

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

На правах рукописи

Тан Найнг Со

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

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Старков Н.И

Москва - 2015

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА.1. УСТАНОВКА ПАВИКОМ. СОСТАВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, СПЕКТР ЗАДАЧ.....	21
ГЛАВА.2. ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД И МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА ПО ПОДГОТОВКЕ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.	32
2.1 Природа одиночного и двойного бета-распада. Безнейтринный бета-распад.....	32
2.2 Предложение об эксперименте с эмульсионной камерой со взвешенными частицами молибдена.....	35
2.3 Программное обеспечение по поиску событий двойного бета- распада и прослеживания треков электронов на прямолинейных и криволинейных участках.	36
2.4 Программное обеспечение для оценки качества ядерных фотоэмульсий. Результаты измерений по оценке качества эмульсии, произведенной в России и в Японии.....	45
ГЛАВА.3.ПОИСК СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР В ПРИРОДЕ.....	60
3.1 Метеориты как природный детектор галактических ядер.....	60
3.2 Особенности изучения треков в оливинах; методика поэтапной обработки кристаллов оливина.	66
3.3 Связь между длиной пробега, скоростью травления и зарядом; калибровочные эксперименты на ускорителях.	73
3.4 Методика измерений протравленных треков на ПАВИКОМ.	76
3.5 Программное обеспечение определения заряда ядер	77
3.6 Результаты измерения зарядового состава космических лучей в области тяжелых и сверхтяжелых ядер	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	93

Введение

Трековая методика как базовый метод для поиска и изучения сверхтяжёлых ядер в природе и в тестовых работах по изучению безнейтринного двойного бета-распада.

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 довольно просты - обычные фотографические пластинки, применяемые фотографами начала 20 века, а также электроскопы. Трековым детектором следующего поколения стала, в частности, камера Вильсона, в которой использовалась конденсация жидкости из пересыщенного пара (при подходящих условиях ионизация, произведенная в веществе заряженной частицей, может вызвать в нем фазовый переход). Прибор был изобретен в 1912 Ч. Вильсоном [1], в течение многих лет изучавшим физику образования облаков в атмосфере. Пузырьковая камера была изобретена и усовершенствована в начале 1950-х годов Д. Глезером [2] (используется перегретая жидкость, которая вскипает вблизи центров зародышеобразования, которыми служат локальные участки энерговыделения $\geq 0,1$ кэВ на траектории частицы в перегретой жидкости). Камеры Вильсона и пузырьковые камеры позволяют непосредственно наблюдать следы частиц. Это означает, что положение частицы может быть определено с точностью до размера капельки или пузырька, т.е. примерно, до 1 мм. Однако недостатками таких термодинамических камер являются их малое быстродействие, невысокое пространственное разрешение и, главное, невозможность автоматизации сбора и обработки данных в режиме

реального времени. Эти недостатки были преодолены в детекторах другого (электронного) типа – газоразрядных счётчиках с газовым усилением, пропорциональных и дрейфовых камерах, сцинтилляционных и черенковских детекторах, твердотельных детекторах.

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 не только в аэростатных, но и в спутниковых экспериментах с космическими лучами [3]. Трековые детекторы (и в их числе ядерные фотоэмульсии) 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).

Трековая методика успешно применяется и в целом ряде прикладных работ, метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область, где бы он не использовался: это физика высоких энергий, космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород [3-14].

Однако, ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает ядерная эмульсия: при размере зерна 0,3 – 1 мкм, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 мкм, а при определенных условиях может быть уменьшено до 0,2 мкм. Использование двусторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее одного миллирадиана. Ядерная

фотоэмульсия используется в целом ряде экспериментов проводимых физиками Европы, Америки, Азии. Самые крупные из них могут содержать тонны ядерной фотоэмульсии, что соответствует тысячам квадратных метров поверхности эмульсии [15-17].

В этой связи, первостепенное значение приобретают 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 приблизительно 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. Создание подобных автоматизированных комплексов позволяет перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих трековую технику регистрации частиц, и существенно расширяет круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

Пионером развития автоматизированных комплексов стала Япония, где такой комплекс был создан ещё в середине 80-х гг. Но настоящим толчком к развитию автоматизированных комплексов по всему миру послужило проведение экспериментов CHORUS и DONUT [15-16], использующих значительные объёмы ядерной фотоэмульсии. В настоящее время только в эксперименте OPERA задействованы сотни тонн ядерной фотоэмульсии, что соответствует сотням тысяч квадратных метров поверхности эмульсии (суммарная поверхность использованной в этом эксперименте фотоэмульсии примерно равна площади восьми футбольных полей). Всего в мире в настоящее время действует около сотни автоматизированных комплексов, примерно половина – в Европе, где в последние годы число таких комплексов стремительно растёт. В ФИАНе в 2000 году создан первый в России и успешно функционирующий Полностью АВтоматизированный Измерительный КОмплекс (ПАВИКОМ), состоящий из трех автоматизированных микроскопов. Детальное описание ПАВИКОМ приведено во II главе диссертации.

Одним из направлений ядерно-физических исследований, где активно используются трековые детекторы, стало изучение зарядового состава космических лучей. Для регистрации ядер тяжелых (“Very Heavy”, VH-группы с зарядом $23 \leq Z \leq 28$) и сверхтяжелых (VVH, $Z \geq 30$, “Very Very Heavy”) элементов галактических космических лучей (ГКЛ) на протяжении последних десятилетий основными были фотоэмульсионные [18] и твердотельные пластиковые [19] детекторы, в которых вдоль траектории движения заряженных частиц происходит формирование визуально наблюдаемых следов этих частиц.

Впервые треки, отнесенные по своим параметрам к ядрам ультратяжелых элементов, вплоть до урана, были зарегистрированы с помощью ядерных фотоэмульсионных детекторов, экспонируемых на шарах-зондах в верхних слоях атмосферы [20]. При этом оценка заряда ядра, образующего трек, осуществлялась по величине диаметра трека, проявляемого в толстом слое фотоэмульсии (см. рисунок 1).

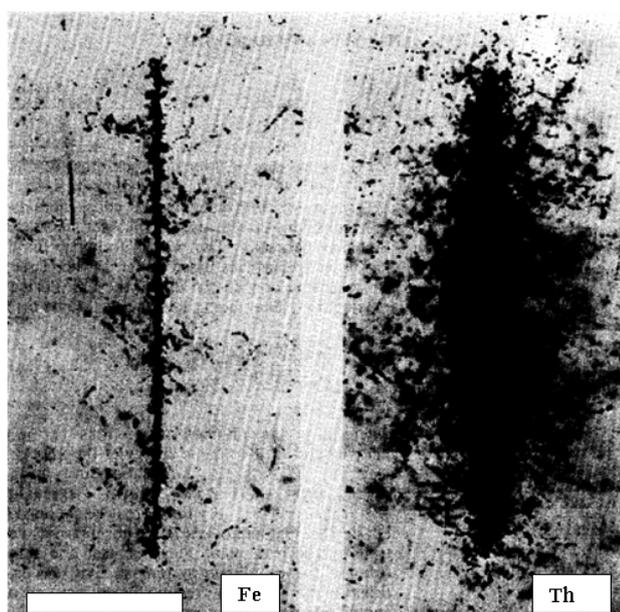


Рис. 1. Треки ядер Fe ($Z = 26$) и Th ($Z = 90$) ГКЛ, наблюдаемые в толстослойной ядерной эмульсии после облучения в верхних слоях атмосферы Земли [20]. Отрезок указанной шкалы составляет 50 микрон.

Однако, из-за необходимости проведения длительных экспозиций в открытом космическом пространстве, в ядерных эмульсиях образовывался очень высокий фон треков от, главным образом, ядер водорода, гелия и легких элементов. Это мешало наблюдению и измерению параметров очень редких треков ядер сверх- и ультратяжелых элементов ГКЛ. Кроме того, была невелика [20] точность определения заряда частицы по зависимости диаметра треков от заряда частиц, образующих эти треки.

С разработкой и началом использования методики пластиковых трековых детекторов (ПТД) появилась возможность проведения более широких исследований ядерного состава ГКЛ. Для этого создавались многослойные трековые годоскопы. На рисунке 2 показан пример одного из зарегистрированных в годоскопе треков [20].

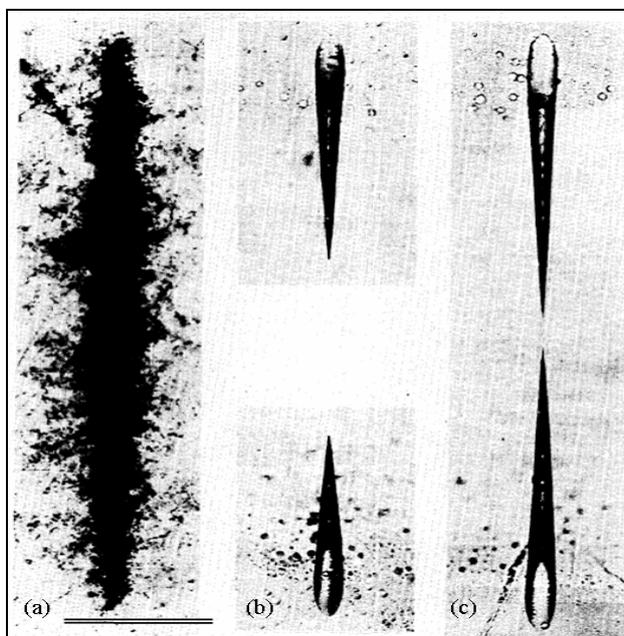


Рис.2 Микрофотографии пространственно совмещенного трека от ядра ГКЛ с зарядом $Z = 78$, зарегистрированного в двух пластинках ПТД типа

лексан (b, c), входящих в стопку трековых детекторов, экспонированных в верхних слоях атмосферы [20]. Между пластинками ПТД находился слой ядерной фотоэмульсии (a), в котором также был зарегистрирован трек от этого ядра. Шкала – отрезок двойной линии, 50 микрон.

Результаты, полученные с помощью многослойных сборок ПТД, показали перспективность их применения для изучения зарядового состава ядерной компоненты ГКЛ вплоть до элементов (Th, U)-группы [21]. Вместе с тем, для того, чтобы зарегистрировать несколько ядер этой группы ГКЛ, необходимо сборку, составленную из многих десятков пластин ПТД площадью сечения около $0,25 \text{ м}^2$ каждая, облучать в условиях открытого космоса (высота 300-400 км над поверхностью Земли) на искусственных спутниках Земли в течение нескольких лет. Так, трековый детектор, размещенный на космической станции Skylab, включал 36 камер, каждая из которых состояла из 32 слоев ПТД лексана. Детектор экспонировался на высоте 430 км в течение 253 дней [22]. Идентификация зарядов ядер, образующих треки, осуществлялась по величине скорости их травления в пластике.

Сборки ПТД, составленные из пластин лексана с расположенными между ними пластинами свинца, (эксперимент UHCRE - Ultra Heavy Cosmic Ray Experiment) экспонировались на высоте 450 км в течение 69 месяцев на космической станции LDEF [23]. Всего в этом эксперименте было зарегистрировано около 2500 треков, относящихся к ядрам с $Z > 65$.

Эксперимент TREK проводился на космической станции «Мир» на высоте 450 км и продолжался более 40 месяцев. Детектор включал 150 стопок, каждая из которых состояла из 16 листов барий-фосфатного стекла (BP-1) [24]. После травления было найдено несколько сотен следов, принадлежащих тяжелым ядрам с $Z > 70$.

Приведенные примеры показывают, что изучение зарядового состава космических лучей путем облучения твердотельных трековых детекторов

(ПТД и ВР-1) на космических аппаратах сопряжено с огромными финансовыми затратами и многолетней работой крупных исследовательских коллективов. В результате поиска, обработки и совмещения траекторий треков, наблюдаемых в разных пластинах ПТД с помощью специальной измерительной технологии, были получены уникальные данные по относительной распространенности в космическом пространстве ядер сверхтяжелых элементов, вплоть до урана [23-25].

Более информативные эксперименты по исследованию зарядового состава ГКЛ были проведены при комплексном использовании многослойных сборок ПТД, совмещенных с черенковскими счетчиками и ионизационными камерами и облученных в космическом пространстве на искусственных спутниках Земли. Наиболее представительные результаты были получены при выполнении работ по программам ARIEL-6 [26] и HEAO-3 [27]. На спутнике ARIEL была установлена сферическая камера, заполненная сцинтиллирующей смесью газов. Заряд частицы определялся по величине сигнала, поступающего от фотоумножителей регистрирующей системы. Измерения продолжались в течение 427 дней на высоте 625 км. На спутнике HEAO (продолжительность полета 454 дня на высоте 495 км) регистрирующая установка состояла из 6 ионизационных камер, черенковского счетчика и многопроволочных ионизационных годоскопов.

Проведенные эксперименты с использованием сложной, дорогостоящей аппаратуры, и при этом экспонируемой непродолжительное (для регистрируемого суммарного потока сверхтяжелых ядер ГКЛ) время в открытом космосе, продемонстрировали необходимость поиска других способов изучения зарядового состава ГКЛ.

Уникальными природными детекторами для изучения состава космических лучей, поиска тяжелых и сверхтяжелых ядер космического происхождения являются железо-каменные метеориты класса палласитов, представляющие собой пористую матрицу из никелистого железа с

включениями кристаллов оливина (полупрозрачный кристалл $(Mg_{0.8}Fe_{0.2})_2SiO_4$, который, после процедуры протравливания, в каком-то смысле аналогичной процедуре проявки фотопластинок, можно просматривать на оптических микроскопах). Уникальность метеоритов как 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. Поэтому 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, для которых используются метеоритные кристаллы оливина, за счет хорошей статистической обеспеченности, могут также 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.

Изучение галактических космических лучей в веществе метеоритов началось в середине 60-х годов прошлого века. Впервые тяжелые галактические ядра ($Z \sim 26$) были обнаружены в метеоритах в 1964 г. [28]; более тяжелые ядра - в 1967 г. [29]. С середины 70-х годов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ под руководством Г.Н. Флерова, были развернуты работы по поиску треков сверхтяжелых ядер космических лучей в силикатных кристаллах оливина из метеоритов [30]. Была разработана эффективная методика выявления треков путем отжига и травления образцов. Работа продолжалась вплоть до 2003 года, и основные результаты

были получены для кристаллов оливина, выделенных из двух палласитов: Марьялахти и Игл Стэйшн [31-33].

Г.Н.Флеров оценил, что при возрасте метеорита сотни миллионов лет исследование 1 куб.см метеоритного оливина эквивалентно проведению эксперимента с 1-2 т фотоэмульсии в космосе в течение 1 года. Опыт работы автора на автоматизированных микроскопах ПАВИКОМ для обработки данных трековых детекторов в полной мере был использован в эксперименте по поиску в природе сверхтяжелых ядер ГКЛ в оливинах из метеоритов. 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 [34].

Таким образом, трековая методика дает возможность получать приоритетные результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира. При этом использование современных высокотехнологичных автоматизированных комплексов (таких, как ПАВИКОМ в ФИАНе) позволяет существенно ускорить обработку данных трековых детекторов и реализовать новые эксперименты на основе трековой методики для исследования самых актуальных проблем физики двадцать первого века.

Универсальность и высокая эффективность комплекса ПАВИКОМ, опыт работы автора в составе фиановской научной группы позволил начать подготовку нового эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада, возможность существования которого является одним из важных вопросов нейтринной физики. Если нейтрино является майорановской частицей (частица тождественна античастице), то некоторые изотопы могут испытывать т.н. безнейтринный двойной бета-распад. Основными трудностями в экспериментах по поиску безнейтринного распада является

наличие большого периода полураспада, малость энергии испускаемых частиц и, следовательно, необходимость максимально близкого расположения детектора и излучателя. Было предложено использовать изотоп 100-ого молибдена, введя его в состав ядерной фотоэмульсии, тем самым решая проблему предельно близкого расположения излучателя и детектора.

События двойного бета-распада довольно редки. Так период полураспада $^{100}_{42}\text{Mo}$ составляет $1,6 \times 10^{17}$ лет для нейтринного и $5,7 \times 10^{24}$ лет для безнейтринного распада. Это приводит к необходимости длительной экспозиции эмульсионных камер с $^{100}_{42}\text{Mo}$ наполнением и использованию большого количества исследуемого материала и эмульсии, что в свою очередь требует просмотра большого объёма детектора. Например, при объёме 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 типа ПАВИКОМ. В данном эксперименте предполагалось дополнить его программное обеспечение необходимыми для данной задачи алгоритмами, что и было успешно сделано автором работы.

Актуальность темы работы

Изучение зарядового состава ядер галактических космических лучей (ГКЛ) имеет большое значение для понимания свойств ядерной материи, эволюции 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 [34]. 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 [29]. Такие широко распространенные минералы, как плагиоклаз, пироксен и оливин, способные формировать и сохранять нарушения кристаллической решетки вдоль следа торможения высокоэнергетичных 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 выделяются из 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 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 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 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 задач по поиску и идентификации природных сверхтяжелых элементов (входящих в состава т.н. «острова стабильности») в составе галактических космических лучей целью автора было накопление экспериментального 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 ревизии 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 значимость 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 исследовал то же ядро. Авторы этого эксперимента летом 2014 года сообщили свои первые результаты, которые не подтвердили ранее полученный результат, поскольку при той же точности измерений события безнейтринного бета-распада не

были зарегистрированы.. 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.

Таким образом, 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 путём замешивания мелкодисперсного порошка молибдена в эмульсионном геле. 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}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 ($Z > 40$) 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

модифицировано существовавшее программное обеспечение, позволяющее проводить более эффективную обработку.

В результате 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 $Z > 50$. 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; $40 < Z < 100$ - 11590 ядер; $50 < Z < 100$ - 10283 ядер; $55 < Z < 100$ - 6716 ядер; $Z > 75$ - 384 ядер; $Z > 80$ - 74 ядра; $Z > 85$ - 22 ядра; $Z > 90$ - 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. К сожалению, в земных условиях на ускорителях невозможно синтезировать ядра с оптимальным соотношением числа протонов и нейтронов ($Z \sim 110$, $N \sim 184$). По этой причине ведутся интенсивные поиски ядер из «острова стабильности» в природных условиях. Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, подтверждающие существование сверхтяжёлых 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.

Глава.1. Установка ПАВИКОМ. Состав, характеристики, спектр задач.

Существенным условием успешного использования трековых детекторов в современных экспериментах является высокая скорость обработки данных при автоматическом сканировании и анализе данных в реальном времени. Задачу быстрого сканирования больших массивов эмульсий и других типов трековых детекторов решают современные прецизионные микроскопы с системой видеозахвата и обработки изображений. В настоящее время скорость сканирования на таких установках в Европе достигает 20 см²/час [35] и 72 см²/час в Японии [36].

Подавляющее большинство современных установок для сканирования трековых детекторов устроены следующим образом. Комплекс состоит из прецизионного стола, перемещающегося в горизонтальной плоскости, и установленной над ним подвижной оптической системы с цифровой камерой. Прецизионный стол и подвижное устройство оптической системы управляются подключенным к компьютеру контроллером, изображение с камеры подается на специальную плату захвата и обработки изображения.

Трековый детектор для сканирования помещается на прецизионный стол. Объектив (используется объективы от 40 до 60 крат) наводится на поверхность детектора, после чего оптическая система начинает движение вниз, захватывая изображения на разных глубинах. Достигнув нижнего края детектора, оптическая система останавливается, стол автоматически передвигается на следующее поле зрения, где вновь происходит сканирование по всем глубинам.

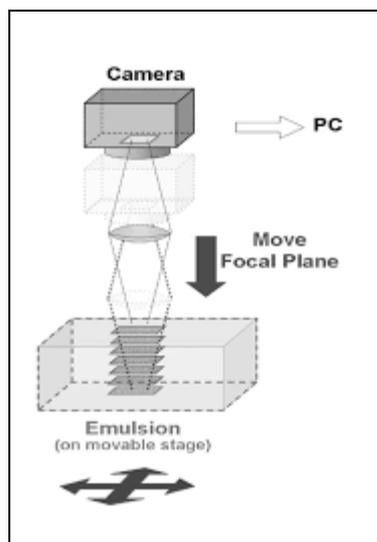


Рис. 3. Процесс сканирования

Этот метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных, ускоряя процесс примерно на три порядка по сравнению с обработкой вручную, и существенно увеличивая статистику событий. Создание подобных автоматизированных комплексов позволяет перейти на более высокий уровень проведения экспериментов, использующих эмульсионную трековую технику регистрации частиц. Всего в мире (в Европе и Японии) действует около сотни подобных комплексов.

В ФИАНе создан и успешно эксплуатируется многоцелевой уникальный измерительный комплекс ПАВИКОМ. Главным его отличием от всех других подобных систем в мире и достоинством является универсальность – на автоматизированных установках комплекса обрабатываются данные, полученные с использованием и ядерных эмульсий, и пластиковых детекторов, и кристаллов оливинов из метеоритов. Ни одна аналогичная установка в мире не используется для решения столь широкого класса задач [37-39].

На ПАВИКОМе в режиме полной автоматизации осуществляется:

- поиск и оцифровка треков заряженных частиц в материале детектора;
- распознавание и прослеживание треков с помощью компьютера;

- систематизация и первичная обработка данных.

Принцип работы: изображение на CMOS-матрице создает объектив микроскопа. Видеосигнал, формируемый видеокамерой, передается на вход карты оцифровки и захвата изображения. Карта передает эти данные в память компьютера, а также выводит оцифрованный видеосигнал в “живом окне” на монитор.

Комплекс состоит из трех сканирующих установок, отличающихся прежде всего, величиной перемещений оптических столов, и, соответственно, допустимыми размерами пленок для обработки.

Работа по изучению зарядового спектра ядер галактических космических лучей выполнена на микроскопе ПАВИКОМ-2, который создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО. Основные узлы установки ПАВИКОМ-2: прецизионный стол немецкой фирмы Carl Zeiss с блоком управления; цифровая CMOS-камера Mikrotron MC1310 (разрешение 1280×1024 пикс, максимальная частота кадров – 500 fps при глубине цвета 8 бит); персональный компьютер. Пределы автоматического перемещения столика по оси X составляют 0 – 120 мм, по оси Y: 0-100 мм, пределы перемещения по вертикальной координате около 1 см. Перемещение оптического столика по всем координатам осуществляется шаговыми двигателями, управляемыми контроллером, на который поступают команды от компьютера. Точность измерения координат X и Y составляет 0,5 мкм, по оси Z – $3,46 \times 10^{-3}$ мкм.

Фотоэмульсии нового эксперимента по поиску безнейтринного бета-распада будут обрабатываться на ПАВИКОМ-3, состоящем из следующих основных узлов:

- оптический стол с кронштейном для микроскопа и система подвижных столов немецкой фирмы MiCos: MS-8 (рабочий диапазон 205×205 мм, точность 0.5 мкм) и LS-110 с (рабочий диапазон 305 мм, точность 0.2 мкм);

- усилитель (драйвер) двигателей MiCos MPA-5;
- микроскоп и система подсветки Nikon с возможностью автоматического управления, набор объективов Nikon 40-100x;
- цифровая CMOS-камера Mikrotron MC1310 (разрешение 1280×1024 пикс, максимальная частота кадров – 500 fps при глубине цвета 8 бит);

Микроскоп управляется через рабочую станцию, оборудованную платой захвата и обработки изображений Matrox ODYSSEY Xpro и контроллером движения National Instruments PCI-7344. На рабочей станции установлен процессор Intel Core2Quad Q8400 2.66 ГГц, 4 Гб оперативной памяти и жесткий диск объемом 1 Тб.



Для автоматического управления уровнем света изготовлен специальный кабель с делителем напряжения, обеспечивающий сопряжение контроллера с блоком питания лампы подсветки. Выходное напряжение аналогового выхода контроллера составляет $-10 \div +10$ В, а входное управляющее напряжение блока питания должно составлять 0 – 5,6 В. Кабель с встроенным делителем напряжения был изготовлен для обеспечения управления с максимальной точностью и предотвращения выхода из строя

блока питания лампы (рис.5)[40]. Он подключается разъемом DE-15 к усилителю МРА-5, а разъемом HR12-10R-8SC к блоку питания лампы.

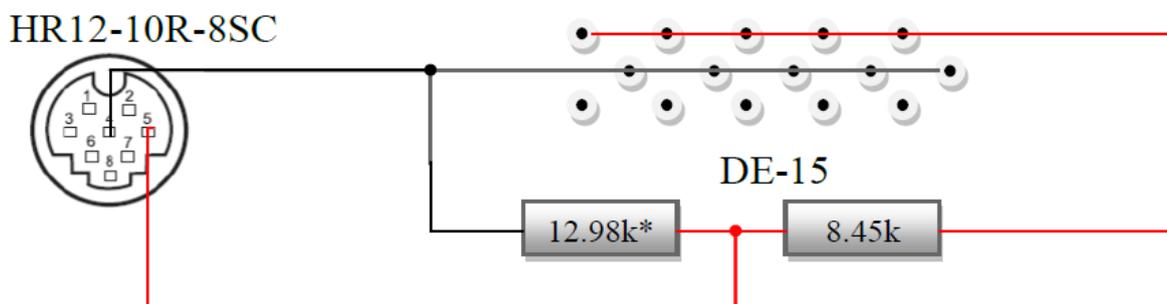


Рис. 5. Схема кабеля управления лампы подсветки. Сопротивление 12.98 кОм составлено из двух 6.49 кОм

Фиксация эмульсии на столе производится вакуумным прижимом (Рис. 6). Вакуум создается насосом Bucsh Seco SV 1003 D, обеспечивающим давление до 150 мбар с производительностью до 3 м³/час. Для уменьшения износа насоса и уровня шума в рабочей комнате спроектирована система автоматического поддержания давления в системе в пределах 250-500 мбар. В начале работы насос откачивает воздух из ресивера объемом 50 л. Когда давление, по показаниям датчика, поднимается до 500 мбар, система включает насос и открывает клапан между насосом и вакуумной системой. При снижении давления до уровня 250 мбар система сначала закрывает клапан (во избежание утечек через выключенный насос), и затем выключает насос. Эта система изготовлена в ФИАН и введена в эксплуатацию [40]. Автоматическая система поддержания давления в системе вакуумного прижима эмульсий позволила уменьшить время работы насоса на 87%. Фотография системы приведена на Рис. 7.

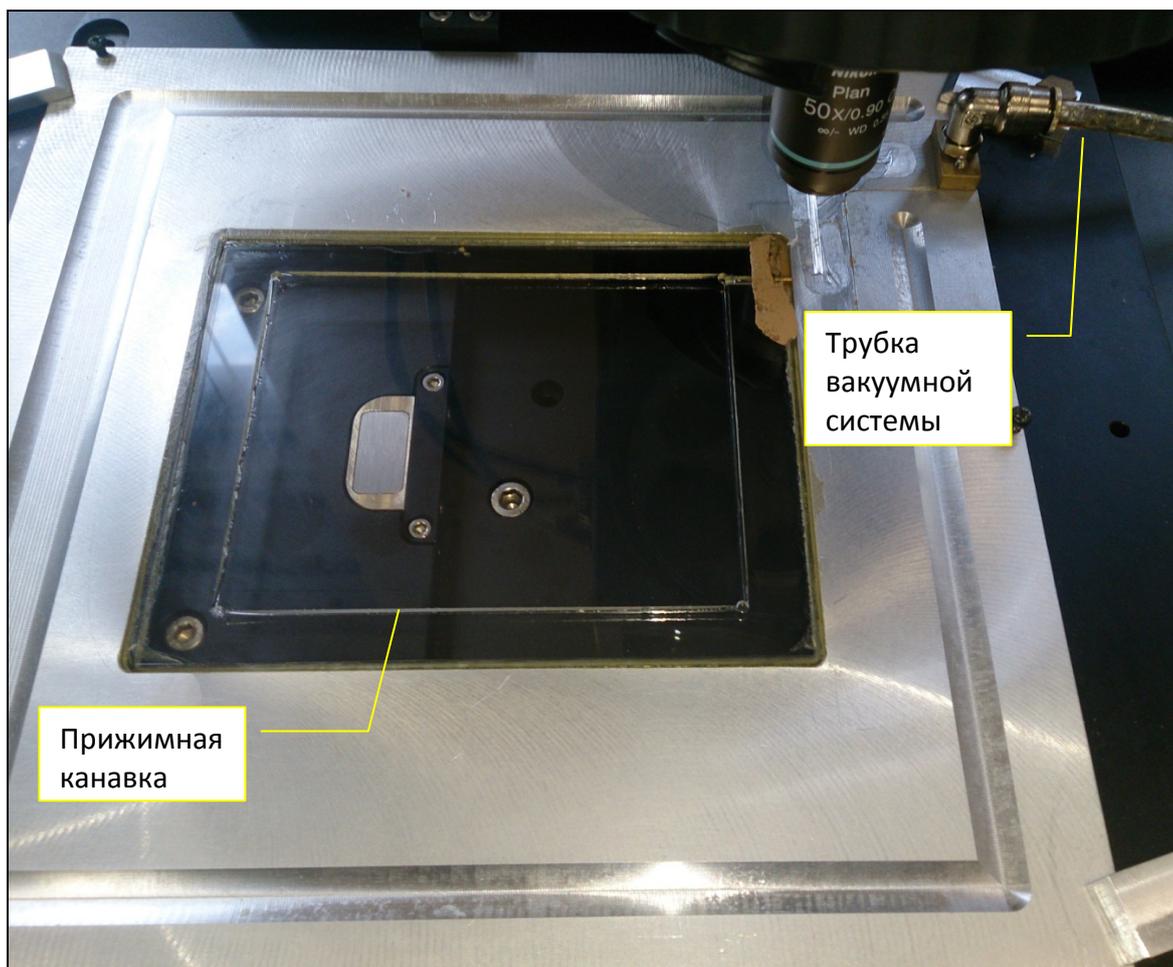


Рис. 6. Предметный стол с вакуумным прижимом.



Рис. 7. Вакуумный насос и устройство поддержания давления в системе а) насос и блок управления; б) электронный датчик давления и вакуумный

ресивер.

Помимо управляющей рабочей станции вычислительная инфраструктура, необходимая для обработки данных экспериментов с трековыми детекторами, включает в себя следующие узлы:

- Рабочая станция для трекинга, в т.ч. на GPU (Graphical Processing Unit – графический процессор) – обеспечивает реконструкцию треков в режиме online в большом диапазоне углов ($\tan \theta < 1$) в режиме быстрого сканирования. На рабочей станции установлен четырех-ядерный процессор Intel Core-i7 2600 3.4 ГГц, 8 Гб оперативной памяти, видеокарта NVIDIA GTX690, 2 Тб дискового пространство + 10 Тб RAID5 массив для хранения данных.
- Рабочая станция для реконструкции в режиме offline и физического анализа (процессор Core2Duo 3,2 ГГц, 2 Гб оперативной памяти, 750 Гб дискового пространства).

ПАВИКОМ - его универсальность, быстродействие и постоянно обновляемое программное обеспечение, не только позволяют обеспечить потребности исследований, проводимых в ФИАН, но эффективно используется также другими российскими лабораториями и институтами. При этом участие группы ПАВИКОМ отнюдь не сводится к предоставлению установки в аренду. Для каждого эксперимента группой ПАВИКОМ как минимум, дорабатывается старое или разрабатывается специальное программное обеспечение, часто производится доработка аппаратуры или необходимое приспособление установки и изменение метода измерений, непрерывно ведется модернизация комплекса, расширяющая его технические возможности. Хотя базисные установки, составляющие основу всего комплекса, создавались первоначально для экспериментов по физике частиц высоких энергий, в работах с другими лабораториями и институтами комплекс был использован для исследований целого ряда проблем, связанных с изучением структуры гало ядер, анализом ядерных реакций при

низких энергиях, исследованием спектров электронов внутренней конверсии изотопов редкоземельных элементов, для изучения космических лучей, множественной генерации частиц при соударениях релятивистских ядер. По существу, охвачен широкий спектр актуальных проблем современной ядерной физики. В частности, на ПАВИКОМе выполнена обработка:

- для эксперимента ОИЯИ «Энергия+Трансмутация», в котором при изучении нейтронных спектров использовались твердотельные трековые детекторы на основе лавсана (полиэтилентерфталата). Применение таких детекторов обусловлено их особенностями: высокой эффективностью регистрации осколков деления, низким собственным фоном и простотой технологии обработки. Твердотельные трековые детекторы использовались в калориметре установки для мониторинга и определения профиля пучка; для изучения распределения событий деления в бланкете; исследования деления урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами; определения усредненного сечения деления в бланкете. Вся обработка ТТД выполнена на ПАВИКОМ;

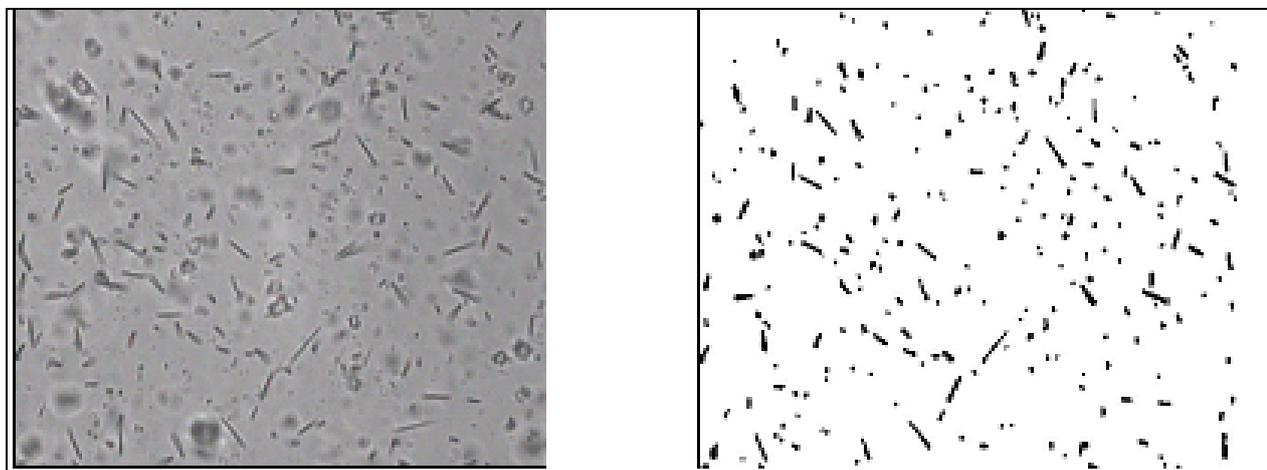
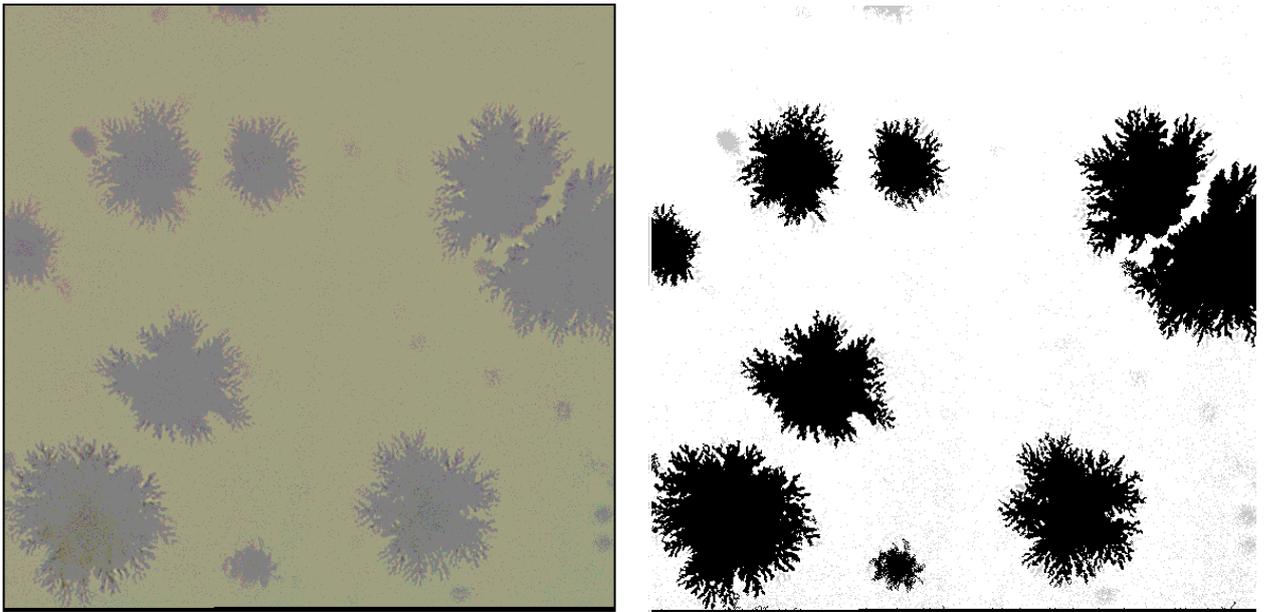


Рис.8. Результат предварительной обработки изображения

Слева - видеоизображение одного поля зрения размером около 100×100 микрон в твердотельном детекторе эксперимента «ЭНЕРГИЯ ПЛЮС ТРАНСМУТАЦИЯ», полученное на ПАВИКОМ; видны треки осколков

деления ядер урана. Справа – результат обработки этого кадра программой, распознающей следы осколков.

- следов заряженных частиц при электрохимическом методе травления. Такой метод травления часто используют в дозиметрии для увеличения размера протравленных каналов при подсчёте их числа. Метод заключается в травлении, сопровождаемом приложением переменного электрического поля (напряжённость десятки КВ/см, частота ~ 1 КГц). При достижении определённой глубины травления под действием поля развивается электрический пробой фрактального типа, приводящий к сложной картине микрозарядов и возникающих отверстий в пластике. Цель данной процедуры – увеличение размеров отверстий в десятки раз до сотен микрон для облегчения визуального подсчёта числа треков. Трудность автоматизации процесса подсчёта числа отверстий заключается в сложной геометрической форме возникающих пятен. Изображение на рисунке ниже передано в группу ПАВИКОМ коллегами из Физического института в Каире с просьбой помочь им при автоматизации его обработки. Алгоритмы, разработанные для ПАВИКОМ позволяют преодолеть указанную трудность и полностью восстановить форму "звезды" любой сложности и произвести требуемый подсчёт автоматическим путём.



а

б

Рис .9. Результат обработки изображения следов альфа-частиц в пластике CR-39 после электрохимической обработки. а- исходное изображение; б- результат обработки на ПАВИКОМ.

- при дозиметрических измерениях пучка ионов углерода в ИТЭФ на основе трековых детекторов CR-39. Детекторы такого типа обеспечивают получение данных не только о средних значениях энергии частиц и энерговыделении частиц в объекте, но и о распределении плотности пучка в его сечении, количестве и месте попадания частиц, разбросе энергий частиц. Вся обработка трековых детекторов CR-39 выполнялась в автоматическом режиме на ПАВИКОМ.

Оборудование ПАВИКОМ используется научными группами около десяти российских институтов. Для фиановской группы основными направлениями в настоящее время являются обработка данных крупнейшего международного эксперимента ОПЕРА и поиск сверхтяжелых элементов в галактических космических лучах. Группа занимается также подготовкой двух новых экспериментальных проектов – международного эксперимента

по поиску тяжелых нейтральных лептонов SHiP (Search for Hidden Particles) в ЦЕРНе и российского эксперимента по безнейтринному бета-распаду. Автор внес значительный вклад в подготовку эксперимента по безнейтринному бета-распаду и реализацию эксперимента по поиску сверхтяжелых элементов (удвоив статистику зарядового распределения ядер ГКЛ, полученную на ПАВИКОМ).

Глава.2. Двойной бета-распад и методическая работа по подготовке тестового эксперимента.

2.1 Природа одиночного и двойного бета-распада. Безнейтринный бета-распад.

Бета-распад обусловлен слабым взаимодействием, протекающим через обмен векторным бозоном. Так распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино (1) происходит за счет рождения заряженного векторного W бозона. В результате один из d кварков нейтрона переходит в u кварк, приводя к появлению протона, и рождению электрона и антинейтрино. В свободном состоянии нейтрон распадается, примерно, за 20 минут. В большинстве ядер закон сохранения энергии запрещает распад нейтрона, однако для некоторых ядер масса конечного ядра и продуктов распада нейтрона меньше массы исходного ядра, в результате чего они испытывают бета-распад.



Кроме того существует более редкие типы распада ядер – двойной бета-распад, когда в ядре распадаются одновременно два нейтрона с испусканием двух электронов и двух антинейтрино. При этом заряд конечного ядра увеличивается на две единицы. Эта реакция изучена экспериментально, а также теоретически в рамках стандартной модели взаимодействия элементарных частиц [41].

В то же время было высказано предположение о существовании другого типа двойного бета-распада – так называемого безнейтринного двойного бета-распада [41], при котором антинейтрино не испускается. Описание такого распада выходит за рамки стандартной модели, так как нарушает закон сохранения лептонного числа и может происходить в случае, когда нейтрино является майорановским, а не дираковским. В этом случае

нейтрино является античастицей по отношению к самой себе и нейтрино одного типа, но с разными спиральностями могут аннигилировать друг с другом. На рисунке 8 показана возможная схема безнейтринного двойного бета-распада ядра. Два нейтрона испускают по электрону, а также антинейтрино с противоположными спиральностями, которые аннигилируют, и переходят в протоны. В итоге появляется ядро с зарядом на две единицы большим исходного и два электрона.

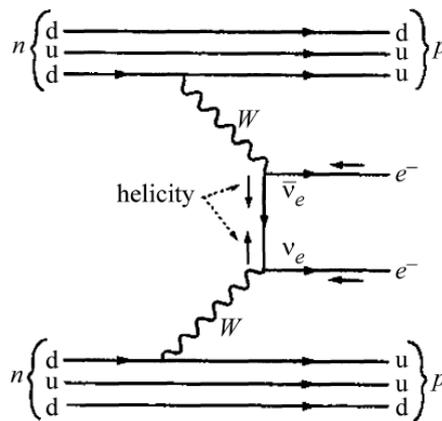


Рис.10. Схема безнейтринного двойного бета-распада.

Выяснение вопроса о природе нейтрино имеет не только теоретический интерес, но важно с точки зрения следствий для различных физических задач, в первую очередь в астрофизике.

Обнаружение такого типа распада может привести к пересмотру некоторых астрофизических моделей.

Ввиду важности вопроса о дираковской или майорановской природе нейтрино, в разных лабораториях мира проводятся эксперименты по обнаружению безнейтринного двойного бета-распада [42], которые до настоящего времени с достоверностью не обнаружили событий такого распада. Более того сложилась противоречивая экспериментальная ситуация,

которую можно проиллюстрировать, например, данными двух экспериментов.

Первый из них это коллаборация Гейдельберг-Москва, которая изучала 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 исследовал то же ядро. Этот эксперимент летом 2014 года сообщил свои первые результаты, которые не подтвердили ранее полученный результат, поскольку при той же точности эксперимента события безнейтринного распада не были обнаружены. Была установлена только верхняя граница времени жизни $T > 2,1 \times 10^{25}$ лет. В настоящее время GERDA совершенствует свою установку планируя довести чувствительность до уровня 2×10^{25} лет через два года.

Таким образом сложившаяся в настоящее время противоречивая ситуация относительно существования процессов безнейтринного двойного бета-распада требует своего разрешения.

2.2 Предложение об эксперименте 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 [43-44]. В качестве исследуемого ядра выбран $^{100}_{42}\text{Mo}$, который испытывает двойной бета-распад, превращаясь в ядро $^{100}_{44}\text{Ru}$. Время жизни этого ядра молибдена по отношению к обычному двойному бета-распаду составляет $T=1,06 \times 10^{17}$ лет, а по отношению к двойному бета-распаду $T = 5,70 \times 10^{24}$ лет [41]. Суммарная энергия двух электронов в последнем случае составляет около 3 МэВ, что соответствует максимальному пробегу около 3 мм.

В качестве детектора предполагается использовать ядерную фотоэмульсию. Предложена оригинальная идея поместить источник внутри объёма детектора. Для этого мелкодисперсный порошок Мо (2-4 мкм) смешивается с эмульсионным гелем и эту смесь предполагается использовать в качестве источника и детектора одновременно.

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. Основным достоинством такой методики изучения двойного бета-распада является визуализация событий и возможность измерения всех

характеристик распада: суммарной и отдельной энергии электронов и углов их разлета.

2.3 Программное обеспечение по поиску событий двойного бета-распада и прослеживания треков электронов на прямолинейных и криволинейных участках.

Поскольку построение распределения суммарной энергии электронов основано на измерении их пробегов до остановки, важная сторона эксперимента связана с обработкой предполагаемых событий, с распознаванием и кинематическим анализом треков испускаемых электронов. 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. 11 показано пример полученного таким путём «события» испускания двух электронов ядром молибдена в виде иллюстративного изображения в видеокамере автоматизированного оптического микроскопа. Трек, идущий влево, почти прямолинейен, а, идущий вправо, сначала прямолинейен, а затем искривляется из-за потерь энергии и увеличивающейся вследствие этого степени перерасеяния. Величина искривления в данном

примере не очень велика, поскольку потери энергии на этом участке (около 100 мкм) пока ещё не очень большие. Вблизи точки остановки характер траектории совершенно меняется и она больше похожа на беспорядочно закручивающуюся спираль. В данной работе эта часть траектории не рассматривается.

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. Свойства зёрен каждой из этих групп различаются довольно сильно, поэтому для них используются различные критерии распознавания (размер, форма, степень почернения и т.д.) и выделение соответствующих кластеров проводится по отдельности. На рисунке 12 показаны результаты отбора кластеров молибдена (12а) и следов электронов (12б).

Затем просматриваются окрестности каждого из зёрен молибдена. Размер окрестности определяется путём оценки максимального расстояния между зёрнами серебра в эмульсии от релятивистских электронов. Для эмульсии, приведённой на рис 11 это расстояние составляет 10-12 мкм. Размер окрестности выбирается с некоторым запасом и для данной пластины составляет 15 мкм. Внутри этой окрестности отбираются зёрна типа Т и для каждого из них производится просмотр его окрестности размером 15 мкм. Если внутри окрестности имеется другое зерно типа Т, через эту пару проводится прямая - кандидат на ось трека. Затем производится проверка того, проходит ли прямая через зерно молибдена. Если она не проходит, производится переход к другому зерну. Если проходит, то прямая продолжается в сторону от зерна молибдена и осуществляется отбор зёрен типа Т, находящихся не далее трёх мкм от прямой и так, чтобы между соседними зёрнами расстояние было не более 15 мкм. При выполнении этих условий отобранные зёрна рассматриваются как принадлежащие треку и эта совокупность сохраняется в базе.

На рисунке 13 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 будет описан алгоритм распознавания только начального участка, где кривизна ещё не так велика. Поскольку аппроксимация прямой линией в данном случае невозможна, отбор зёрен трека производится в конической области. Начальный конус, ось которого совпадает с осью прямолинейного участка, выходит из его конца. В результате предварительного исследования результатов продления трека угол раствора начального конуса был выбран равным 135° . По мере продвижения вдоль трека по криволинейному участку угол изменяется. Внутри каждого конуса проводится поиск зёрен, находящихся на расстоянии не далее 15 мкм. Каждое из этих зёрен, в свою очередь, становится началом поиска продолжения. Таким образом, набираются цепочки вариантов продолжения всего трека, между которыми утраивается конкуренция. В рассматриваемом случае таких вариантов не много. После применения к нему приведённого выше алгоритма было получено криволинейное продолжение прямолинейного участка трека, которое показано на рисунке 14 в виде красной ломаной линии.

Более запутанный участок трека электрона вблизи точки остановки (последние 20-30 мкм) требует более сложных методов распознавания. Ситуация осложняется тем, что при автоматической обработке просмотр трека по глубине осуществляется с дискретным шагом и участки, находящиеся на разном уровне, проецируются на одно изображение видеокамеры. В этом случае часто бывает необходимо распутать частично

самопересекающиеся участки трека, представляющие собой кривую со сложной топологией. При ручной обработке имеется возможность просмотреть промежуточные по глубине участки, чтобы понять порядок прохождения частей трека. При автоматизированной обработке для этого необходимо аппроксимировать траекторию гладкими кривыми и устраивать конкуренцию между разными вариантами конфигурации траектории. В данной работе этот этап обработки не обсуждается.

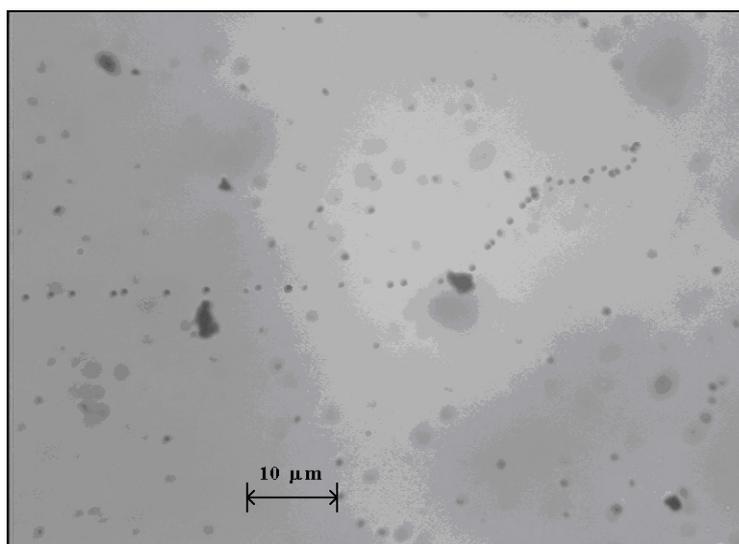
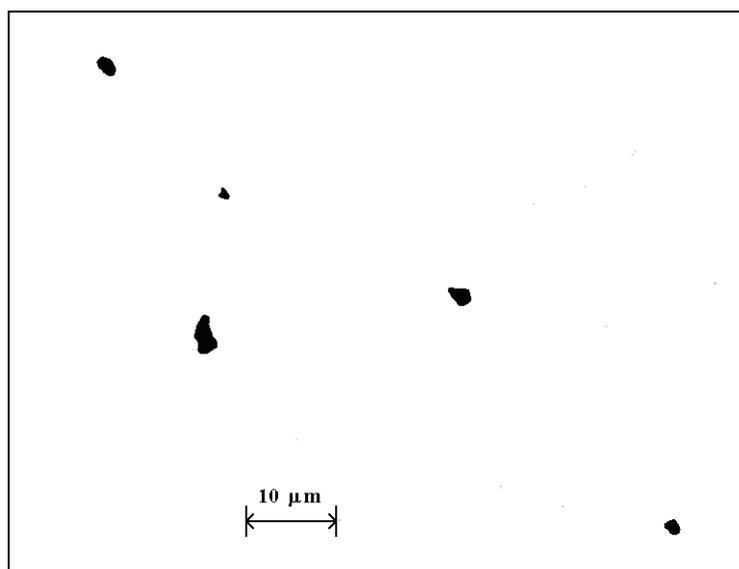
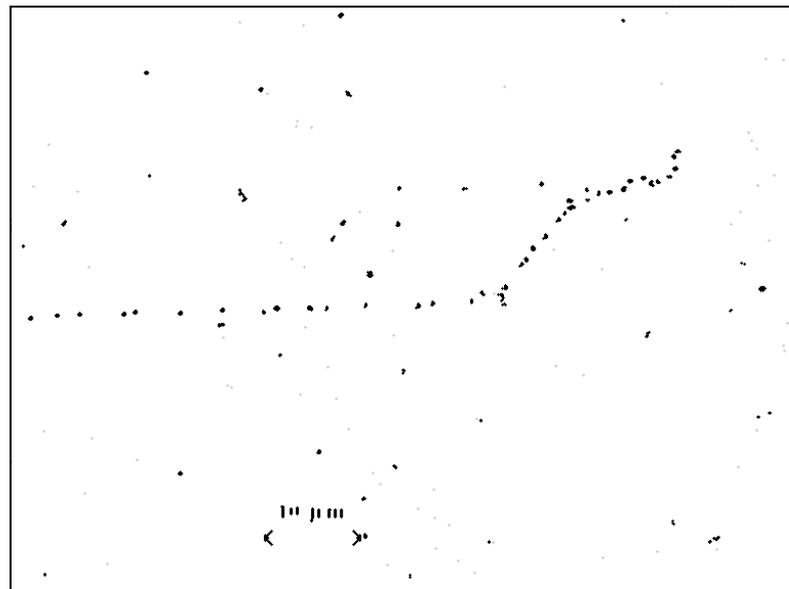


Рис.11. Исходное изображение «события» двойного бета-распада.



а.



б.

Рисунок 12. Выделенные кластеры зёрен молибдена (а) и следов частиц (б).

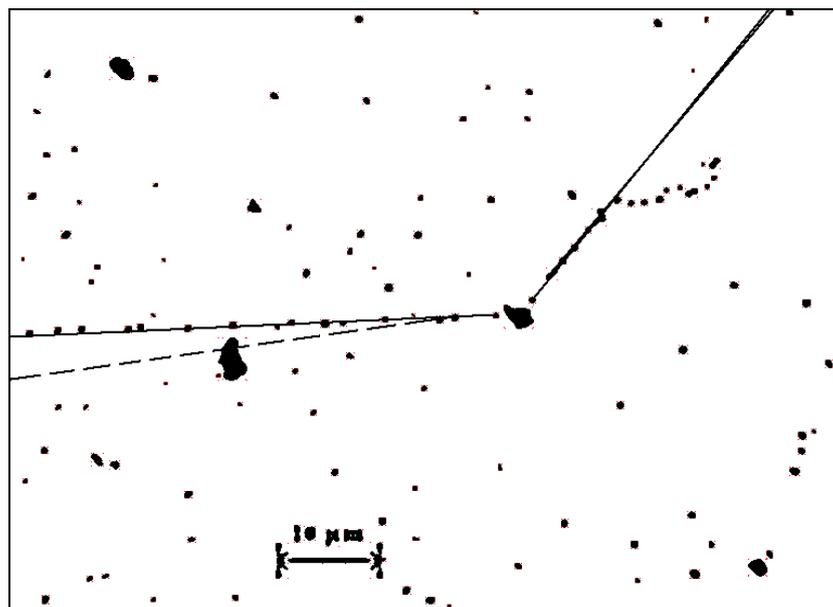


Рисунок 13. Результат распознавания прямолинейных участков электронов.

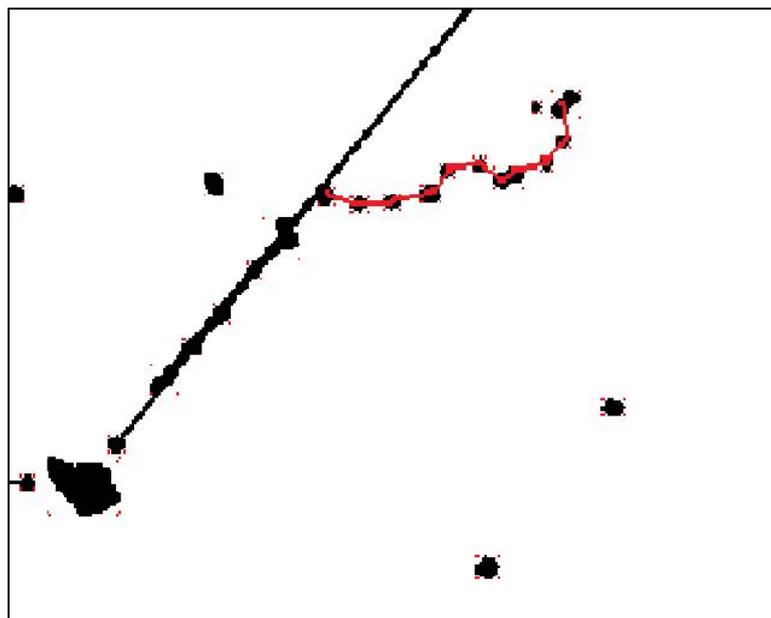


Рисунок 14. Результат распознавания криволинейного участка трека электрона.

Существенным обстоятельством, определяющим успешность выполнения этой работы, является возможность автоматизированной обработки эмульсий: поиск и распознавание треков частиц на комплексе ПАВИКОМ. При распознавании треков частиц одной из основных задач является задача их отделения от фона. Одним из таких фоновых процессов является распад радиоактивных ядер, присутствующих в фотоэмульсии, с одновременным испусканием электронов. Основным признаком таких реакций является наличие характерных пространственных конфигураций - звёзд (рис. 15а). Их предварительный отбор осуществляется по характерному признаку - малой величине отношения числа пикселей, образующих звезду, к площади описанного прямоугольника (рис. 15б). Эта процедура осуществляется на стадии кластеринга (выделение на оцифрованном изображении областей потемнения заданного уровня).

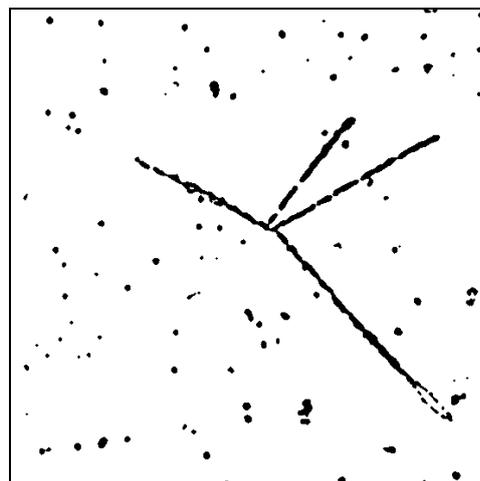
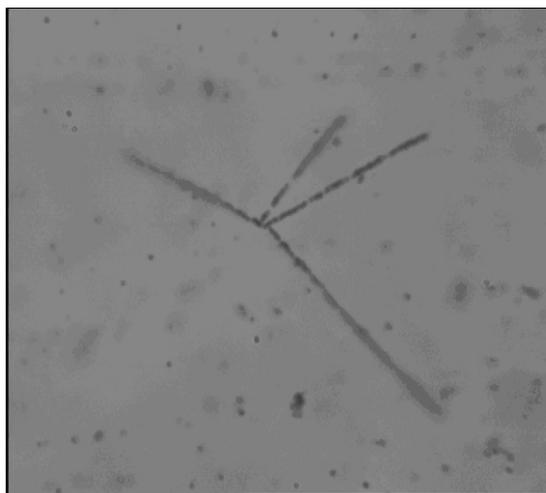
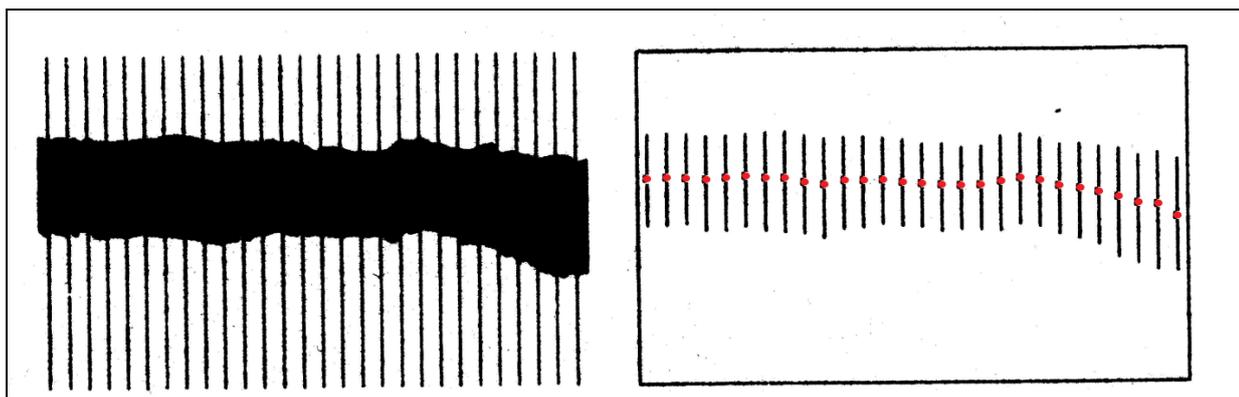


Рисунок 15. Исходное изображение звезды (а). Результат кластеринга (б).

Для выделения отдельных элементов сложной фигуры часто используются логические операции. Для этого на исходное изображение накладывается вспомогательная сетка и применяется логическая операция AND, OR и другие. В местах пересечения обоих изображений образуется набор отрезков. Линия, соединяющая середины этих отрезков образует среднюю линию соответствующей фигуры. Для прямолинейных частей фигуры она определяет её ось. Для примера на рисунке 16 показаны результаты применения операции AND к двум фигурам. Красными точками на рисунках 16в и 16г отмечены середины результирующих отрезков. Если одна линия сетки пересекает фигуру два и более раз, это служит указанием на возможность наличие у неё дырки (рис. 16г). Ответ на вопрос о том, есть ли она на самом деле, может дать дополнительный анализ.

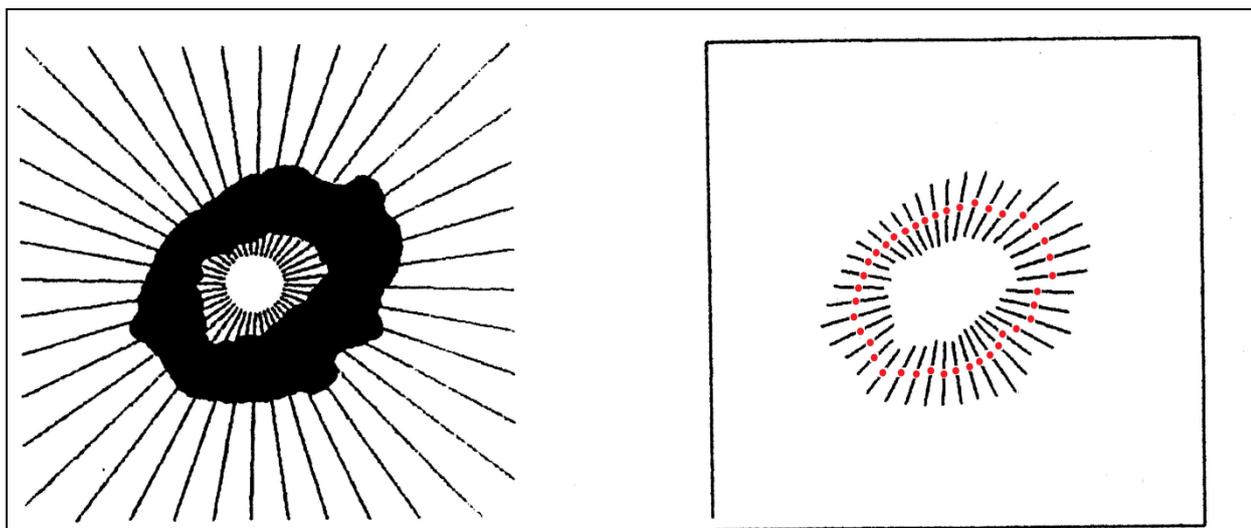
Выделение отдельных частей звезды производится наложением на изображение 15б сетки из взаимно перпендикулярных линий и применением операции AND к полученному комбинированному изображению. В результате получаются отдельные наборы отрезков, которые отражают расположение лучей звезды (рис. 15а).

Для поиска положения лучей близко расположенные отрезки группируются и через их центры масс проводятся прямые линии - оси лучей. Область взаимного пересечения осей соответствует положению вершины распада (рис.176). С учётом знания вершины положение лучей уточняется. В силу неоднородности потемнения различных частей звезды на изображении, некоторые лучи при обработке распадаются на отдельные куски, которые необходимо собрать для полного восстановления звезды распада. Для этого анализируются характеристики кластеров, расположенных вблизи звезды. Если ось кластера совпадает с осью одного из лучей звезды, он считается продолжением луча. В итоге формируется полная геометрия звезды. На рисунке 176 показаны несколько дополнительных кусков лучей, принадлежащих звезде.



а.

б.



в.

г.

Рисунок 16. Исходные изображения фигур и наложенных на них вспомогательных линий (а, б). Результат применения операции AND к изображениям на рис. а и б (в, г).

В данной задаче распады ядер являются фоновым процессом и целью распознавания звезды является отсеивание событий такого рода. Однако данный алгоритм можно применить и в случае необходимости осуществить полный анализ событий с распадом ядер. Так для восстановления пространственной геометрии звезды необходим просмотр изображений в вышележащих и нижележащих слоях и поиск продолжения лучей на них. Разработка такого специального программного обеспечения продолжается.

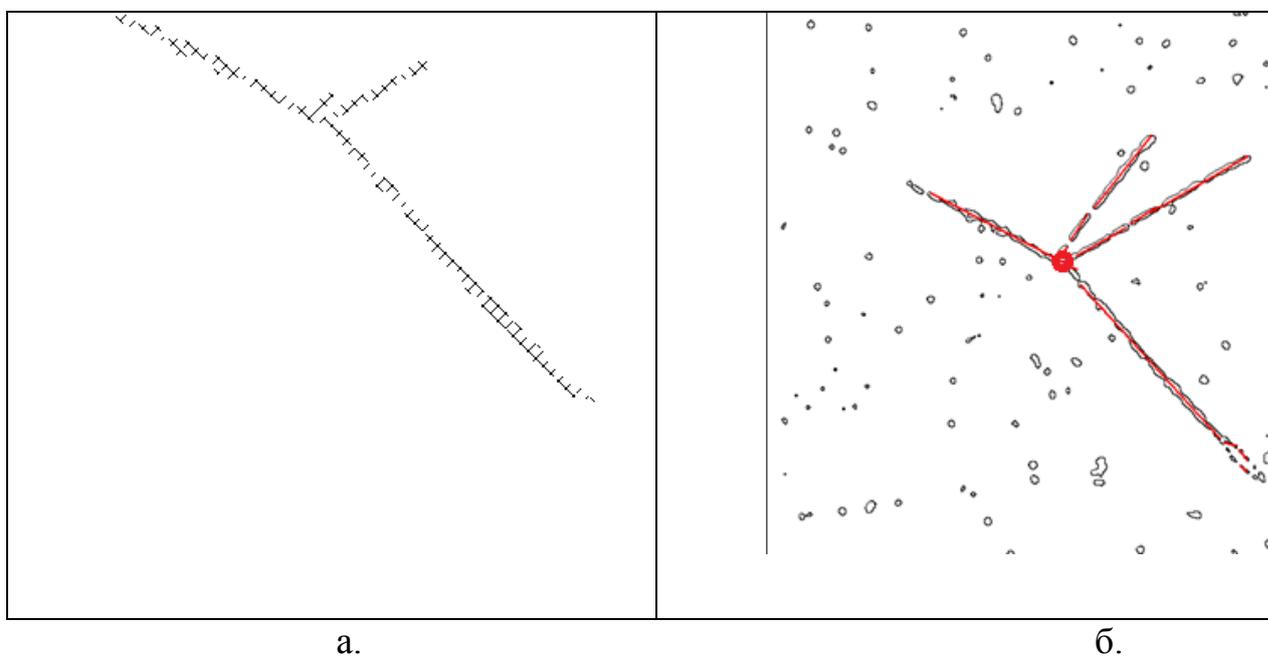


Рисунок 17. Результат применения операции AND к кластеру звезды (рис. 15б) и наложенной на него сетки взаимно перпендикулярных линий. (а). Выделение осей лучей звезды и вершины взаимодействия (б).

2.4 Программное обеспечение для оценки качества ядерных фотоэмульсий. Результаты измерений по оценке качества эмульсии, произведенной в России и в Японии.

Одной из наиболее серьезных проблем при осуществлении данного эксперимента является наличие высокочувствительной ядерной фотоэмульсии. 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.

С 1974 г. компанией «Славич» организовано производство фотопластинок ВР-П для микроэлектроники на основе наноэмульсии ВР, содержащей нанокристаллы размером 60 нм, а с 1978 г. осуществляется производство фотопластинок для голографии на основе эмульсии ПЭ-2. Методы синтеза эмульсий типа ПЭ-2 для голографии не освоила ни одна фирма за рубежом. За прошедшие годы произведено усовершенствование технологии, освоен выпуск четырёх видов фотопластинок и плёнок для голографии. Россия является единственным производителем и поставщиком фотопластинок и фотоплёнок для голографии на основе эмульсии ПЭ-2.

В 2008 г. в ОАО «Славич» цехом «Микрон» начато освоение производства ядерной фотоэмульсии для научных исследований. Основными задачами, поставленными перед цехом, являются восстановление производства ядерных эмульсий типа Р-2 и БР-2, а также создание нового типа ядерной эмульсии, обеспечивающего детектирование частиц с очень малой энергией. Для создания эмульсии предполагается использовать

известный способ синтеза голографической эмульсии ПЭ-2 с нанокристаллами размером 8 – 15 нм.

На данный момент «Славич» осталась единственной в России организацией, сохранившей линию производства ядерных эмульсий.

Ранее в экспериментах на ускорителях и в космических лучах было показано, что плотность почернений на следах частиц зависит от удельных ионизационных потерь энергии при прохождении заряженной частицы через вещество. Это позволяет идентифицировать частицы по измеренным значениям их заряда и массы, определять их энергии, исследовать времена жизни и характеристики распада нестабильных частиц. При измерении пробегов ионизирующих частиц в фотоэмульсии чрезвычайно важна стабильность количества зерен на единицу длины трека элементарной частицы. Высокая стабильность количества зерен на единицу длины трека элементарной частицы в фотоэмульсии достигается за счет резкого повышения концентрации галоидного серебра в фотографическом слое до 85—87% веса при равномерном распределении его по объему фотослоя. Если в рентгеновских эмульсиях на 1 см³ приходится приблизительно 6×10^9 кристаллов галоидного серебра, то в ядерных эмульсиях на 1 см³ приходится примерно 10^{13} кристаллов.

На стабильность количества зерен также влияет то, что в ядерных фотоэмульсиях кристаллы галоидного серебра при малой абсолютной величине весьма однородны по размерам. Все это создает высокую гомогенность эмульсии, и путь ионизирующей частицы получается в виде четкой линии проявленных зерен, причем их количество на единицу длины трека находится в соответствии с потерей энергии частицей на данном участке ее пути.

Для полной идентификации ионизирующих частиц и успешного определения их массы и энергии с помощью методов, основанных на измерении плотности зерен, необходимо увеличение толщины

эмульсионного слоя. Для эмульсий с толщиной слоя от 200 до 600 мкм важной технической проблемой является равномерное проявление слоя по всей его глубине и уменьшение дисторсии. Поэтому наиболее общим требованием, которому должна удовлетворять ядерная эмульсия, является наличие у нее постоянной во времени и относительно высокой чувствительности (не менее 30 зерен на 100 мкм) на следах частиц с минимальной ионизацией. Таким образом, ядерные эмульсии для регистрации релятивистских частиц должны обладать:

а) максимальной однородностью кристаллов по размерам, составу, форме (габитусу), чувствительности и т.д.;

б) минимальным размером кристаллов;

в) высокой предельной чувствительностью, т.е. возможностью регистрации частиц с минимальной ионизирующей способностью;

г) стабильностью свойств при хранении, воспроизводимостью от партии к партии, минимальной регрессией (распадом центров чувствительности из-за окисления и термических флуктуаций).

Кроме того одним из важнейших требований, предъявляемых к фотоэмульсиям для ядерных исследований, является требование максимальной однородности микрокристаллов по их размерам. Однородность микрокристаллов эмульсии по их размерам является одним из самых необходимых условий принципа однородности, согласно которому максимальная чувствительность фотоэмульсии достигается при однородности скорости созревания для всех микрокристаллов эмульсии.

Начиная с 2012 года на ОАО «Славич» проводились поисковые работы по разработке технологии изготовления ядерной фотоэмульсии с требуемыми характеристиками. Для целенаправленного поиска оптимальной технологической цепочки необходимо иметь представление о том, к каким изменениям в характеристиках эмульсии приводят те или иные изменения в технологии. 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 18 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».

Поиск оптимальной технологической цепочки требует постоянного наблюдения за изменениями качества эмульсии при изменениях каких-либо звеньев этой цепи. Одними из наиболее важных показателей качества являются геометрические характеристики зёрен AgBr, которые требуют измерения размеров зёрен. 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 18, 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 19а 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. 19б).

Распределение по диаметру аппроксимируется функцией Гаусса с помощью метода наименьших квадратов.

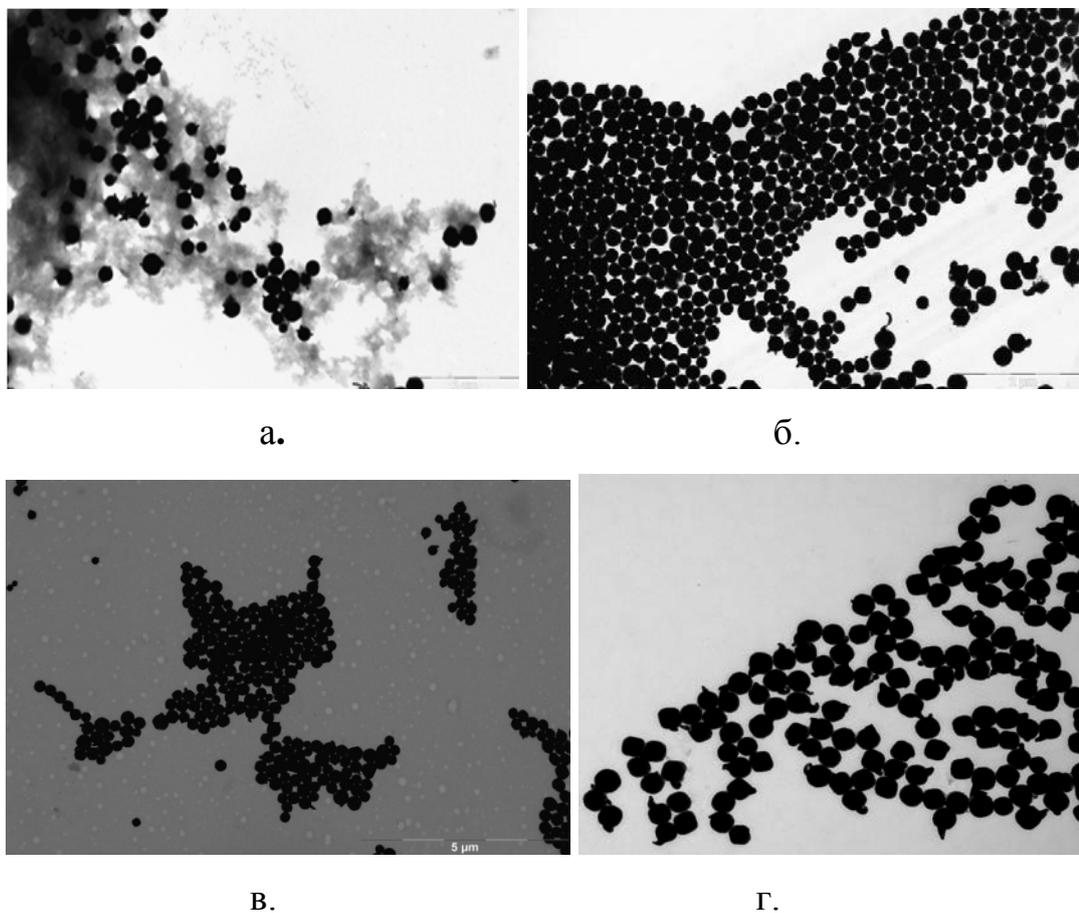


Рис. 18. Микрофотографии микрокристаллов эмульсии партии 14С (а), партии 42С (б), партии 608С (в) и кристаллов японской эмульсии (г). Увеличение 15000 раз.

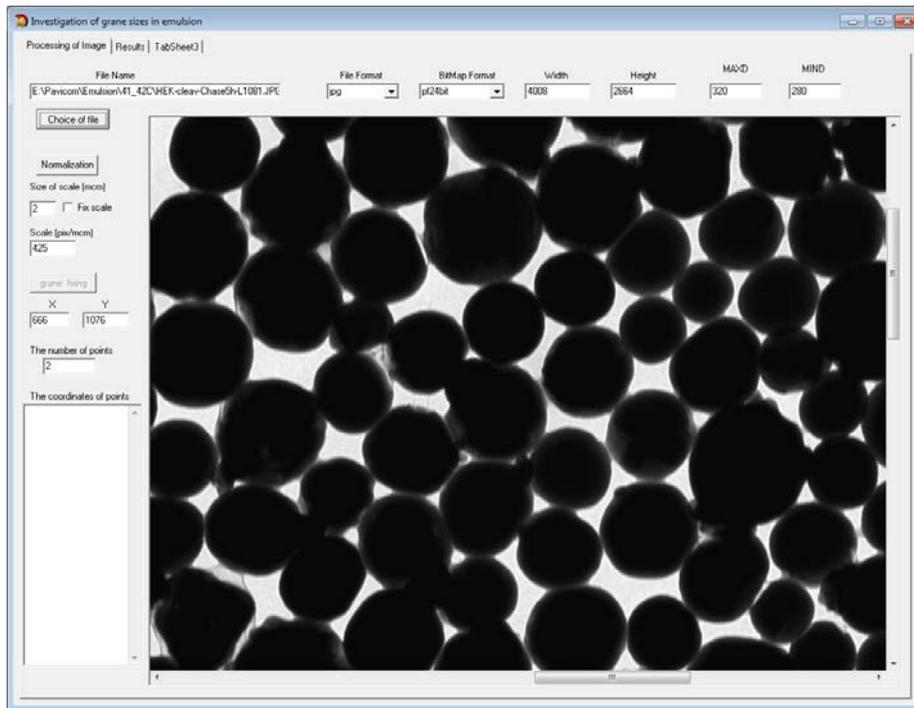


Рис. 19а. Рабочее окно программы по измерению гранулометрических характеристик ЭМУЛЬСИИ.

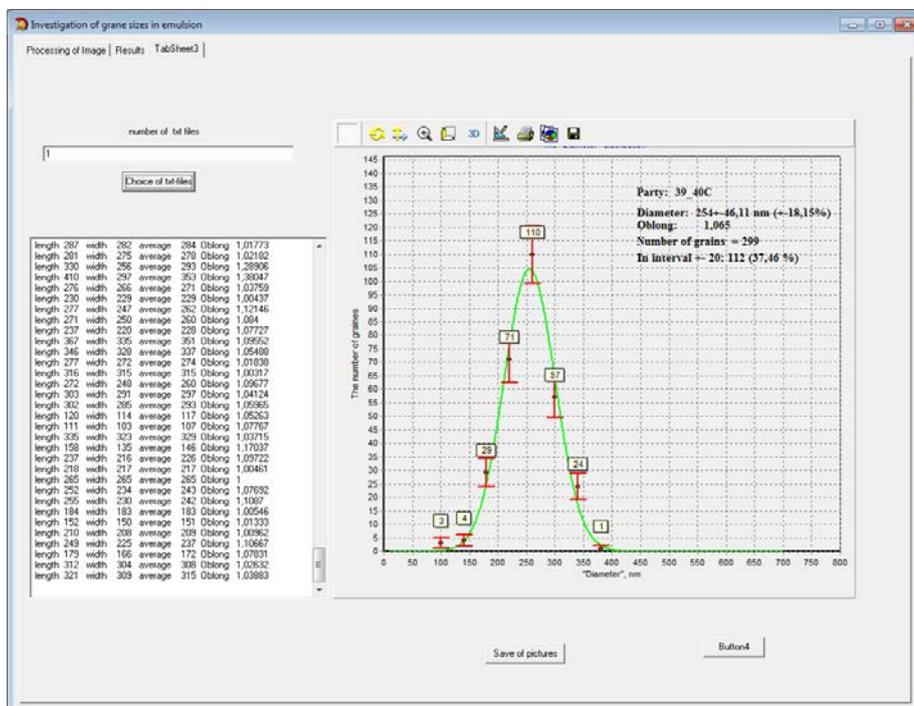
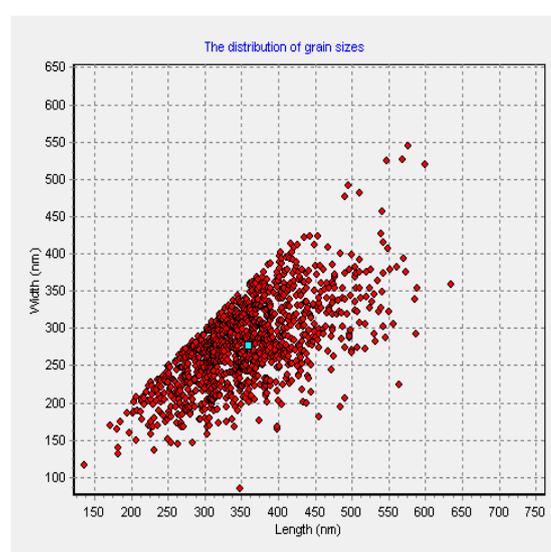
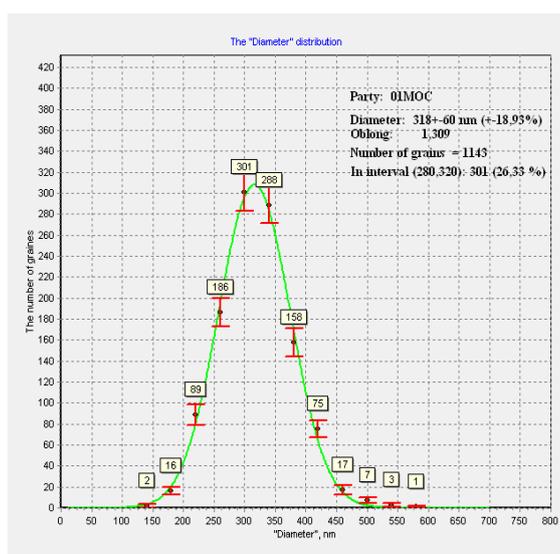


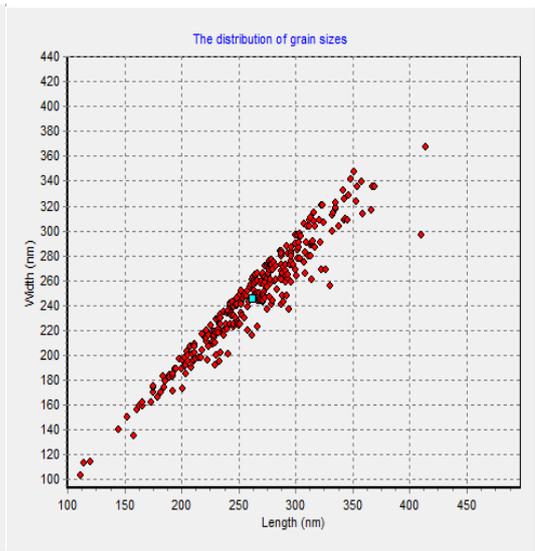
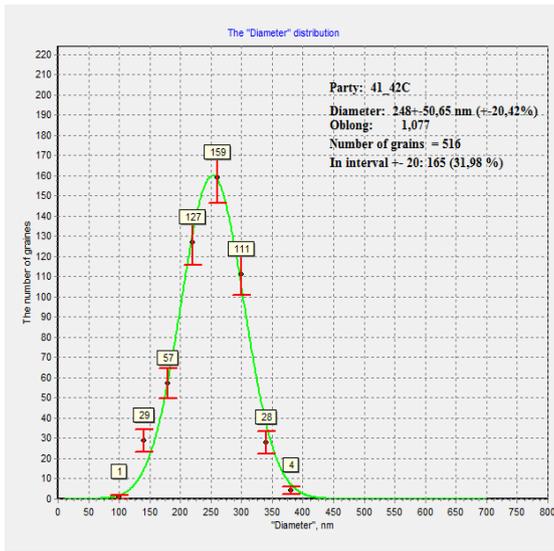
Рис. 19б. Окно программы с результатами измерений.

За период с 2012 года по 2015 год были обработаны углеродные реплики семнадцати партий, начиная с 12С и заканчивая 608С. Результаты некоторых из них представлены на рисунке 20, 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.

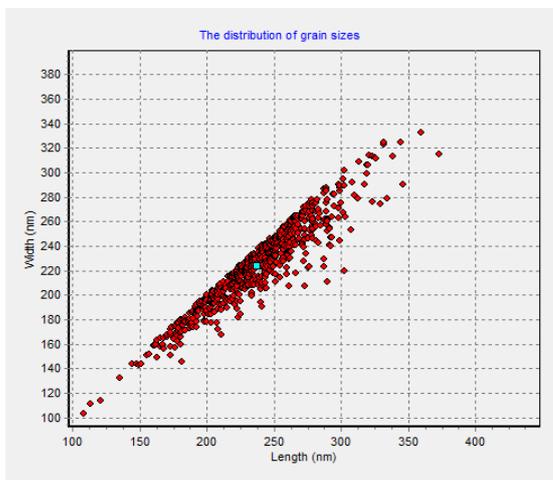
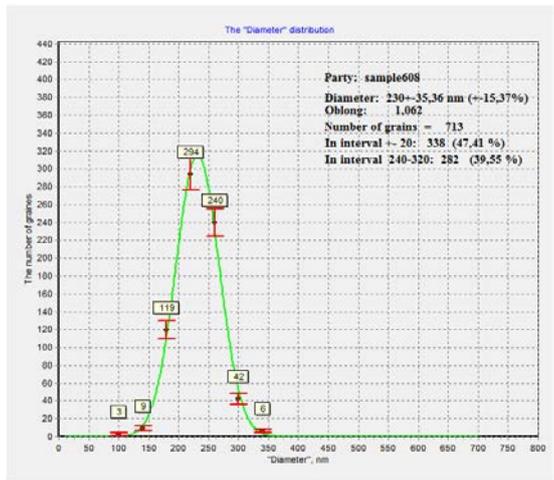
Рисунок 20 наглядно показывает серьёзные качественные изменения в качестве эмульсии, произошедшие за последние два года, в частности, благодаря анализу геометрических характеристик эмульсии, проведённому автором диссертации. Размер зёрен и степень сферичности вплотную приблизились к показателям японской 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.



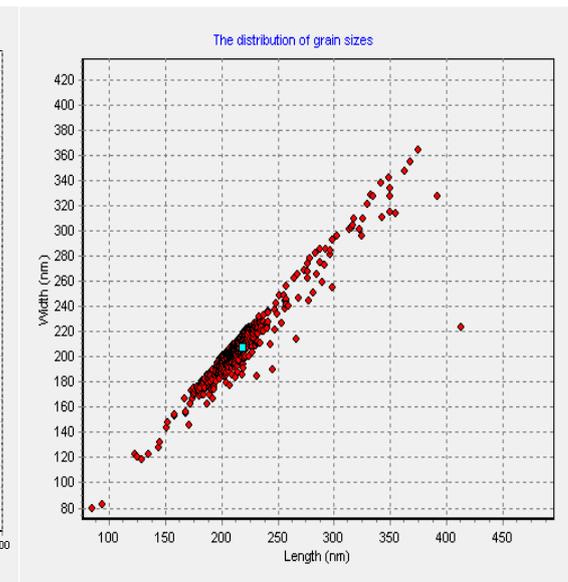
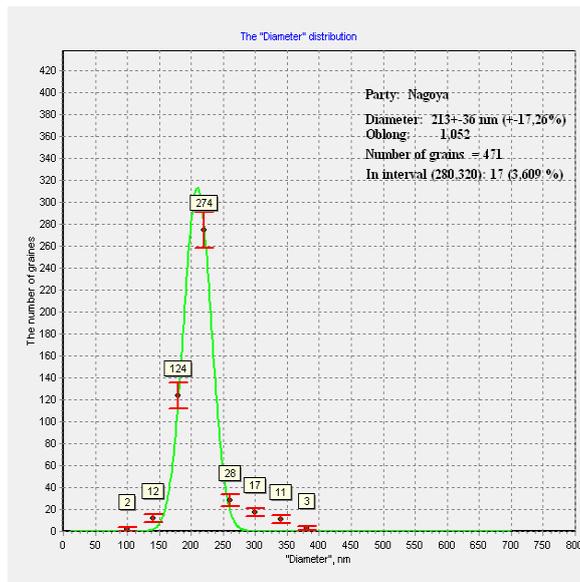
а.



б.



В.



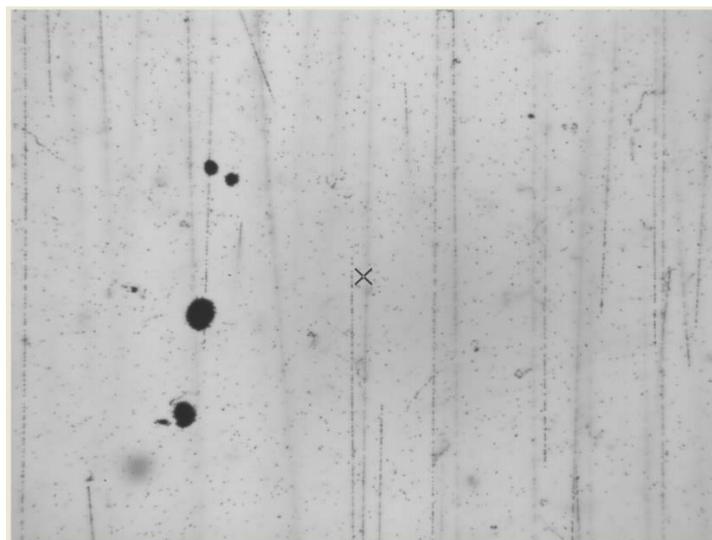
Г.

Рис. 20. Сравнение результатов измерений характеристик эмульсии: а – партия 12С (2012 г.); б – партия 41-42С (2014 г.); в - партия 608С (2015 г.); г – японская эмульсия. Левые рисунки – распределения размера зёрен, правые рисунки – распределение по длине и ширине зёрен.

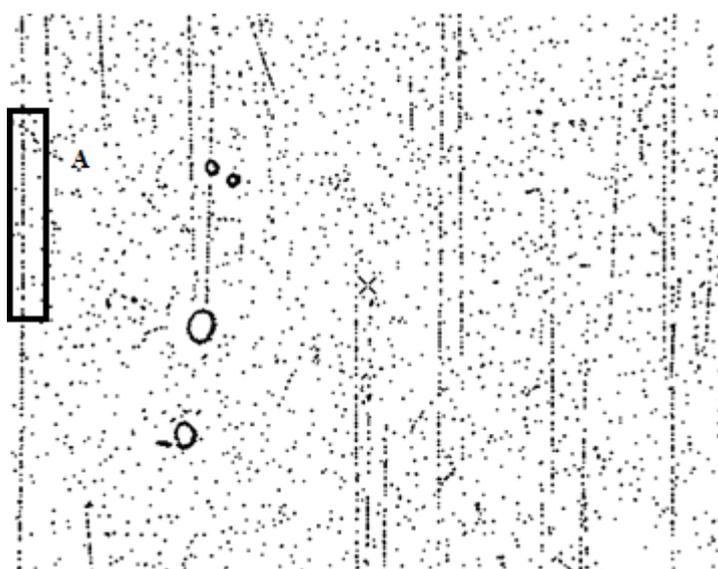
Другая важная характеристика ядерной фотоэмульсии – её чувствительность. В ядерной физике и физике элементарных частиц она определяется как число зёрен серебра на 100 мкм трека частицы с минимальной степенью ионизации (МІР – частицы). Протоны являются МІР – частицами при энергии 2-3 ГэВ, пионы и мюоны при энергии около 400 МэВ, а электроны при энергии около 3 МэВ. Для проверки качества эмульсии по этому показателю её облучают пучком частиц с соответствующей энергией. Однако не всегда удаётся вовремя найти подходящий пучок и тогда облучение производят при той энергии, которая есть в наличии. При этом степень ионизации, производимая частицей больше, соответственно, и число зёрен серебра на треке больше. Для определения чувствительности в этом случае производится процедура пересчёта числа зёрен к МІР – частицам. Если степень ионизации большая, зёрна идут настолько часто, что многие из них перекрываются, и непосредственный их подсчёт затруднён.

На рисунке 21а приведены изображение эмульсии, облучённой медицинским пучком протонов (кинетическая энергия 150 МэВ, степень ионизации в два раза больше, чем у МІР-частицы), на рисунке 21б выделенные зёрна серебра после кластеризации. Для сравнения на рисунке 21в представлена часть трека, обведённая рамкой на рис. 21б, а на рисунке 21г трек МІР-частицы. Видна большая разница в количестве зёрен, в частности, на рисунке 21в многие из них перекрываются.

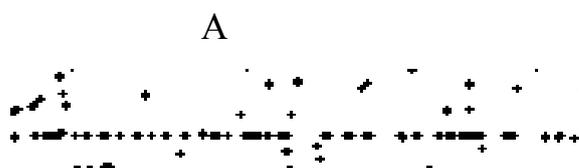
Для преодоления этой трудности был разработан алгоритм, основанный на следующем модельном эксперименте.



а.



б.



в.



г.

Рисунок 21. Изображение треков протонов с энергией 150 МэВ. Исходное изображение (увеличение 50х) (а); результат кластеринга (б); увеличенное изображение части трека, выделенной прямоугольником А на рис. б (в). Пример трека МIP-частицы.

На отрезок длиной в 100 мкм случайным образом набрасываются кружки диаметром 1,3 мкм (средний размер зерна Ag на треке). Количество кружков N от 35 до 75, что соответствует числу зёрен Ag на 100 мкм при разных величинах чувствительности плёнки и энергии частицы. При каждом значении N процедура проводится 500 раз. Строятся распределения доли X , занимаемой кружками на отрезке длиной 100 мкм для разных чисел N . На рисунке 22 приведены примеры такого розыгрыша для N равного 35 и 55. На рисунке 23 приведены распределения долей X для разных значений N . Положение максимумов распределений X_{max} хорошо аппроксимируются прямой линией и связаны с числом зёрен на треке формулой $X_{max}=0,147+0,00628 \cdot N_{grain}$ (рис. 24). На основе этой зависимости разработан алгоритм оценки числа зёрен в случае плотных следов, который заключается в следующем.



Рисунок 22. Два примера розыгрыша в модельном эксперименте с разным числом «зёрен» N .

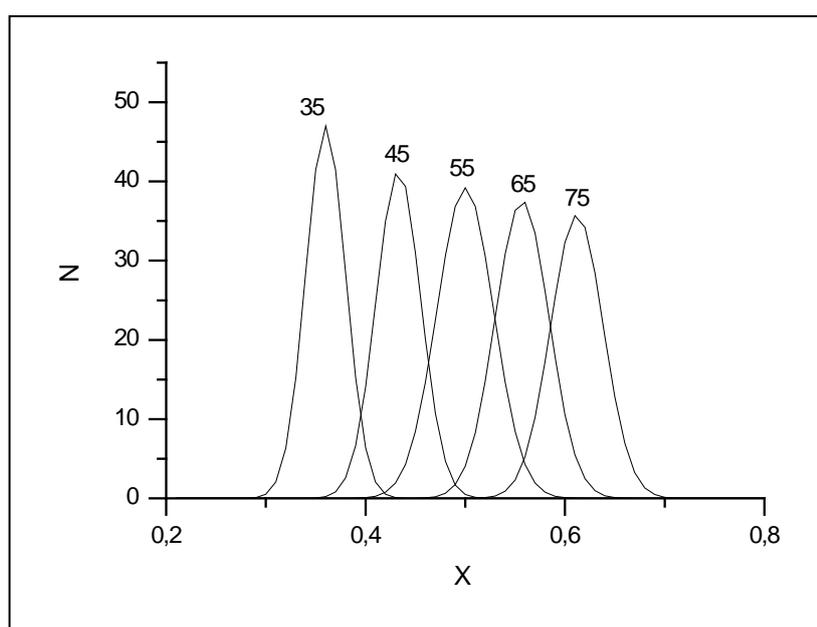


Рисунок 23. Распределение доли, занимаемой «зёрнами» на отрезке 100 мкм, при разных значениях N.

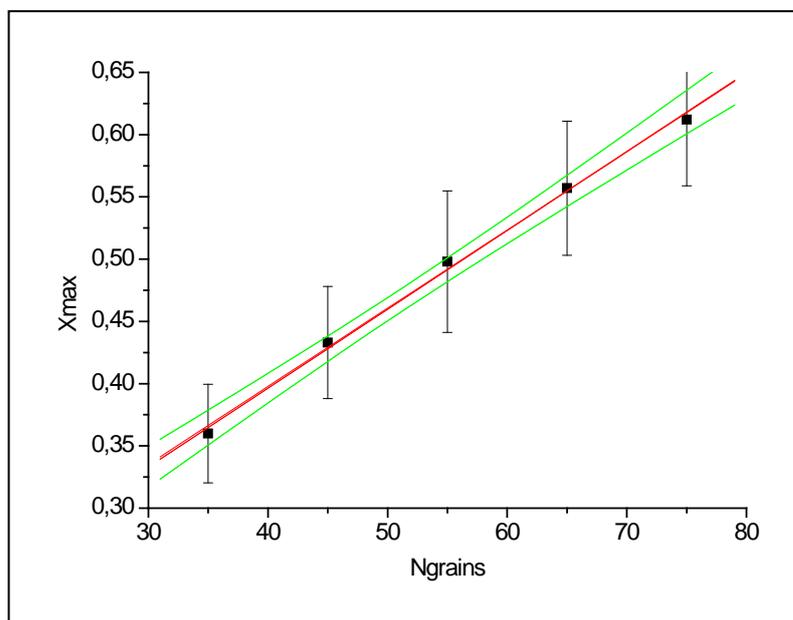


Рисунок 24. Зависимость положения максимума распределений X_{max} от числа «зёрен» на треке.

На изображении облучённой эмульсии, полученном после стадии кластеризации, в автоматическом режиме производится поиск треков частиц и затем измеряется доля X , занимаемая зёрнами серебра на длине 100 мкм. Такое измерение выполняется для многих треков, на этой основе строится распределение X и определяется величина X_{max} . Используя формулу $X_{max}=0,147+0,00628 \cdot N_{grain}$, можно получить оценку числа зёрен и произвести пересчёт для определения чувствительности.

Так, для примера, приведённого на рисунке 24 изображения треков (партия 608С), было получено $X_{max} \sim 0,61-0,64$, что соответствует $N_{grains} \sim 66-70$. При пересчёте к чувствительности, т.е. числу зёрен МIP-частицы, это приводит к величине 32-34 зерна Ag на 100 мкм.

В таблице 1 и на рисунке 25 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.

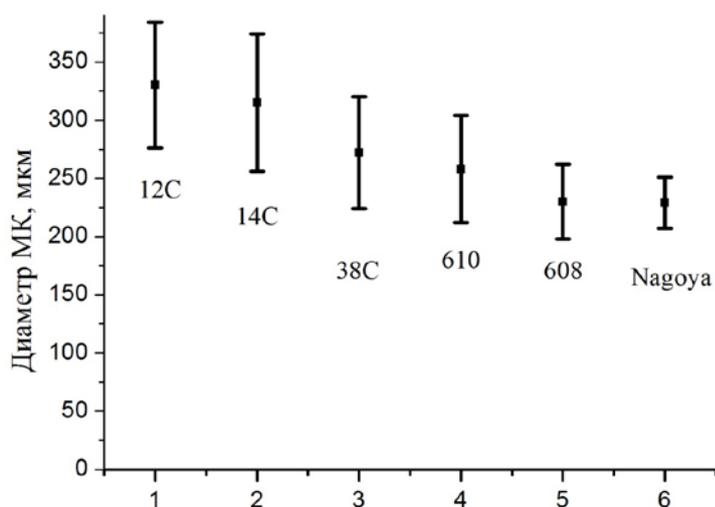
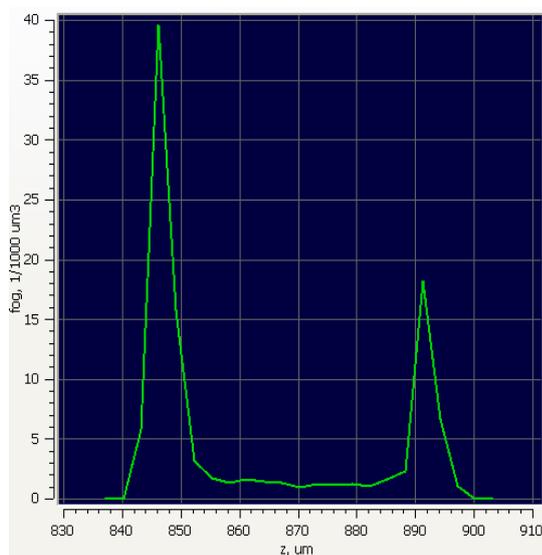


Рисунок 25. Изменения диаметра и однородности по размерам зёрен AgBr в зависимости от партии эмульсии в сравнении с японской эмульсией.

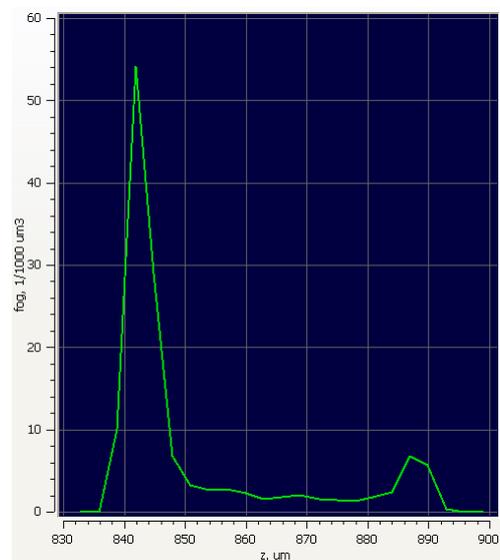
Таблица 1. Характеристики эмульсии разных партий (красным цветом отмечены партии с наилучшими характеристиками)

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

Другая проблема связана с наличием большой объёмной вуали вблизи пластика и поверхности эмульсии. На рисунках 26а и 26б представлены распределения по числу зёрен в $1000 \mu\text{m}^3$ на различной глубине Z эмульсионного слоя. Измерения, представленные на рис. 26а, сделаны в середине эмульсионного слоя; рис. 26б соответствует измерениям на крае эмульсии. $Z \approx 840$ соответствует пластику, $Z \approx 900$ - поверхности эмульсионного слоя. Из приведенных на рисунке 26 распределений отчетливо видно, что первые $10 \mu\text{m}$ эмульсии у пластика ($840 \div 850 \mu\text{m}$) имеют огромную объёмную вуаль в районе $40 \div 50$, что, скорее всего, связано с особенностями полива.



а.



б.

Рис. 26. Распределение числа зерен в единице объема в зависимости от глубины эмульсионного слоя в середине (а) и на краю (б) эмульсии.

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.

Глава.3.Поиск сверхтяжелых ядер в природе.

3.1 Метеориты как природный детектор галактических ядер.

Вопрос о том, каков заряд наиболее тяжёлого ядра, образуемого в природе, тесно связан с гипотезой о существовании "острова стабильности" элементов, а также с астрофизическими моделями, описывающими экстремальные условия, возникающие во Вселенной. Где граница Периодической системы? Реально ли существуют «острова стабильности»? Действительно ли верны предсказания теории о реализации в природе условий синтеза сверхтяжелых элементов? И если да, то как много объектов, в которых эти условия реализуются?

Исследования, направленные на изучение распространенности химических элементов в составе космических лучей в области тяжелых и сверхтяжелых ядер ($Z > 50$), играют также особую роль в развитии междисциплинарных направлений ядерной физики, астрофизики и физики космических лучей. 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, в которой распространяются космические лучи, а также построения моделей удержания космических лучей в галактике. При этом особое значение имеют работы, направленные на исследование ядер ультратяжелой компоненты ГКЛ ($Z \geq 80$), в частности, регистрация сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 100$.

Стоит отметить, что все наблюдаемые на земле ядра с зарядом, больше заряда урана (92) были синтезированы искусственно.

Существует несколько возможных путей синтеза сверхтяжёлых элементов. Один из них – нейтронный синтез, при котором в результате прибавления нейтрона ядро становится перенасыщено нейтронами,

происходит бета-распад, в ядре образуется протон, и заряд ядра повышается на единицу. Возможности нейтронного синтеза в земных условиях были исчерпаны на фермии (этот элемент был обнаружен в грунте после ядерных испытаний). Как показывают теоретические расчеты, для синтеза более тяжелых элементов нужны облучения ядер потоками нейтронов в нейтронной среде огромной плотности, порядка 10^{20} - 10^{30} нейтронов на см^3 .

В природе, согласно существующим представлениям, элементы, начиная с углерода и тяжелее, образуются в недрах звезд и при взрывах сверхновых. Сверхтяжелые элементы, находящиеся в таблице Менделеева за висмутом, образуются при высокой концентрации нейтронов - более 10^{20} см^{-3} - в результате r-процесса (rapid – процесс: нуклеосинтез, протекающий вблизи границы нейтронной стабильности, когда скорость захвата ядрами нейтронов много больше скорости бета-распада). При этом могут образовываться ультратяжелые ядра с числом нейтронов вплоть до $N = 184$. Кроме этих традиционных механизмов, рассматривается возможность образования очень тяжелых ядер (с массовым числом до 500) при плотности нейтронов порядка 10^{30} см^{-3} и умеренной температуре $T < 10^8$ градусов Кельвина. Такая ситуация может реализоваться в неравновесных оболочках нейтронных звезд, выбросы из которых могут приводить к появлению ультрасверхтяжелых элементов в межзвездной среде, звездах и планетах [45-48].

В земных условиях сверхтяжёлые ядра (за фермием) синтезируют теперь в результате столкновения более лёгких ядер. Одним из мировых лидеров в работах по синтезу новых элементов является Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований. Им удалось синтезировать 12 из 18 трансфермиевых элементов (под руководством Г.Н. Флерова: 102, 103, 104, 105, 106; [49-50] под руководством Ю.Ц. Оганесяна: 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118) [51-52]. Время жизни некоторых этих ядер составляет несколько секунд и даже минут, что в десятки тысяч раз превышает время жизни ядер с меньшими зарядами.

Активным и направленным усилиям по синтезу сверхтяжёлых элементов способствовало бы подтверждение их существования в природе и определение параметров их ядер – заряда и массы.

Отношение количества протонов к количеству нейтронов является ключевым параметром, определяющим стабильность атомного ядра. Так, теория предсказывает, что элемент $Z=110$, $A=294$ должен жить сто миллионов (а может и миллиард) лет [53]. Но, если изменить число нейтронов или протонов на 2-3 единицы, т.е. всего на 1%, то время жизни должно уменьшится в 10 млн раз. Этот эффект наблюдается у изотопов свинца: дважды магическое ядро - 82 протона и 126 нейтрона - свинец-208 настолько стабилен, что никто еще не наблюдал его распад. Но если взять свинец со 127 нейтронами, его время жизни - 3.3 часа.

Поиск в космических лучах тяжелых и сверхтяжелых ядер непростая задача, поскольку слишком мала их интенсивность в общем потоке – всего несколько частиц на квадратный метр в год [54-55]. Путей решения этой проблемы два: первый – ждать многие годы, пока эти несколько частиц пролетят (однако сделать масштабную зарисовку состава по единичному случаю невозможно, нужна статистика, и, значит, годы растянутся на миллионы лет); второй – проводить регистрацию с помощью детекторов очень больших площадей - в сотни квадратных метров.

Существенный объем экспериментальных данных по этой проблеме был получен с помощью методики регистрации следов торможения ядер ГКЛ в твердотельных трековых детекторах различного типа. 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 [29]. 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. В России

исследования оливинов из палласитов были инициированы группой сотрудников под руководством Г.Н. Флерова в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) [56].

Одним из неоспоримых преимуществ этих природных детекторов является длительность экспозиции - 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, потоки которых в космическом пространстве чрезвычайно малы. Результаты исследований потоков ядер галактических космических лучей, естественными детекторами которых являются метеоритные кристаллы оливина, могут ответить на многие вопросы.

Возраст исследуемых в настоящей работе совместно сотрудниками ФИАН (автор-член фиановской группы) и ГЕОХИ палласитов (Marjalahti и Eagle Station) составляет, по различным оценкам, от 30 до 200 миллионов лет [57]. Разделяют 1) - возраст метеоритного вещества (радиографический) и 2) космический возраст метеоритов (CRE):

1) Возраст вещества (радиографический) определяется радиометрическим методом с использованием масс-спектрометров. Определяется - какая доля некоторого изотопа («свинец – свинец» или «рубидий 87 – стронций 87») успела распасться за время существования метеорита. По этой величине, зная период полураспада данного изотопа, можно рассчитать возраст образца. Абсолютный возраст практически всегда идентичен для всех метеоритов: $(4,566 \pm 0,005) \times 10^9$ лет.

2) Космический или радиационный возраст (CRE - "cosmic-ray exposure") отсчитывается от момента разрушения родительских планет и выделению метеоритов как отдельных космических тел. Космические лучи действуют на тело, некоторые ядра в атомах вещества расщепляются, и в образце накапливаются продукты ядерных реакций, количество которых можно установить в лабораторных условиях. Возраст определяют по

содержанию космогенных изотопов, образованных в веществе метеоритов под действием космических лучей.

Таблица 2. Возраст метеоритов Marjalahti и Eagle Station, радиографический и космический.

Публикация	Изотоп	Marjalahti	Eagle Station
1. Zholud' T.P., Levskii L.K., Lkhagvansuren D. et al., On Preatmospheric Sizes of the Lipovsky Khutor Meteorite, <i>Meteoritika</i> , 1980, no.39, pp. 85-89	^3He	CRE 205×10^6 лет	
	^{21}Ne	CRE 204×10^6 лет	
	^{38}Ar	CRE 178×10^6 лет	
2. Megrue G.H., Rare Gas Chronology of Hypersthene Acondrites and Pallasites, <i>J. Geophys. Res.</i> , 1968, vol. 73, pp. 2027-2033	^3He		CRE 47×10^6 лет
	^{21}Ne		CRE 35×10^6 лет
	^{38}Ar		CRE 51×10^6 лет
		CRE 178×10^6 лет	
3. Niemeyer S., I-Xe and ^{40}Ar - ^{39}Ar Analyses of Silicate from the Eagle Station Pallasite and Anomalous Iron Meteorite Enon, <i>Geochim. Cosmochim. Acta</i> , 1983, vol. 47, pp. 1007-	^{38}Ar		CRE 58×10^6 лет
			Радио-графический возраст $0,86 \times 10^9$ лет

1012			
4. Pellas P., Perron C., Crozas G. et al., Fission Track Age and Cooling Rate of the Marjalahti Pallasite, <i>Eath Planet. Sci. Lett.</i> , 1983, vol. 64, pp. 319-326		Радиографический возраст $(4,30)\times 10^9$ лет	
5. Yu.V. Bondar, V.P Perelygin, Fision-track analysis of meteorites: Dating of the Marjalahti pallasite, <i>Radiational Measurements</i> , 40 (2005) 522-527		Радиографический возраст (Pu/U) $(4,31\pm 0,02)\times 10^9$ лет	
6. G. F. Herzog, D. L. Cook, M. Cosarinsky, L. Huber, I. Leya, and J. Park, Cosmic-ray exposure ages of pallasites, <i>Meteoritics & Planetary Science</i> 50, Nr 1, 86–111 (2015) doi: 10.1111/maps.12404	$^{36}\text{Ar}/^{36}\text{Cl}$	CRE $(185\pm 19)\times 10^6$ лет	CRE $(43\pm 5)\times 10^6$ лет
	$^{21}\text{Ne}/^{10}\text{Be}$		CRE $(40\pm 11)\times 10^6$ лет
	$^{38}\text{Ar}/^{10}\text{Be}$		CRE $(48\pm 13)\times 10^6$ лет
	$^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne}$		CRE $(71\pm 5)\times 10^6$ лет
	Оливин	CRE $(182\pm 27)\times 10^6$ лет	CRE 35×10^6 лет

Таким образом, космический возраст используемых в настоящей работе метеоритов: Marjalahti 178-205 миллионов лет; Eagle Station 35-71 миллионов лет.

Около 60% объема палласитов занимают кристаллы оливина, которые содержат большое число треков космических ядер: в 1 см³ таких кристаллов, расположенных на глубине до ~5 см от доатмосферной поверхности метеорита, за 10⁸ лет образуется 10²-10³ треков ядер с Z>90, а в кристаллах из приповерхностных участков метеоритов, расположенных на глубине меньше ~1 см - до 10⁴ 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 [27,58-59], в то время как в данной работе обнаружено уже более 11 тысяч треков ядер с Z>55.

3.2 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 (>10⁸ 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 ~ (30-70) Å. Скорость растворения материала этой области в специальных химических

растворах значительно выше скорости растворения неповреждённого материала, что позволяет «проявлять» треки ядер [60].

Специфической особенностью оливина в палласитах является то, что его структура содержит плотную сеть трещин, из-за чего довольно крупные (до 1-2 см) зерна оливина, находящиеся в виде отдельных включений в матрице (Fe,Ni)-сплава, при их механическом выделении распадаются на кристаллы с линейными размерами не более нескольких миллиметров. В конечном итоге, из исходного образца оливина размером $\sim 1 \text{ см}^3$ выделяется в среднем около 10 кристаллов размером 2-3 мм и $\sim 40-50$ кристаллов размером порядка одного миллиметра.



Рис. 27. Образец метеорита Игл Стейшн, используемый для исследований.

В середине 70-х годов прошлого века в ОИЯИ была разработана эффективная методика выявления треков ядер путем отжига и химического травления образцов оливина [30]. В данной работе авторами впервые успешно разработана и использована принципиально другая методика – послойного травления и просмотра объема кристалла [55].

Кристаллы упаковываются сотрудниками ГЕОХИ РАН по несколько штук в эпоксидные таблетки размером 10×20 мм, затем шлифуются и полируются. 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 [37,39,61-64].

При травлении треков в очередном слое производится процедура его совмещения или сшивки с предыдущим слоем. Для этого используются реперные координатные метки и прослеживаемые на глубину кристалла, превышающую толщину данного среза, длиннопробежные треки ядер ГКЛ. Полная длина таких треков суммируется после проведения нескольких этапов «травления-измерения-среза-полировки». Для совмещения таких треков, представляющих собой разные участки одного и того же трека, требуется построение точной схемы ориентации всех исследуемых треков в объеме кристалла, что может быть выполнено только на основе измеренных для каждого из них координат (X,Y,Z) и углов наклона относительно плоскости поверхности травления. Эти данные получают с помощью специальной программы измерений, проводимых на ПАВИКОМ. Сопоставление величин скорости травления длиннопробежных треков, измеренных на первом этапе травления, со значениями скорости травления тех же треков относительно новой поверхности второго (и последующих) этапов позволяет получать наиболее точные результаты по идентификации зарядов ядер. Таким образом, автоматизированная обработка позволяет осуществлять точную сшивку последовательно сошлифованных слоев

оливина. В итоге, методика измерений позволяет просматривать весь объем кристалла.

Благодаря особенностям структуры кристаллов оливина, эффективность травления треков в длину не обнаруживает сильной зависимости от ориентации треков в объеме отдельных зерен оливина. Экспериментальное подтверждение этому было получено авторами в результате специально проведенных исследований [65-66]. Было показано, что как длина, так и скорость травления треков от высокоэнергичных ядер Хе и У, измеренные в калибровочных экспериментах на ускорителе с использованием примерно 100 кристаллов оливина, произвольно ориентированных относительно направления пучка ускоренных ядер, остаются постоянными в пределах статистической погрешности измерений. Этот факт позволяет проводить измерения параметров травимых треков ядер ГКЛ без необходимости учета каких-либо дополнительных кристаллографических характеристик оливина.

Различие скорости травления вещества оливина вдоль траектории ядра по сравнению с радиационно ненарушенной областью кристалла составляет до 200 крат. Степень повреждений определяется, в основном, величиной ионизационных потерь, причем существует минимальная величина ионизационных потерь энергии, начиная с которой треки в твердотельном детекторе начинают проявляться. Пороговая величина ионизационных потерь энергии для оливина составляет около $D \approx 18 \text{ МэВ}/(\text{мг} \cdot \text{см}^{-2})$ [67]. В результате, в отличие от фотоэмульсионных и пластиковых трековых детекторов, в оливине полностью отсутствует фон от треков ядер с $Z \leq 24$, что связано с достаточно высоким порогом удельных энергетических потерь энергии для формирования в нем химически травимых треков заряженных частиц [67]. Это свойство оливинов делает их ещё более удобными природными детекторами для наблюдения ядер тяжелых и сверхтяжелых, вплоть до трансурановых, элементов ГКЛ.

Возможность наблюдения этих каналов в оптический микроскоп существует благодаря полупрозрачности оливина. На рисунке 28 представлены микрофотографии треков ядер в оливине.

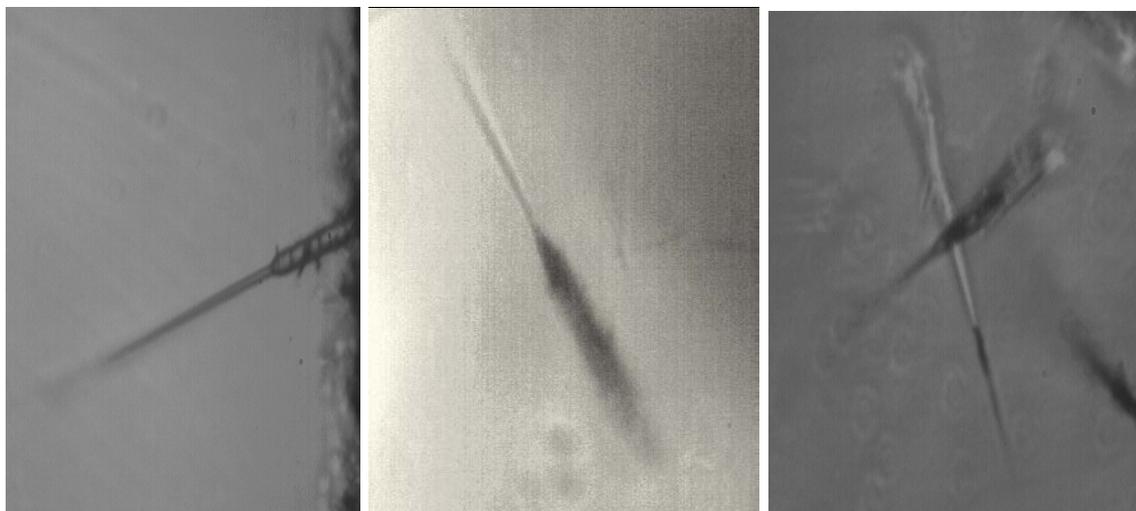


Рис. 28. Микрофотографии треков ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, травимых в кристаллах оливина из палласитов. Размер поля зрения на всех микрофотографиях от 60×140 до 100×140 микрон.

В соответствии с характером ионизационных потерь в оливине, что подтверждается фотографиями треков на рисунке 28, полностью протравленные треки-каналы высокоэнергичных тяжелых ядер состоят из двух основных частей – цилиндрической и иглообразной, и имеют форму «шприца». Видна четкая граница раздела каждого трека на два участка, диаметр канала в которых различается в 2-3 раза. Более тонкий, конусообразной формы участок относится к «игле шприца», участок большего диаметра, наиболее эффективно растравливаемая основная зона трека, практически цилиндрической формы. Такая форма трека обусловлена величиной энергии, передаваемой ядром в кристалл на различных участках

траектории, и механизмом формирования структурно-фазовых изменений в кристалле.

Исходя из физико-химической картины взаимодействия, можно следующим образом описать схему формирования травимого канала (см. рис. 29). 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

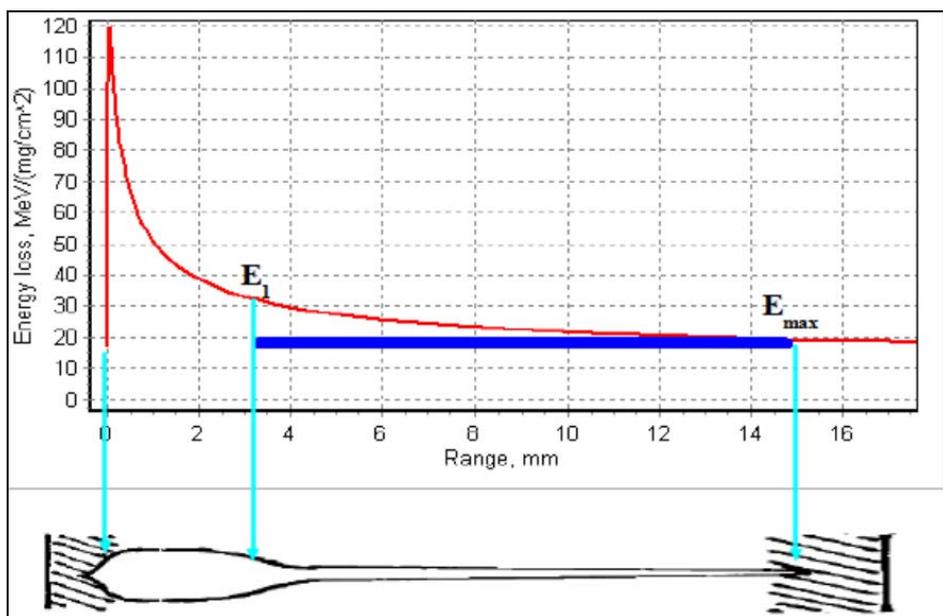


Рис. 29. Схема формирования травимого участка трека в оливине. Вверху – удельные ионизационные потери энергии ядра. Внизу – геометрическая форма различных участков трека.

Существует прямая зависимость геометрических параметров и скорости травления треков от параметров ядра, что позволяет провести его идентификацию. Травимая длина треков характеризует запас энергии налетающего ядра. Чем больше запас энергии ядра, то есть его масса, тем больше длина эффективно травимой зоны микронарушений кристалла. Необходимо отметить, для ядер с зарядом $Z > 70$ травимая длина в большинстве случаев превышает средние размеры исследуемых образцов кристаллов оливина и поэтому не может быть полностью измерена.

В качестве второй основной характеристики протравленных треков - для идентификации заряда ядер, авторами используется скорость травления треков в длину. Величина скорости травления различных участков треков вдоль траектории не остается постоянной, что позволяет определять заряды частиц с использованием калибровочных данных о соотношении между скоростью травления треков и зарядом этих ядер, соответствующем различным величинам остаточного пробега ядер.

Таким образом, авторская методика поэтапно проводимых последовательных операций «шлифовка–травление–просмотр/регистрация» треков в сочетании с удалением изученных слоев травимой поверхности позволяет проводить: а) наблюдение и фиксацию пространственной ориентации треков в объеме каждого кристалла; б) фиксацию в точке остановки ядра момента окончания травления трека; в) определение величины скорости травления V_{etch} на разных участках выявленных и поэтапно прослеживаемых треков; г) использование практически полного объема исследуемых кристаллов.

3.3 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 [68].

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, 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.

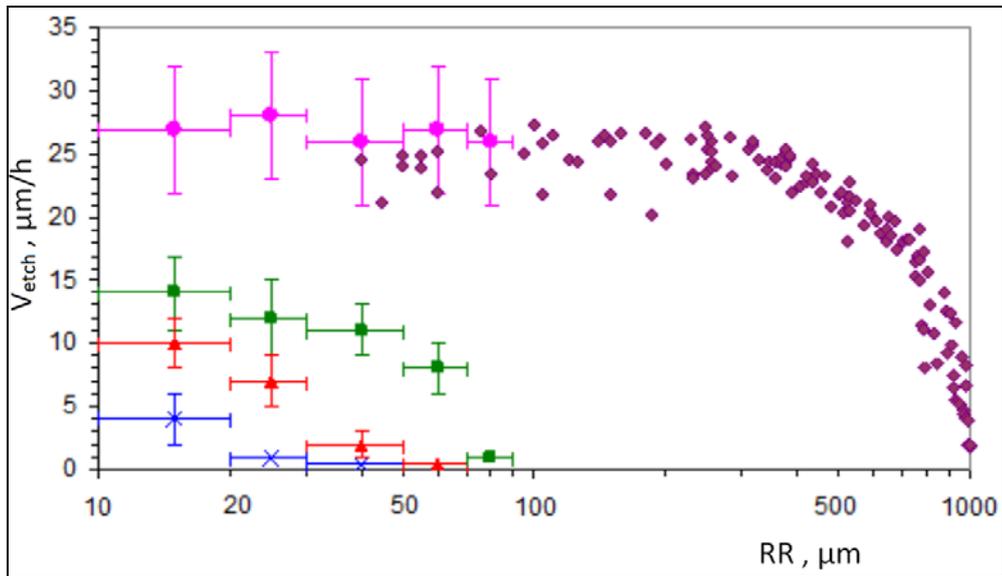


Рис. 30. Зависимость скорости травления треков от остаточной длины пробега RR ядер Fe, Kr, Xe и U (снизу вверх).

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 31) [69].

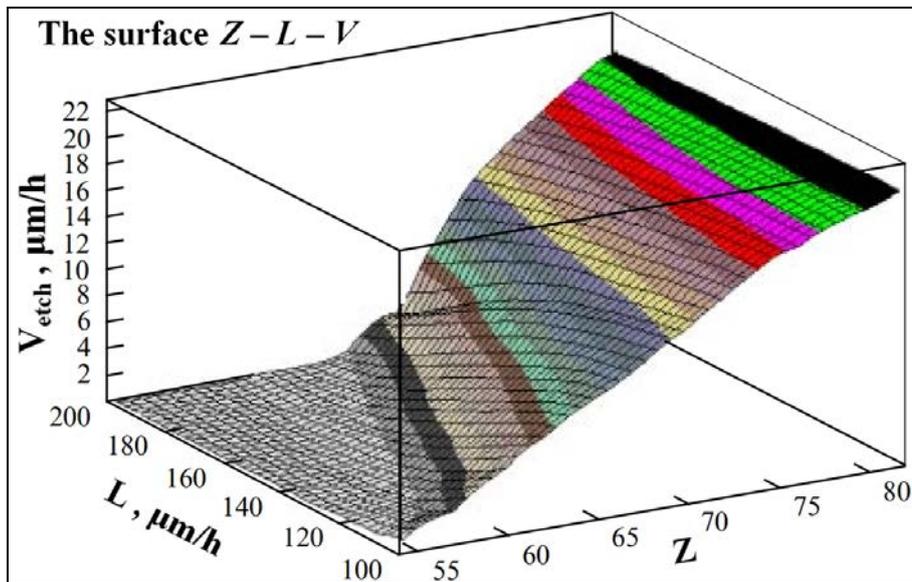


Рис. 31. Полученная в работе связь между зарядом пролетающего ядра, остаточной длиной пробега и скоростью травления трека.

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 $\sim 10\%$.

3.4 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 [70]. 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 Bi 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 (Германия) получили для Bi - 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.

3.5 Программное обеспечение определения заряда ядер

Использование пятипараметрической формулы для описания зависимости скорости травления от остаточной длины и заряда.

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 32 и 33 приведены результаты экспериментов и их описание формулой (2).

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

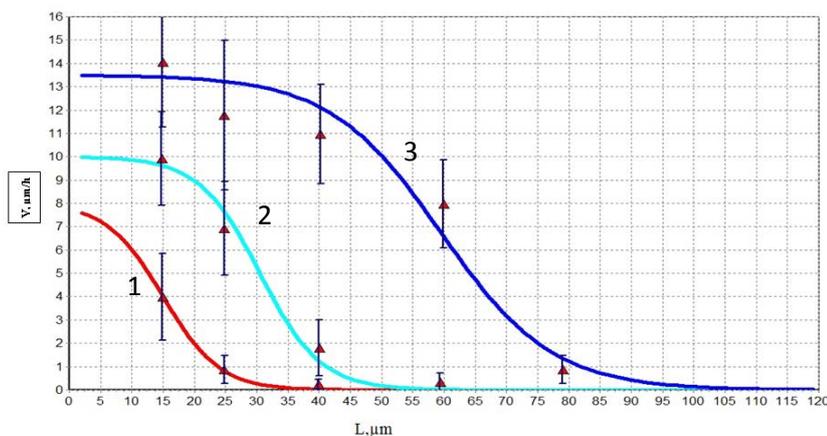


Рис. 32. Описание функцией (2) экспериментальных данных для Fe – (1); Kr – (2); Xe – (3).

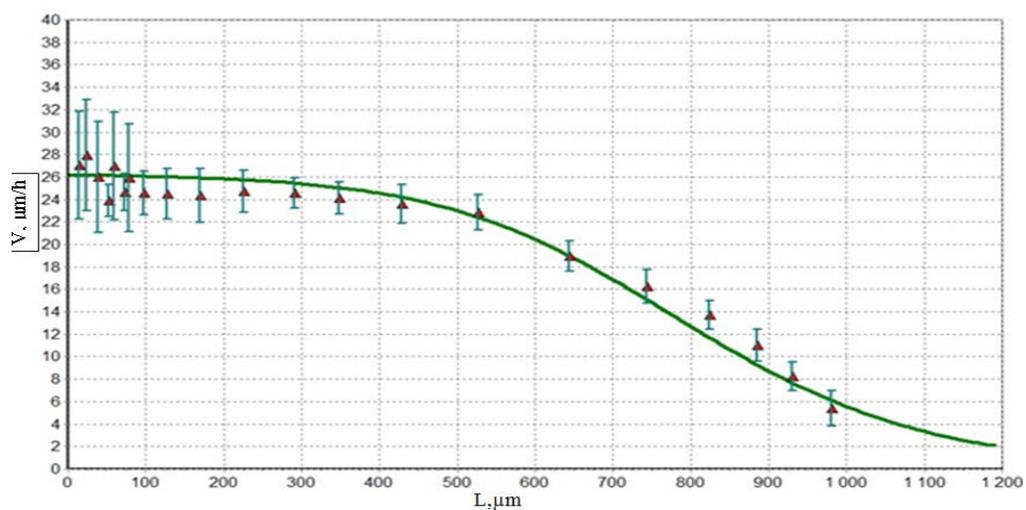


Рисунок 33. Описание функцией (2) экспериментальных данных для U.

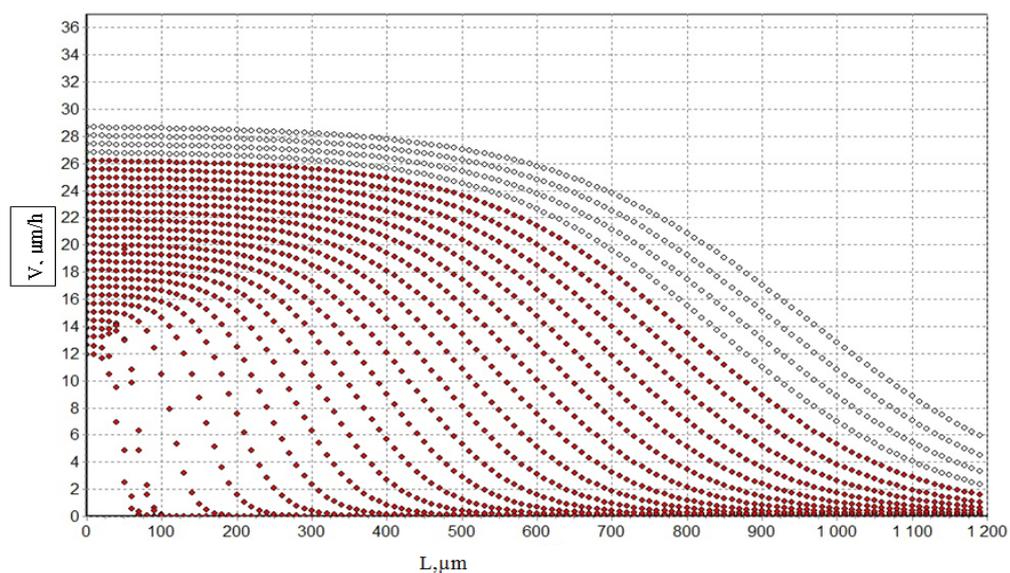
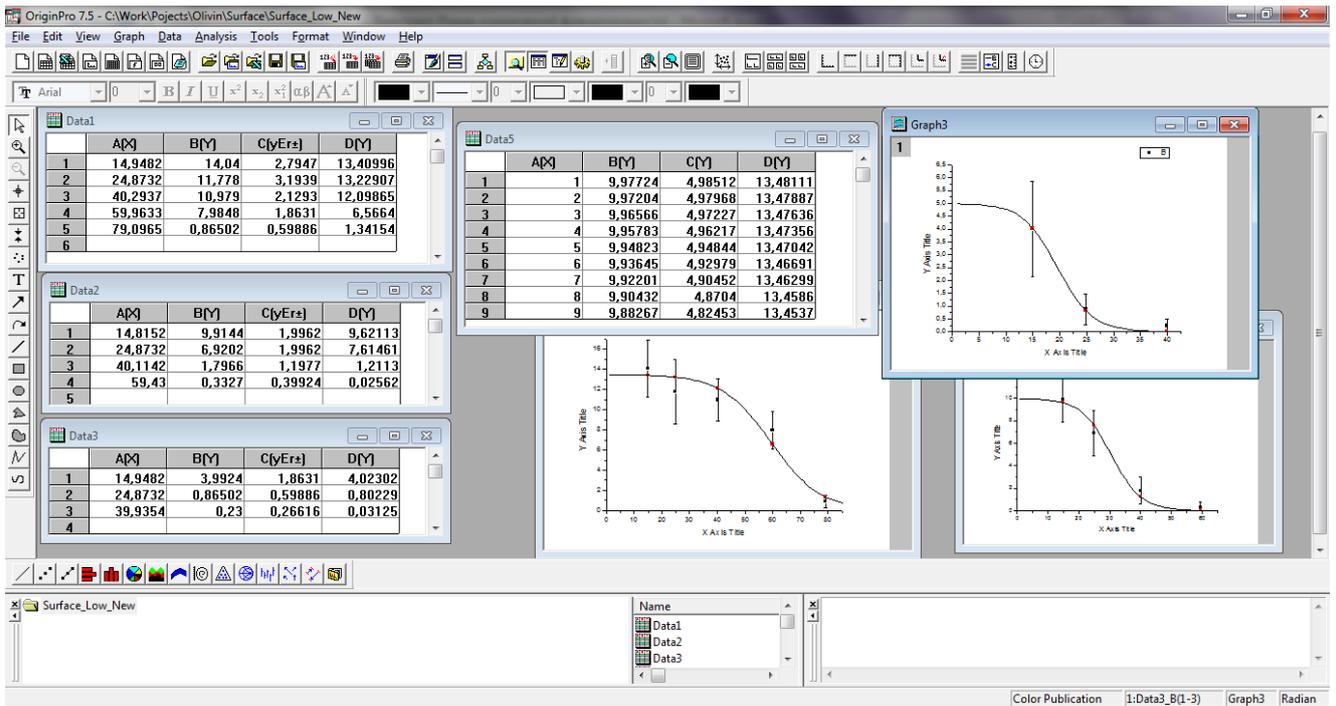
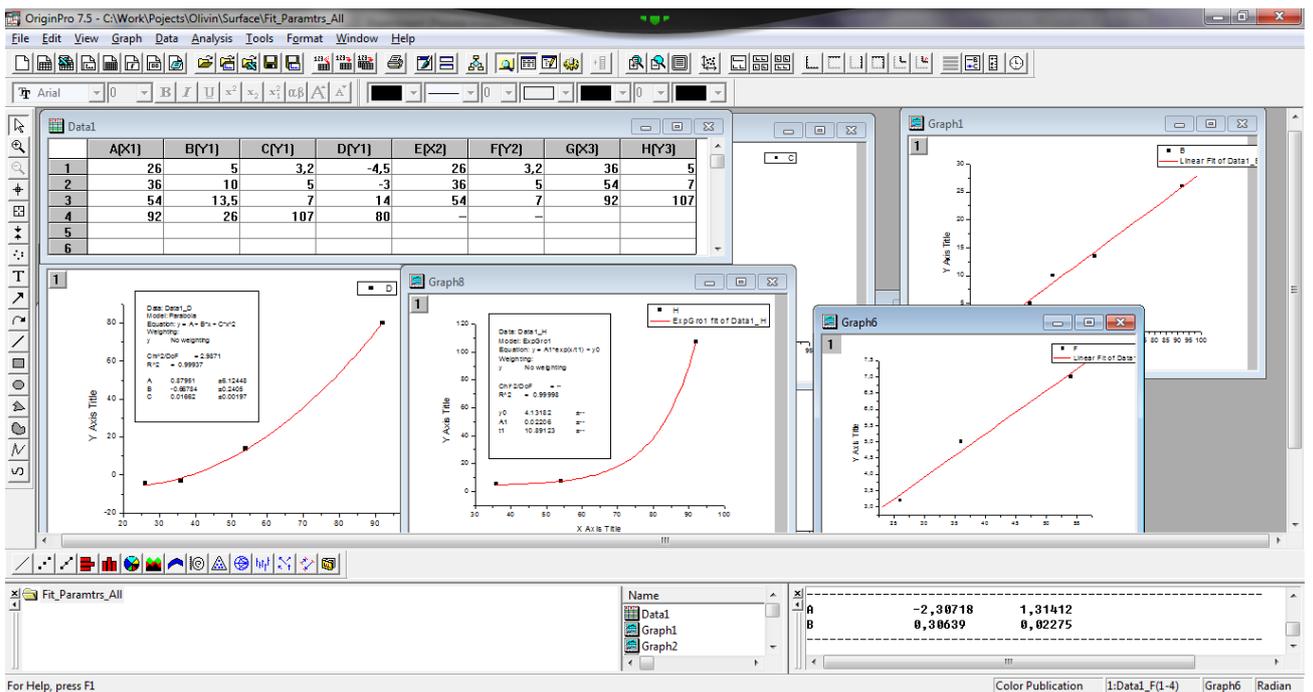


Рисунок 34. Семейство кривых $V(Z,L)$, полученных по формуле (2). Заряды от $Z=54$ до $Z=92$ (•); экстраполяция $V(Z,L)$ в область больших зарядов от $Z=94$ $Z=100$ (o) с интервалом в две единицы заряда.



a



3.6 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 10682 трекам ядер с зарядами $Z > 48$ 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 36 вместе с данными со спутниковых экспериментов. Сравнение данных демонстрирует хорошее согласие [57].

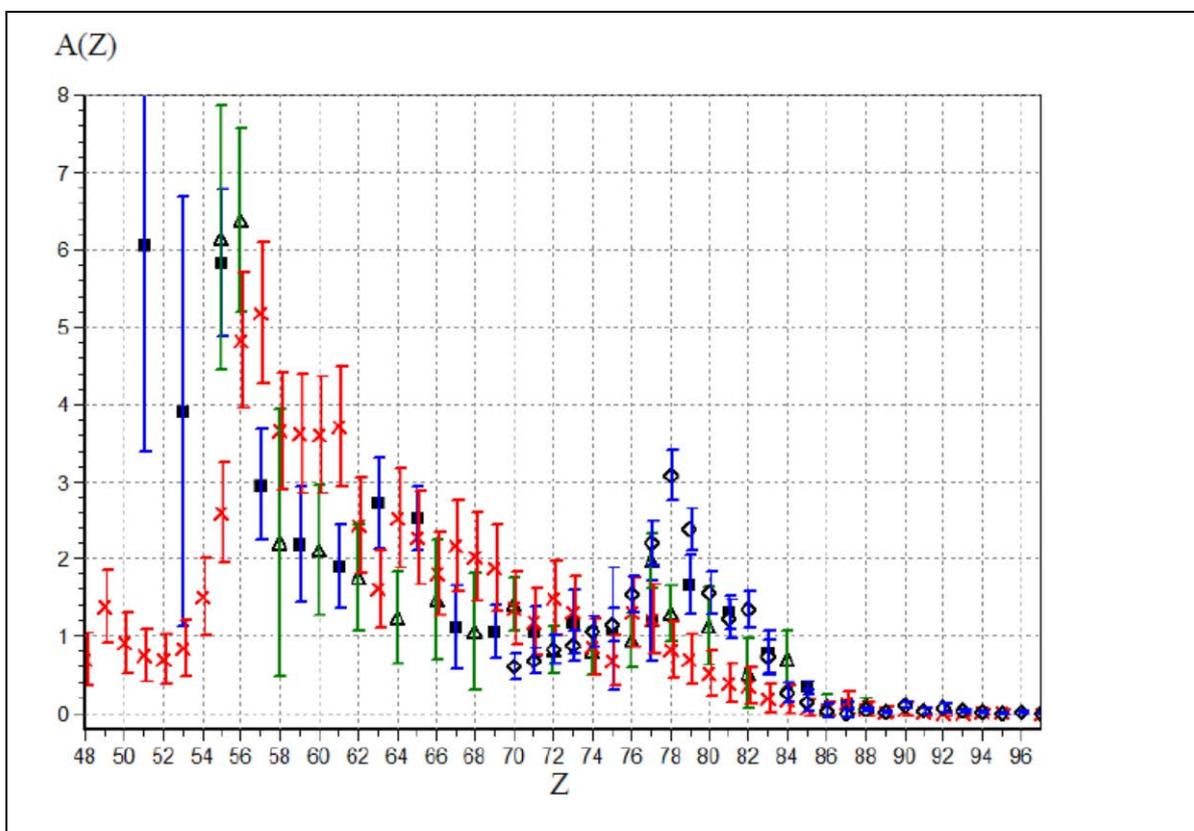


Рис. 36. Зарядовый спектр ядер, зарегистрированных в эксперименте ОЛИМПИА (кресты) в сравнении с результатами других экспериментов: HEAO-3 (квадраты) [27] ARIEL-6 (треугольники) [58] и UHCRE (круги) [59]

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.

Заключение

Активно развивая имеющийся в группе опыт высокотехнологичной обработки ядерно-физических данных автору удалось существенно увеличить статистику найденных и идентифицированных сверхтяжелых ядер в природе. Выполненные расчеты зависимостей $Z(L,V)$ проверены в серии калибровочных облучений оливинов на ускорителях тяжелых ионов в Германии и Китае. Получен значительный объем экспериментальных данных о сверхтяжелых ядрах природного происхождения, и набор данных продолжается. Общая статистика – 11642 тяжелых ядра ГКЛ ($Z>40$) позволяет оценить этот банк данных как самый большой из существующих. Результаты работы по проекту являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер в природе. Полученные результаты позволяют сделать вывод о существовании и распространенности трансфермиевых элементов в природе.

В существенной степени благодаря анализу характеристик эмульсии, выполненным автором в ФИАНе удалось определить оптимальные характеристики эмульсии российского производства и технологию ее изготовления. Стоит отметить, что в сентябре 2015 года при облучении российской эмульсии на пучке пионов с энергией 8 ГэВ в ЦЕРНе была экспериментально определена ее чувствительность к релятивистским частицам. Экспериментально измеренная чувствительность полностью совпала с определенной автором диссертации в модельных расчетах (см. п. 2.4, партия 608С, чувствительность - 32-34 зерна Ag на 100 мкм).

Выполненная в рамках диссертации работа позволила продолжить подготовку тестовых экспериментов по изучению двойного бета-распада. В настоящее время планируется создание эмульсионной камеры из толстослойных слоев эмульсии для экспозиции. Созданное автором программное обеспечение позволяет проводить распознавание событий

двойного бета-распада и определять треки электронов, включая искривленный участок. Ожидаемый фон от распада радиоактивных ядер будет учтен в будущем эксперименте благодаря программе распознавания и анализа «звёзд» - характерных конфигураций треков от распадов радиоактивных ядер. Особый интерес в рамках планируемого эксперимента представляет изучение возможности процесса безнейтринного двойного бета-распада, выходящего за рамки стандартной модели. 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.

Таким образом, в ходе работы были успешно выполнены исследования на основе трековой методики с применением автоматизированной обработки данных, позволившие получить новые интересные результаты и обеспечить дальнейшее развитие методики.

Автором выносятся 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.

Апробация результатов исследований

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 материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы в рецензируемых журналах.

Благодарности

Я хотел бы выразить мою глубокую благодарность научному руководителю Н.И.Старкову за отличное руководство, непрерывное внимание и большое терпение, отдельную благодарность научным сотрудникам Н.Г. Полухиной, Н.М.Коноваловой и Л.А.Гончаровой, всем сотрудникам группы ПАВИКОМ и Лаборатории элементарных частиц за постоянную поддержку и помощь в проведении исследований.

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. А.В. Aleksandrov, A.V. Bagulya, М.М. 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.

Список литературы

1. C.T.R. Wilson, *Phil. Trans.*, v. 189, 265 (1897).
2. Glaser D. A., Some effects of ionizing radiation on the formation of bubbles in liquids, *Phys. Rev.*, 1952, v.87, №4.
3. 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.
4. 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.
5. Fremlin J.H., Abu-Jarad F. (1980) Alpha-emitters in the environment. I:Natural sources. *Nucl. Instr. Meth.* 173, 197-200.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Fowler F.H., Perkins D. H. (1961) The possibility of therapeutic applications of beams of negative π mesons. *Nature* 189, 524-8.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. 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.A*318, 1-43.
14. 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.
15. K. Kodama, et.al, Detection and analysis of tau-neutrino interactions in DONUT emulsion target, *Nuclear Inst. And Meth. A* 493 (202), 45-66.
16. E. Eskut et al, Final results from a search for nu-mu to nu-tau oscillations with the CHORUS experiment, *Publ. Ref.: CERN-PH-EP/2007-034*, arXiv:0710.3361, *Nucl. Phys. B.* 793, 326-343 (2008).
17. R Acquafredda et al 2009, The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino, *JINST* P04018, Volume 4, April 2009.
18. P. H. Fowler, R. A. Adams, V. G. Cowen, J. M. Kidd, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A310, 39 (1967).
19. H. G. Paretzke, T. A. Gruhn, E. V. Benton, *Nucl. Instr. & Meth.*, 107, 597 (1973).
20. P. H. Fowler *Nucl. Instr. & Meth.*, 147, 183 (1977).
21. P. H. Fowler, C. Alexandre, V. H. Clapham, D. L. Henshaw, C. O. Ceallaigh, D. O'Sullivan and A. Thomson, *Nucl. Instr. & Meth.*, 147, 195 (1977).
22. E. K. Shirk, P. B. Price, *Astrophys. J.*, 220, 719 (1978).

- 23.A. Thompson, D. O'Sullivan, K.-P. Wensel, V. Domingo, C. O'Ceallaigh, J. Daly and A. Smit, *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.*, 8, 575 (1984).
- 24.B. A. Weaver, A. J. Westphal, *Astrophys. J.*, 569, 493 (2002).
- 25.E. K. Shirk, P. B. Price, *Astrophys. J.*, 220, 719 (1978).
- 26.P. H. Fowler, N. F. Walker, R. W. Mashedier et al., *Astrophys. J.*, 314, 746 (1987).
- 27.W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner et al., *Astrophys. J.*, 346, 997 (1989).
- 28.M. Maurette, P. Pellas, R. M. Walker, Cosmic-ray-induced particle tracks in a meteorite, *Nature* 204 821 (1964).
- 29.R. L. Fleisher, P. B. Price, R. M. Walker, M. Maurette and G. Morgan. *J. Geophys. Res.* 72(1), 355 (1967).
- 30.O. Otgonsuren, V. P. Perelygin, S. G. Stetsenko et al., Abundance of $Z > 52$ nuclei in galactic cosmic rays: long-term averages based on studies of pallasites, *Astrophys. J.*, 210, 258 (1976).
- 31.В. П. Перельгин, С. Г. Стеценко, *Письма в ЖЭТФ*, 32, 622 (1980).
- 32.V. P. Perelygin, R. I. Petrova, S. G. Stetsenko, R. Brandt, P. Vater, M. Rebetez, R. Spohr, I. Vetter, C. Perron, *Rad. Meas.*, 31, 609 (1999).
- 33.C. Perron, M. Bourot-Denise, V. P. Perelygin, W. Birkhols, S. G. Stetsenko, R. Dersch, T. C. Zhu, P. Vater, R. Brandt. *Nucl. Tracks Rad. Meas.*, 15, No 1-4, 231 (1988).
- 34.Ginzburg, V.L., "Physics and Astrophysics, A Selection of Key Problems", Pergamon, New York, 1985.
- 35.N. Armenise et al., High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2005, 551, 261.
- 36.K. Morishima, T. Nakano, Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out, *Journal of Instrumentation*, 2010, 5, P04011.

- 37.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.
- 38.Dremin I.M., Ivanov O.V., Kalinin S.A., Kotelnikov K.A., Nechitailo V.A., Polukhina N.G. «Wavelet-Patterns in Nucleus-Nucleus Collisions at 158 A GeV» Phys.Lett. B, 2001, v. 499 (1-2), p.97-103 hep-ph/0007060.
- 39.Полухина Н.Г., докторская диссертация, Москва, ФИАН, 2006.
- 40.Владимиров М.С., кандидатская диссертация, Москва, ФИАН, 2013.
- 41.Ф. Боум, П. Фогель, Физика массивных нейтрино, Москва, Мир, 1990
- 42.H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I. V. KRIVOSHEINA, *Mod. Phys. Lett. A* 21, 1547 (2006).
- 43.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.
- 44.В.Д. Ашитков, А.С. барабаш, В.Я. Браднова, Л.А. Гончарова, О.И. Оуррк, 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.
- 45.Гинзбург ВЛ., Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас наиболее важными и интересными, УФН. 1999. Т. 169. С. 419;
- 46.Зельдович Я.Б., ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 1123.
- 47.Бисноватый-Коган Г.С., Чечеткин В.М., УФН. 1979. Т. 127. С. 263.

48. Крамаровский Я.М., Чечев В.П., Синтез элементов во Вселенной, М., Наука, 1987.
49. V. L. Mikheev, V. I. Ilyushchenko, M. B. Miller, S. M. Polikanov, G. N. Flerov, Yu. P. Kharitonov Synthesis of isotopes of element 102 with mass numbers 254, 253, and 252, Atomic Energy, February 1967, Volume 22, Issue 2, pp 93-100.
50. G N Flerov, V A Druin, A A Pleve, The stability of heavy nuclei and the limit of the periodic system of elements Sov. Phys. Uspekhi, 1970, 13(1), 24–50.
51. Yu. Ts. Oganessian et al., Synthesis of a New Element with Atomic Number $Z=117$, Phys. Rev. Lett. 104, 142502 (2010).
52. Y. T. Oganessian et al., Production and Decay of the Heaviest Nuclei 293,294 117 and 294 118, Phys. Rev. Lett. 109, 162501 (2012).
53. М. Гепперт-Майер. «Ядерные оболочки» // Успехи физических наук, том 82, выпуск 4, апрель 1964.
54. Lodders K., Palme H., Gail H.-P., Abundance of the elements in the Solar System, Landolt-Bornstein - Group VI Astronomy and Astrophysics, v. 4B: Solar system, 2009.
55. A.V. Bagulya, L.L. Kashkarov, N.S. Konovalova, N.M. Okat'eva, N.G. Polukhina, N.I. Starkov, JETP Letters, 2013, Vol. 97, No. 12, pp. 708–719.
56. Г. Н. Флеров, О. Отгонсурен, В. П. Перельгин. Изв. АН СССР, 39, 388 (1975).
57. 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.

58. O'Sullivan, A. Thompson, C. Domingo et al., Nucl. Track and Rad. Meas., 15, 673, (1988).
59. J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan et al., Astrophys. J. 747(40), 14, (2012).
60. Р. Л. Флейшер, П. Б. Прайс, Р. М. Уокер, Треки заряженных частиц в твердых телах, в 3-х частях, М., Энергоатомиздат (1981).
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. Старков Н.И., докторская диссертация, Москва, ФИАН, 2010.
65. В.К. Егоров, Л.Л. Кашкаров, В.А. Царев, О некоторых структурных особенностях кристаллов оливина из метеорита Марьялахти; «Структура и разнообразие минерального мира», Материалы Международного минералогического семинара, Сыктывкар, Республика Коми, Россия 17-19 июня 2008 г. (ISSN издания 978-5-98491-026-2), 2008, стр.139-140 (Полное название издательства Геопринт Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г.Сыктывкар).
66. A. V. Bagulya, L. A. Goncharova, A. I. Ivliev, G. V. Kalinina, L. L. Kashkarov, N. S. Konovalova, N. M. Okat'eva, N. G. Polukhina, A. S. Rusetski, N. I. Starkov, V. A. Tsarev. Rad. Meas. 44, No 9-10, 739 (2009).
67. Horn et al., A study of the registration of arsenic and iodine ions in olivine and hypersthene crystals, Zeitschrift fur Naturforschung, 1967, 22a, 11, 1793-1798.

68. 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).
69. 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.
70. A.B. 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.

Приложение

Приложение 1. Текст блока программы генерации псевдозёрен серебра для определения их количества в случае сильного перекрывания.

```
// ===== Функция генерации зёрен серебра =====
int TForm1::GetTrack(int jj, Grain * Gra)
{
    int width=1280, height=1024, ii, kk, ll;
    int X0=10, Y0=100, Numb, Red0=0, Gray0=0;
    double Hist[100]={0};
    FILE * ff=fopen("Res75.txt","wt");

// ===== Предварительная подготовка параметров =====
    for(ii=0; ii<80; ii++) Gra->Grains[ii][0] = 0;

    Numb = StrToInt(MaskEdit1->Text);

    Image1->Picture->Bitmap->Width=width;
    Image1->Picture->Bitmap->Height=height;
    Image1->Width = width;
    Image1->Height = height;
    Image1->Picture->Bitmap->PixelFormat = 6;

    {
        Image1->Canvas->FloodFill(0,0,width,height);

        Image1->Canvas->Brush->Color = clWhite;
        Image1->Canvas->FillRect(Rect(0,0,width,height));
        Image1->Canvas->Brush->Color = clBlack;

        Image1->Canvas->Pen->Color = clWhite;
        Image1->Canvas->Pen->Width = 2;
        Image1->Canvas->MoveTo(X0,Y0);
        Image1->Canvas->Pen->Color = clBlack;

        Red0 = 0;
        Gray0 = 0;
// ===== Генерация псевдозёрен серебра =====
// ===== на окне рабочей программы =====

        for(ii=0; ii<Numb; ii++)
        {
            X0 = random(476);
            Image1->Canvas->Ellipse(X0+10+ii*0,Y0-3,X0+10+6+ii*0,Y0+3);
            Grai.Grains[ii][0] = X0;
            Grai.Grains[ii][1] = Y0;
        }
        kk = 0; ll = 0;
        for(ii=0; ii<476; ii++)
```

```

{
  X0 = ii+10;

  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] == clBlack) Red0++;
  else Gray0 ++;

  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] == clBlack && ll == 0)
    { kk++; ll = 1;}

  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] != clBlack && ll == 1) ll = 0;
  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] == clBlack) Red0++;
  else Gray0 ++;

  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] == clBlack && ll == 0)
    { kk++; ll = 1;}
  if(Image1->Canvas->Pixels[X0][Y0] != clBlack && ll == 1) ll = 0;

}

Grai.Part = Red0/476.0;
Hist[kk] = Red0/476.0;

Memo1->Lines->Add(" Step "+IntToStr(jj)+
" Numb "+IntToStr(Numb)+
" N "+IntToStr(kk)+" Part "+
FloatToStrF(Red0/476.0, ffGeneral,5,3));

}
return kk;
}

// ===== Функция определения характеристик зёрен =====
// ===== и построения их распределений =====
void __fastcall TForm1::BitBtn3Click(TObject *Sender)
{
  int ChoiceFiltre, ChoiceThresh, mm, nn, MaxPix, Hist[21]={0};
  long int ii, pp, Gr, Numb;
  long int kk, ll=0;
  uint8 * puCurrent, oo8, Method = 0, iX, iY;
  uint8 BegF=0, EndF=0, BegX=0, EndX=0, BegY=0, EndY=0, CurF;
  double X0, Y0, Add, Area[21], Prob[21][20]={0}, HistAll[21]={0};
  int NumbGr[20]={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19};
  int DistrArea[21]={0};
  char ConstPath[100], ConstName[10], InterName[25];
  AnsiString Buf;
  TRect Rec;
  Cluster * Blob;
  FILE * Res = fopen("Clusters.txt", "wt");
  TColor RRRR[20] = {clAqua, clBlue, clGreen, clDkGray,
  clFuchsia, clGray, clGreen, clLime, clLtGray, clMaroon,
  clMedGray, clMoneyGreen, clNavy, clOlive, clPurple, clRed,

```

```

    clSilver, clSkyBlue, clTeal, clYellow}, Rcur;

// ===== Предварительное задание параметров генерации =====
ChoiceFiltre = ComboBox2->ItemIndex;

height = StrToInt(Edit3->Text);
width = StrToInt(Edit2->Text);

Graphics::TBitmap *Bmp1 = new Graphics::TBitmap;

Bmp1->PixelFormat=Image1->Picture->Bitmap->PixelFormat;
Image1->Picture->Bitmap->PixelFormat = 6;
Bmp1->Assign(Image1->Picture);

strcpy(sFileIn, Edit1->Text.c_str());
Img = MyIm->GetExtension(sFileIn,ext);
ComboBox1->ItemIndex = Img;

uint8 * pulmageBinary = new uint8[width*height];
uint8 * puClusters = new uint8[width*height];
uint8 * puOutCont = new uint8[width*height];

MyIm->GetAscciiFromBitmap(Bmp1, pulmageBinary);
delete Bmp1;

Numb = StrToInt(MaskEdit1->Text);
//// Rec = Rect(0,0,width,height);
// =====
for(ii=0; ii<20; ii++) { Area[ii] = 10+ii*14; Hist[ii]=0;}
Area[20] = 200; Hist[21]=0;

// ===== Цикл по числу событий =====
for(CurF=0; CurF<StrToInt(Edit33->Text); CurF++)
{
// ===== ..Генерация псевдозёрен =====
kk = GetTrack(CurF, &Grai);
Grai.Ncl = kk;

for(ll=0; ll<height-0; ll++)
for(mm=0; mm<width-0; mm++)
{
kk = mm+ll*width;
*(pulmageBinary+kk) =
GetBValue(ColorToRGB(Image1->Canvas->Pixels[mm][ll]));
}

for(ll=0; ll<height-0; ll++)
for(mm=0; mm<width-0; mm++)
{
kk = mm+ll*width;
*(puClusters+kk) = *(pulmageBinary+kk);
}
}

```

```

}

puCurrent = puClusters;

Clusters2.GetHistogram(width, height,puCurrent);

Series1->Clear();
Series1->Active = TRUE;
Series2->Clear();
Series2->Active = TRUE;
Series3->Clear();
Series3->Active = TRUE;
// ===== Обработка изображения зёрен =====
// ===== программой распознавания =====
for(kk=0; kk<256; kk++)
    Series1->AddXY(kk, Clusters2.Histogram[kk], "", clYellow);
Chart1->LeftAxis->Maximum = Series1->MaxYValue()*1.2;
// ..... Filtering .....
if(ChoiceFiltre > 0)
{
    ChoiceThresh = FiltreSize[ChoiceFiltre-1];
    MaxPix    = Clusters2.FillMask(width, height,
        ChoiceThresh, puCurrent);

    Clusters2.GetHistogram(width, height, puCurrent);
    for(kk=0; kk<256; kk++)
        Series2->AddXY(kk, Clusters2.Histogram[kk], "", clGreen);

    if(CheckBox3->Checked)
    {
        strcpy(sFileFig, "Filtre1.bmp");
        MyIm->PutImage1(ScrollBox2, Image2,
            width, height, puCurrent, sFileFig, 1, 1);
    }
}
// ..... Contrast .....
if(CheckBox2->Checked)
{
    Gamma    = StrToFloat(Edit5->Text);
    dContrast = StrToInt(Edit4->Text);
    Clusters2.GetHistogram(width, height, puCurrent);
    Thresh    = Clusters2.MaxHistI - dContrast;

    Edit6->Text = IntToStr(Thresh);
    Clusters2.Contrast(height, width,
        puCurrent, Thresh, Gamma);

    Clusters2.GetHistogram(width, height,puCurrent);
    for(kk=0; kk<256; kk++)
        Series3->AddXY(kk, Clusters2.Histogram[kk], "", clAqua);
    Chart1->LeftAxis->Maximum = Series3->MaxYValue()*1.2;

```

```

    if(CheckBox4->Checked)
    {
        strcpy(sFileFig, "Contrast1.bmp");
        MyIm->PutImage1(ScrollBox3, Image3,
            width, height, puCurrent, sFileFig, 1, 1);
    }
}
// ..... Fixed or Automatic threshold .....
if (!CheckBox1->Checked)
    Thresh = (uint8) StrToInt(Edit7->Text);
else if(CheckBox1->Checked == true)
{
    Thresh = Clusters2.ThreshEval(height, width, puCurrent, 0);
    Edit7->Text = IntToStr(Thresh);
}
// ===== Фильтр Кувахары =====....
if(CheckBox16->Checked == true)
    Clusters2.Kuwahara(width, height, 1, Thresh, puCurrent);
// .....
Clusters2.MakeBinary(puCurrent, width, height, 0, Thresh);

// ===== Выделение контура =====....
if(CheckBox15->Checked == true)
    Clusters2.Contour(width, height, 1, Thresh, puCurrent);

// =====. Erose, delite =====
if(CheckBox6->Checked)
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox7->Checked)
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox8->Checked)
{
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
}
if(CheckBox10->Checked)
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox11->Checked)
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox9->Checked)
{
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
}
if(CheckBox13->Checked)
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox14->Checked)
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
if(CheckBox12->Checked)
{
    Clusters2.Erose(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
    Clusters2.Dilate(width, height, puCurrent, 4, Thresh);
}

```

```

}
// =====. FindClusters .=====
Clusters2.Clusters.clear();
Clusters2.OutMax = 5;
Clusters2.MaxClust = StrToInt(Edit8->Text);
Clusters2.MinClust = StrToInt(Edit9->Text);
Clusters2.MaxLength = StrToInt(Edit10->Text);
Clusters2.MinLength = StrToInt(Edit11->Text);
Clusters2.MaxWidth = StrToInt(Edit12->Text);
Clusters2.MinWidth = StrToInt(Edit13->Text);

mm = Clusters2.FindClusters(puCurrent, width, height,
                          Thresh, puOutCont);
// =====. Tracking =====
Clusters2.Tracking(height, width, puOutCont, 0);
// .....
Memo1->Lines->Add(" Layer "+IntToStr(CurF)+
" Size = "+IntToStr(mm)+
" Number of SubClusters = "+IntToStr(Clusters2.NumbSubClusters)
// +" Number of Clusters = "+IntToStr(Clusters2.NumbClusters)
);
// ===== Построение распределения доли, =====
// ===== занимаемой зёрнами на 100 мкм =====
MyPoint PP;
CPoint Pc;

kk = Clusters2.Clusters.size();
oo8 = 0;
pp = 0;
for(ll=0; ll<kk; ll++) // Clusters
{
Blob = &Clusters2.Clusters[ll];
mm = Blob->ClusterPoints.size();
Blob->Gabarit();
Blob->Area = mm;

if(Blob->Length > Clusters2.MaxLength ||
Blob->Length < Clusters2.MinLength) continue;

Add = 0;
oo8 = oo8 < 19 ? oo8+1 : 0;
Rcur = RRRR[oo8];
for(nn=0; nn<mm; nn++)
{
X0 = Blob->ClusterPoints[nn].x;
Y0 = Blob->ClusterPoints[nn].y;

Gr = *(pulImageBinary+(int)X0+width*(int)Y0);

Add += Gr;

*(puClusters+(int)X0+width*(int)Y0) = Gr;

```

```

    }
    if(mm != 0) Blob->Gray = Add/mm;
// ===== Запись результата в файл =====
    fprintf(Res,
"#%d %d %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf\n",
    CurF, pp, Blob->Area, Blob->Centroid.x, Blob->Centroid.y,
    Blob->Width, Blob->Length, Blob->Axis1, Blob->Gray);
    fprintf(Res,
"          %d %d %d %d %d %d %d %d\n",
    Blob->Pbot.x, Blob->Pbot.y,
    Blob->Ptop.x, Blob->Ptop.y,
    Blob->Plef.x, Blob->Plef.y,
    Blob->Prig.x, Blob->Prig.y);
    pp++;

    fprintf(Res,"-----\n");
}
fprintf(Res,"-----\n");

if(CheckBox5->Checked)
{
    if(Method == 0) ll = 0;
    MyIm->PutImage1(ScrollBar5, Image5,
        width, height, puClusters, sFileFig, ll, 1);
// #####
    kk = Clusters2.Clusters.size();

    for(ll=0; ll<kk; ll++) // Clusters
    {
        Blob = &Clusters2.Clusters[ll];
        mm = 0;
        for(ii=0; ii<Numb; ii++) // Along
        {
            if(Grai.Grains[ii][0]+10 <= Blob->Prig.x &&
                Grai.Grains[ii][0]+10 >= Blob->Plef.x)
            {
                mm++;
            }
        }
    }

    nn=0; while(Blob->Area > Area[nn]) nn++;
    DistrArea[nn-1] ++;

    Prob[nn-1][mm]++;

    Hist[mm]++;

}
// #####
}
}

```

```
// CurF
  fclose(Res);

  delete[] puImageBinary;
  delete[] puClusters;
  delete[] puOutCont;
}
```

Приложение 2. Текст блока программы выделения зёрен AgBr на микрофотографии и определения их характеристик.

```
// ===== Функция выделения зёрен AgBr =====
void __fastcall TForm1::Image1MouseDown(TObject *Sender,
    TMouseButton Button, TShiftState Shift, int X, int Y)
{
    int jj, kk, mm=0, nn=0, mmm=0, X0, Y0;

    jj = Pxy.size();
    if(jj > 0)
    {
        mmm = jj%4;
// ===== Замена цвета меток на зерне с красного на зелёный =====
        if(mmm == 0)
        {
            for(kk=3; kk>=0; kk--)
            {
                X0 = Pxy[jj-1-kk].Xi;
                Y0 = Pxy[jj-1-kk].Yi;
                for(mm=0; mm<3; mm++)
                for(nn=0; nn<3; nn++)
                    Image1->Canvas->Pixels[X0+mm][Y0+nn] =
                        (TColor) RGB(0,255,0);
            }
// ===== Вычисление размеров зёрен =====
            Dist1 = sqrt((Pxy[jj-4].Xi-Pxy[jj-3].Xi)*
                (Pxy[jj-4].Xi-Pxy[jj-3].Xi)+
                (Pxy[jj-4].Yi-Pxy[jj-3].Yi)*
                (Pxy[jj-4].Yi-Pxy[jj-3].Yi))*1000/Scale;
            Dist2 = sqrt((Pxy[jj-1].Xi-Pxy[jj-2].Xi)*
                (Pxy[jj-1].Xi-Pxy[jj-2].Xi)+
                (Pxy[jj-1].Yi-Pxy[jj-2].Yi)*
                (Pxy[jj-1].Yi-Pxy[jj-2].Yi))*1000/Scale;

            if(Dist1 < Dist2) { mm = Dist1; Dist1 = Dist2; Dist2 = mm; }

            Memo1->Lines->Add(" "+IntToStr(Dist1)+
                " "+IntToStr(Dist2)+
                " "+IntToStr((Dist1+Dist2)/2));
// ===== Построение распределения длины и ширины =====
            Series1->AddXY(Dist1,Dist2,"", clTeeColor);

            Chart1->LeftAxis->Maximum = Series1->MaxYValue()*1.1;
            Chart1->LeftAxis->Minimum = Series1->MinYValue()*0.9;
            Chart1->BottomAxis->Maximum = Series1->MaxXValue()*1.1;
            Chart1->BottomAxis->Minimum = Series1->MinXValue()*0.9;
        }
    }

    TwoI.Xi = X;
```

```

    Twol.Yi = Y;
    Pxy.push_back(Twol);
// ===== Установка красных меток на зерне =====
    for(mm=0; mm<3; mm++)
        for(nn=0; nn<3; nn++)
            Image1->Canvas->Pixels[X+mm][Y+nn] = (TColor) RGB(255,0,0);

    Edit4->Text = IntToStr(X);
    Edit5->Text = IntToStr(Y);
    jj = Pxy.size();
    Edit6->Text = IntToStr(jj);
///    Memo1->Lines->Add(IntToStr(mmm)+" "+IntToStr(X)+" "+IntToStr(Y));
}
// ===== Функция построения распределений по размеру зёрен =====
void __fastcall TForm1::BitBtn2Click(TObject *Sender)
{
    int jj, kk, ll, Av;
    int Nhist = 26;
    double ff, gg, aa, bb;
    int Ax[26] = {0,40,80,120,160,200,240,280,320,360,400,440,480,
        520,560,600,640,680,720,760,800,840,880,920,960,1000};
    int Hist[26] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};

    TwolInt1 Tl;

    Series4->Clear();
    Series5->Clear();
    Series6->Clear();

    DmiDma = 0;
    sA=0; sW=0; sH=0; DisH=0; DisW=0; DisA=0;
    Oblong = 0;

    jj = Pxy.size();
    kk = jj/4;
    HW.clear();
// ===== Цикл по числу отмеченных зёрен =====
    for(jj=0; jj < kk; jj += 1)
    {
        Dist1 = sqrt((Pxy[jj*4].Xi-Pxy[jj*4+1].Xi)*
            (Pxy[jj*4].Xi-Pxy[jj*4+1].Xi)+
            (Pxy[jj*4].Yi-Pxy[jj*4+1].Yi)*
            (Pxy[jj*4].Yi-Pxy[jj*4+1].Yi))*1000/Scale;
        Dist2 = sqrt((Pxy[jj*4+2].Xi-Pxy[jj*4+3].Xi)*
            (Pxy[jj*4+2].Xi-Pxy[jj*4+3].Xi)+
            (Pxy[jj*4+2].Yi-Pxy[jj*4+3].Yi)*
            (Pxy[jj*4+2].Yi-Pxy[jj*4+3].Yi))*1000/Scale;

        if(Dist1 <Dist2) { ll = Dist1; Dist1 = Dist2; Dist2 = ll; }

        Av = (Dist1+Dist2)/2;

```

```

    if(Dist2 == 0) Dist2 = 2;
    aa = Dist1;
    bb = Dist2;

//    Oblong += double(Dist1/Dist2);
    Oblong += aa/bb;
    Tl.Xi = Dist1;
    Tl.Yi = Dist2;

    HW.push_back(Tl);
    Aver.push_back(Av);

//    if(jj == kk-1)
    {
        Series1->AddXY(Dist1,Dist2,"", cITeeColor);
    }

    sH += Dist1;
    sW += Dist2;
    sA += Av;
}

sH /= kk;
sW /= kk;
sA /= kk;
Oblong /= kk;
// ===== Вычисление дисперсий величин =====
for(jj=0; jj < kk; jj += 1)
{
    DisH += (sH-HW[jj].Xi)*(sH-HW[jj].Xi);
    DisW += (sW-HW[jj].Yi)*(sW-HW[jj].Yi);
    DisA += (sA-Aver[jj])*(sA-Aver[jj]);
}
DisH /= kk-1;
DisW /= kk-1;
DisA /= kk-1;
/*
Memo1->Lines->Add(" Average values:");
Memo1->Lines->Add(" Length "+IntToStr(sH)+" +- "+
    IntToStr((int)sqrt(DisH)));
Memo1->Lines->Add(" Width "+IntToStr(sW)+" +- "+
    IntToStr((int)sqrt(DisW)));
Memo1->Lines->Add(" \"Diameter\" "+IntToStr(sA)+" +- "+
    IntToStr((int)sqrt(DisA)));
Memo1->Lines->Add(" Oblong "+
    FloatToStrF((float) Oblong,ffGeneral,4,2));
*/
Series2->AddXY(sH,sW,"", cITeeColor);

Chart1->LeftAxis->Maximum = Series1->MaxYValue()*1.1;
Chart1->LeftAxis->Minimum = Series1->MinYValue()*0.9;
Chart1->BottomAxis->Maximum = Series1->MaxXValue()*1.1;

```

```

Chart1->BottomAxis->Minimum = Series1->MinXValue()*0.9;
// ===== Формирование имени файла записи =====
Str = Edit1->Text;
jj = Str.Length();
ll = jj;
while(Str[ll] != '\\') ll--;
Str0 = Str.SubString(ll+1,jj-ll+1);
Str[jj] = 't';
Str[jj-1] = 'x';
Str[jj-2] = 't';
Memo1->Lines->SaveToFile(Str);

int mid,mad;
mad = StrToInt(Edit9->Text);
mid = StrToInt( Edit10->Text);
kk = Aver.size();
// ===== Построение гистограммы распределения длин =====
for(ll=0; ll<kk; ll++)
{
    Av = Aver[ll];
    if(Av <= mad && Av >= mid) DmiDma ++;
    for(jj=0; jj<Nhist;jj++)if(Av <Ax[jj]) break;
    if(jj == Nhist) continue;
    Hist [jj-1]++;
}

for(jj=0; jj<Nhist;jj++)
{
    if(Hist[jj] == 0) continue;
    Series5->AddXY(Ax[jj]+20, Hist[jj],"",clTeeColor);
}
// ===== Аппроксимация гистограммы функцией Гаусса =====
Av = 0;
for(jj=0; jj<Nhist;jj++)
{
    MyMat->Ar[jj] = Ax[jj]+20;
    MyMat->Da[jj] = Hist[jj];
    MyMat->Er[jj] = 1; //Hist[jj]/10;
    if(Av < Hist[jj]) {Av = Hist[jj]; ll = jj;}
}

H[0] = Series5->MaxYValue();   H[1] = Ax[ll];   H[2] = sqrt(DisA);
A[0] = H[0]/3;   A[1] = H[1]/3;   A[2] = H[2]/3;
MyMat->Nnach = 0;
MyMat->Ncon = Nhist;

ff = MyMat->minaC(3, 100, H, A, Gauss);

mid = A[1]-20;
mad = A[1]+20;
DmiDma = 0;
A280 = 0;

```

```

for(ll=0; ll<kk; ll++)
{
    Av = Aver[ll];
    if(Av <= mad && Av >= mid) DmiDma ++;
    if(Av <= 320 && Av >= 240) A280 ++;
}

ff = A[1];
for(jj=10; jj<900;jj +=1)
{
    gg = A[0]*exp(-(jj-ff)*(jj-ff)/(A[2]*A[2]));
    Series4->AddXY(jj, gg,"",clTeeColor);
}
Chart2->LeftAxis->Maximum = Series4->MaxYValue()*1.4;
}

```

Приложение 3. Текст блока программы продления треков в оливине.

```
// ===== Функция продления трека (в сокращении) =====
void __fastcall TForm1::BitBtn1Click(TObject *Sender)
{
    double XX, YY, ZZ, GG, mu, Slope=0.1, Charge, TT=12, Ltr, Zq;
    double Charge2, V1, V2;
    char CC;
    int ii, jj, kk, ll, mm, nn, oo, Ntr, i1, i2, lcr, Ntab;
    FILE * Res;
    double Char1[44] = {
        42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
        51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60,
        61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70,
        71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80,
        81, 83, 85, /*86*/88, 91,
        92};
    double Dist1[44] = {
        3.1, 3.435, 4.06, 4.42, 4.67, 4.86, 5.088, 5.44, 6.076,
        7.155, 8.43, 9.32, 10.174, 11.07, 12.04, 12.8, 13.22, 14.0, 14.77,
        15.51, 16.48, 17.34, 18.33, 19.1, 19.88, 20.98, 22.07, 23.0, 23.7,
        25.37, 27.45, 29.39, 31.71, 33.72, 35.55, 38.25, 39.98, 45.57,
        47.08, 54.66, 59.36, 65.73, 75.28,
        92.19};

    Res = fopen(Edit11->Text.c_str(), "at");

    AnsiString Buffer;
    FILE *F1;
    TrackO Trck, *Trk1, *Trk2;

    ThreeInt1 NN;
    MyPoint P0;
    Cross Cr1, *Cr2, *Cr3;

    mu = 1/sqrt(1+Slope*Slope);
    T1 = StrToFloat(Edit5->Text);
    T2 = StrToFloat(Edit10->Text);
    ZZ = StrToFloat(Edit6->Text);

    Ntr1 = StrToInt(Edit1->Text);
    Ntr2 = StrToInt(Edit2->Text);

// ===== Цикл по кристаллам таблетки с оливинами =====
    Tracks.clear();
    for(lcr=StrToInt(Edit4->Text); lcr<=StrToInt(Edit7->Text); lcr++)
    {
        ii = Tracks.size();
        Vcr1.clear();
        Vcr2.clear();
        Vtr1.clear();
    }
}
```

```

    Vtr2.clear();
    Ntab = StrToInt(Edit3->Text);

// ===== Формирование имен файлов данных о частях треков
// ===== и их чтение =====
if(StrToInt(lcr) < 10)
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c00"+IntToStr(lcr)+"s001.txt";
else if(lcr < 100)
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c0"+IntToStr(lcr)+"s001.txt";
//    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c0"+Edit4->Text+"s001.txt";
else
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c"+IntToStr(lcr)+"s001.txt";

i1 = access(Buffer.c_str(),0);
if(i1 >= 0)
{
    ii = Read_Data(Buffer.c_str(), &Vtr1);
}

if(StrToInt(lcr) < 10)
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c00"+IntToStr(lcr)+"s002.txt";
else if(lcr < 100)
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c0"+IntToStr(lcr)+"s002.txt";
else
    Buffer = "t0"+Edit3->Text+"c"+IntToStr(lcr)+"s002.txt";

i2 = access(Buffer.c_str(),0);
if(i2 >= 0)
{
    ii = Read_Data(Buffer.c_str(), &Vtr2);
}
if(i1 < 0 && i2 < 0) continue;

ii = Vtr1.size();
ll = Vtr2.size();
nn = 0;
Cont.clear();
for(kk=0; kk<ii; kk++)
{
    Trk1 = &Vtr1[kk];
    NN.Yi = kk;
    for(mm=0; mm<ll; mm++)
    {
        Trk2 = &Vtr2[mm];
        NN.Xi = Trk2->Ntr;
        NN.Zi = mm;
        if(Trk1->Ntr==Trk2->Ntr)
        {
            Cont.push_back(NN);
            Memo1->Lines->Add(" NN.Xi "+IntToStr(NN.Xi)+
                " NN.Zi "+IntToStr(NN.Zi));

```



```

for(oo=0; oo<44; oo++) //
    if(XX < Dist1[oo]) { nn++; break; }
if(oo>=43) oo = 42; //
if(oo==0) oo = 1; //
Charge = InterPol(Dist1[oo-1], Dist1[oo], Dist1[oo+1], //
    Char1[oo-1], Char1[oo], Char1[oo+1], XX); //
if(XX>65)
    Charge = (1-pow(32.03/(XX+42.8),1.452))/0.0095; // Heavy !!!

Charge2 = 0;
if(VSOF2[jj].L > 150 && VSOF2[jj].L/TT > 10)
    Bisection1(VSOF2[jj].L, VSOF2[jj].L/TT, &Charge2);
if(Charge2 >= 68) Charge = Charge2;

VSOF2[jj].Z = Charge;
Tracks.push_back(Charge);

fprintf(Res," %d %d %d 2 %6.1lf %6.2lf %6.2lf \n",
    StrToInt(Edit3->Text), lcr, VSOF2[jj].Ntr,
    VSOF2[jj].L, VSOF2[jj].L/TT, VSOF2[jj].Z); //, Charge2);
// fprintf(Res," 2 %lf %d %d %d \n",
//     Charge, lcr, VSOF2[jj].Ntr, StrToInt(Edit3->Text));
}
// .....
Memo1->Lines->Add(" ===== List of continued ===== ");
nn = Cont.size();
for(kk=0; kk<nn; kk++)
    Memo1->Lines->Add(" Ntr "+IntToStr(Cont[kk].Xi)+
        " Nlist1 "+IntToStr(Cont[kk].Yi)+
        " Nlist2 "+IntToStr(Cont[kk].Zi));
// ===== Поиск продолжения трека среди массива других частей =====
Memo1->Lines->Add(" ===== Crosses 1 ===== ");
int dd, ee, ff, gg;

for(oo=0; oo<nn; oo++)
{
    kk = Cont[oo].Yi;
    dd = Cont[oo].Xi;
    Trk1 = &Vtr1[kk];
    for(ii=oo; ii<nn; ii++)
    {
        mm = Cont[ii].Yi;
        ee = Cont[ii].Xi;
        if(Cont[oo].Xi == Cont[ii].Xi) continue;
        Trk2 = &Vtr1[mm];

        Trk1->Ln.Cross_L1_L2(&Trk2->Ln,&P0);

        Cr1.Npair = dd+ee*100;
        Cr1.Pcross = P0;

        if(Trk1->Ntr == Ntr1 && Trk2->Ntr == Ntr2 ||

```

```

Trk1->Ntr == Ntr2 && Trk2->Ntr == Ntr1)
Series5->AddXY(P0.x,P0.y," ",clTeeColor);

Vcr1.push_back(Cr1);

Series7->AddXY(P0.x,P0.y," ",clTeeColor);
}
}

Memo1->Lines->Add(" ===== Crosses 2 ===== ");
for(oo=0; oo<nn; oo++)
{
kk = Cont[oo].Zi;
dd = Cont[oo].Xi;
Trk1 = &Vtr2[kk];

for(ii=oo; ii<nn; ii++)
{
mm = Cont[ii].Zi;
ee = Cont[ii].Xi;
if(Cont[oo].Xi == Cont[ii].Xi) continue;
Trk2 = &Vtr2[mm];
Trk1->Ln.Cross_L1_L2(&Trk2->Ln,&P0);

Cr1.Npair = dd+ee*100;
Cr1.Pcross = P0;

if(Trk1->Ntr == Ntr1 && Trk2->Ntr == Ntr2 ||
Trk1->Ntr == Ntr2 && Trk2->Ntr == Ntr1)
Series5->AddXY(P0.x,P0.y," ",clTeeColor);

Vcr2.push_back(Cr1);

Series8->AddXY(P0.x,P0.y," ",clTeeColor);
}
}
// =====
double Z0 = 0, dX, dY;
int nZ = 0;

ii = Vcr1.size();
ll = Vcr2.size();
Memo1->Lines->Add(" ===== dX, dY ===== ");
for(kk=0; kk<ii; kk++)
{
Cr2 = &Vcr1[kk];
for(mm=0; mm<ll; mm++)
{
Cr3 = &Vcr2[mm];
if(Cr2->Npair != Cr3->Npair) continue;
dX = Cr2->Pcross.x-Cr3->Pcross.x;
dY = Cr2->Pcross.y-Cr3->Pcross.y;

```

```

    }
}
// ===== Определение заряда частицы =====
Memo1->Lines->Add(" ===== Get ZZ ===== ");
for(kk=0; kk<ii; kk++)
{
    Cr2 = &Vcr1[kk];
    for(mm=0; mm<ll; mm++)
    {
        Cr3 = &Vcr2[mm];
        if(Cr2->Npair != Cr3->Npair) continue;
        dX = Cr2->Pcross.x-Cr3->Pcross.x;
        dY = Cr2->Pcross.y-Cr3->Pcross.y;
    }
}
Memo1->Lines->Add(" ===== Get Charge ===== ");
ZZ = StrToFloat(Edit6->Text);
nn = Cont.size();
for(ii=0; ii<nn; ii++)
{
    Ntr = Cont[ii].Xi;
    mm = GetLengthLong(Ntr, ZZ, &Ltr, &V1, &V2);

    kk = 0;
    TT = (T2+T1)/2;
    XX = Ltr*mu*(Slope+1/TT);
    for(oo=0; oo<44; oo++) //
        if(XX < Dist1[oo]) { kk++; break; }
    if(oo>=43) oo = 42; //
    if(oo==0) oo = 1; //
    Charge = InterPol(Dist1[oo-1], Dist1[oo], Dist1[oo+1], //
        Char1[oo-1], Char1[oo], Char1[oo+1], XX);
    if(XX>65)
        Charge = (1-pow(32.03/(XX+42.8),1.452))/0.0095; // Heavy !!!
    Zq = Charge;

    Charge2 = 0;
    if(Ltr > 150 && Ltr/TT > 10)
        Bisection1(Ltr, Ltr/TT, &Charge2);
    if(Charge2 >= 68) Charge = Charge2;

    VSOF2[jj].Z = Charge;
    Tracks.push_back(Charge);

    fprintf(Res," %d %d %d 12 %6.1lf %6.2lf %6.2lf \n",
        StrToInt(Edit3->Text), lcr, Ntr, Ltr, Ltr/TT, Zq); //, Charge2);
//    fprintf(Res," 12 %lf %d %d %d \n",
//        Zq, lcr, Ntr, StrToInt(Edit3->Text));

    Tracks.push_back(Zq);
} // ii Tracks

```

```
} // lcr cristal  
  
ii = Tracks.size();  
  
    for(jj=0; jj<ii; jj++)  
  
fclose(Res);  
}
```

Приложение 4. Текст блока программы выделения лучей звезды распада ядра.

```
void __fastcall TForm1::BitBtn3Click(TObject *Sender)
{
    int   ChoiceFiltre, ChoiceContrast, ChoiceThresh,
          Img, kk, ll, mm, nn, oo, pp, qq, MaxPix, Tx, Ty;
    uint8 * puCurrent, nn8, oo8;
    long   kkM, kkL;
    double X0, Y0;
    Cluster * Blob;
    TColor RRRR[20] = {clAqua, clBlue, clGreen, clDkGray,
                      clFuchsia, clGray, clGreen, clLime, clLtGray, clMaroon,
                      clMedGray, clMoneyGreen, clNavy, clOlive, clPurple, clRed,
                      clSilver, clSkyBlue, clTeal, clYellow}, Rcur;

    ChoiceFiltre = ComboBox2->ItemIndex;

    strcpy(sFileIn, Edit1->Text.c_str());
    // ===== Обработка исходного изображения =====
    Img = strlen(sFileIn);
    Img = MyIm->GetExtension(sFileIn,ext);
    ComboBox1->ItemIndex = Img;
    MyIm->ReadImagePropert(ScrollBar1, Image1,
                          &width, &height, sFileIn, Img);

    Edit3->Text = IntToStr(height);
    Edit2->Text = IntToStr(width);

    uint8 * pulImageBinary = new uint8[width*height];
    uint8 * puClusters     = new uint8[width*height];
    uint8 * puOutCont      = new uint8[width*height];
    // .....
    MyIm->GetImage2(&width, &height, Image1,
                  pulImageBinary,
                  sFileIn, Img);

    for(ll=0; ll<height-0; ll++)
        for(mm=0; mm<width-0; mm++)
        {
            kk = mm+ll*width;
            *(puClusters+kk) = *(pulImageBinary+kk);
        }
    puCurrent = puClusters;

    Clusters2.GetHistogram(width, height,puCurrent);

    Series1->Clear();
    Series1->Active = TRUE;
    Series2->Clear();
    Series2->Active = TRUE;
```

```

Series3->Clear();
Series3->Active = TRUE;

for(kk=0; kk<256; kk++)
    Series1->AddXY(kk, Clusters2.Histogram[kk], "", cYellow);
Chart1->LeftAxis->Maximum = Series1->MaxYValue()*1.2;
// ===== Последовательные операции обработки (сокращено) =====.
// ..... Filtering .....
// ..... Contrast .....
// ..... Fixed or Automatic threshold .....
// ..... Erode, dilate .....
// ..... FindClusters .....
// ..... Tracking .....
Clusters2.Tracking(height, width, puOutCont, 0);
// .....
Memo1->Lines->Add(" Size = "+IntToStr(mm)+
" Number of SubClusters = "+IntToStr(Clusters2.NumbSubClusters)+
" Number of Clusters = "+IntToStr(Clusters2.NumbClusters));

double ax, ay;
MyPoint PP;
CPoint Pc;
FILE * Res = fopen("Clusters.txt", "wt");

Image5->Height = height;
Image5->Width = width;
Image5->Top = 0;
Image5->Left = 0;
// ===== Обработка отдельных кластеров и поиск звёзд =====
kk = Clusters2.Clusters.size();
oo8 = 0;
for(ll=0; ll<kk; ll++)
{
    Blob = &Clusters2.Clusters[ll];
    mm = Blob->ClusterPoints.size();
    Blob->Gabarit();
    Blob->Area = mm;

    fprintf(Res,
"# %d %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf %6.2lf\n",
ll, Blob->Area, Blob->Centroid.x, Blob->Centroid.y,
Blob->Width, Blob->Length, Blob->Axis1, Blob->Gray);
    fprintf(Res,
"    Bottom (%d, %d) Top (%d, %d) Left (%d, %d) Right (%d,%d)\n",
Blob->Pbot.x, Blob->Pbot.y,
Blob->Ptop.x, Blob->Ptop.y,
Blob->Plef.x, Blob->Plef.y,
Blob->Prig.x, Blob->Prig.y);

    kkL = 0;
    oo8 = oo8 < 19 ? oo8+1 : 0;
    Rcur = RRRR[oo8];

```

```

for(lmg=0; lmg<mm; lmg++)
{
kkM = Blob->ClusterPoints[lmg].x+
    Blob->ClusterPoints[lmg].y*width;
kkL += *(pulmageBinary+kkM);
Blob->ClusterPoints[lmg].Gray = *(pulmageBinary+kkM);
fprintf(Res,
"      %d %6.0lf %6.0lf %d %d \n",
lmg, Blob->ClusterPoints[lmg].x, Blob->ClusterPoints[lmg].y,
Blob->ClusterPoints[lmg].State,Blob->ClusterPoints[lmg].Gray);
} // lmg

// ===== Признак кандидата звезды =====
if((Blob->Prig.x-Blob->Plef.x)*
    (Blob->Pbot.y-Blob->Ptop.y)/Blob->Area >20)
{

// ===== Обработка кандидата звезды =====

    Clusters2.LinesConstruction(Blob); // Построение сетки в поле кластера звезды
    Tx = Blob->Plef.x;
    Ty = Blob->Ptop.y;

///    Clusters2.StarProceeding(Blob);

    lmg = Clusters2.SetC.size();
    for(nn=0; nn<60; nn++)
// ===== Поиск пересечения сетки и кластера звезды =====
    for(nn=0; nn<lmg; nn++)
    {
        MaxPix = Clusters2.SetC[nn].ClusterPoints.size();
        if(MaxPix < 2) continue;
        Blob = &Clusters2.SetC[nn];
        oo = Blob->Plef.x;
        oo = Blob->Plef.y;

        X0=Y0=0;
        qq=pp=0;
        for(oo=0; oo<MaxPix; oo++)
        {
            PP = Blob->ClusterPoints[oo];

            Form1->Image5->Canvas->Pixels[PP.x-1][PP.y-1] = RRRR[15];

            if(qq == PP.State)
            {
                X0 += PP.x;
                Y0 += PP.y;
                pp++;
            }
            else
            {

```

```

    if(pp != 0)
        pp=0;
    }
    if(oo == MaxPix-1 && MaxPix != 1)
        qq = PP.State;
    } // oo

    Image5->Canvas->Pen->Width = 2;
    Image5->Canvas->Pen->Color = clRed;
    Image5->Canvas->Pen->Width = 2;
    PP = Blob->ClusterPoints[0];
    Image5->Canvas->MoveTo(PP.x,PP.y);

    PP = Blob->ClusterPoints[MaxPix-1];
    Image5->Canvas->LineTo(PP.x,PP.y);
} // nn
} // if Blob

if(Blob->Width > 0 && Blob->Length/Blob->Width > 4 && ll != 0)
{
    X0 = tan(Blob->Axis1*3.1416/180);
    for(nn=0; nn<Blob->Pbot.y-Blob->Ptop.y; nn++)
    {
        PP.y = Blob->Ptop.y+nn;
        PP.x = Blob->Centroid.x-(Blob->Centroid.y-PP.y)/X0;
    }

}

fprintf(Res,"-----\n");
}
fprintf(Res,"-----");
fclose(Res);

// ===== Построение лучей найденных звёзд =====

Res = fopen("Rais_1.txt","wt");
// ===== Сбор
ll = Clusters2.Rays.size();
for(mm=0; mm<ll;mm++)
{
    for(kk=mm+1; kk<ll; kk++)
    {
        nn = Math1->Intersept(Clusters2.Rays[mm].a0,
            Clusters2.Rays[mm].b0,Clusters2.Rays[kk].a0,
            Clusters2.Rays[kk].b0, &PP);
        Memo1->Lines->Add(" Intersept: mm "+IntToStr(mm)+
            " kk "+IntToStr(kk)+
            " X "+FloatToStrF(PP.x,ffGeneral, 4,2)+
            " Y "+FloatToStrF(PP.y,ffGeneral, 4,2));
    }
}

```

```

kk = Clusters2.Rays[mm].Cuts.size();
fprintf(Res, " %d %d %6.1f %6.3f %6.1f %6.1f \n",
        mm, Clusters2.Rays[mm].NumbRay,
        Clusters2.Rays[mm].a0, Clusters2.Rays[mm].b0,
        Clusters2.Rays[mm].Xmin, Clusters2.Rays[mm].Xmax);
// .....

X0 = Clusters2.Rays[mm].Xmin+Tx;
Y0 = Clusters2.Rays[mm].a0+ Clusters2.Rays[mm].b0*(X0-Tx)+Ty;

Image5->Canvas->Pen->Color = clRed;
Image5->Canvas->Pen->Width = 2;
Image5->Canvas->MoveTo(X0,Y0);
X0 = Clusters2.Rays[mm].Xmax+Tx;
Y0 = Clusters2.Rays[mm].a0 + Clusters2.Rays[mm].b0*(X0-Tx)+Ty;

// ===== Запись результатов в файл =====.

for(nn=0; nn<kk; nn++)
{
    pp = Clusters2.Rays[mm].Cuts[nn];
    qq = Clusters2.SetC[pp].ClusterPoints.size();
    fprintf(Res, " %d %d %6.1f %6.1f %d\n",
            nn, Clusters2.SetC[pp].CapacityX,
            Clusters2.SetC[pp].Centroid.x,
            Clusters2.SetC[pp].Centroid.y, qq);

}
}

fclose(Res);

if(CheckBox5->Checked)
{
    strcpy(sFileFig, "Clusters1.bmp");
    MyIm->PutImage1(ScrollBar4, Image4,
                    width, height, puOutCont, sFileFig, 1, 1);
}
delete[] pulmageBinary;
delete[] puClusters;
delete[] puOutCont;
}

```