возможность постановки тестовых экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада.

Разработанное автором программное обеспечение для стандартизированной проверки качества ядерной релятивистской фотоэмульсии позволило существенно сократить сроки анализа партий произведенной в России эмульсии и выполнить отладку технологии ее производства.

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлялись и докладывались на международных и национальных конференциях: International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2015, Athens, Greece, March 20-23, 2015), SHIM 2015 (Swift heavy ions in matter conference, May 18-21, 2015, Darmstadt, Germany) и XVI Международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле", 28 сентября 2015 г., ГЕОХИ им. В.В. Вернадского.

Публикации по теме диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы в рецензируемых журналах.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, три главы и заключения, содержит 117 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 70 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дается обзор специфики трековой методики как базового метода для поиска и изучения сверхтяжёлых ядер в природе и в тестовых работах по изучению безнейтринного двойного бета-распада. Отмечается актуальность исследований, излагается цель работы и ее научная новизна.

В **первой главе** представлен подробный обзор характеристик ПАВИКОМ, его состав, спектр задач в которых используется комплекс.

Во **второй главе** говорится о природе двойного бета-распада и методической работе по подготовке тестового эксперимента. В разделе 2.1 обсуждаются механизм одиночного бета-распада, двойного и безнейтринного бета-распада. В разделе 2.2 сообщается о предложении эксперимента с эмульсионной камерой со взвешенными частицами молибдена. В группе ПАВИКОМ в сотрудничестве с ИТЭФ с 2010 года ведутся работы по подготовке эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада [18-19]. В качестве исследуемого ядра выбран $^{100}_{42}\text{Mo}$, который испытывает двойной бета-распад, превращаясь в ядро $^{100}_{44}\text{Ru}$. В качестве детектора предполагается использовать ядерную фотоэмульсию. Предложена оригинальная идея поместить источник внутри объёма детектора. Измеряемой величиной является распределение суммарной энергии двух вылетающих электронов. При этом на фоне непрерывного распределения обычного двойного бета-распада должен существовать пик в области 3 МэВ от безнейтринного распада, если он существует. Энергия электронов может быть определена по их пробегу от места вылета из конгломерата Мо до полной остановки, которая имеет в эмульсии, в конце пробега, характерный вид. Поскольку максимальная длина пробега электрона с энергией 3 МэВ около 3 мм, необходимо использовать эмульсионную камеру, состоящую из нескольких слоёв толстой (толщина ~600 мкм) эмульсии. В разделе 2.3 представлены описания алгоритмов программного обеспечения по поиску событий двойного бета-распада и прослеживания треков электронов на прямолинейных и криволинейных участках. Энергия электронов, испускаемых в двойном бета-распаде, составляет несколько МэВ (суммарная энергия двух электронов около 3 МэВ). При такой энергии их движение является ультрарелятивистским, поэтому начальные участки трека выглядят почти прямолинейными и ввиду малости ионизационных потерь представляют собой редкую цепочку зёрен металлического серебра.

При разработке и реализации алгоритма распознавания различных участков траектории релятивистского электрона, включая искривлённую часть трека, использовалось иллюстративное изображение двойного бета-распада, который, во-первых, включал

изображение зёрен молибдена, полученное на эмульсиях тестового эксперимента по изучению влияния зерен молибдена на свойства эмульсии. Во-вторых, наложенные на это изображение следы электронов из другого эксперимента.

На рис. 1 показан пример полученного таким путём «события» испускания двух электронов ядром молибдена в виде иллюстративного изображения в видеокамере автоматизированного оптического микроскопа. Алгоритм распознавания содержит несколько этапов. На первом этапе отдельно выделяются зёрна молибдена (тип зерна М) и следов трека (тип Т), характеристики которых заносятся в соответствующие базы данных. Затем просматриваются окрестности каждого из зёрен молибдена. На рисунке 2 показаны результаты отбора кластеров молибдена (2а) и следов электронов (2б).

На рисунке 3 показан результат сбора зёрен частиц в два трека, выходящих из зерна молибдена и имеющих пересечение внутри него. Такая комбинация рассматривается как кандидат на двойной бета-распад, а точка пересечения треков как вершина распада. На том же рисунке для примера приведена прямая (штриховая линия), которая не удовлетворяет условиям отбора и далее не рассматривается.

Более сложной для обработки является искривлённая часть трека. В данной работе описан алгоритм распознавания только начального участка, где кривизна ещё не так велика. Поскольку аппроксимация прямой линией в данном случае невозможна, поэтому набираются цепочки вариантов продолжения всего трека, между которыми утраивается конкуренция. В рассматриваемом случае таких вариантов немного. После применения к нему приведённого выше алгоритма было получено криволинейное продолжение прямолинейного участка трека, которое показано на рисунке 4 в виде красной ломаной линии.

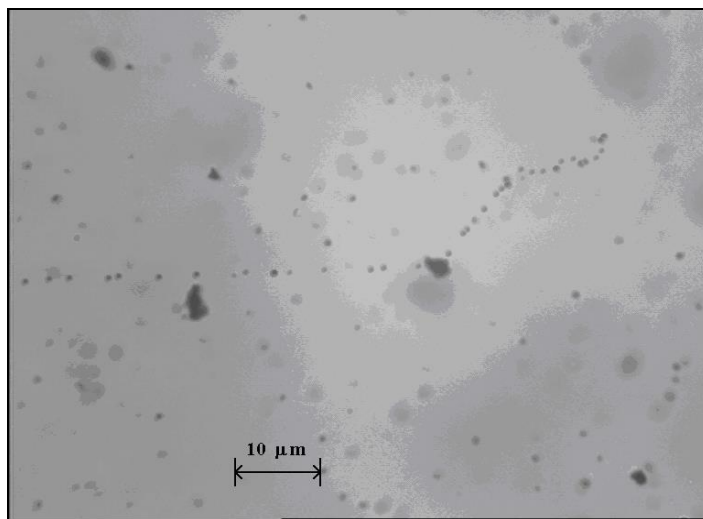
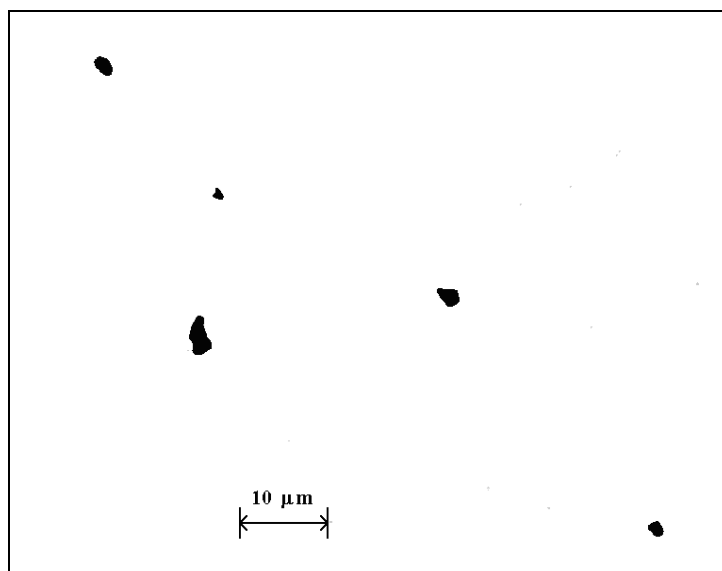
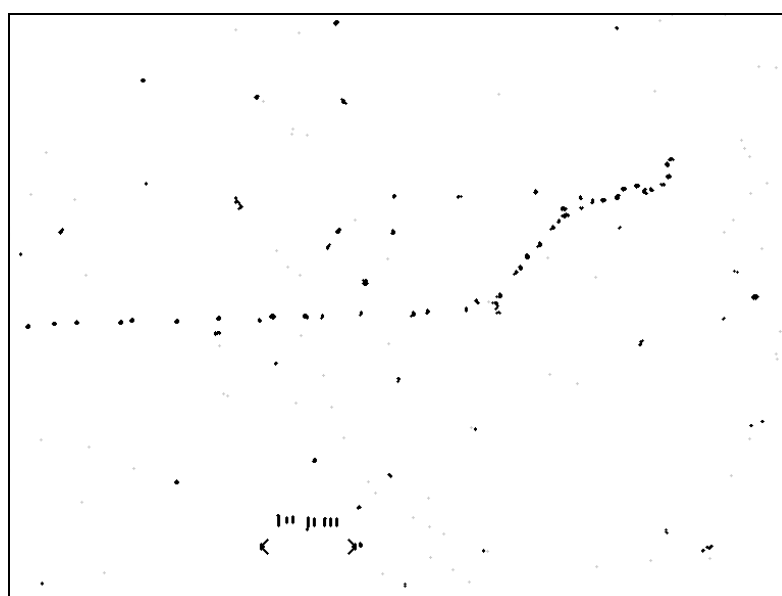


Рис.1. Исходное изображение «события» двойного бета-распада.



а.



б.

Рисунок 2. Выделенные кластеры зёрен молибдена (а) и следов частиц (б).

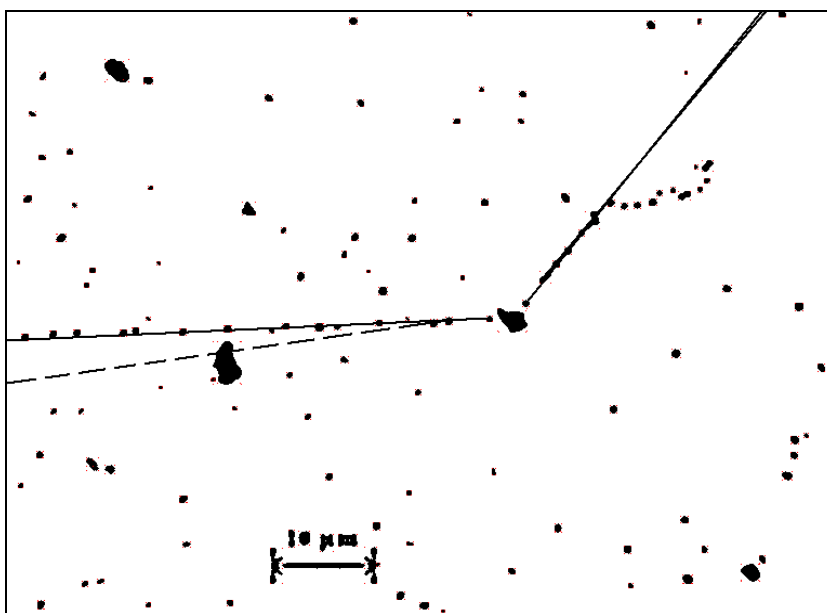


Рисунок 3. Результат распознавания прямолинейных участков электронов.

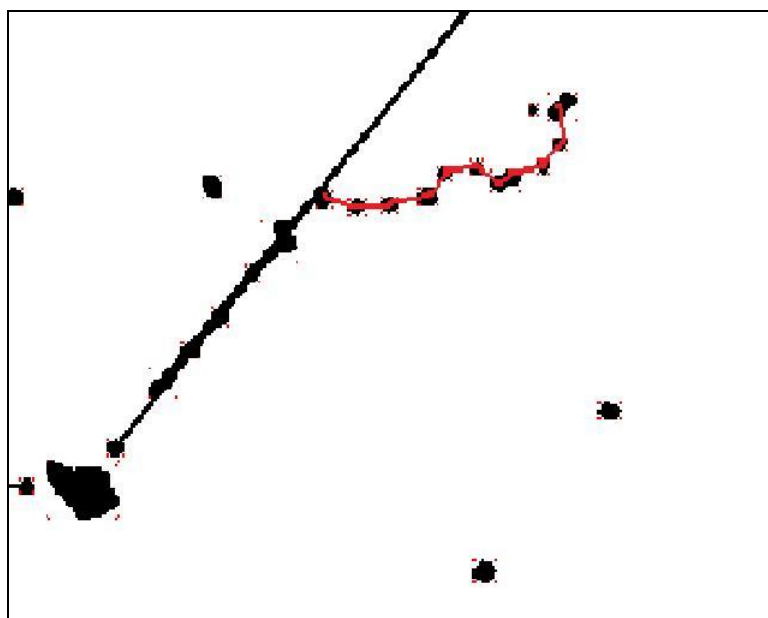


Рисунок 4. Результат распознавания криволинейного участка трека электрона.

Более запутанный участок трека электрона вблизи точки остановки (последние 20-30 мкм) требует более сложных методов распознавания.

В разделе 2.4 описаны программное обеспечение для оценки качества ядерных фотоэмульсий и результаты измерений по оценке качества эмульсии, произведенной в России и в Японии. Одной из наиболее серьёзных проблем при осуществлении данного эксперимента является необходимость иметь высокочувствительную ядерную фотоэмульсию. Проблема усугубляется ещё тем фактом, что за последние два десятилетия были закрыты многие предприятия по её приготовлению, а технология по приготовлению высокочувствительной

ядерной фотоэмульсии в России была утеряна. В последние несколько лет ОАО «Славич» в г. Переяславль-Залесский ведётся работа по восстановлению утраченных технологий. ОАО «Славич» является одним из старейших в России промышленных предприятий в области производства фотографических материалов.

Начиная с 2012 года на ОАО «Славич» проводились поисковые работы по разработке 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. На рисунке 5 представлены образцы микрофотографий зёрен эмульсии ОАО «Славич» двух партий приготовления (номер партии соответствует этапу разработки технологии) и для сравнения микрофотография зёрен эмульсии из Японии фирмы «Фуджи».

Ввиду большого количества образцов их ручная обработка невозможна по причине её трудоёмкости. Для автоматизации обработки автором была разработана программа выделения на изображении отдельных зёрен эмульсии и определения их характеристик. К сожалению, полная автоматизация этого процесса невозможна из-за того, что, как видно из рисунка 5, многие зёрна слипаются и не могут быть распознаны программным путём. По этой причине было принято решение о создании программы, осуществляющей обработку в полуавтоматическом режиме, использующем намного большие распознавательные возможности человеческого глаза по сравнению с компьютером. На рисунке 6а показано рабочее окно программы с изображением зёрен эмульсии партии С42. Оператор шаг за шагом выбирает зерно и отмечает два его размера (длина и ширина), которые запоминаются. По окончании обработки зёрен программа вычисляет средние величины ширины и длины, а также среднее отношения длины и ширины (вытянутость - oblong). Результаты по каждому образцу приводятся в виде распределений и средних величин (рис. 6б). Распределение по диаметру аппроксимируется функцией Гаусса с помощью метода наименьших квадратов.

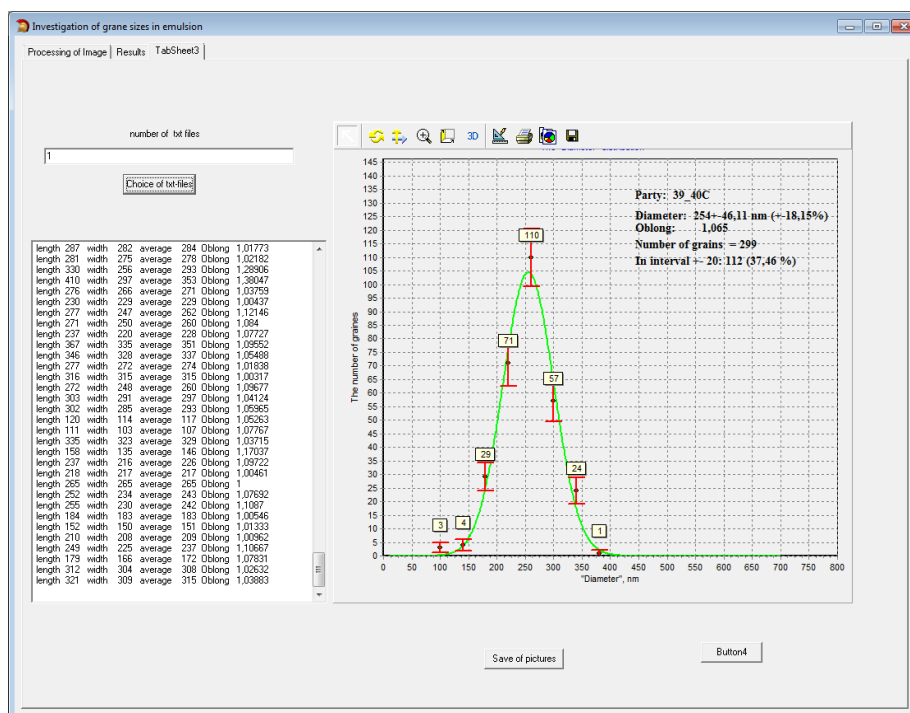
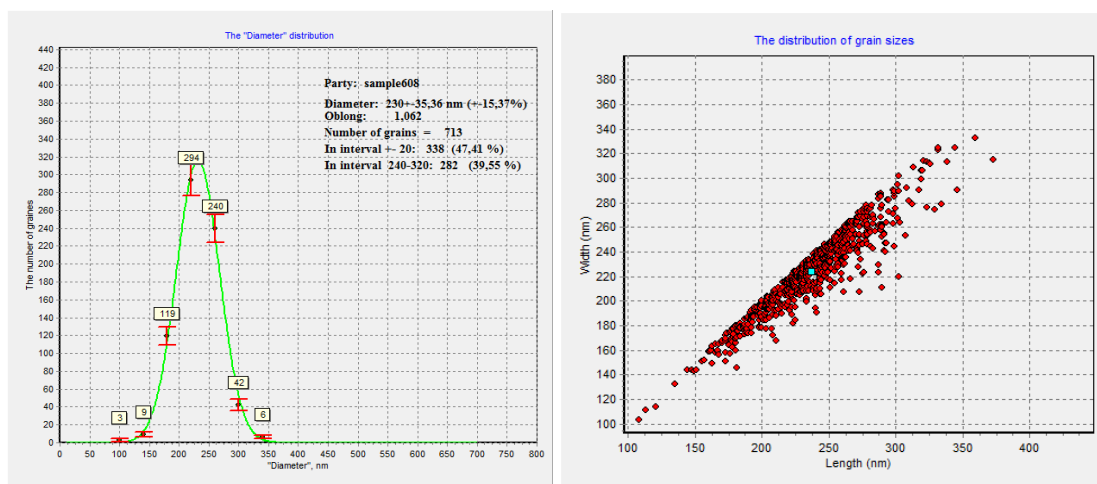


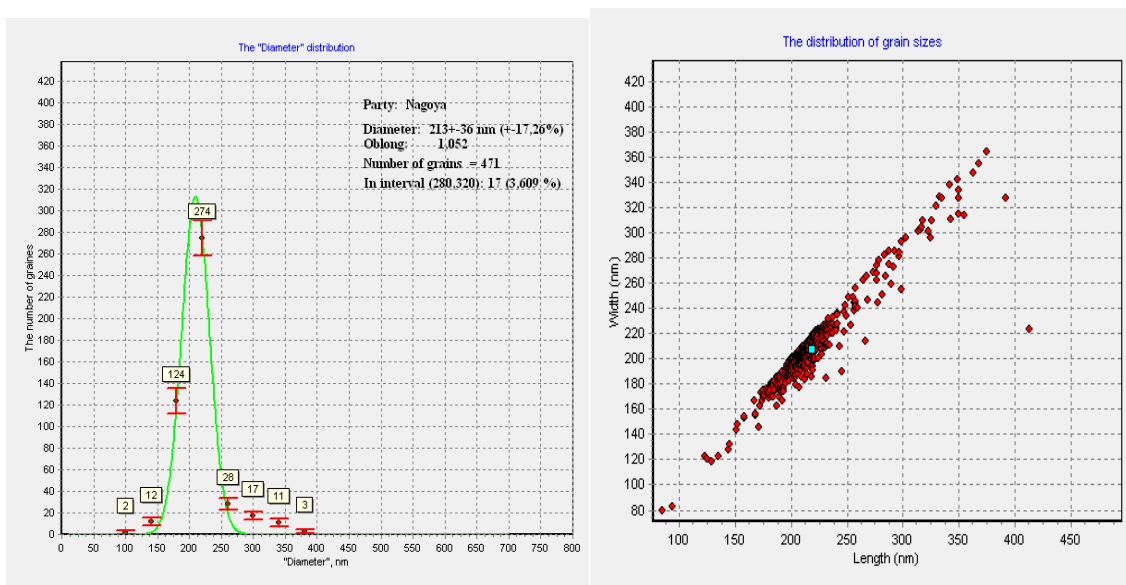
Рис. 6. Рабочее окно программы по измерению гранулометрических характеристик эмульсии (а). Окно программы с результатами измерений (б).

За период с 2012 года по 2015 год были обработаны реплики семнадцати партий эмульсии, начиная с 12С и заканчивая 608С. Результаты некоторых из них представлены на рисунке 7, где для сравнения показаны распределения по размеру зёрен и разброс длины и ширины для образцов трёх партий (12С, 42С и 608С) российской и одной партии японской эмульсии. Эмульсия партии 608С выбрана в качестве базовой для продолжения разработки технологии, как обладающая наилучшими характеристиками.

Рисунок 7 наглядно показывает серьёзные качественные изменения в качестве эмульсии, произошедшие за последние два года, в частности, благодаря анализу геометрических характеристик эмульсии, проведённому автором диссертации. Размер зёрен и степень сферичности вплотную приблизились к показателям японской эмульсии, считающейся эталоном. Тем не менее, остаются проблемы, требующие дальнейшего совершенствования технологии изготовления. В частности, полученная эмульсия характеризуется немного большим разбросом размеров зёрен, по сравнению с японской.



а.



б.

Рис. 7. Сравнение результатов измерений характеристик эмульсии: а-партия 608С (2015 г.); б – японская эмульсия. Левые рисунки – распределения размера зёрен, правые рисунки – распределение по длине и ширине зёрен.

В таблице 1 приведены характеристики плёнок разных партий произведённых в период с 2012 года по 2015 год. Видно, что за этот период качество плёнок существенно изменилось и приблизилось к «эталонному», за который принята японская плёнка, как по гранулометрическим характеристикам, так и по чувствительности.

Таблица 1. Характеристики эмульсии разных партий (красным цветом отмечены партии с наилучшими характеристиками)

Партия	Число измеренных МК	Средний диаметр D, нм	ΔD , нм	Вытянутость (L/W)	Чувствительность (количество зёрен на 100 мкм пробега)
NE Nagoya	654	229	22	1,12	35
12C	1564	330	54	1,257	22
14C	861	315	59	1,393	22
17C	591	302	52	1,29	21
18C	1162	289	51	1,309	22
28C	677	266	61	1,09	20
32C	705	297	52	1,064	22
38C	2199	242	48	1,066	32
42C	1445	250	50	1,07	30
608C	713	230	35	1,06	30-34

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.

В третьей главе дается описание фундаментальной проблемы поиска сверхтяжелых ядер в природе. В разделе 3.1 описаны метеориты как природный детектор галактических ядер. В середине 60-х годов прошлого века началось активное развитие исследований, в которых в качестве трековых детекторов ядер ГКЛ стали использоваться природные кристаллы силикатных минералов - оливинов, входящих в состав метеоритов типа палласитов [17]. Оливин, химический состав которого описывается формулой $(Mg_{0.8} Fe_{0.2})_2SiO_4$, является одним из наиболее распространенных силикатных минералов в веществе метеоритов-палласитов. Около 60% объема палласитов занимают кристаллы оливина, которые содержат большое число треков космических ядер: в 1 см^3 таких кристаллов, расположенных на глубине до ~ 5 см от доатмосферной поверхности метеорита, за 10^8 лет образуется 10^2 - 10^3 треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из приповерхностных участков метеоритов,

расположенных на глубине меньше ~ 1 см - до 10^4 таких треков. Таким образом, статистика экспериментальных данных, которые могут быть получены при такой длительной экспозиции метеоритов в космосе, многократно превосходит статистику при экспозиции на спутниках и аэростатах. Для сравнения можно отметить, что статистические данные наиболее известных спутниковых и стратосферных экспериментов, направленных на исследование потоков тяжелых и сверхтяжелых ядер в ГКЛ, составляют не более нескольких сотен событий [20,21-22], в то время как в данной работе обнаружено уже более 11 тысяч треков ядер с $Z > 55$.

В разделе 3.2 представлены особенности изучения треков в оливинах; методика поэтапной обработки кристаллов оливина. Кристаллы силикатных минералов, к которым относится оливин из метеорита, обладают способностью регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($> 10^8$ лет) треки ядер с $Z > 20$. Тяжелые ядра, проходя через оливин, производят в его кристаллической решетке структурно-фазовые изменения. Вдоль траектории ядра образуется сквозной канал области повреждений с диаметром $\sim (30-70)$ Å. Скорость растворения материала этой области в специальных химических растворах значительно выше скорости растворения неповреждённого материала, что позволяет «проявлять» треки ядер [23].

Кристаллы упаковываются сотрудниками ГЕОХИ РАН по несколько штук в эпоксидные таблетки размером 10×20 мм, затем шлифуются. Травление кристалла происходит послойно: после травления очередного слоя срезается часть кристалла определенной толщины, поверхность полируется, после чего продолжается травление кристалла на вновь вскрытой большей глубине, таким образом, просматривается весь объем кристалла. Толщина удаляемого с поверхности травления слоя находится в пределах $40-70$ мкм (точность среза порядка нескольких мкм) и подбирается, исходя из общего количества наблюдаемых на данном этапе травления треков и распределения длин протравленных каналов. После каждой процедуры травления производятся измерения геометрических параметров обнаруженных треков. Поиск треков ядер в кристаллах оливина и анализ их параметров осуществляется на современном автоматизированном комплексе ПАВИКОМ [24,25,26-29]. На рисунке 8 представлены микрофотографии треков ядер в оливине.

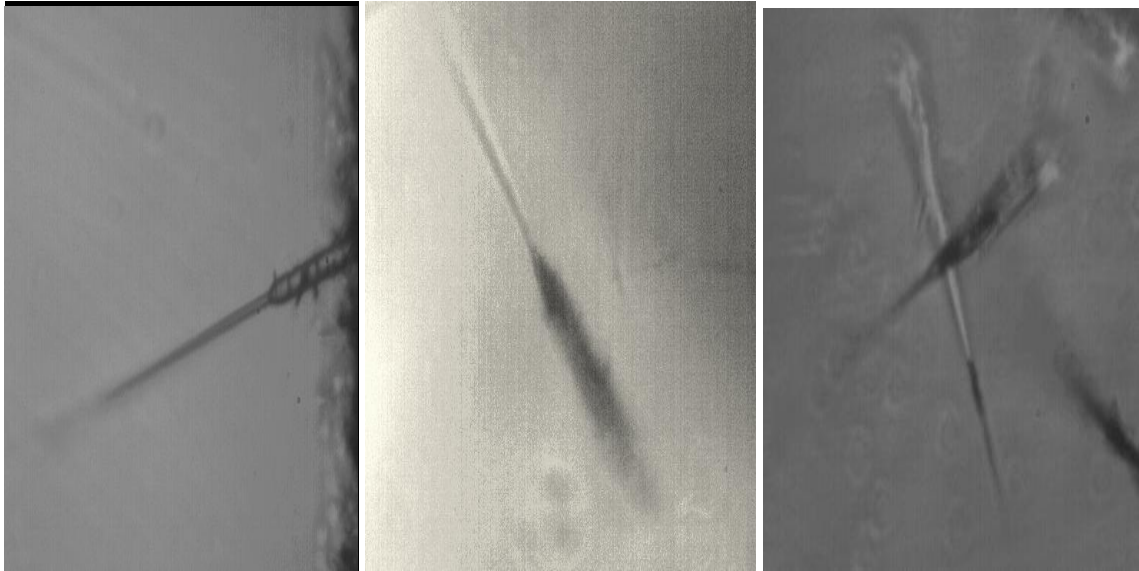


Рис. 8. Микрофотографии треков ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, травимых в кристаллах оливина из палласитов. Размер поля зрения на всех микрофотографиях от 60×140 до 100×140 микрон.

Исходя из физико-химической картины взаимодействия, можно следующим образом описать схему формирования травимого канала (см. рис. 9). Если энергия частицы больше E_{\max} , то видимый канал после травления не возникает. По мере её замедления начиная с энергии E_{\max} скорость травления начинает превышать скорость травления неповреждённых участков и постепенно растёт. На этом участке трека возникает узкий протравленный канал. При дальнейшем торможении частицы ($E < E_1$) скорость травления резко возрастает и, соответственно, травимая область этого участка (район Бреговского пика электронных потерь) приобретает большой диаметр. В конце трека перед остановом частицы потери энергии снова падают ниже порога D и канал заканчивается узким остриём

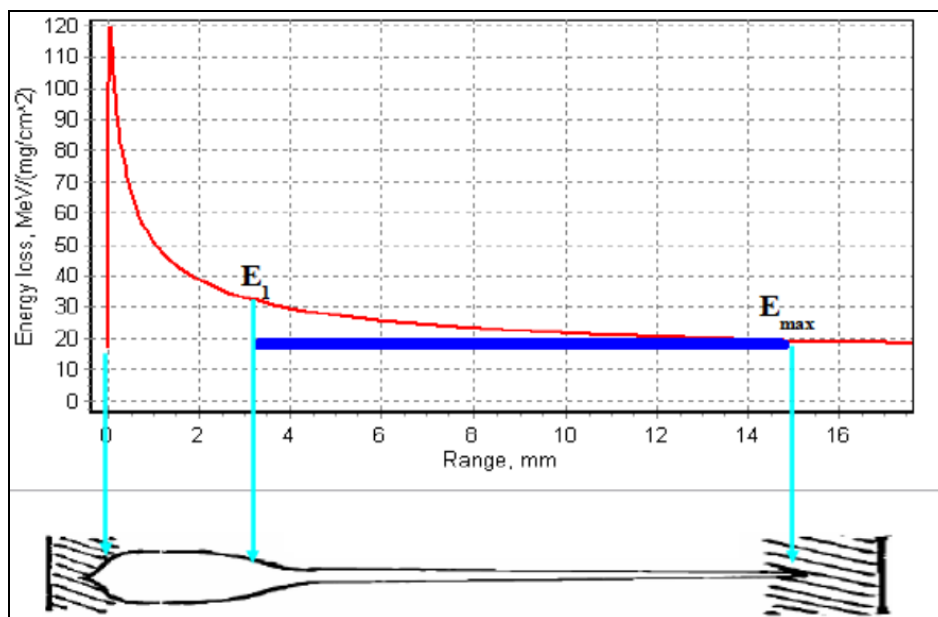


Рис. 9. Схема формирования травимого участка трека в оливине. Вверху – удельные ионизационные потери энергии ядра. Внизу – геометрическая форма различных участков трека.

В разделе 3.3 описаны связь между длиной пробега, скоростью травления и зарядом; калибровочные эксперименты на ускорителях. Для получения количественного выражения зависимости скорости травления V_{etch} от указанных параметров были проведены калибровочные эксперименты с облучением оливина из метеоритов ускоренными ядрами разных элементов [30].

Как было отмечено выше, полностью протравленные треки-каналы, образовавшиеся при прохождении высокоэнергичных тяжелых ядер, имеют ярко выраженную форму "шприца" и состоят из двух основных частей – конусообразной и цилиндрической. Величина скорости травления на разных участках трека изменяется существенным образом, возрастая в среднем в 5 раз при переходе от конусообразной зоны трека к его основной цилиндрической части. Если за величину остаточной длины пробега RR принять длину пути торможения ядра до его полной остановки, то зависимость скорости травления треков в длину (V_{etch}) от заряда Z и остаточной длины пробега ядер RR может быть представлена как в двумерном (отдельные кривые зависимости V_{etch} от RR для каждого ядра), так и в трехмерном виде (в виде поверхности, указывающей зависимость V_{etch} и RR от Z). На рис. 30 показана зависимость скорости травления треков, полученных при контролируемом облучении на ускорителе GSI, г. Дармштадт, Германия, от остаточной длины пробега (RR) ядер Fe, Kr, Xe и U, с соответствующими пределами ошибок измерений. При этом за величину RR принимается

длина пути торможения ядра до его полной остановки.

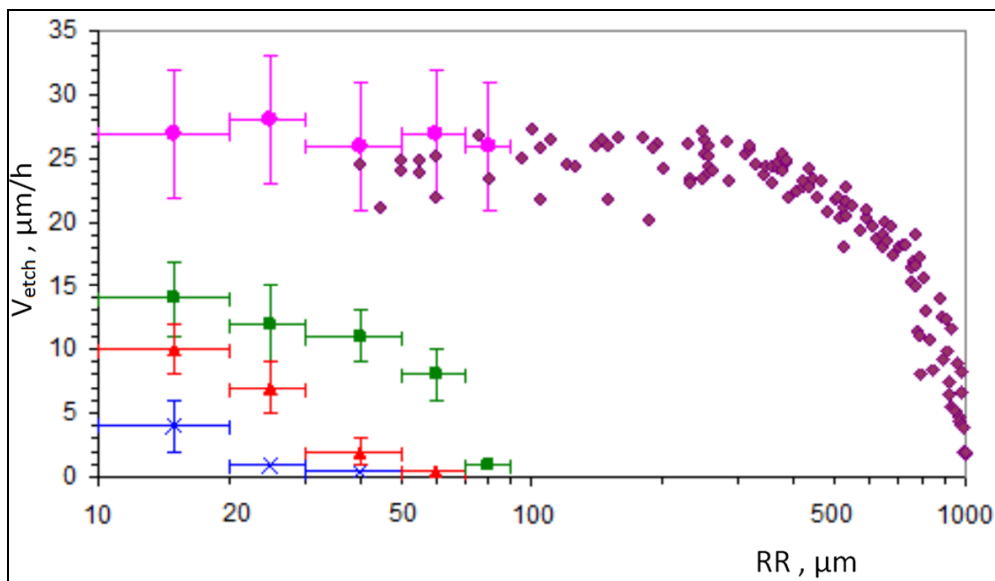


Рис. 10. Зависимость скорости травления треков от остаточной длины пробега RR ядер Fe, Kr, Xe и U (снизу вверх).

Разработанная методика оценки величины заряда основана на проведении двумерной интерполяции поверхности $Z(RR, V_{etch})$, построенной по экспериментально измеренным значениям величин скорости травления V_{etch} и остаточной длины пробега ядер RR для травимых треков (рисунок 11) [31].

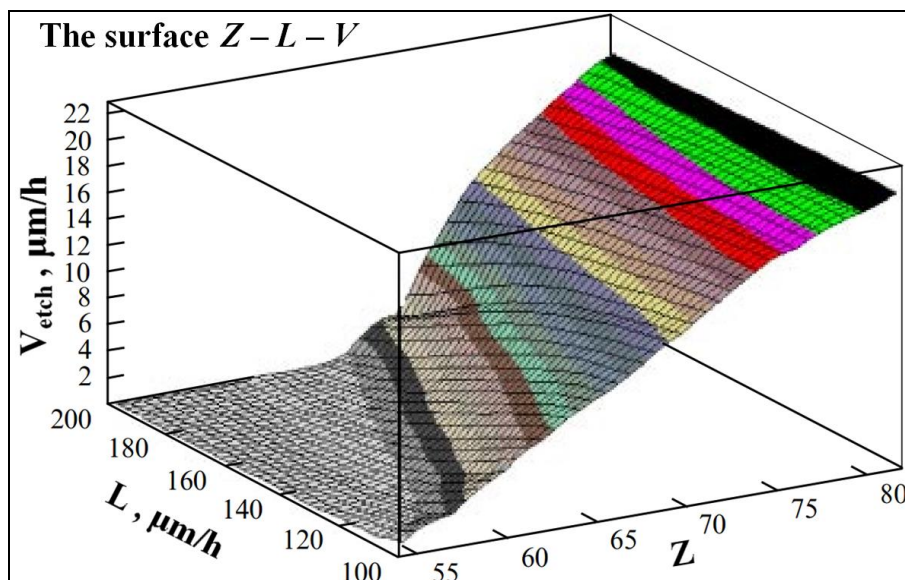


Рис. 11. Полученная в работе связь между зарядом пролетающего ядра, остаточной длиной пробега и скоростью травления трека.

Точность определения заряда по предложенной методике зависит от положения точек на плоскости $Z(L, V_{\text{etch}})$ и составляет от ± 1 до ± 2 ед. Исходя из калибровочных экспериментов с ускоренными ядрами ^{36}Kr , ^{54}Xe , ^{79}Au и ^{92}U , для ядер с зарядом Z от 50 до 92 было получено соотношение длины L и скорости травления V_{etch} при определенных значениях остаточной длины пробега RR ядер перед их остановкой. Из полученной зависимости скорости травления треков V_{TR} сверхтяжелых ($Z > 55$) ядер ГКЛ от измеренной длины треков $L_{\text{изм}}$ следует, что при более дифференцированном по времени измерении травимой длины треков источник систематической погрешности определения заряда может быть доведен до величины, не превышающей $\sim 10\%$.

В разделе 3.3 представлены методика измерений протравленных треков на ПАВИКОМ. В 2014 году в ходе выполнения работы были модернизированы некоторые блоки программного обеспечения, используемого при поиске и измерениях треков ядер [32]. В данной работе используется метод последовательного травления и сошлифовки. В этой связи очень важна процедура продления треков, появляющихся на нескольких стадиях этой процедуры, т.к. именно они соответствуют наиболее тяжелым ядрам. С целью повысить ее эффективность была усовершенствована программа автоматизированного сбора частей длинных треков. Для более эффективного определения больших зарядов калибровочные кривые, связывающие протравленную длину, скорость травления и заряд, были аппроксимированы пятипараметрической функцией в диапазоне $67 < Z < 93$. Параметры этой функции гладким образом зависят от заряда и были в свою очередь аппроксимированы линейной функцией с небольшим квадратичным членом.

Это дало возможность более надежно экстраполировать процедуру определения заряда тяжелых ядер на несколько единиц за пределы калибровочных экспериментов ($Z > 92$). Результаты обработки данных о характеристиках калибровочных ядер Vi в оливине, по данным из Ланчжоу, Китай: средняя длина треков = $47,5 \pm 1,1$ мкм при $E = 4,5$ MeV/A. Расчетная длина ~ 40 мкм. Средняя длина треков = $56 \pm 1,8$ мкм при $E = 9,4$ MeV/A. Расчетная длина ~ 60 мкм. Из калибровки в Дармштадте получили для Vi - средняя длина треков = $81 \pm 4,8$ мкм при $E = 11,1$ MeV/A. Расчетная длина ~ 80 мкм. Таким образом, калибровочные измерения подтверждают правильность выполненных расчетов, используемых при идентификации зарядов ядер.

В разделе 3.5 описано программное обеспечение для определения заряда ядер. Использование поверхности $L-V-Z$ требует интерполяции экспериментальных точек зависимости $V(L, Z)$ в широкой области. Для большей точности при интерполяции, была введена параметризация этой поверхности с помощью пятипараметрической функции,

параметры которой зависят от заряда ядра: Параметры A, B, C, D и E, функции были подобраны таким образом, чтобы достаточно хорошо описывались экспериментальные точки. На рисунках 12 и 13 приведены результаты экспериментов и их описание формулой (1).

$$V(Z, L) = \frac{A(Z) \cdot (1 + E(Z) \cdot L^2)}{1 + B(Z) \cdot \exp[(L - C(Z)) / D(Z)]} \quad (1)$$

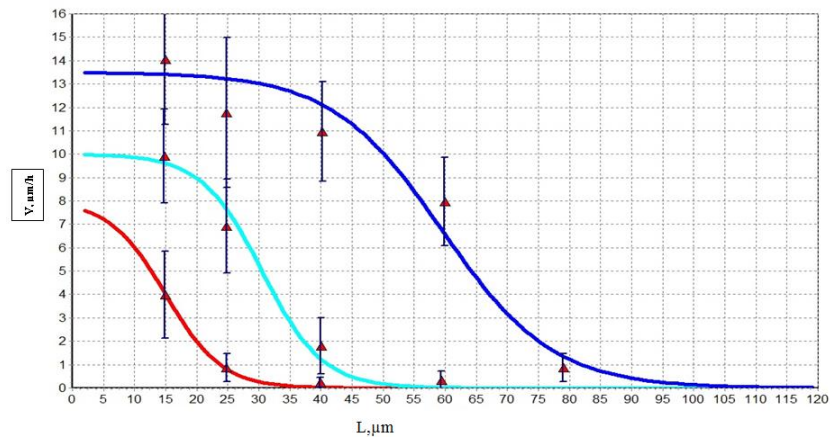


Рис. 12. Описание функцией (1) экспериментальных данных для Fe – (1); Kr – (2); Xe – (3).

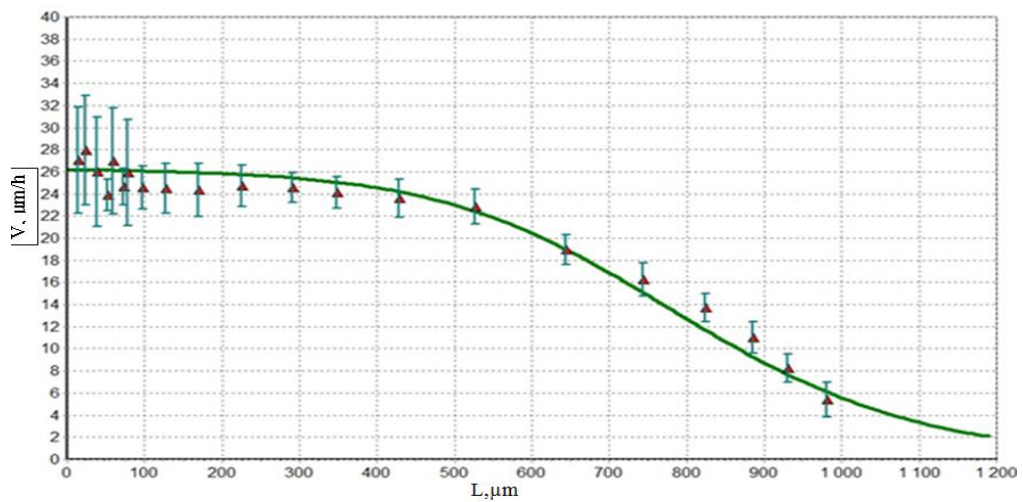


Рисунок 13. Описание функцией (1) экспериментальных данных для U.

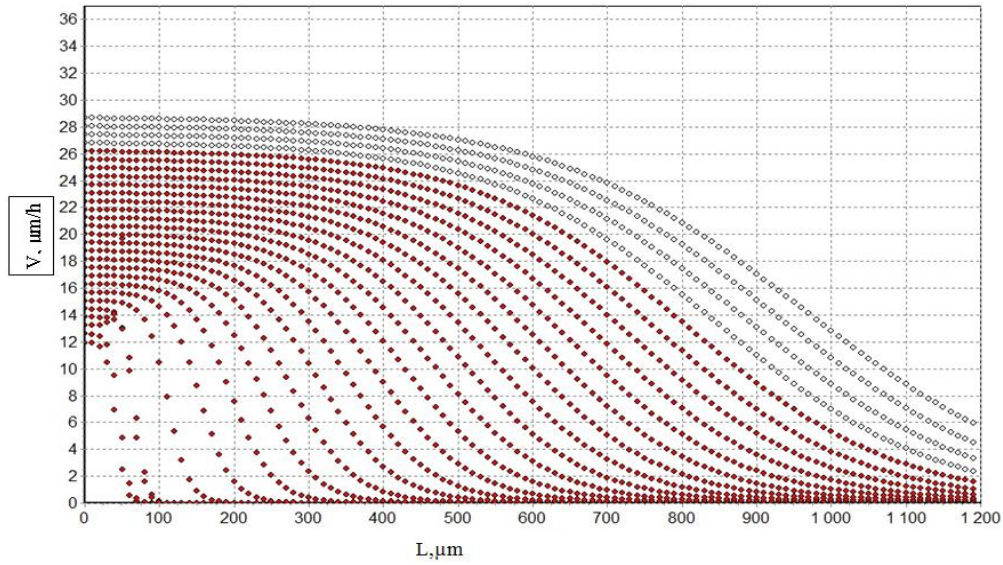
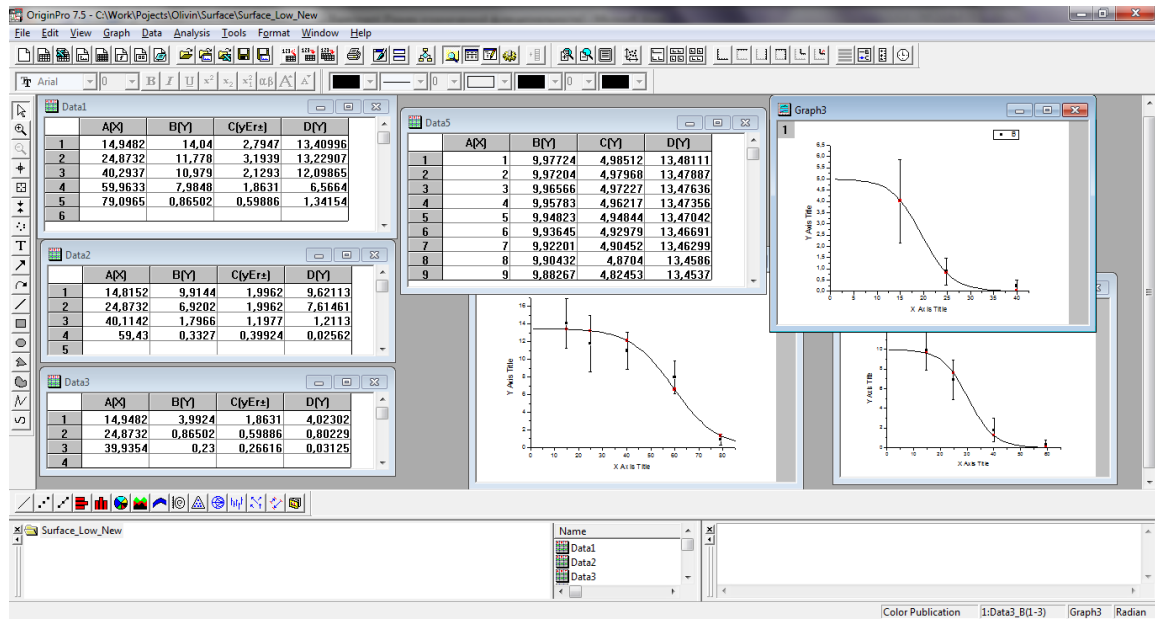
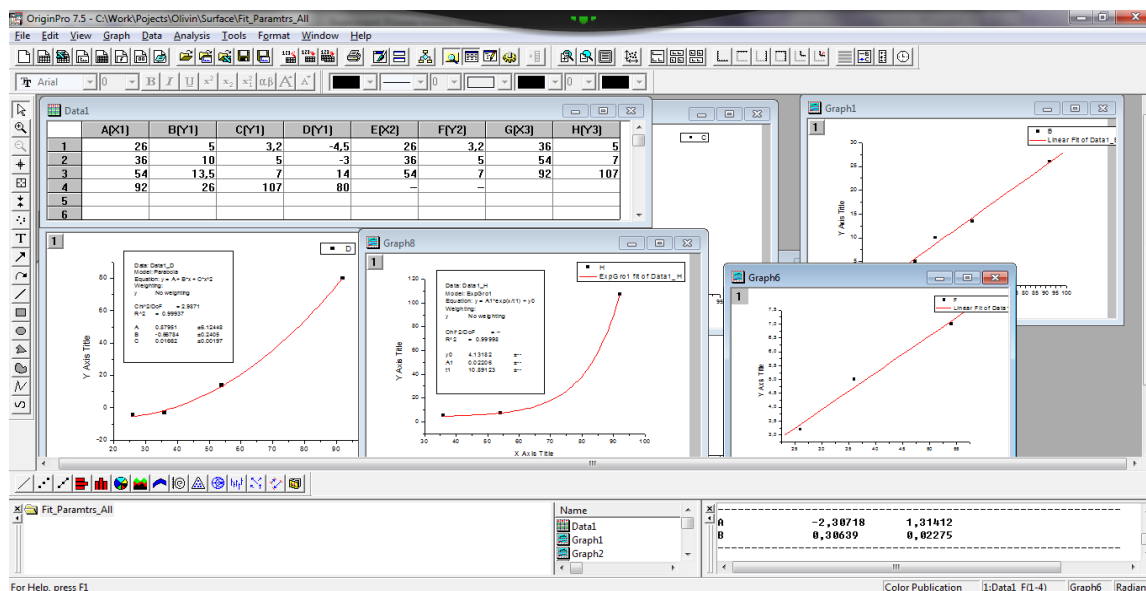


Рисунок 14. Семейство кривых $V(Z,L)$, полученных по формуле (1). Заряды от $Z=54$ до $Z=92$ (•); экстраполяция $V(Z,L)$ в область больших зарядов от $Z=94$ $Z=100$ (o) с интервалом в две единицы заряда.



a



6

Рис. 15. Результаты определения заряда с формулой (1) с помощью программного обеспечения в пакете OriginPro7.5

В разделе 3.6 представлены результаты измерения зарядового состава космических лучей в области тяжелых и сверхтяжелых ядер. Предложенная методика поиска и идентификации заряда тяжелых ядер галактических космических лучей позволила получить данные по ~11500 трекам ядер с зарядами $Z > 40$ в кристаллах оливина из метеоритов Marjalahti и Eagle Station. На основе полученных данных, был построен график относительной распространённости $A(Z)$ ($A(26)=10^6$), который представлен на Рисунке 16 вместе с данными со спутниковых экспериментов. Сравнение данных демонстрирует хорошее согласие [33].

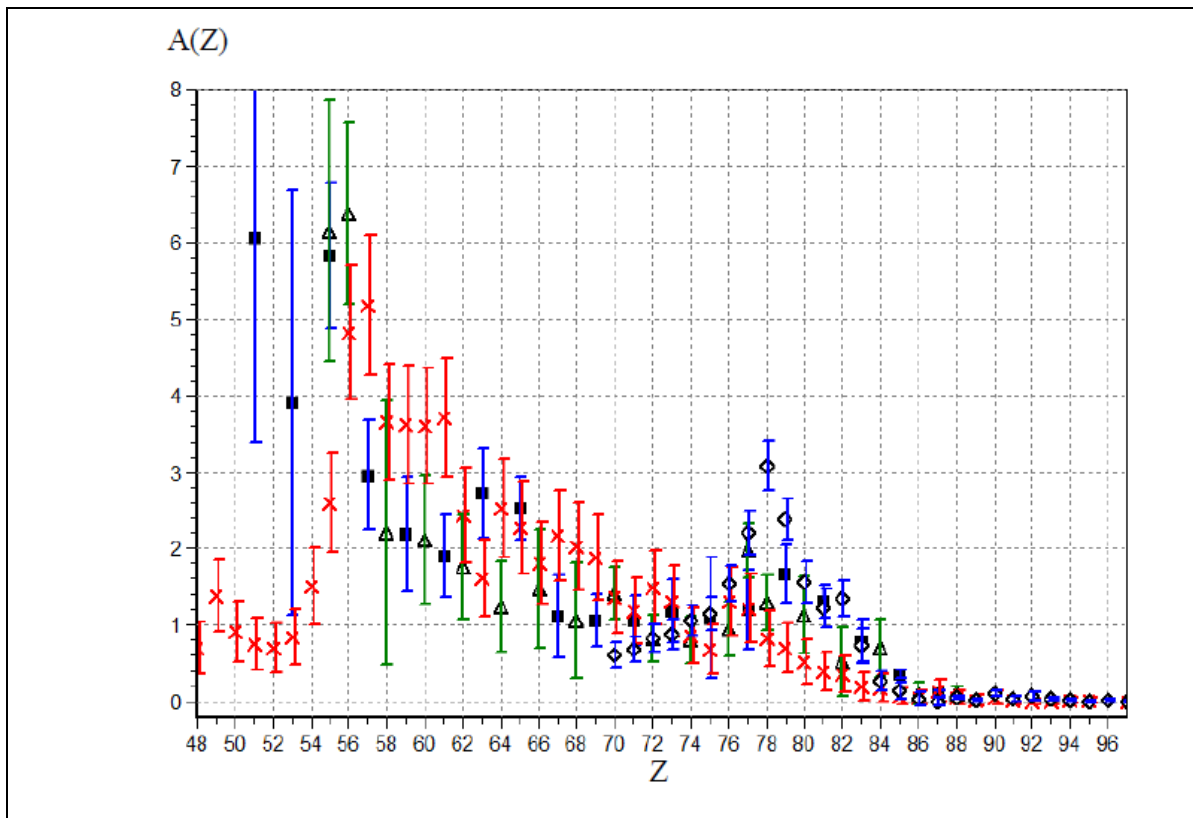


Рис. 16. Зарядовый спектр ядер, зарегистрированных в эксперименте ОЛИМПИА (кресты) в сравнении с результатами других экспериментов: HEAO-3 (квадраты) [20] ARIEL-6 (треугольники) [21] и UHCRE (круги) [22]

В числе обработанных треков идентифицировано 384 трека, заряд которых оценивается как $Z \geq 75$, т.е. соответствующие ядра могут относиться к долгоживущим сверхтяжелым элементам, поиск которых в космических лучах является одной из основных задач проекта.

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

1. Разработана новая программа определения характеристик треков ядер космического излучения в полном объеме кристаллов оливина из метеоритов.
2. По калибровочным измерениям на пучке ядер Bi и Au подтверждена правильность модельных расчетов и определения заряда.
3. Получено отношение распространённости ядер с $Z > 88$ к распространённости ядер с $74 \leq Z \leq 87$ равно $0,045 \pm 0,015$ (Марьялахти) и $0,025 \pm 0,02$ (Игл Стейшн). Эти величины несколько больше, чем в эксперименте UHCRE ($0,0147 \pm 0,0032$), но хорошо согласуются с данными экспериментов TREK, HEAO и Ariel.

4. Получены данные о зарядовом составе более 11500 ядер с зарядом > 40 , в том числе более 10000 с $Z > 55$, распределение которых согласуется с данными других экспериментов.
5. Создана программа для распознавания событий двойного бета-распада и продолжение треков электронов, включая искривленный участок.
6. Создана программа распознавания и анализа звёзд от распада ядер.
7. Создана программа для измерения характеристик зёрен AgBr и построения распределения получено величин. Обработано 17 партий эмульсии и выбрана технология эмульсия лучшего качества.
8. Создана программа для определения чувствительности плёнки в случае большой ионизации. Проведено измерение опытных образцов плёнки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chan J.H., Price P.B. (1975) Composition and energy spectra of heavy nuclei of unknown origin detected on Skylab. *Phys.rev.Lett.* 35, 539-42.
- [2] P. H. Fowler, R. A. Adams, V. G. Cowen, J. M. Kidd, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A310**, 39 (1967).
- [3] H. G. Paretzke, T. A. Gruhn, E. V. Benton, *Nucl. Instr. & Meth.*, **107**, 597 (1973).
- [4] Chan J.H., Price P.B. (1975) Composition and energy spectra of heavy nuclei of unknown origin detected on Skylab. *Phys.rev.Lett.* 35, 539-42.
- [5] Burger G., Frunauer F. and Paretzke H. (1970) The applicability of track detectors in neutron dosimetry. In: *Proc.Symp. Adv. Rad.Detectors*. International Atomic Energy Agency, Vienna, paper Sm-143. 17.
- [6] Fremlin J.H., Abu-Jarad F. (1980) Alpha-emitters in the environment. I:Natural sources. *Nucl. Instr. Meth.* 173, 197-200.
- [7] Frank A.L., Benton E.V. (1975) Active and passive radon-daughter dosimeters using track-etch detectors. Dept. of Physics, Univ. of San Francisco, Tech.Report 39.
- [8] Savvides E., Manolopoulou M., Papastefanou C., Charalambous S. (1985) A simple device for measuring radon exhalation from the ground. *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.* 36, 79-81.
- [9] Birot A., Adroguer B., Fontan J. (1970) Vertical Distribution of Radon 222 in the atmosphere and its use for study of exchange in the lower troposphere. *J.Geophysics. Res.* 75, 2373-83.
- [10] Fowler F.H., Perkins D. H. (1961) The possibility of therapeutic applications of beams of negative π mesons. *Nature* 189, 524-8.

- [11] Benton E.V., Curtin S.B., Raju M.R., Tobias C.A. (1970) Studies of negative pion beams by means of plastic nuclear track detectors. In: Proc. 7th Int. Colloq. Corpuscular Photography and Visual Solid Detectors, Barselona, pp. 423-8.
- [12] Price P.B., Fleischer R.L, Peterson D.D. et al. (1967) Identification of isotopes of energetic particles with dielectric track detectors. Phys.Rev. 164, 1618-20.
- [13] Price P.B., Fleischer R.L., Peterson D.D. et al. (1968) High resolution study of low energy cosmic rays with Lexan track detectors. Phys.Rev.Lett. 21, 630-3.
- [14] Fowler P.H., Adams R.V., Cowen V.G., Kidd J.M. (1970) The charge spectrum of very heavy cosmic ray nuclei. Proc. Roy.Soc.Lond.A318, 1-43.
- [15] O’Sullivan D., Thompson A., Daly J., O’Ceallaigh C., et al. (1980) A solid state track detector array for the study of ultraheavy cosmic ray nuclei in earth orbit. In: Proc.10th Int.Conf. Solid State Nucl. Track Detectors, Lyon, and Suppl. 2, Nucl.Tracks. Pergamon, Oxford, pp.1011-19.
- [16] V. L. Ginzburg, Physics and Astrophysics, a Selection of Key Problems. (Pergamon, NewYork, 1985); В. Л. Гинзбург, УФН**169**, 419 (1999).
- [17] R. L. Fleisher, P. B. Price, R. M. Walker, M. Maurette and G. Morgan. J. Geophys. Res. **72**(1), 355 (1967).
- [18] 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.Страков,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.
- [19] В.Д. Ашитков, А.С. барабаш, В.Я. Браднова, Л.А. Гончарова, О.И. Огурк, Е.А. Пожарова, Н.Г. Полухина, В.А. Смирнитский, Н.И.Страков, 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
- [20] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibneretal., Astrophys. J., 346, 997 (1989).
- [21] O’Sullivan, A. Thompson, C. Domingo et al., Nucl. Track and Rad. Meas., 15, 673, (1988).
- [22] J. Donnelly, A. Thompson, D. O’Sullivan et al., Astrophys. J. 747(40), 14, (2012).
- [23] Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, Треки заряженных частиц в твердых телах, в 3-х частях, М., Энергоатомиздат (1981).
- [24] Фейнберг Е.Л., Полухина Н.Г., Котельников К.А. «Полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки экспериментального материала трековых детекторов» ЭЧАЯ, 2004, т.35, вып.3, стр.763-787.

- [25] Полухина Н.Г., докторская диссертация, Москва, ФИАН, 2006.
- [26] Калинин С.А., Котельников К.А., Мартынов А.Г., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ» «Наука-производству», № 12, 2000, стр.29.
- [27] Егоров О.К., Котельников К.А., Старков Н.И., Полухина Н.Г., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-1» ПТЭ, 2003, № 6, с.131-132.
- [28] Егоров О.К., Котельников К.А., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2» ПТЭ, 2003, № 6, с.133-134.
- [29] Старков Н.И., докторская диссертация, Москва, ФИАН, 2010.
- [30] 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, Приборы и техника эксперимента (Техника ядерного эксперимента), №2, 38 (2009).
- [31] 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, том 180, № 8, стр.839-842, 2010.
- [32] A.V. 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 NaingSoe, 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.
- [33] А.В.Багуля, М.С.Владимиров, А.Е.Волков, Л.А.Гончарова, С.А.Горбунов, 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//Зарядовый спектр сверхтяжелых ядер галактических космических лучей, полученный в эксперименте Олимпия// Журнал «Краткие сообщения по физике» 2015, № 5, стр.49-56.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.Окатьева, 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. A.V. 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.