

Учреждение Российской академии наук
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н.ЛЕБЕДЕВА РАН

На правах рукописи

Старков Николай Иванович

**Программный комплекс для анализа данных трековых детекторов
методами распознавания образов и его применение в физике высоких
энергий, элементарных частиц и космических лучей**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2010

Содержание

| | |
|---|-----|
| I. Введение. Твёрдотельные детекторы и их применение в физике высоких энергий, элементарных частиц и космических лучей... | 3 |
| II. Установка ПАВИКОМ. Особенности поиска следов заряженных частиц в твёрдотельных детекторах методами распознавания образов..... | 9 |
| III. Предварительная обработка изображений. Кластеризация. Бинаризация..... | 36 |
| IV. Определение параметров треков и характеристик заряженных частиц в экспериментах с ядерными фотоэмульсиями..... | 57 |
| 1. Исследование структуры нейтроноизбыточных ядер в экспериментах с ядрами ${}^6\text{He}$ | 57 |
| 2. Методика измерения зарядов релятивистских ядер в толстослойных эмульсиях..... | 69 |
| 3. Изучение спектров электронов внутренней конверсии ядер группы лантаноидов | 80 |
| V. Исследования на основе методики твёрдотельных трековых детекторов..... | 85 |
| 1. Измерение характеристик потока нейтронов в пластиковых детекторах в эксперименте "Энергия плюс Трансмутация"..... | 85 |
| 2. Изучение зарядового распределения тяжёлых и сверхтяжёлых ядер космических лучей по их следам в оливинах из метеоритов..... | 96 |
| VI. Применение нейронной сети для обработки данных RICH- детектора..... | 123 |
| VII. Заключение. | 142 |
| VIII. Приложение. Краткое описание структуры программного комплекса..... | 144 |
| Литература..... | 153 |

I. Введение.

Твёрдотельные детекторы и их применение в физике высоких энергий, элементарных частиц и космических лучей.

Целью данной работы было создание программного комплекса (ПК), разработанного на основе метода распознавания образа и использованного для анализа треков частиц целого ряда экспериментов в физике высоких энергий, элементарных частиц и космических лучей. На защиту выносятся ПК для обработки изображений в трековых детекторах и результаты его применения на установке ПАВИКОМ [1-4], а также результаты использования искусственной нейронной сети, разработанной в рамках ПК для анализа изображений RICH детектора [5,6].

Твёрдотельные трековые детекторы (в том числе ядерные фотоэмульсии) широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий [7-11]. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с их уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Так, например, 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. Использование двусторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее одного миллирадиана. Простота твёрдотельных трековых детекторов (ТТД) также обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими системами детектирования. Метод трековых детекторов непрерывно развивается, совершенствуется его методика, и в настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он не использовался. Это и физика высоких энергий, и физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород.

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 приборов с зарядовой связью (CCD-камеры) 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 для обработки и анализа изображений 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 CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение, реконструировать вершины взаимодействия и т. д.

В связи с созданием в ФИАН автоматизированного комплекса ПАВИКОМ [1-4] возникла необходимость создания программных продуктов, способных восстанавливать треки заряженных частиц в трековых детекторах. Изначально комплекс создавался для обработки материалов эксперимента EMU-15 [12-15], в котором эмульсионная камера, включающая свинцовую мишень толщиной 0,4

мм с последующей стопкой из 38 слоёв фотоэмульсии, облучалась пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон. Однако, универсальность и потенциально большие аппаратные возможности комплекса ПАВИКОМ позволили использовать его для существенно более широкого круга задач. В настоящее время на ПАВИКОМ'е обрабатываются детекторы практически всех типов трековых детекторов (фотоэмульсии, рентгеновские плёнки, майлар, пластик, кристаллы). Фактически ПАВИКОМ работает в режиме центра коллективного пользования. Сотрудники примерно 10 российских и нескольких иностранных институтов совместно с фиановской группой ПАВИКОМ проводят обработку и анализ экспериментальных данных. При этом фиановская группа ПАВИКОМ активно участвует в создании специализированного программного обеспечения, проведении сканирования и в физическом анализе результатов.

Проблема восстановления треков частиц в объёме детектора возникла давно, с появлением первых ионизационных, пузырьковых и искровых камер, в которых трек частицы возникает как последовательность капель жидкости, пузырьков и электрических разрядов [16-18]. В отличие от этих камер, следы, возникающие в твёрдотельных детекторах, несут информацию о свойствах частицы не только своим расположением в пространстве, но также геометрическими размерами, формой и другими характеристиками. Задачи по выявлению объектов на изображениях со сложным набором характеристик относятся к классу задач на распознавание образа. Метод распознавания образа [19-22] широко используется в самых различных областях науки и техники, где имеется множество задач, связанных с обработкой изображений. Это, например, анализ и интерпретация аэрофотоснимков и космических снимков в науках о Земле, в метеорологии, астрономии, исследовании природных ресурсов; анализ оптических, рентгеновских, тепловых, радиографических и других изображений в медицинской диагностике, промышленной дефектоскопии, научных исследованиях и т.д. Широкое использование метода распознавания образа привело к разработке многочисленных методов и алгоритмов работы с изображениями.

В то же время следует отметить, что не существует универсальных алгоритмов, применимых для обработки всех типов изображений, в том числе

снимков следов частиц в ТТД. Это обусловлено большим разнообразием геометрических форм и конфигураций треков, образуемых следами частиц в разных материалах. По этой причине для программного пакета ПАВИКОМ'a был создан целый ряд оригинальных алгоритмов, учитывающих индивидуальные особенности характеристик следов частиц в различных материалах. При возникновении новых задач, в которых треки имеют новые характеристики, программный комплекс может быть дополнен соответствующими алгоритмами. Таким образом, открытый характер и универсальность созданного программного комплекса позволяют осуществлять его расширение и развитие применительно к новым задачам и условиям обработки.

При создании программного комплекса автор опирался на опыт объектно-ориентированного программирования с искусственными нейронными сетями [22-24]. Искусственные нейронные сети разрабатываются с 60-х годов 20-го века [25, 26]. Их устройство основано на принципах работы отдельных элементов мозга, открытых в опытах с животными и человеком. Автором был создан программный пакет, реализующий работу нейронной сети. Его применение позволили намного повысить эффективность обработки изображений RICH-детектора. Этот пакет включён в рассматриваемый программный комплекс как самостоятельный модуль.

Структура работы следующая.

В первом разделе первой главы описана автоматизированная установка ПАВИКОМ, на которой анализируются следы частиц в ТТД, системы управления движением микроскопа и считывания изображений. В следующем разделе проведен сравнительный анализ характеристик следов частиц в различных экспериментах и дана оценка качества изображений с точки зрения возможностей их обработки. Решающее значение при анализе изображений имеет эффективность выделения тех областей, которые соответствуют изучаемому объекту, в нашем случае следу частицы. Поскольку при реализации этой задачи используется методы распознавания образов [27-33], в данном

разделе приводятся основные сведения о методах обработки изображений, выделения на них анализируемых объектов и определения их характеристик.

Во второй главе основное внимание уделено описанию методов выделения следов частиц на изображениях. Процедура выделения содержательных областей изображения называется кластеризация и включает несколько этапов.

В первой части главы описан первый этап - предварительная обработка изображения, облегчающая отделение искомых областей от фона и которая может быть разной в зависимости от качества изображений и особенностей характеристик треков. Поскольку программный комплекс предполагает автоматическую обработку больших наборов изображений, разработаны специальные алгоритмы, способные независимо от человека оценить оптимальный набор преобразований изображения. Их описание приведено в данной части.

Во второй части главы описывается алгоритм следующего этапа кластеризации – сегментации, первым этапом которой является бинаризация, то есть разбиение изображения на две области: фон и анализируемые объекты. Основным методом, используемый на этом этапе, заключается в анализе гистограммы почернений и определении порога почернения, т. е. такого уровня, на котором следы частиц и фон (в том числе посторонние пятна, царапины и т. д.) разделяются максимальным образом. Следующий этап заключается в выделении следов частиц, как самостоятельных объектов.

На последнем этапе для отбора кластеров, подлежащих дальнейшему анализу, определяются специфические характеристики треков (пространство признаков): геометрические размеры, площадь кластеров, направление оси вытянутых кластеров и так далее. На примере экспериментов, обрабатываемых на комплексе ПАВИКОМ, более детально описаны различные алгоритмы, используемые при кластеризации.

В третьей и четвертой главах описаны методы и алгоритмы, осуществляющие трекинг, то есть построение трека частицы в пространстве и определение его характеристик. В силу существенного различия свойств используемых частиц, характеристик изображений и пространственного расположения треков в разных экспериментах, описание трекинга проводится

по разделам, относящимся к различным постановкам экспериментов. В тех же разделах приведены результаты физического анализа экспериментальных данных, полученных при обработке с использованием созданного программного пакета.

В пятой главе описан программный модуль, моделирующий работу нейронной сети, и результаты его применения при анализе данных RICH-детектора.

Заключение содержит основные результаты работы и выводы.

В Приложении представлено краткое описание структуры программного комплекса и принципов работы отдельных элементов.

Глава II. Установка ПАВИКОМ. Особенности поиска следов заряженных частиц в твёрдотельных детекторах методами распознавания образов.

Принцип регистрации элементарных частиц в твёрдотельном трековом детекторе основан на появлении областей ионизации и повреждений структуры материала в объёме детектора при прохождении через него заряженной частицы [9-11]. Нейтральная частица также может быть зарегистрирована по ионизации, создаваемой вторичными заряженными частицами. После химической обработки детектора (проявление в случае фотоэмульсии или травление в случае пластика или минерала) в нём образуются микроскопические неоднородности (зёрна серебра в фотоэмульсии или полость в пластике или минерале), которые можно увидеть с помощью оптического микроскопа. Размеры и форма этих неоднородностей зависят от физических характеристик частиц: скорости, заряда и массы. Анализ следов частиц позволяет восстановить пространственное положение трека и характеристики частиц.

ПАВИКОМ состоит из двух независимых полностью автоматизированных установок ПАВИКОМ-1 и ПАВИКОМ-2, различающихся, прежде всего, величиной перемещений оптических столов, и, соответственно, допустимыми размерами пленок для обработки.

Основные узлы установки ПАВИКОМ-1 (рис. 1а) включают прецизионную механическую систему MICOS, оптическую систему в виде микроскопа с использованием элементной базы ЛОМО и CCD-камеру системы VS-СТТ фирмы «Видеоскан» сопряжённую с компьютером. Она предназначена для обработки трековых детекторов больших размеров: до 40X80 см².

Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 (рис. 1) создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО. Основные узлы установки ПАВИКОМ-2:

- прецизионный стол немецкой фирмы Carl Zeiss с блоком управления;
- цифровая CCD-камера или CMOS-камера (в зависимости от задачи);
- система для управления микроскопом, захвата и обработки изображений из двух персональных компьютеров с видеопроцессором.

Пределы автоматического горизонтального 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 0,25 мкм, по оси Z – 0,1 мкм.



а



б

.....Рисунок 1. Установка ПАВИКОМ-1 (а) и ПАВИКИМ-2 (б).

Матрица CCD-камеры имеет размеры 768×576 пикселей и глубину цвета 8 бит (256 градаций серого). Изображение в камере создается объективом микроскопа, с увеличением до $90\times$. Аналоговый видеосигнал, формируемый

видеокамерой, подаётся на вход аналого-цифрового преобразователя – карты захвата и оцифровки изображения, которая передаёт оцифрованный видеосигнал в память компьютера. При этом быстродействующая CMOS-камера имеет размер матрицы 1280x1024 пикселей и позволяет обрабатывать до 500 кадров/сек.

Основные задачи, выполняемые на автоматизированных микроскопах ПАВИКОМ, связаны с распознаванием, восстановлением и анализом треков в объёме детектора. Это предполагает сканирование по всем трём координатам. При этом, как правило, изображение трека попадает на одно поле зрения (фиксировано положение микроскопа по осям X и Y), а пространственная картина трека восстанавливается по его изображениям на разных уровнях по Z . В случае толстых эмульсий число уровней по Z может превышать 150.

Изображение, получаемое в CCD-камере и передаваемое на компьютер, представляет собой прямоугольную область, образуемую набором мелких прямоугольников, называемых пикселями. Их количество по горизонтали задает ширину изображения, а по вертикали – высоту. Таким образом, положение отдельного пикселя определяется дискретными координатами X и Y . Помимо координат X и Y они имеют параметры, характеризующие цвет соответствующей точки и её яркость. В рассматриваемом круге задач изображения, как правило, одноцветны, а разные точки на нем различаются только степенью яркости (градации серого). В большинстве случаев следы частиц создают более тёмные области, по сравнению с фоном, поэтому в качестве дополнительной характеристики пикселя обычно принимается степень его потемнения.

Изображение состоит из ряда областей разной степени потемнения. Эти области можно разбить на несколько групп. Наиболее обширная область, как правило, принадлежит фону и характеризуется гладким, постепенным изменением степени потемнения. Другую группу пятен можно назвать помехами. В неё входят образования (пятна и посторонние включения), которые по размерам и форме отличаются от тех, что образуются искомыми объектами. Третья группа содержит пятна, имеющие размеры и форму такие же, как и следы прошедших через материал частиц. Четвёртая группа – следы частиц.

Именно объекты последней группы должны быть выделены, прежде чем можно будет приступить к детальному анализу характеристик частиц. Эта задача носит название кластеризация и, в свою очередь разбивается на несколько этапов, на каждом из которых для повышения эффективности обработки используются целый ряд специальных приемов. Однако качество изображений, их структура, а также характеристики фона и полезного сигнала, сильно различаются в разных задачах. По этой причине наряду с использованием стандартных приемов обработки их приходится модифицировать, приспособлявая к конкретным условиям, а иногда и разрабатывать совершенно новые алгоритмы, более эффективные при данных характеристиках изображений.

Чтобы продемонстрировать такое различие, ниже приведены примеры изображений, полученных в разных экспериментах. Здесь приведено только краткое описание соответствующих экспериментов. Более подробно они будут описаны в последующих главах при обсуждении методов обработки конкретных экспериментов.

1. Эксперимент EMU15 [12-15]. В этом эксперименте пучок ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон (полная энергия 32,8 ТэВ) направлялся на эмульсионную камеру, включающую в качестве мишени свинцовую пластину толщиной 0,4 мм и 38 слоев ядерной эмульсии толщиной 50 мкм за ней. Наибольший интерес представляют такие столкновения ядер свинца, при которых не образуется тяжёлых фрагментов и очень велика множественность вторичных заряженных частиц. Интерес к таким событиям связан с теоретическими представлениями, в соответствии с которыми именно во взаимодействии частиц с большой множественностью наиболее велика вероятность обнаружения кварк-глюонной плазмы. Средняя множественность в таких событиях составляет более тысячи. Изображение центрального поля зрения (60×80 мкм²) такого взаимодействия приведена на рисунке 2. Следы от частиц представляют собой цепочку зёрен размером от 0,4 мкм до 1 мкм в пространстве со средним числом 35 зёрен на 100 мкм. Для обработки одного взаимодействия ядер Pb с энергией 158 ГэВ/нуклон требуется отсканировать в плоскости XY 25 таких полей зрения и 20 кадров по глубине с шагом 1 мкм.

2. Эксперимент ОПЕРА [27-29]. Этот эксперимент проводится с целью поиска осцилляций мюонных нейтрино на большой пролетной базе – 730 км. Нейтринный пучок формируется на ускорителе SPS (CERN) и регистрируется детектором – подземной установкой в лаборатории Гран-Сассо (Италия). Пучок мюонных нейтрино от SPS, проходя через Землю путь около 730 км, испытывает осцилляции (если они существуют), т.е. частично превращается в нейтрино других типов, в том числе в тау нейтрино. Задача эксперимента – обнаружить появление в пучке тау нейтрино и тем самым напрямую подтвердить существование осцилляций. OPERA – первый и пока единственный эксперимент "на появление", в отличие от всех других экспериментов по поиску нейтринных осцилляций "на выбывание". Мишенью служат специальные камеры – «кирпичи», состоящие из 57 двухсторонних эмульсионных плёнок (детектор), прослоенных 56 пластинами свинца (мишень) толщиной 1 мм. Общая масса мишени – 10000 тонн, из них более 100 тонн составляет эмульсия. Критерий присутствия тау нейтрино – образование тау

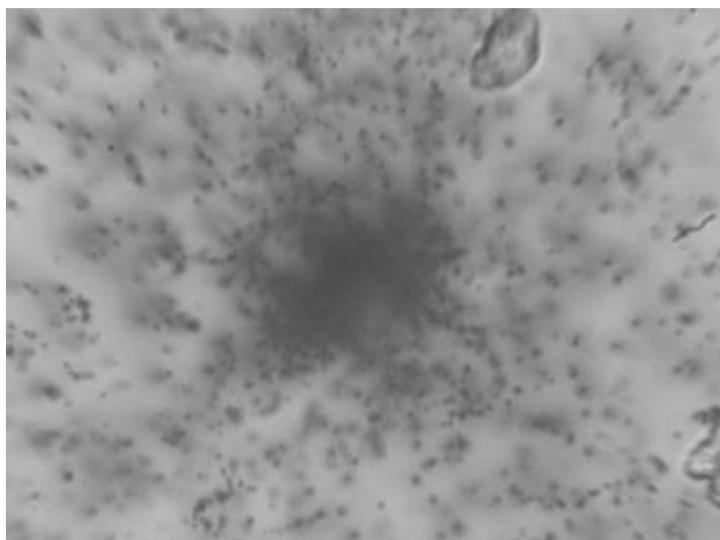


Рисунок 2.

лептона при взаимодействии тау нейтрино с мишенью. Так как взаимодействие с нейтрино происходит, в основном, в свинце, а время жизни тау лептона мало, он будет распадаться преимущественно внутри свинцовой мишени и его

идентификация будет производиться путем восстановления кинематики продуктов распада тау лептона.

Типичная картина одного поля зрения эмульсии эксперимента OPERA представлена на рисунке 3. Размер изображения 325×300 мкм², увеличение $50\times$. Основная масса пятен на изображении это обычная вуаль и следы комптоновских электронов. Стандартная величина вуали на плёнках эксперимента OPERA составляет 5-6 зерен на 1000 мкм³.



Рисунок 3.

3. Анализ треков ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов [37-39].

Метеориты – космические тела, путешествующие в космическом пространстве десятки и сотни миллионов лет. За это время они подвергаются

облучению первичными космическими лучами, в том числе тяжёлыми и сверхтяжёлыми ядрами, среди которых могут быть и стабильные трансфермиевые ядра, если существует так называемый остров стабильности [33]. Следы от ядер остаются в материале метеоритов и могут быть обнаружены при использовании специальных методов, в частности, с помощью травления. Хорошие возможности существуют при исследовании метеоритов из семейства

паласситов. Основной объём этих метеоритов занимает железо, в котором имеются включения из полупрозрачного минерала – оливина. Следы космических частиц в этом материале могут быть исследованы после травления с помощью оптического микроскопа. На рисунке 4 приведен пример изображения, полученного на ПАВИКОМ, содержащего более десятка треков ядер, видимых после травления. Увеличение $40\times$.

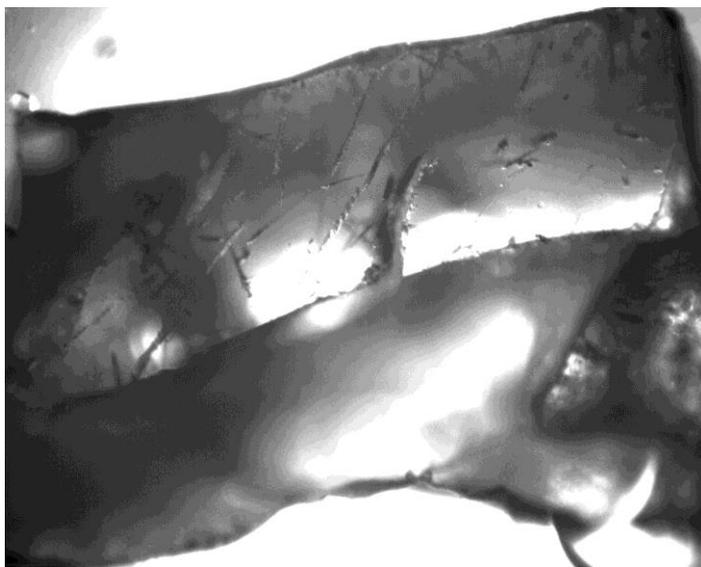


Рисунок 4.

4. Анализ характеристик ядер при продольном облучении толстых ядерных эмульсий. В серии экспериментов изучались периферические взаимодействия релятивистских ядер с целью изучения их кластеризации [41-44]. В этих экспериментах использовались толстослойные эмульсии (толщина порядка 600 мкм), облученные вдоль их поверхности ядрами с энергией несколько ГэВ на нуклон. Одной из задач исследования было определения заряда ядра по характеристикам следа в фотоэмульсии (см. рисунок 5), которая была решена путём использования калибровочных кривых, построенных с помощью созданного программного пакета и позволяющих в автоматическом режиме осуществить процедуру определения заряда ядра. Увеличение $40\times$.

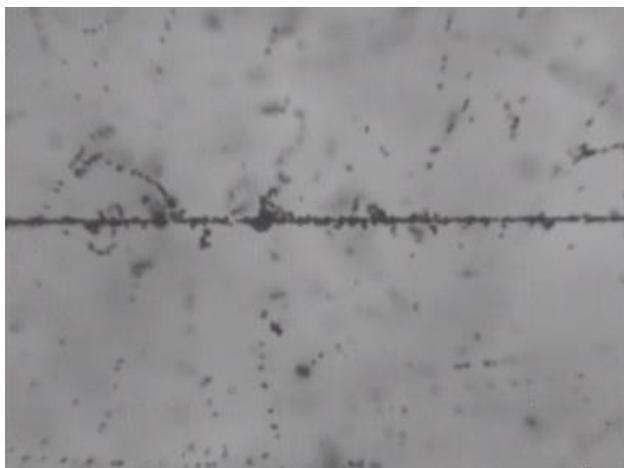


Рисунок 5.

5. Исследование нейтронного гало нейтронно-избыточных ядер.

В данном эксперименте изучалась двухнейтронная конфигурация в ядре ${}^6\text{He}$ с целью анализа особенностей взаимодействия двух избыточных нейтронов в поле ${}^4\text{He}$ - центральной части этого ядра. Эмульсионная камера, состоявшая из шести слоёв ядерной фотоэмульсии толщиной 400 мкм каждая, облучалась ядрами ${}^6\text{He}$ с энергией 60 МэВ перпендикулярно поверхности [45-48]. Типичная картина треков на одном уровне по глубине после проявки показана на рис. 6 (увеличение $40\times$).



Рисунок 6.

6. Измерение потоков нейтронов с помощью твердотельного детектора в эксперименте "Энергия плюс трансмутация" [49-51].

В этом эксперименте исследовались возможности электроядерного способа производства энергии и изучения возможной трансмутации радиоактивных отходов. Под действием протонного пучка с энергией 1 ГэВ в цилиндрической свинцовой мишени возникал поток нейтронов, попадавший в урановый blanket, окружавший мишень. Нейтроны, проникающие в уран, вызывали его распад и дополнительный поток нейтронов. Требовалось определить зависимость потока нейтронов как функцию расстояния от мишени. Регистрация нейтронов производилась с помощью детектора из лавсана или майлара с радиаторами из тория и золота. Типичное изображение треков от осколков ядер после травления приведено на рис. 7а и 7б при разных величинах потоков (увеличение $20\times$). Следует отметить особенность рисунка 7б, на котором многие следы частиц пересекают друг друга, что делает невозможным подсчёт количества следов обычными методами при больших потоках нейтронов.

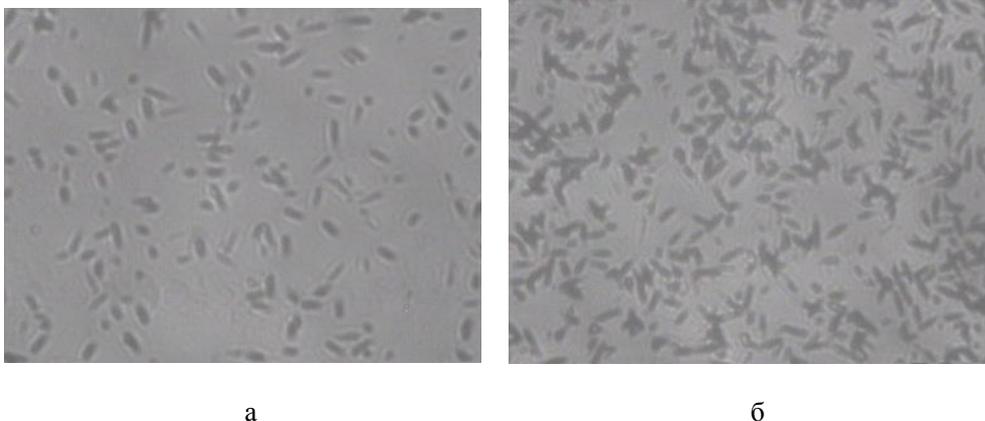


Рисунок 7.

7. Анализ гамма-переходов ядер группы лантаноидов.

Существуют многочисленные эксперименты по определению линий гамма-переходов. Однако данные по ядерным линиям, имеющиеся в атласах [52], неполны и существует необходимость их дополнения. С этой целью был поставлен эксперимент по идентификации линий путём регистрации электронов

внутренней конверсии и определения их энергии. На рисунке 8 показана часть изображений спектроскопических линий нескольких возбуждённых ядер группы лантаноидов, возникших в результате распада ядра эрбия (увеличение $8\times$).

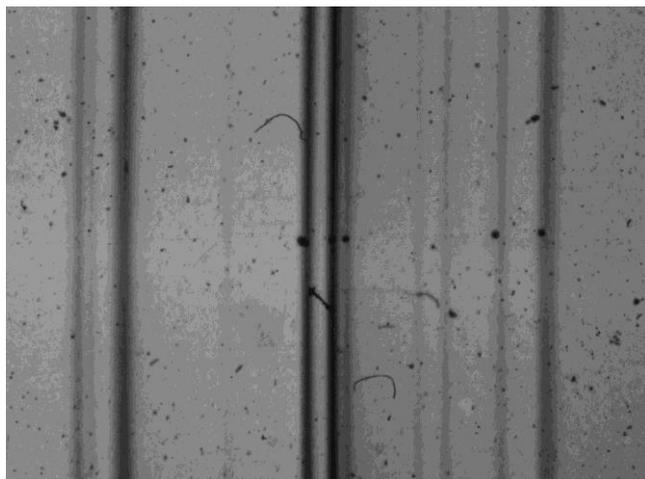


Рисунок 8.

8. Следы заряженных частиц при электрохимическом методе травления.

Такой метод травления часто используют в дозиметрии для увеличения размера протравленных каналов при подсчёте их числа [10]. Метод заключается в травлении, сопровождаемом приложением переменного электрического поля (напряжённость десятк КВ/см, частота ~ 1 КГц). При достижении определённой глубины травления под действием поля развивается электрический пробой фрактального типа, приводящий к сложной картине микроразрядов (см. рисунок 9) 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 рис. 9 передано в группу ПАВИКОМ коллегами из Физического института в Каире с просьбой помочь им при автоматизации его обработки. В следующей главе будет показано, что алгоритмы, разработанные в

рассматриваемой программном комплексе, позволяют преодолеть указанную выше трудность и полностью восстановить форму "звезды" любой сложности и произвести требуемый подсчёт автоматическим путём.

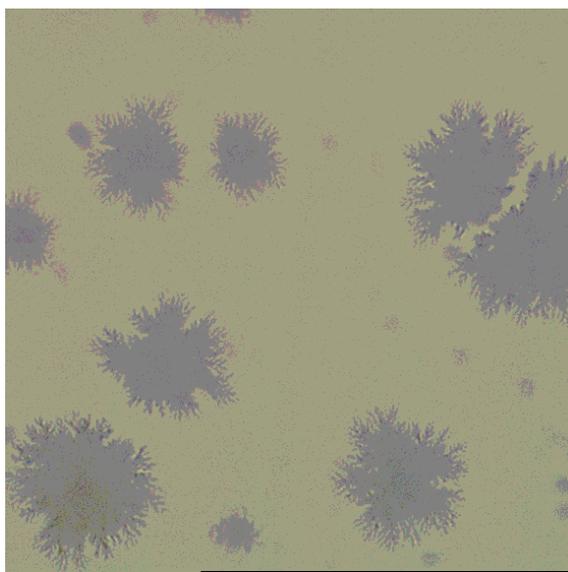


Рисунок 9.

Приведённые выше примеры демонстрируют большое разнообразие форм следов частиц. Очевидно, что по этой причине невозможно добиться большой эффективности обработки перечисленных выше изображений в рамках одного программного продукта, поскольку потребовалось бы учесть слишком много различных особенностей следов частиц. В случае же возникновения новых задач с характеристиками, не учтёнными ранее, возникли бы большие затруднения по настройке программы на новые условия.

В связи с вышесказанным было принято решение использовать блочно-модульный подход и реализовать задачу автоматизации распознавания и анализа треков в виде программного комплекса. При таком подходе весь процесс обработки исходных изображений разбивается на последовательные этапы, которые, в свою очередь, делятся на более мелкие шаги. Эти шаги присутствуют во многих задачах на распознавание треков, хотя и в разных комбинациях. Потому, при наличии отдельных программных модулей,

соответствующих различным этапам и шагам обработки, комбинируя их, можно воспроизвести необходимую для данной задачи последовательность действий.

Выделение и анализ объектов с определёнными характеристиками на изображении относятся к задачам на распознавание. Использование подхода, связанного с методом распознавания, вначале возник в технике в связи с необходимостью обработки электрических и акустических сигналов. Основной проблемой было наличие различного рода шумов, которые вносили искажения в исходный сигнал и затрудняли его интерпретацию. Развитие соответствующих средств привело к созданию различного вида устройств (в основном, электрических) по ослаблению искажений и выделению сигнала на фоне шума. В основном, это были различного рода фильтры, которые вырезали определённый участок частот в спектре сигнала, а также устройства по восстановлению в некоторой степени его формы. Практическая потребность привела к развитию соответствующих математических методов и приёмов, основу которым составило разложение сигнала в ряд Фурье.

С появлением аэрофотосъёмки, с последующим широким распространением телевидения и других методов получения и передачи изображений, область применения метода распознавания существенно расширилась [28, 31]. Особенно интенсивно он стал развиваться в связи с появлением телевидения и необходимостью обработки и устранения помех телевизионного изображения, в частности, выявления подозрительных объектов (в том числе движущихся) на камерах видеонаблюдения, установленных на спутниках, самолётах и на Земле.

В связи с этим в информационных технологиях появился и развивается особый раздел - распознавание образов [32-33]. Этот термин на самом деле не имеет чёткого определения и посвящён приемам и методам исправления и восстановления двумерных изображений, а также выделения на нём объектов с определёнными характеристиками. Имеется много таких методов: интегральные, примером которых является разложение в двумерный ряд Фурье по синусам и косинусам или по другим наборам функций (Адамара, Уолша и т. д.), обработка с помощью локальных линейных и нелинейных преобразований (фильтрация), использование методов нечётких множеств, нейронных сетей, вейвлет-анализа

и т. д. Несмотря на такое разнообразие методов, процедура обработки изображений, как правило, включает четыре последовательных этапа обработки:

1. Предварительная обработка изображений. Цель этого этапа провести такое преобразование исходного изображения, чтобы по возможности отделить фон и помехи от анализируемых объектов.

2. Кластеризация (сегментация) – выделение анализируемых областей изображения как самостоятельных объектов и определение их характеристик.

3. Анализ кластеров и классификация отобранных объектов в соответствии с выбранным пространством признаков, распределение их по группам, исключение оставшихся помех.

4. Содержательный анализ полученных объектов и их групп.

В общем случае в пункты 3 и 4 вышеприведённого списка входят как простые признаки, такие как цвет, размер, форма и т.п., так и более сложные: текстура отдельных участков изображения, наличие деталей определённой формы у кластеров, наличие движущихся объектов и т.д. Созданный программный пакет имеет более узкое применение и, соответственно, использует меньший набор признаков. Поэтому в дальнейшем обсуждаются только те методы обработки изображений и наборы признаков анализируемых объектов, которые необходимы в рассматриваемых задачах. В частности, в главе V (раздел 1) и в главе VI будут рассмотрены примеры применения методов нечёткой логики и нейронных сетей, соответственно.

Приведённые выше этапы обработки находят своё отражение в структуре созданного программного комплекса, который включает следующие блоки обработки и анализа:

1. Блок, включающий операции с графическими файлами различных форматов и с видеопамятью компьютера и видеоплаты для работы с автоматизированным микроскопом.
2. Блок обработки изображений, включающий следующие разделы:

- Алгоритмы линейных преобразований изображений (градиентные, Лапласа, сглаживающие и т.д.).
 - Алгоритмы нелинейных преобразований изображений (медианные фильтры, повышение контраста и яркости, логические операции и т.д.).
 - Операции с гистограммой почернений (аппроксимация пиков несколькими функциями Гаусса, алгоритмы поиска порога отсечения фона, автоматизированная оценка качества изображений).
 - Операции по выделению кластеров треков и элементов треков частиц как самостоятельных объектов. Комплект классов для хранения информации о кластерах и их наборах.
 - Процедуры определения характеристик кластеров.
3. Блок операций по поиску треков, вершин взаимодействия и их характеристик для разных экспериментальных задач. Комплект классов для хранения информации о треках.
 4. Блок математических операций, содержащий:
 - Комплект классов элементарных геометрических объектов в двух- и трёх-мерном пространстве - точки, прямые линии и операции с ними .
 - Алгоритм минимизации функционала на основе алгоритма Нелдера-Мида и набор классов для аппроксимации точек методом наименьших квадратов (аппроксимация наборов точек функциями Гаусса и Ландау, аппроксимация набора точек прямыми на плоскости и в пространстве с учётом возможных выбросов, аппроксимация произвольными функциями и т.д.).
 5. Блок визуализации. Представление результатов работы комплекса в виде последовательности точек, кривых, гистограмм и поверхностей.
 6. Блок, выполняющий программным путём работу нейронной сети Хопфилда с обратным распространением ошибки (обучение и рабочий режим).

Такое деление соответствует также объектно-ориентированному подходу в программировании, принятому в языке C++ [53], который использовался для создания программного комплекса. В таком представлении крупные блоки делятся на более мелкие объекты (классы), которые, в свою очередь, подразделяются на ещё более мелкие части. В итоге возникает иерархия классов,

в целом воспроизводящая структуру системы в целом, свойства отдельных частей и связей между ними. В каждой новой задаче из имеющихся объектов собирается своя структура, отражающая особенности данной задачи. Более детально структура программного комплекса представлена в Приложении.

На первом этапе обработки изображений производится их предварительное преобразование, с целью сделать различие между фоном и искомыми объектами по возможности более резким. Большинство алгоритмов такого преобразования изображений, обычно называются фильтрами, так как многие из соответствующих методов и алгоритмов используют приёмы, разработанные для обработки электрических и акустических сигналов, когда с помощью специальных устройств отсекаются или ослабляются те или иные частоты колебаний.

Этапы, связанные с пунктами 3, во многом индивидуальны и зависят от особенностей изображения и целей исследования. Они будут рассмотрены далее в главах IV, V и VI. В первых же двух пунктах используются схожие методы. Рассмотрим здесь кратко основные из них.

Предварительная обработка изображений.

В этом разделе будут рассмотрены общие приёмы, используемые на предварительном этапе обработки. Конкретные примеры и результаты их применения будут приведены в следующей главе.

Основной приём при отделении кластеров анализируемых объектов от фона и помех заключается в задании порогового уровня степени почернения L . Области изображения, имеющие степень почернения большую L относят к анализируемым объектам и запоминают, а меньшую - отбрасывают. Однако на исходных изображениях такая процедура редко приводит к успеху, так как в силу неравномерности фона и наличия помех часть анализируемых объектов может иметь степень почернения меньшую, чем фон, и может быть потеряна для анализа. Кроме того, границы объектов могут быть сильно размыты, что затрудняет их выделение. Предварительная обработка способствует

выравниванию фона, усилению кластеров анализируемых объектов и созданию более резких границ. В первое время, до широкого распространения компьютеров и цифровых видеокамер, преобразования изображений осуществлялись с помощью оптических методов [27]. В последние два десятилетия практически вся обработка производится на компьютерах.

Методы преобразования изображений могут быть разбиты на три категории в зависимости от затрагиваемых областей: глобальная, локальная и точечная. При глобальных преобразованиях новое значение пиксела зависит от значений всех пикселей изображения, при локальном только от значений в некоторой его окрестности. При точечном преобразовании учитывается только значение текущего пиксела. Условное изображение таких преобразование приведено на рис. 10 [54].

Один из примеров глобального преобразования основан на применении двумерных интегральных преобразований изображения (Фурье, Адамара, Уолша и др.) с последующим отбрасыванием низкочастотной (или высокочастотной, в зависимости от целей преобразования) части спектра, т.е. медленно (быстро) меняющихся областей. Это способствует выравниванию фона (устранению мелких объектов), но иногда приводит к отбрасыванию слабых полезных сигналов.

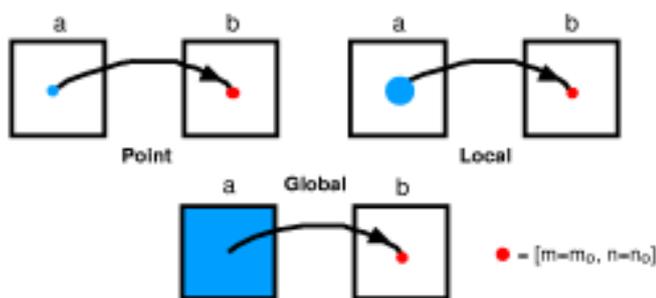


Рисунок 10.

Однако при интегральном преобразовании трудно учесть особенности отдельных анализируемых объектов. Более эффективными и проявляющими более многообразное действие являются локальные преобразования изображений, называемые часто фильтрацией. Они основаны на

преобразовании значений почернений пикселей другими, зависящими от значений пикселей ближайшей окрестности. Размер такой окрестности зависит от размеров анализируемых объектов и, как правило, имеет форму квадрата $N \times N$ пикселей. Чаще всего используется нечетное число N , чтобы текущий преобразуемый пиксел находился в центре. В настоящем разделе будут приведены только общие сведения о фильтрах. Результаты их применения к исследуемым нами изображениям будут приведены в следующей главе.

Линейные фильтры [27, 54] представляют собой матрицу \mathbf{h} размерностью $N \times N$ ($N=3, 5, 7$ и т.д.). Действие такой матрицы на пиксел P_{mn} с координатами m и n можно описать формулой типа свёртки

$$P'_{mn} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P_{ij} \cdot h_{m-i, n-j}. \quad (1)$$

При работе с фильтрами по формуле (1) появляется проблема обработки пикселей вблизи краёв изображения, т.к. в этом случае координаты выходят за его пределы. Эта проблема решается заданием продолжения за пределы границ. Такое задание не однозначно и его выбор определяется исследователями, исходя из условий оптимальности обработки. На рисунке 11 показаны возможные схемы такого продолжения [54]. Рис. 11а представляет в условном виде исходное изображение. Оно может быть продолжено периодически (рис. 11b), как зеркальное отражение (рис. 11c) или заменено константой, равной значению на крае (рис. 11d). Результат такой обработки, естественно, зависит от выбора продолжения.

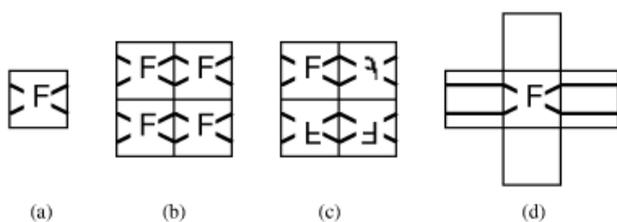


Рисунок 11.

Линейные фильтры можно разбить на несколько групп в зависимости от их структуры и действия на изображение.

Сглаживающие фильтры. При обработке фильтром этого типа центральный пиксел заменяется взвешенным средним значением пикселей окрестности. Веса матрицы могут быть одинаковыми (однородный фильтр) или разными. На рисунке 12 приведены примеры "пирамидального" и "конусообразного" сглаживающих фильтров размером 5x5 пикселей [25]. Применение такой матрицы приводит к расплыванию изображения, степень которого зависит от размеров матрицы. Эта процедура бывает полезна при выявлении медленно меняющегося фона или для устранения мелких помех на изображении.

$$h_{rect}[j,k] = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad a$$

$$h_{circ}[j,k] = \frac{1}{21} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad б$$

Рисунок 12.

Градиентные фильтры. Другой важный класс линейных фильтров основан на получении информации о резких перепадах степени почернения на изображении. Такие перепады характерны для границ областей и являются важными ориентирами при выделении объектов. Название таких фильтров часто связывают с производной (градиентный фильтр, Лапласиан и т.д.), однако, поскольку обрабатываемое изображение определено на дискретном множестве (координаты пикселей), эти названия условны.

Градиентные фильтры построены на сравнении почернений по обе стороны текущего пиксела по горизонтали \mathbf{h}_x и по вертикали \mathbf{h}_y . Существует несколько представлений для них. Простейшее представлено на рисунках 13а и 13б, более сложное (фильтр Собеля) на рисунке 13в и 13г.

$$[\mathbf{h}_x] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad [\mathbf{h}_y] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad [\mathbf{h}_x] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad [\mathbf{h}_y] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Нелинейные фильтры. Класс нелинейных фильтров довольно разнообразен и не существует их единой классификации. Упомянем здесь только два вида из них, используемые в настоящее время в программном комплексе.

Многочисленные нелинейные сглаживающие фильтры рассмотрим на примере медианного фильтра. Его действие заключается в том, что в прямоугольной окрестности каждого пиксела вычисляется медиана, значением которой заменяется текущий пиксел.

Нелинейные фильтры Кувахары [54] имеют форму квадрата размерностью $N \times N = 4 \cdot L + 1$, где L - целое число. Они разбивают окрестность текущего пиксела на четыре угловые области. На рисунке 17 показан пример такого разбиения для $L=1$. В каждой области вычисляется среднее и дисперсия. Текущий пиксел заменяется на среднее той области, у которой дисперсия наименьшая.

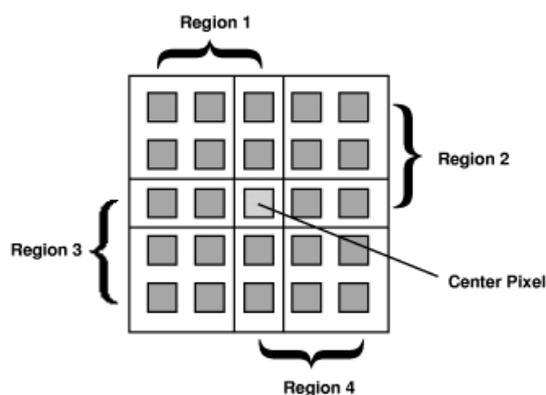


Рисунок 17.

В отличие от других сглаживающих фильтров, этот фильтр выравнивает области, близкие по степени почернения без их размытия, т.е. оставляя резкими границами раздела.

В конкретной работе перечисленные фильтры часто являются основой для построения их модифицированных комбинаций. Введение таких модификаций позволяет учесть отдельные особенности следов частиц, возникающие в конкретных задачах. Примеры модификаций будут приведены в следующей главе при описании преобразований изображений, полученных в конкретных экспериментах.

Точечные преобразования. Иногда перечисленных выше видов преобразований, бывает недостаточно. Поэтому для усиления изучаемых

объектов используют дополнительные, заключающиеся, в частности, в изменении степени их потемнения и контрастности. При этих преобразованиях изменению по определённому закону подвергается каждый пиксел в отдельности. Эти процедуры могут выполняться по линейному или по нелинейному (гамма-коррекция) законам. Примерами таких преобразований могут служить операторы изменения яркости и контрастности:

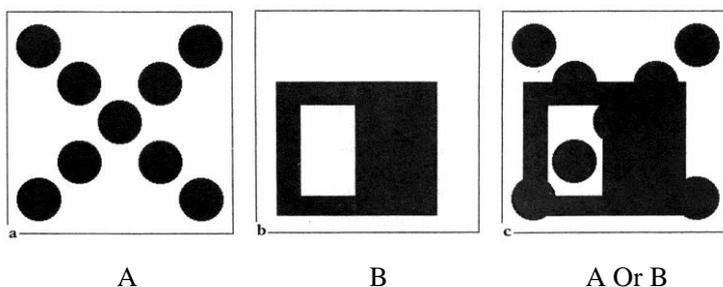
$$T_{ij}^{new} = T_{ij}^{old} + K^{br} \cdot F^{br}(T_{ij}^{old}) \quad \text{для изменения степени яркости,} \quad (3)$$

$$T_{ij}^{new} = T_{ij}^{old} + K^{con} \cdot F^{con}(T_{ij}^{old} - T^{fix}) \quad \text{для изменения контрастности.} \quad (4)$$

Здесь T_{ij}^{old} T_{ij}^{new} – значения потемнений до и после преобразования, F^{br} и F^{con} ($F^{con}(0)=0$) – функции преобразований, которые могут быть нелинейными, T^{fix} – "неподвижная точка" преобразования контрастности, K^{br} и K^{con} – постоянные преобразований. При достижении границы интервала степени потемнения (в нашем случае 0 ил 255) значение пиксела устанавливается равным значению границы.

В данном программном пакете используются, в основном, линейные функции преобразований $F^{br,con}(x)=x$. Предусмотрена возможность включения нелинейных функций.

Логические операции с изображениями [54, 55] часто бывают полезны для выделения отдельных областей с помощью "масок". На рисунке 18 приведены примеры применения к исходным изображениям А и В различных логических операций.



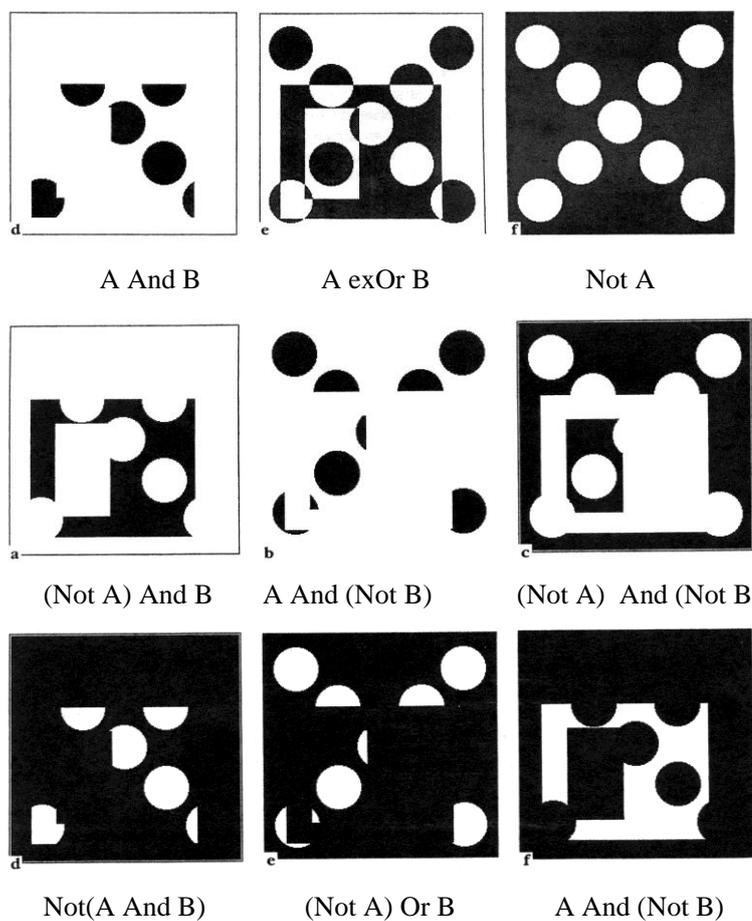


Рисунок 18.

Логические операции над изображениями A и B.

Дополнительные проблемы при обработке изображений связаны с наличием различного рода помех на изображении из-за посторонних включений, пятен, царапин и т. п. Природа этих помех различна и возникают они на разных этапах приготовления материала детектора. Большая часть из них может быть разбита на две группы: помехи, создающие кластеры по своим характеристикам схожие с кластерами следов частиц, и помехи, имеющие кластеры отличные от следов. Вторая группа исключается из анализа на этапе предварительной подготовки. Первая может быть исключена на этапе построения трека проверкой на принадлежность какому-либо треку.

Помимо помех, возникающих в материале ТТД, существуют искажения, природа которых имеет аппаратное происхождение:

- Неравномерность фона. Причиной этого вида помех может быть неравномерность освещения. Поскольку такое искажение имеет фиксированное по площади распределение в течение одного сеанса съёмки, его можно учесть, запоминая это распределение вначале, до съёмки и вычитая его из изображений объектов до обработки.

- Наличие темных пятен с фиксированным положением на изображении. Они могут быть результатом наличия пыли на линзах объектива, присутствием выбитых пикселей на матрице CCD-камеры и т.п. Эти помехи также могут быть зафиксированы до проведения съёмки объектов и затем вычтены из каждого изображения.

- Искажения за счет недостатков оптической системы: аберрация, астигматизм и т.д. Такие искажения можно скорректировать, проводя съёмку специальных образцов с нанесёнными на них сетками. После обработки и получения координат узлов сетки можно ввести корректирующую матрицу, по которой с помощью двумерной интерполяции можно получить поправку к положению любого пикселя изображения.

Гистограмма почернений, кластеризация, бинаризация.

Важную роль при обработке изображений играет гистограмма почернений [28, 31, 33], которая показывает сколько пикселей той или иной степени почернения имеется на изображении. Как правило, изображения, получаемые на CCD-камере, имеют 256 степеней почернения (градаций серого), поэтому горизонтальная шкала гистограммы почернений имеет значения от 0 (черный цвет) до 255 (белый).

Во-первых, по ней оценивается качество предварительной обработки. Так, исходные изображения, как правило, характеризуются нерегулярной гистограммой из-за разного рода неоднородностей. После обработки она должна иметь более гладкое поведение. Пример исходных и обработанных гистограмм для изображения, приведённого на рисунке 2, показаны на рисунке

19. Иногда анализируемые объекты занимают половину или даже больше площади изображения. В этом случае гистограмма не даёт однозначного критерия отбора, и используются дополнительные варианты анализа, основанные на сравнении площадей, занимаемых фоном и следами частиц [55], или применяются более сложные методы обработки, например, методы нечётких множеств [56, 57] (см., например, главу V, раздел 1).

Во-вторых, гистограмма помогает в выборе порога степени почернений при отсечении фона и кластеров следов частиц. Основной пик на гистограммах обработанных изображений, как правило, содержит пиксели фона. В наших задачах анализируемые объекты (следы частиц), будучи более тёмными, находятся на левом "хвосте" гистограмм. Основная задача бинаризации заключается в отделении этих объектов от фона. Для этого левая часть гистограммы анализируется таким образом, чтобы найти такой уровень почернения, который наиболее эффективным образом отсекает пиксели фона и части помех. На рисунке 19 оптимальный уровень порога на гистограмме после фильтрации и усиления контраста показан стрелкой ($T^{пор}=101$).

Пиксели следов частиц расположены слева от порога. Иногда для повышения эффективности устранения помех приходится устанавливать два порога отсечения - сверху и снизу. В некоторых задачах проводится предварительный анализ поведения гистограмм, полученных на разных интервалах степени почернения. Наконец, если приблизительно известна доля площади, занимаемая анализируемыми объектами, порог можно выбрать таким, чтобы площади, занимаемые пикселями со степенью почернения выше и ниже порога, имели то же соотношение.

Алгоритм поиска порога не является универсальным и зависит от целей исследования, качества изображений и характеристик следов частиц. В следующей главе этот вопрос будет рассмотрен подробнее.

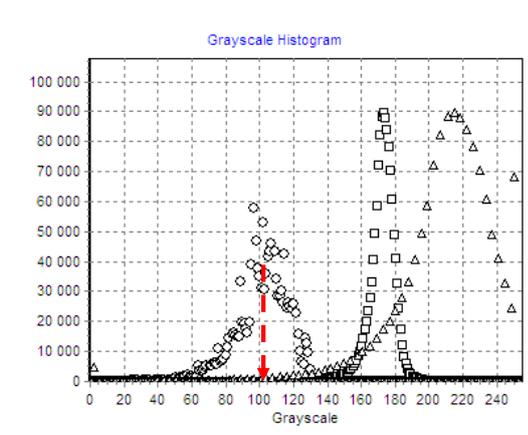


Рисунок 19. Гистограмма почернений: кружок - исходное изображение, квадрат после фильтрации, треугольник – после фильтрации и усиления контраста, стрелка – порог отсечения ($T_{\text{пор}}=101$).

В рамках метода распознавания образов существуют ещё другие приёмы, используемые для преобразования изображений в целом или отдельных его участков, позволяющие повысить эффективность поиска и классификации объектов [54, 55] (например, учёт и анализ текстуры и т. п.). В данной работе они пока не используются и обсуждаться не будут. Более подробную информацию можно найти в работах [27, 33, 54, 55].

Помимо построения гистограмм почернений используется метод суммирования пикселей по горизонтали или вертикали (рис 20) [55]. Свойства этих гистограмм или их сравнение позволяют оценить положение кластера, его форму или ориентацию. В данной работе этот приём использовался для выделения треков при продольном облучении эмульсии (глава IV, часть 2).

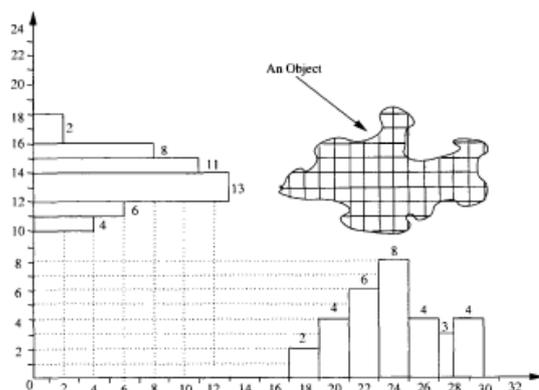
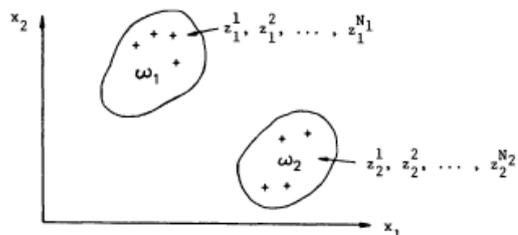


Рисунок 20.

Пространство признаков, трекинг.

Выбор набора характеристик следов частиц (пространство признаков) решающим образом определяет эффективность последующего анализа. Этот набор должен максимальным образом производить разделение объектов на классы, группируя их в непересекающиеся множества в пространстве признаков. Для иллюстрации этого часто рисуют условную картинку двумерного пространства для двух признаков (рис. 21), представимых в виде чисел. Такое чёткое разделение на классы выполнимо не всегда. В этом случае можно в пересекающейся по признаку области можно применять вероятностное описание принадлежности к классу. Наиболее последовательно с математической точки зрения это можно осуществить, используя аппарат нечётких множеств [56, 57] (см. главу V, раздел 1). Признаки могут носить не только числовой, но и качественный характер.

Рисунок 21. Разделение двух классов ω_1 и ω_2 в пространстве признаков x_1 и x_2 .

Как правило, отбор признаков выполняется человеком визуально на начальном этапе. Эта процедура выполняется специалистом в предметной области, который вначале на основе экспертной оценки производит классификацию кластеров, относя их к следам частиц или помехам. Затем сравнением характеристик кластеров следов частиц и помех производится построение пространства признаков для кластеров следов частиц разного типа. В процессе построения программы эти наборы могут уточняться.

Такая процедура не всегда бывает необходима от начала до конца, т.к., например эксперименты с фотоэмульсией проводятся уже много лет и за это время накопился большой опыт работы с ней. Хотя иногда дополнительный анализ требуется и в этом случае (см. главу IV).

Поиск треков и восстановление их расположения в пространстве (трекинг), а также их анализ, производятся на основе пространства признаков с использованием характеристик, полученных на этапе кластеринга.

Глава III. Предварительная обработка изображений.

Кластеризация. Бинаризация.

Конечной целью рассматриваемого этапа обработки является выделение следов частиц на отдельных изображениях как самостоятельных объектов. Это означает, что должны быть получены координаты всех пикселей каждого следа. Затем на основе этой информации определяются характеристики следов в соответствии с пространством признаков, выбранным для данной задачи. Эта процедура выполняется в несколько этапов.

Сначала, в зависимости от качества изображения проводится предварительная обработка. Её цель – максимально разнести по градации почернений пиксели помех и пиксели, принадлежащие следам частиц, и повысить эффективность процедуры бинаризации.

Задача бинаризации заключается в отделении анализируемых объектов от фона и помех. Выделение на изображении некоего подмножества равнозначно заданию его "характеристической функции", т.е. функции, равной единице в точках подмножества и нулю в остальных точках. Общепринятый метод выделения на исходном изображении некоего подмножества сводится к отысканию его характеристической функции с помощью квантования на два уровня исходного изображения. Такая процедура заключается в определении порога почернений. Все пиксели, имеющие почернение выше порога, считаются принадлежащими следам частиц и помечаются на изображении чёрным цветом. Остальные пиксели относят к фону и помехам и помечают белым цветом.

Последний этап обработки заключается в выделении отобранных кластеров (следов) в качестве самостоятельных объектов (получение координат пикселей), определении их характеристик и устранении части оставшихся помех.

Набор преобразований, необходимых на этапе предварительной обработки, зависит от целей данной задачи, качества соответствующих изображений и пространства признаков. Результаты предварительной обработки содержатся в нескольких классах (в терминах языка C++), объём информации в которых

можно выбирать в зависимости от задачи и пространства признаков. С этой целью классы для описания кластеров построены по иерархическому принципу. Основной класс Cluster0, содержащий минимальную информацию о кластере, включает количество пикселей (площадь кластера) и их координаты (X, Y, Z) с указанием о принадлежности границе кластера. Производные классы Cluster1, Cluster2 и т.д. содержат дополнительную информацию. Выбор класса для использования в конкретной задаче зависит от потребностей последующей обработки. Информация обо всех кластерах собирается в классе Clusters, в котором содержатся также функции обработки изображений и отдельных кластеров. Более подробно состав классов описан в Приложении.

В силу различия следов частиц, пространство признаков может сильно различаться в разных задачах. Соответственно, обработка изображений треков производится по-разному в разных экспериментах. Поэтому процедуру предварительной обработки удобно более детально рассматривать, собирая сходные изображения в группы.

1. Предварительная обработка изображений экспериментов EMU-15 и OPERA.

Примеры изображений, указанных в заголовке экспериментов были приведены на рис. 2 и 3. Следы на них образованы однозарядными частицами и представляют собой отдельные blobs серебра диаметром 0,5-1,2 мкм (EMU-15) и 0,4-1 мкм (OPERA). Они достаточно хорошо пространственно разделены (35 blobs на 100 мкм) и не сильно различаются по форме. Степень почернения кластеров на изображениях микроскопа каждого из этих экспериментов находится в довольно узком интервале. Размеры кластеров составляют 5-7 (EMU-15) и 3-5 (OPERA) пикселей. Степень неоднородности фона небольшая и присутствует на небольших по площади участках. Посторонние включения и царапины также почти отсутствуют.

Отличительной особенностью эксперимента OPERA является наличие большого числа посторонних кластеров вуали, комптоновских электронов и других частиц. Их свойства близки к свойствам кластеров от анализируемых

частиц (продукты реакции нейтрино с мишенью) и по этой причине они не могут быть отделены на этапе предварительной обработки. Такое отделение производится на этапе трекинга при анализе пространственной конфигурации треков.

Анализ различных вариантов обработки показал, что для получения удовлетворительного результата предварительной обработки изображений описанного выше качества достаточно применить фильтр Лапласа размером 9x9 (EMU-15) и 7x7 (OPERA) с последующей нелинейной операцией увеличения контрастности. Гистограммы почернений изображений до и после соответствующих операций показаны на рисунке 22а и 22б, соответственно.

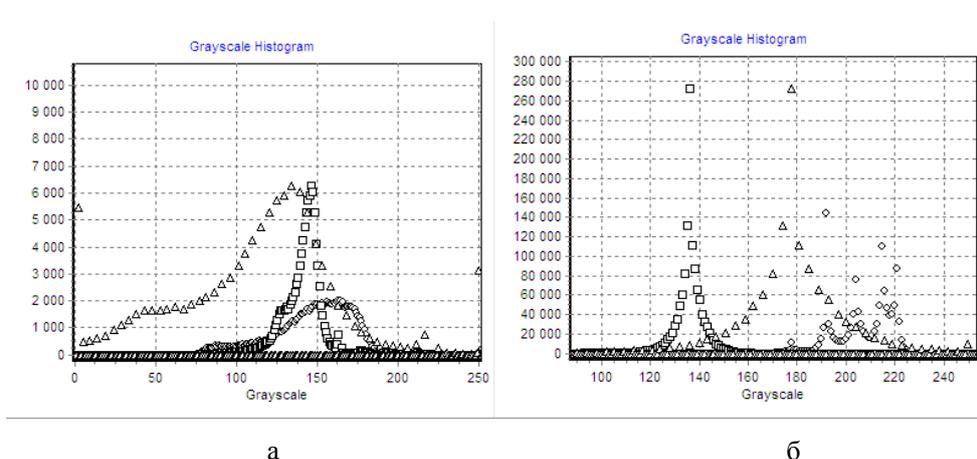


Рисунок 22. Гистограммы почернений: (а) рисунка 2; (б) рисунка 3. Крестик - исходное изображение, квадрат – после фильтрации, треугольник – после фильтрации и усиления контраста.

Для проведения операции увеличения контраста использовался следующий алгоритм выбора "неподвижной точки" T^{fix} :

- определяется максимум гистограммы почернений, полученной после фильтра.
 - вычисляется полуширина основного пика W .
 - Положение "неподвижной точки" берётся равным $T^{\text{fix}} = 1,5W$.
- Коэффициент K определялся путём подбора и был принят равным 2,5.

Результат бинаризации в сравнении с исходным изображением показан на рисунке 23.

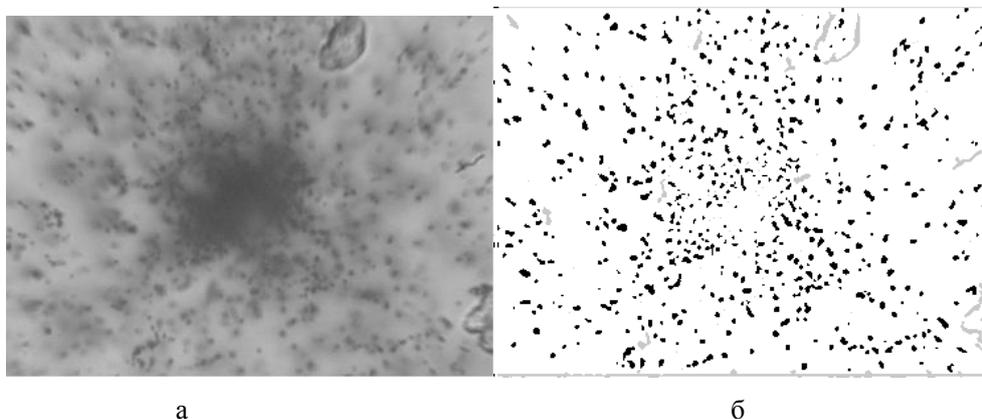


Рисунок 23. (а) - исходное изображение эксперимента ЕМУ-15; (б) - результат обработки. Серые области на рис. 23б отброшены как посторонние.

Следующая операция - выделение кластеров как самостоятельных объектов, в рамках данной системы является универсальной и выполняется с помощью единого алгоритма. Его описание будет дано в конце данной главы.

В пространство признаков для данных экспериментов достаточно включить следующие параметры кластеров

- координаты их центров масс;
- площади кластеров;
- средние величины степени почернений;
- линейный размер.

2. Предварительная обработка изображений эксперимента "Энергия плюс Трансмутация".

Особенностью изображений этого эксперимента (рис. 7) является разнообразие размеров и форм кластеров, соответствующих трекам осколков ядер, возникающих после взаимодействия нейтронов с ядрами радиаторов. Это

связано с разнообразием продуктов реакций, а также с произвольностью направлений движения частиц. Помимо кластеров от частиц на изображении присутствуют пятна посторонних включений. Размеры многих из них отличаются от кластеров частиц и могут быть отброшены на этапе предварительной обработки.

Как показал опыт работы с данными изображениями, для удовлетворительного результата предварительной обработки и выделения кластеров достаточно провести обработку модифицированным фильтром Лапласа размером 11×11 и провести усиление контрастности.

Модифицированный фильтр Лапласа строится на основе обычного, но в него вводится дополнительная асимметрия относительно диагонали. Этот фильтр, с одной стороны, способен выделить кластеры соответствующего размера, а, с другой стороны, выровнять фон, сделав его почти однородным. Ниже (рис. 24) представлен пример такого фильтра для случая матрицы размером 5×5 пикселей. На рисунке 25 представлен результат бинаризации изображения с малой загрузкой.

Рисунок 7а соответствует средней величине потока нейтронов. В этом случае подсчёт числа треков не составляет труда. Тот же набор процедур пригоден и для обработки более сложных изображений детекторов этого эксперимента, когда многие треки пересекают друг друга (см. рисунок 26а). Однако в этом случае после предварительной обработки кластеры, близкие друг к другу, часто не до конца разъединяются и бывают соединены тонкой перемычкой. После кластеризации они рассматриваются как один кластер. Для устранения этого дефекта кластеры подвергаются дополнительной процедуре "открытия" (см. далее) для расщепления слипшихся кластеров. Это важно, поскольку в случае больших загрузок подсчёт числа треков осуществляется на основе сравнения площадей и геометрических характеристик кластеров с "эталонными" образцами методом нечётких множеств (см. следующую главу). При этом важно выдерживать одинаковые условия обработки на протяжении всех сеансов измерений, так как от них зависят характеристики кластеров. В пространство признаков в этом случае включены следующие характеристики

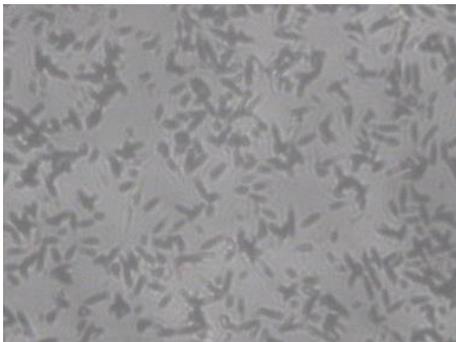
кластеров: площадь, длина, ширина, степень заполнения площади. Результат предварительной обработки изображения 26а представлен на рисунке 26б.

| | | | | |
|----|----|----|----|----|
| -1 | -2 | -3 | -2 | -1 |
| -2 | 2 | 5 | 2 | -2 |
| -3 | 5 | 20 | 5 | -8 |
| -2 | 2 | 5 | 2 | -2 |
| -1 | -2 | -8 | -2 | -1 |

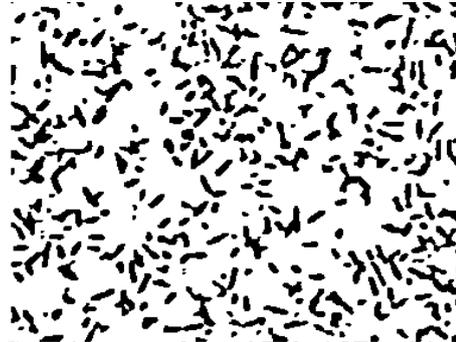
Рисунок 24.



Рисунок 25.



а



б

Рисунок 26.

3. Предварительная обработка изображений релятивистских ядер в толстослойных эмульсиях.

Кластеры следов частиц с зарядом $Z > 1$ и энергией более 1 ГэВ/нуклон при облучении эмульсии вдоль её поверхности представляют собой протяжённые образования, для лёгких ядер составленные из нескольких частей, разделённых

промежутками (см. рис. 5). Поскольку в этом эксперименте ориентация частиц была вполне определённой по отношению к сторонам плёнки (на рисунке горизонтальная) с небольшим разбросом по углу, наиболее эффективной для выделения кластеров в данном случае является комбинация градиентных фильтров определённого направления в сочетании с последующим усилением контраста.

Поперечные размеры кластеров, их площадь и характеристики промежутков между ними (количество и общая длина) зависят от заряда частицы и могут служить его индикаторами. Другим важным признаком, зависящим от заряда, является число электронов, выбитых из атомных оболочек частицей (дельта-электроны) на единице длины. При работе над задачей по определению заряда в рассматриваемом комплексе было принято использовать все три перечисленные выше признака, чтобы повысить эффективность анализа. В связи с этим для построения пространства признаков кластеров потребовалось сохранять не только их интегральные характеристики, но и координаты пикселей границ кластеров. На этапе трекинга по ним строятся все необходимые признаки (см. следующую главу).

Результат предварительной обработки изображения на рисунке 5 представлен на рисунке 27.

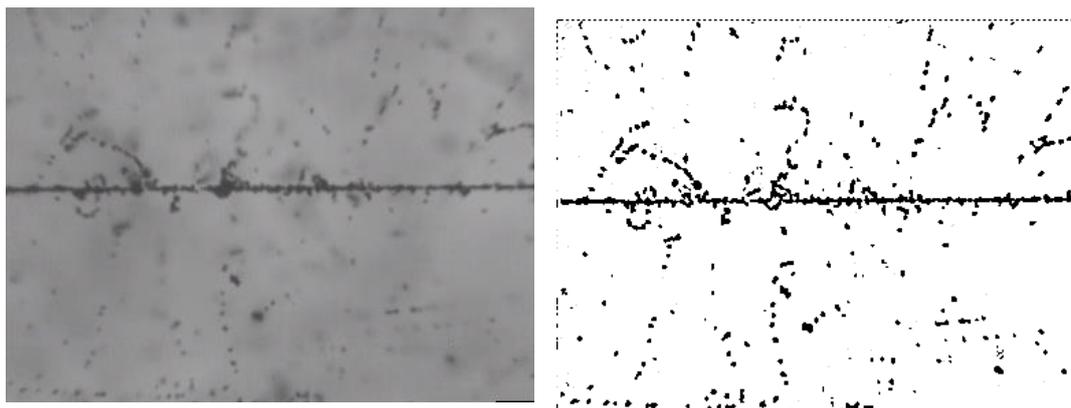


Рисунок 27.

4. Предварительная обработка изображений взаимодействия ядер He^6 с фотоэмульсией.

Кластеры рассматриваемой реакции отличаются большим разнообразием (рис. 28). Ядра He^6 с полной энергией 60 МэВ испытывают большие потери при прохождении через эмульсию. В силу этого зёрна серебра появляются при проявке так часто, что сливаются между собой и трек представляет собой сплошную темную линию в пространстве. Треки частиц, перпендикулярных к поверхности плёнки или близкие к перпендикулярным (ядра исходного пучка), дают на изображениях тёмные, короткие отрезки, которые медленно смещаются по полю зрения с изменением глубины. Ядра после рассеяния могут двигаться под большим углом по отношению к нормали к поверхности плёнки. В этом случае в область пространства, захватываемую объективом, из-за наличия глубины резкости попадает большой участок трека, который на изображении в микроскопе выглядит как протяжённый, но более бледный кластер. По ряду причин этот кластер имеет неодинаковую величину потемнения, что приводит к его разбиению на отдельные короткие отрезки при обработке фильтрами. Кроме того, его перемещение по изображению с изменением глубины просмотра происходит на гораздо большие расстояния, что затрудняет последующий поиск продолжения трека (трекинг).

Другим обстоятельством, осложняющим обработку, является большое различие качества изображений данного эксперимента при изменении глубины просмотра эмульсии. Вследствие большой толщины эмульсии, области, примыкающие к поверхности, проявляются в большей степени, чем внутренние. Это приводит к тому, что невозможно подобрать один режим обработки, являющийся оптимальным одновременно для всех глубин.

Для устранения этого недостатка был разработан специальный алгоритм, учитывающий различие изображений по глубине. Основным признаком перепроверки являются большие размеры кластеров следов частиц и большое

количество кластеров вуали на одном поле зрения. Их число тем больше, чем более перепроявлена эмульсия и может достигать нескольких тысяч на одно изображение, по сравнению с 70-80 кластерами следов частиц (сравните рис. 28а и 28б). На рисунке 29 показано распределение числа кластеров в зависимости от шага по глубине. Следует также принять во внимание эффект уменьшения толщины эмульсии примерно в два раза после проявки и сушки плёнки с 400 мкм до примерно 230 мкм.

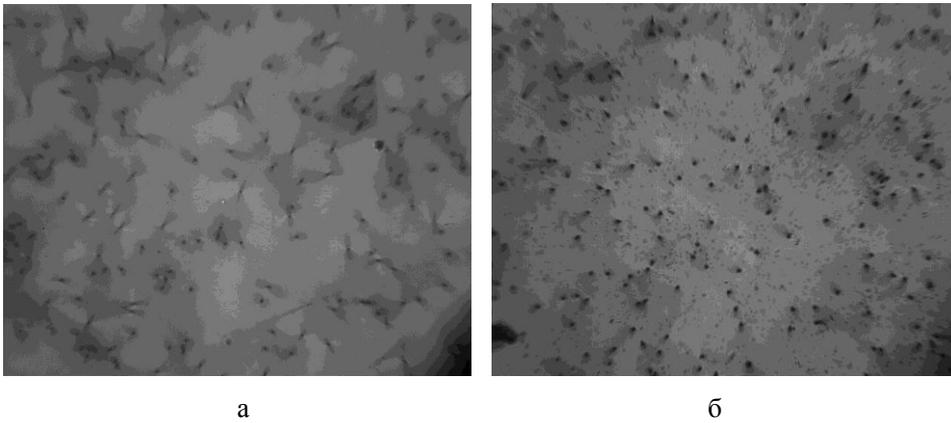


Рисунок 28.

Поле зрения на разной глубине: а – в середине эмульсии, б – на поверхности.

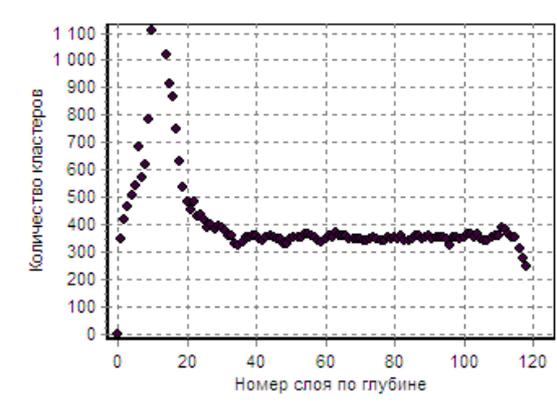


Рисунок 29.

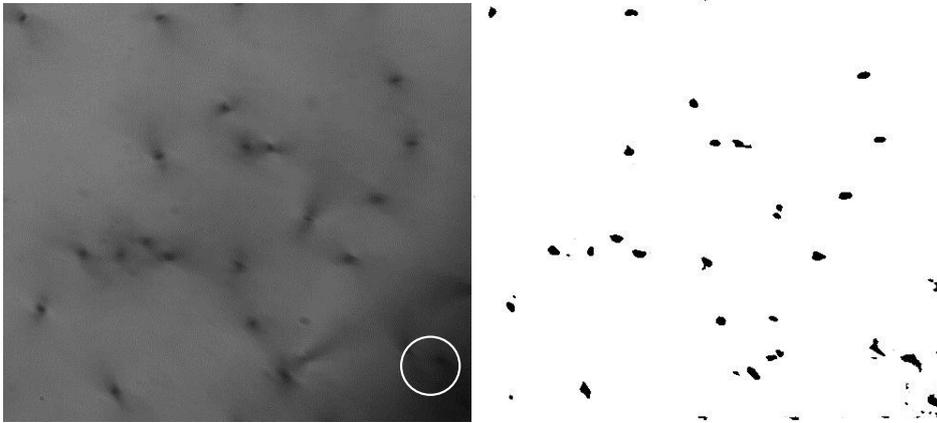
Зависимость числа кластеров от номера слоя по глубине.

Процедура отделения кластеров вуали осуществляется после выделения кластеров на всех слоях по глубине для одного поля зрения. В начале процедуры изучается распределение числа кластеров $N(i)$ в зависимости от глубины и определяется среднее число кластеров N^{av} в середине эмульсии по толщине. Затем для каждого из слоёв i определяется минимальный размер кластера R_{min}^i , при котором число кластеров N^i размером больше минимального составляет $N^i = 1,2N^{av}$. Эти кластеры отбираются для продолжения обработки, остальные отбрасываются. Здесь используется тот факт, что большинство кластеров вуали по размеру намного меньше кластеров следов частиц. Таким способом удаётся уменьшить вуаль на 90%.

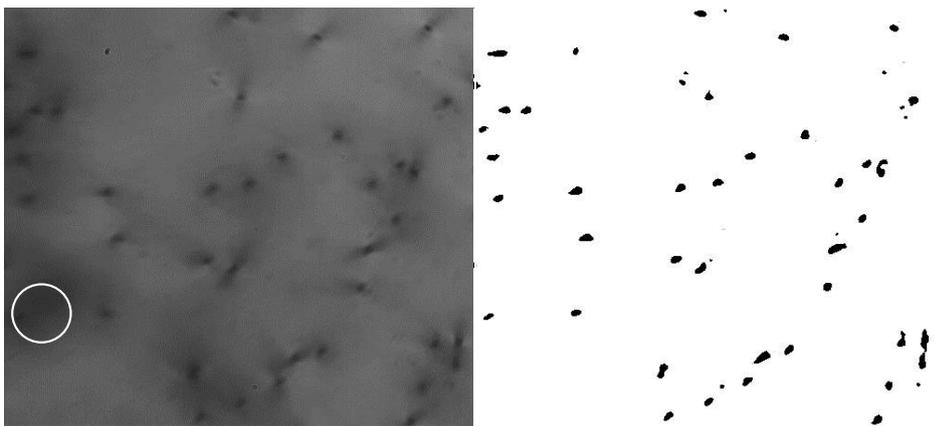
Помимо этого распределение $N(i)$ помогает распознать уровень N^{begin} , на котором находится поверхность эмульсии, т.к. при выборе начальной поверхности съёмки вручную невозможно с точностью до микрона выставить этот уровень. Кроме того, поверхность эмульсии может "уходить" по координате z из-за не параллельности плоскости хода микроскопа и поверхности эмульсии. Принято, что поверхность эмульсии соответствует уровню, при котором имеется максимум кластеров, включая кластеры вуали.

Другая трудность связана с наличием участков очень тёмного фона, на которых кластеры почти неразличимы (на рисунке 28 правый и левый нижние углы). Для выделения следов в этом случае использовалась нелинейная процедура изменения контраста. Параметры преобразования были подобраны таким образом, чтобы наиболее тёмные области были более чувствительны к перепадам потемнений, чем другие области. На рисунке 30а и 30б показаны результаты выделения кластеров на тёмных участках рисунка 28а.

Окончательный набор предварительных преобразований принятый в этой задаче включал выравнивающий фильтр, модифицированный фильтр Лапласа и нелинейное усиление контраста. Перед каждым сеансом обработки нескольких тысяч изображений параметры преобразований подбирались вручную на нескольких типичных по качеству изображениях.



а



б

Рисунок 30.

5. Предварительная обработка изображений следов частиц в оливинах из метеоритов.

Основная задача эксперимента заключается в определении заряда частицы, прошедшей через оливин, с помощью метода послойного травления. Более подробное описание этого метода будет изложено в главе V. Здесь отметим, что для выполнения поставленной задачи требуется знание геометрических характеристик различных участков протравленного канала. Основная трудность

выделения трека заключается в наличии большого числа пятен различной формы и размера, расположенных на окружающем кристалл оливина материале эпоксидной "таблетки", трещин и посторонних включений в самом оливине.

Для снижения уровня помех, создаваемых эпоксидной таблеткой, в пользовательский вариант программы обработки включена возможность выделять определённую область, предназначенную для анализа. Пример такого выделения представлен на рисунке 31а и 31б для изображений следов ядер Хе с энергией 11,4 МэВ нуклон в эксперименте по калибровке [58].

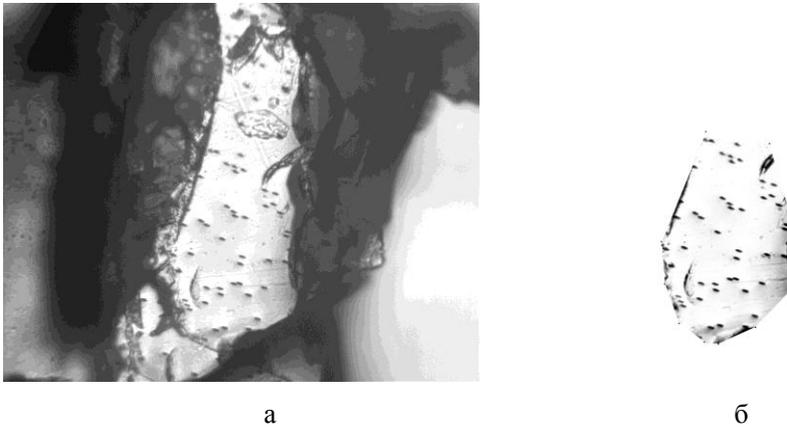


Рисунок 31.

После травления оливина в местах прохождения тяжёлых ядер образуются каналы, имеющие форму "шприца" (см. рис. 32а). Физико-химические причины появления такой формы объясняются в главе V. Здесь же следует обратить внимание на то, что детали геометрической формы трека могут быть важны для определения заряда частицы. Поэтому при кластеризации необходимо сохранять информацию о пикселах границы кластера. Результат кластеризации в случае кластера в форме "шприца" представлен на рисунке 32б.

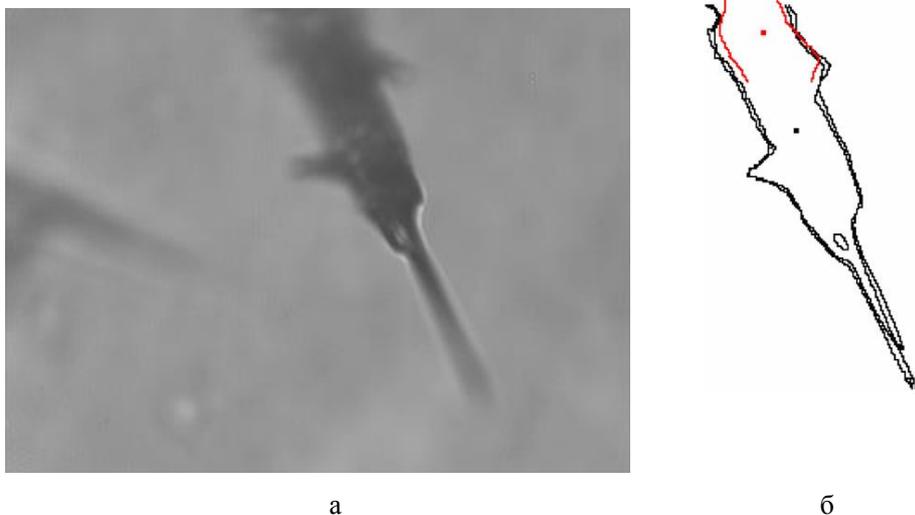


Рисунок 32.

Показанный на рис. 32а кластер имеет продолжение на соседнем сверху поле зрения. На рисунке 32б это продолжение найдено с помощью специального алгоритма по поиску продолжения треков на соседних полях зрения и показано красным цветом. Можно видеть, что поля зрения частично перекрываются. Это помогает совмещению соседних полей зрения при поиске продолжений треков.

6. Процедура выделения кластеров.

Конечным этапом кластеризации является выделение кластеров как самостоятельных объектов. Это означает получение координат всех пикселей, принадлежащих кластеру. Эта информация затем используется для получения всех остальных характеристик кластеров в соответствии с пространством признаков. Успех выполнения этой процедуры во многом зависит от эффективности предварительной обработки, которая была описана ранее.

Существует несколько алгоритмов извлечения пикселей кластеров из общего массива пикселей изображения. Однако прежде чем приступить к их описанию, необходимо ввести несколько понятий, используемых при проведении этих операций. Эти понятия касаются свойств пикселей по отношению к их соседям [54, 55].

Во-первых, введём важное свойство, связанное с понятием смежности (касания) пикселей и устанавливающее правила отнесения их к одному кластеру. На рисунке 33 показаны 8 соседних пикселей по отношению к центральному. Возможны два варианта смежности:

1. Только пиксели, примыкающие по вертикали или горизонтали (рис. 33а), могут принадлежать тому же кластеру, что и пиксел в центре (смежность-4). Остальные кластеры (примыкающие по диагонали) - или фон, или принадлежат другому кластеру.

2. Все восемь пикселей ближайшей окрестности могут быть отнесены к одному и тому же кластеру (смежность-8, рис. 33б).

Вопрос о выборе варианта смежности зависит от геометрических свойств кластеров конкретной задачи. Так кластеры следов частиц на рисунках 2 и 3 по своей природе являются выпуклыми фигурами. Им соответствует вариант смежности-4. В случае кластеров с границей более сложной конфигурации (например, рисунок 5 и, в особенности, 9) используется правило смежности-8,

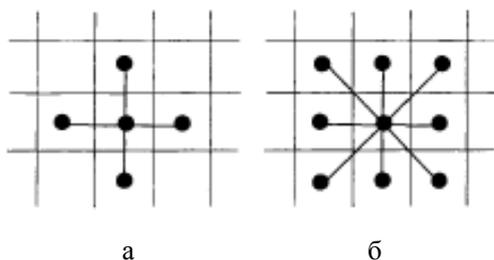


Рисунок 33.

так как многие их пиксели могут соприкасаться и углами.

Во-вторых, существует естественное деление на пиксели фона и пиксели кластера. Последние, в свою очередь, делятся на внутренние, не имеющие пикселей, смежных с пикселями фона, и принадлежащие границе, т.е. такие, которые имеют пиксели, смежные с пикселями фона.

Понятие смежности используется при выделении кластеров как самостоятельных объектов, когда решается вопрос о принадлежности пикселей кластеру. Существует несколько возможностей для реализации этой процедуры.

Одна из них заключается в последовательном анализе по строкам бинаризованного изображения, начиная с левого верхнего угла. При обнаружении первого пиксела, который с необходимостью принадлежит границе кластера, производится перебор соседних пикселей, с целью отбора принадлежащих границе данного кластера. При завершении обхода границы одного кластера, производится поиск пикселей следующего кластера и процедура обхода повторяется.

Такая процедура достаточно эффективна в случае кластеров простой формы, однако её реализация затруднена при обработке, например, кластеров, изображённых на рисунке 9. Поэтому в программном комплексе принята другая процедура. Её работа также начинается с анализа первой строки бинаризованного изображения, которое, напомним, состоит из белых (фон) и чёрных (кластеры) пикселей. Одновременно с анализом матрицы изображения, строится другая матрица, в которой на месте белых полей ставится цифра 0. На месте первого пиксела кластера из первой строки ставится цифра 1. Если далее в исходном изображении также следуют не нулевые пиксели, они тоже заменяются на 1. Если цепочка единиц обрывается, далее следуют нули до пиксела следующего кластера, который помечается цифрой 2 (рисунки 34а и 34б), также как и все пиксели, стоящие в цепочке рядом с ним в первой строке. Когда эта цепочка заканчивается, ведётся поиск новых, помечаемых последовательно цифрами 3, 4 и т.д. По окончании просмотра первой строки производится просмотр остальных строк по следующему правилу.

Если в строке встречается пиксел кластера, производится просмотр его окрестности в области уже просмотренной ранее с учётом правила смежности, которое выбирается до начала обработки. В случае обнаружения уже помеченных пикселей, смежных с текущим, последнему присваивается номер наименьшего из соседних кластеров. При этом если среди смежных с текущим кластером оказываются уже помеченные кластеры с разными номерами, запоминается пара этих номеров (пара смежности). Пиксели, помеченные этими номерами, считаются принадлежащими одному кластеру.

Если смежных помеченных кластеров нет, в текущий пиксел вводится новое число. На рисунке 34б показаны результаты указанной процедуры для

случая кластера сложной формы. В зависимости от принятого правила смежности результатом кластеризации рис. 34а будет либо один кластер, либо два.

По окончании этой процедуры производится сбор координат пикселей, принадлежащих каждому кластеру, в отдельные массивы. При этом учитывается принадлежность одному кластеру пикселей, помеченных номерами из пар смежности. Например, на рисунке 34б это пара (1,2), а в случае смежности-8, ещё и пара (2,3). На этом же этапе помечаются пиксели границы кластеров.

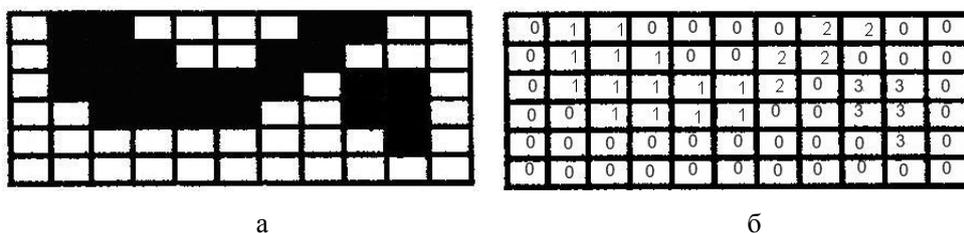
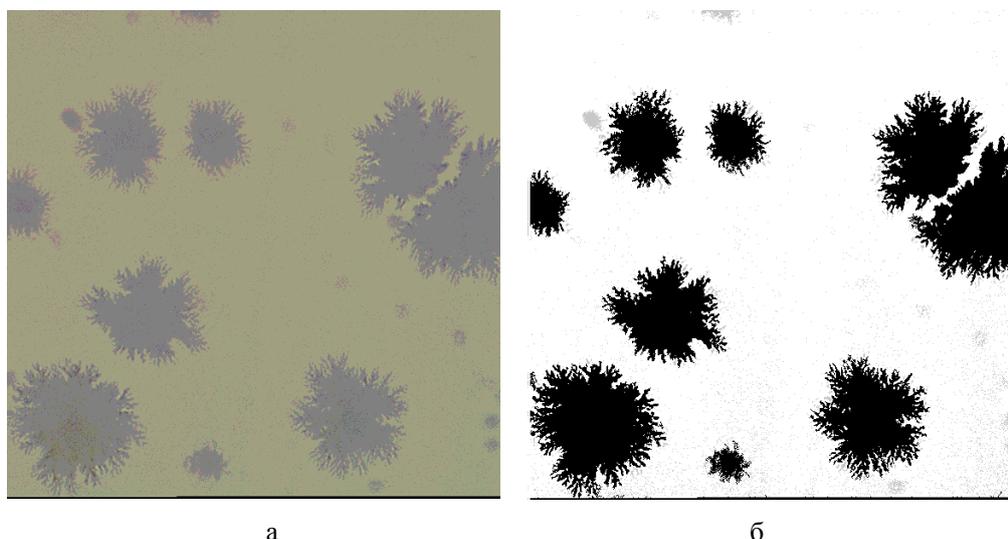


Рисунок 34.

7. Выделение кластеров сложной формы

Перечисленные выше процедуры предварительной обработки и выделения кластеров позволяют собрать пиксели кластеров самой сложной формы. Примером, демонстрирующим такие возможности, может служить рисунок 35, на котором представлен результат обработки изображения следов альфа-частиц в пластике CR-39 после электрохимической обработки. При обработке обычными алгоритмами эти кластеры часто распадаются на многочисленные объекты. Алгоритм, применённый в программном комплексе, рассматривает эти кластеры как единый объект.



а

б

Рисунок 35.

В некоторых случаях полезно провести дополнительную обработку кластеров для исправления их формы. Например, иногда между близко лежащими кластерами после предварительной обработки остаются тонкие перемиčky и оба кластера в этом случае рассматриваются как один кластер. Наоборот, некоторые кластеры утончаются и могут распасться на отдельные, слегка примыкающие куски. Для устранения таких случаев используют операции открытия (opening) и закрытия (closing) с помощью промежуточных операций разъедания (erosion) и растяжения (dilation) [55], результаты которых показаны на рис. 36.

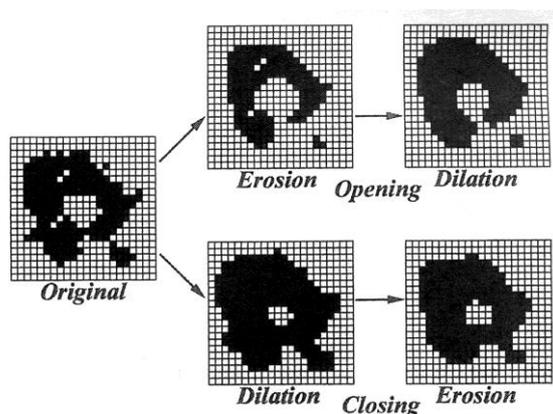


Рисунок 36.

8. Определение характеристик кластеров.

Характеристики кластеров играют важную роль при анализе изображений. Приведём здесь приёмы определения основных из них.

Площадь кластера равна просто числу пикселей, из которых он состоит и определяется на этапе выделения кластеров. Для получения других характеристик в программном комплексе разработан набор специальных алгоритмов.

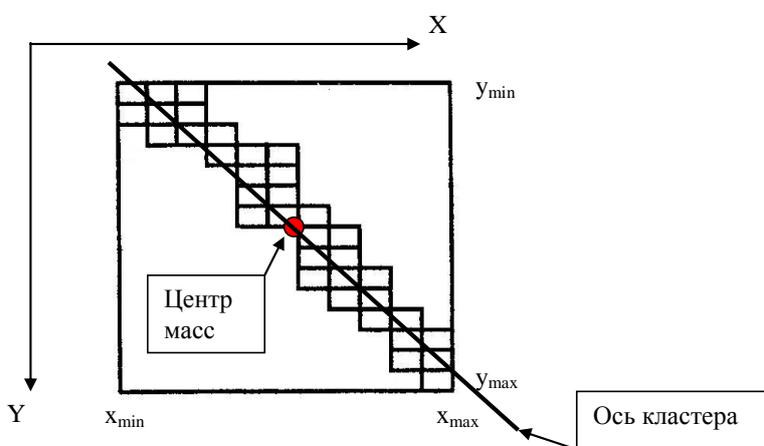


Рисунок 37.

Каждый кластер обрабатывается отдельно. Вначале определяются максимальные и минимальные координаты x и y , ограничивающие кластер (см. рисунок 37; следует учесть, что в компьютерной графике принято ось Y направлять сверху вниз). Такой ограничивающий кластер прямоугольник бывает нужен для оценки степени его вытянутости. Далее вычисляются *координаты центра масс* пикселей кластера, которые являются его важной характеристикой, определяющей положение в пространстве.

Для нахождения *направления оси кластера* вначале определяются координаты середин его строк. Далее полученный набор точек методом наименьших квадратов аппроксимируется отрезком прямой, проходящей через центр масс (рис. 37). Эта прямая считается осью кластера. Иногда указанную процедуру приходится повторять для середин столбцов. Это связано с тем, что

на первом шаге может получиться не продольная, а поперечная ось. Тогда на втором наверняка будет продольная. Важной характеристикой оси является её наклон. Например, в задаче о рассеянии нейтроноизбыточных ядер она определяет направление поиска продолжения треков частиц, рассеявшихся под большим углом.

Существует возможность найти положение оси и её направления, минимизируя моменты инерции пикселей относительно прямой, проходящей через центр масс кластера. Соответствующие формулы приведены ниже.

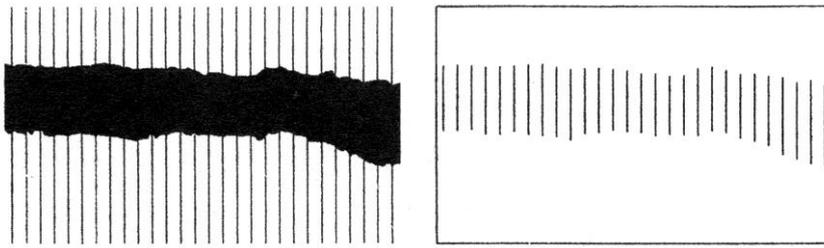
$$\begin{aligned}
 S_x &= \sum x_i & M_x &= S_{xx} - \frac{S_x^2}{Area} \\
 S_y &= \sum y_i & M_y &= S_{yy} - \frac{S_y^2}{Area} \\
 S_{xx} &= \sum x_i^2 & M_{xy} &= S_{xy} - \frac{S_x \cdot S_y}{Area} \\
 S_{yy} &= \sum y_i^2 & \Theta &= \tan^{-1} \left\{ \frac{M_{xx} - M_{yy} + \sqrt{(M_{xx} - M_{yy})^2 + 4 \cdot M_{xy}^2}}{2 \cdot M_{xy}} \right\} \\
 S_{xy} &= \sum x_i y_i
 \end{aligned} \tag{5}$$

Ширина кластера определяется как удвоенное среднее расстояние пикселей границы до его оси. *Длина* определяется как длина части оси, лежащей внутри кластера.

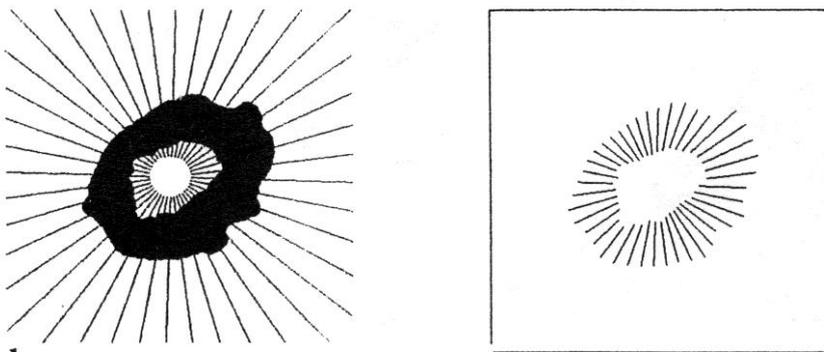
Приведённые выше определения оси, ширины и длины являются достаточно точными для кластеров выпуклой формы или близкой к ней (рис. 2, 3, 4, 5, 6). Если кластеры изогнуты или имеют ещё более сложную форму (рис. 9), то эти понятия теряют свою точность и не используются. Более точно форму кластера в этом случае отражает, например, величина отношения его площади и круга диаметром, равным длине кластера.

Иногда оценить характеристики треков помогают логические операции [55]. Например, на рисунке 38а показано как наложение двух изображений - исходного кластера и набора параллельных прямых, и применения к ним операции AND даёт возможность оценить ширину кластера и его профиль. Другой пример, приведённый на рис. 38б показывает применение операции

AND к кластеру и семейству полупрямых, исходящих из центра масс, для определения профиля выпуклого кластера с отверстием. В программном комплексе предусмотрен блок, позволяющий выполнять подобные операции.



а



b

c

б

Рисунок 38.

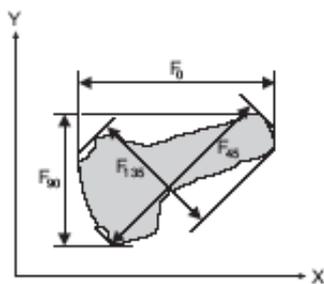


Рисунок 39.



Рисунок 40.

Форму кластера помогают также оценить диаметры Ферета – расстояние между внешними касательными к кластеру, проведёнными под определённым углом к оси X. На рис. 39 приведены примеры диаметров Ферета F_0 , F_{45} , F_{90} и F_{135} . Другое важное понятие – выпуклый периметр, которое есть периметр такой выпуклой фигуры, которая описана вокруг кластера и имеет наименьший периметр из всех подобных фигур (рис. 40).

Глава IV. Определение параметров треков и характеристик заряженных частиц в экспериментах с ядерными фотоэмульсиями.

1. Исследование структуры нейтроноизбыточных ядер в экспериментах с ядрами ${}^6\text{He}$.

Исследования реакций с помощью пучков радиоактивных ядер расширили область ядерных исследований на ядра, далёкие от линии стабильности. Было открыто множество новых явлений, характерных для нестабильных ядер, в частности, ядра с нейтронным гало [45-48].

Нейтронное гало - эффект, обусловленный наличием слабо связанных состояний нейтронов, расположенных вблизи континуума энергии связи. Малая величина энергии связи нейтрона (или группы нейтронов) и короткодействующий характер ядерных сил приводят к туннелированию нейтронов во внешнюю периферийную область на большие расстояния от кора ядра. При этом плотность распределения периферийных нейтронов существенно меньше плотности распределения нейтронов внутри кора. Нейтронное облако, окружающее кор, простирается на гораздо большие расстояния, чем радиус ядра, определяемый соотношением $R = 1.3A^{1/3}$.

Особый интерес вызывают ядра с двухнейтронным гало (${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$). Задача более детального экспериментального изучения такой двухнейтронной структуры и, в частности, корреляций валентных нейтронов, полностью не решена до настоящего времени. Особенно интересен вопрос о том, как эти два нейтрона существуют в гало-ядре – как "динейтрон" (рис. 41а) или как "сигарообразная" конфигурация (рис. 41б).

Для исследования конфигурации двухнейтронного гало был предложен экспериментальный метод изучения нейтрон-нейтронных корреляций путем измерения сечений реакции передачи двух нейтронов [59, 60]. В качестве исследуемых гало-ядер могут быть использованы ядра ${}^{6,8}\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ и другие гало-ядра. В [59] было показано, что дифференциальное сечение, например, реакции

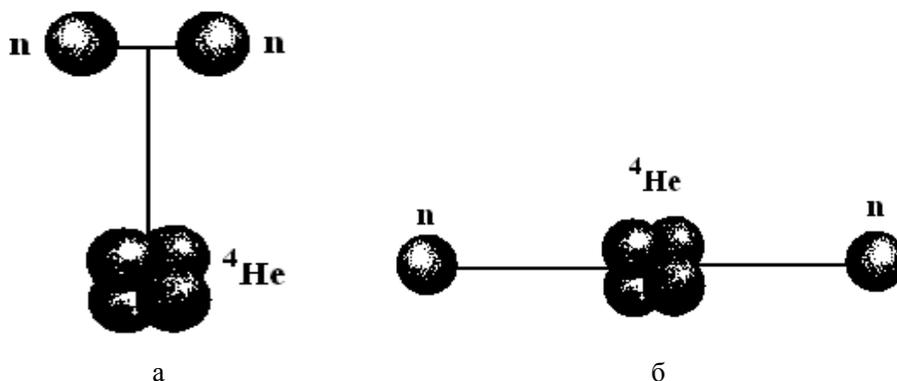


Рисунок 41

${}^6\text{He} + A \rightarrow {}^4\text{He} + B$ по энергии и углу вылета фрагмента ${}^4\text{He}$ в предположении о передаче компактного кластера - динейтрона определяется двумя факторами: распределением по импульсу ядра ${}^4\text{He}$ в гало ядре ${}^6\text{He}$ (или распределением по импульсу динейтрона в ядре ${}^6\text{He}$) и сечением (вне массовой поверхности) захвата двух нейтронов ядром A . Второй фактор можно извлечь из анализа данных эксперимента на пучке ядер трития, т.е. реакции $A(t, p)B$ при соответствующих значениях энергии пучка трития. Таким образом, информация о структуре нейтронного гало может быть прямо получена из анализа дифференциального сечения реакции передачи двух нейтронов.

В [61] был проведен анализ реакции ${}^4\text{He}({}^6\text{He}, {}^4\text{He}){}^6\text{He}$ в рамках одноступенчатого прямого механизма реакции и приближения искаженных волн. Экспериментальные данные были получены в Лаборатории ядерных реакций им. Г.В.Флёрва (ОИЯИ) на пучке радиоактивных ионов ${}^6\text{He}$ с энергией 151 МэВ. На основе проведенного анализа авторы работы [61] утверждают, что конфигурация динейтрона определяет сечение под передними углами, отражая больший вес этой конфигурации в основном состоянии ${}^6\text{He}$. При больших углах роль сигарообразной конфигурации увеличивается.

В [61] на основе анализа реакции упругого ${}^6\text{He}$ -рассеяния делается вывод о том, что нейтронное гало ядра ${}^6\text{He}$ на 95% состоит из динейтронного кластера, а оставшиеся 5% приходятся на долю некоррелированных нейтронов, расположенных симметрично по отношению к α -частице.

С другой стороны, в [62] исследовался радиационный захват протона на ядре ${}^6\text{He}$, при этом захват в состояния ${}^7\text{Li}$ наблюдался как самый сильный канал. Помимо этого были зафиксированы события, описанные как квазисвободный захват протона на нейтроне гало, коре ${}^4\text{He}$ и ${}^5\text{He}$. Однако события квазисвободного захвата на нейтроне обнаружены не были.

Таким образом, вопрос о структуре нейтронного гало в ${}^6\text{He}$ нельзя считать окончательно решенным. Будут полезны, по-видимому, исследования и других реакций в широкой области энергий ядер снарядов (гало-ядер). Также можно предположить, что для различных гало ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$ структура гало двух валентных нейтронов может быть различна, так что область исследуемых ядер должна быть расширена.

Для более детального исследования реакции передачи двух нейтронов ${}^6\text{He} + A \rightarrow {}^4\text{He} + B$ проведено облучение стопок фотоэмульсии в Лаборатории ядерных реакций им. Г.В. Флерова (ОИЯИ, Дубна) [63-73]. Пучок ${}^6\text{He}$ с энергией 60 МэВ падал перпендикулярно к плоскости стопки из шести фотоэмульсий (рисунок 42). Полная толщина стопки (~1600 мкм) превышала пробег частиц пучка ${}^6\text{He}$ с такой энергией и была достаточна для остановки вторичных частиц (${}^4\text{He}$ и ядер отдачи), рождаемых в каждом слое фотоэмульсии. Использование стопки фотоэмульсий позволяет одновременно получить данные о реакции передачи в широкой области энергии ядер-снарядов (гало-ядер): 20-60 МэВ, так как, проникая в фотоэмульсию, частицы пучка испытывают ионизационные потери. В результате взаимодействия с ядрами мишени происходит при меньших энергиях. Другое преимущество использования фотоэмульсии - возможность регистрации вторичных частиц под малыми углами (3° - 5°) относительно направления первичного пучка.

Ядерные реакции на гало-ядрах можно разделить на две группы в зависимости от величины прицельного параметра взаимодействия b . Для столкновений с прицельным параметром $b < R_1 + R_2$, где R_1 и R_2 - радиусы кора и налетающего ядра, реакция происходит как обычная реакция столкновения ионов при высоких энергиях. При больших значениях прицельного параметра

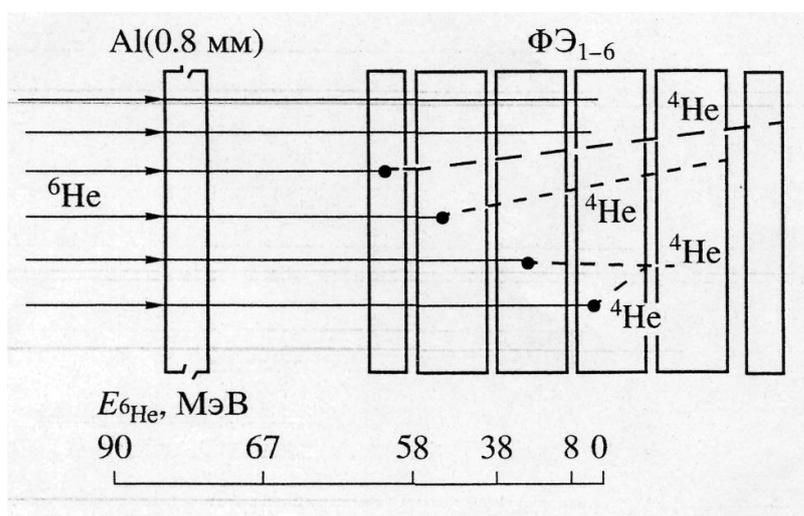


Рисунок 42.

Схема эксперимента по изучению гало ядра ${}^6\text{He}$.

$b > R_1 + R_2$ для обычных ядер происходит реакция кулоновского возбуждения. В случае, если ядро имеет гало, которое простирается достаточно далеко относительно ядерного кора, налетающая частица взаимодействует с нуклонами гало. В результате сильного взаимодействия меняются угловые распределения и величина сечения реакций.

Для эффективности предлагаемого экспериментального метода [74-82] критическим моментом является возможность разделения событий передачи двух и одного нейтрона. Эти каналы реакции можно разделить вследствие различия их кинематики. Так, например, взаимодействие ${}^6\text{He}$ с ядром ${}^{12}\text{C}$ может приводить к передаче как одного, так и двух нейтронов гало. Однако при передаче одного нейтрона, как известно, двухнейтронные гало-ядра испускают и второй нейтрон. При этом величины энерговыделения Q реакций значительно отличаются, например:



Это различие, а также наличие в реакции однеитронной передачи свободного нейтрона в выходном канале приводит к значительному различию в энергетических спектрах ${}^4\text{He}$ (большие энергии ${}^4\text{He}$ в реакциях передачи двух

нуклонов), что является типичным для реакций с гало-ядрами (${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$ и т.д.). При этом такое же различие кинематики для реакций передачи одного и двух нейтронов проявляется и для других ядер-мишеней.

На рис. 43. представлены двумерные диаграммы «энергия – угол вылета» ядер ${}^4\text{He}$ для реакций передачи одного и двух нейтронов. Q-зависимость выхода реакций бралась в форме экспериментальной зависимости. Результаты симуляции показывают, что локус ${}^4\text{He}$ реакции (6) проходит значительно выше соответствующего локуса реакции (7), что позволяет надеяться на однозначное разделение этих двух реакций.

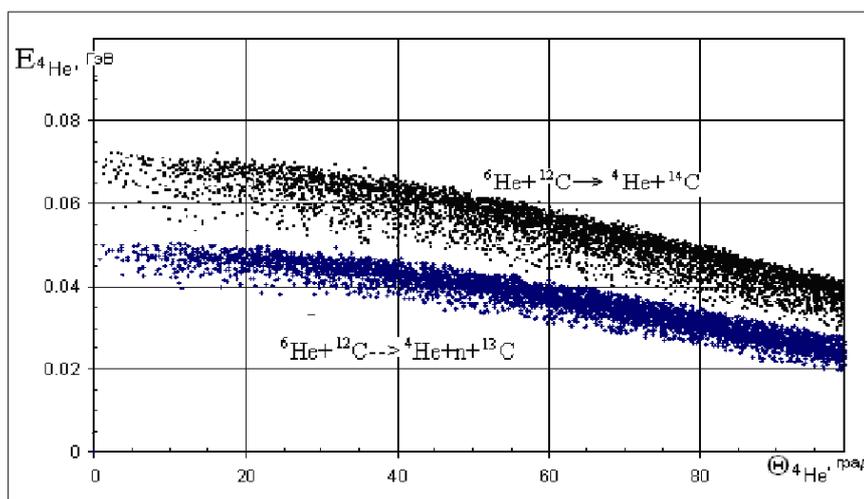


Рисунок 43.

В рассматриваемом варианте обработки отбирались события взаимодействия ${}^6\text{He}$ с протонами эмульсии (рис. 44). Особенностью этого канала является то, что при передаче нейтронов (одного или двух) ядра отдачи (D или T) будут иметь достаточно большой пробег в эмульсии и могут быть легко идентифицированы по характерным "вилкам".

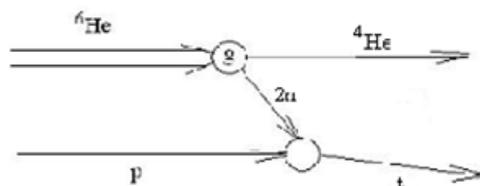


Рисунок 44.

Ядерные фотоэмульсии, полученные в результате эксперимента, были просканированы на установке ПАВИКОМ и проанализированы с помощью рассматриваемого программного комплекса.

Следы первичных и вторичных частиц обладают следующими особенностями. Исходные частицы с зарядом 2 движутся почти перпендикулярно поверхности эмульсии. Их след в ядерной эмульсии при энергии десятки МэВ состоит из множества близко расположенных зёрен серебра, практически сливающихся друг с другом. На изображении, полученном при увеличении $60\times$, их следы видны в виде тёмных пятен почти круглой формы или коротких отрезков, слегка размытых на концах. Треки частиц, рассеявшихся и летящих под большим углом к вертикали это достаточно длинные, но бледные отрезки

Перечислим здесь проблемы, связанные с изображениями, получаемыми в данном эксперименте:

1. Кластеры потемнения, возникающие от ядер и их фрагментов, сильно различаются по своим свойствам в зависимости от глубины наблюдения. Это связано с явлением перепроявки вблизи поверхности толстой эмульсии. Для эффективной обработки всех треков в автоматическом режиме используется специальный алгоритм, описанный в предыдущей главе.

2. Необходимость выявления бледных кластеров приводит к тому, что часть крупных тёмных кластеров распадается на отдельные фрагменты при фильтрации. Это создаёт дополнительные ложные треки.

3. Геометрический размер трека близок к длине волны света. В ряде случаев это приводит к явлению дифракции на краях кластера. В результате

рядом с основным кластером следа появляется скопление более мелких пятен, имитирующих ложные треки.

4. При обработке толстой фотоэмульсии (проявка, сушка) её слои деформируются (дисторсия). Это приводит к деформации треков и невозможности использовать в качестве критерия поиска прямолинейность треков при их восстановлении.

5. Требуется специальная процедура для определения уровня, на котором находится поверхность эмульсии.

6. Некоторая часть эмульсии имеет сильно затемнённый фон, на котором очень слабо выделяются кластеры.

Перечисленные выше особенности треков приводят к необходимости задания более детального набора признаков, по сравнению с другими задачами. В него включены: координаты центра масс кластеров, их площадь, длина, ширина, направление оси кластера, средняя степень почернения, координаты пикселей границы. Результаты кластеринга всех слоёв на одном поле зрения приведены на рис. 45 в виде проекции центров масс всех кластеров на плоскость эмульсии. На рисунке визуально отчётливо прослеживаются треки и отдельные вершины взаимодействия с расходящимися лучами или с резко меняющимися направлением треками.



Рисунок 45.

Задача трекинга восстановить эти треки в пространстве, найти вершины взаимодействия и определить кинематику соответствующей реакции.

Отбор кластеров трека начинается с изображения, соответствующего поверхности эмульсии. Все кластеры этого слоя, удовлетворяющие условию отбора $R_{\text{clust}}^{\text{begin}} \geq R_{\text{min}}^{\text{begin}}$ (см. глава III, часть 4), рассматриваются как кластеры начала треков. Далее на последующих по Z слоях устраивается процедура продолжения треков, включающая следующие этапы:

1. Для каждого трека на слое i рассматривается некоторая область поиска на слое $i+1$ (см. рис. 46). Эта область строится в зависимости от свойств кластеров. Для ядер исходного пучка и ядер, рассеявшихся на малые углы и имеющих не вытянутые кластеры (рис. 46а), область поиска представляет собой квадрат со сторонами, параллельными осям X и Y. Для ядер, рассеявшихся под большим углом и имеющих вытянутые кластеры (рис. 46б), область поиска выбирается в виде прямоугольника с длинной стороной, параллельной оси кластера. Её длина зависит от степени вытянутости кластера.

Для первых пяти кластеров каждого трека координаты середины квадрата или прямоугольника поиска выбираются равными координатам последнего найденного кластера трека. Для треков, накопивших число точек больше 5, середина области поиска выбирается на продолжении трека на уровень $i+1$. Для поиска продолжения трека его последние 5 точек аппроксимируются отрезком прямой в пространстве. Точка пересечения этой прямой с уровнем $i+1$ – искомая точка продолжения и середина области поиска. Большее число точек для аппроксимации трека отрезком дают худший результат из-за искривления треков вследствие дисторсии плёнки после проявки и сушки.

2. Все кластеры слоя $i+1$, попавшие в область поиска, рассматриваются как кандидаты на продолжение текущего трека. Построение области поиска производится несколько раз, начиная с минимальных размеров сторон L_{min} . Если ни один кластер не попал в область поиска, она увеличивается на некоторую величину K и поиск продолжается. Коэффициент K, величина L_{min} и число шагов изменения области поиска являются параметрами, задаваемыми до начала обработки.

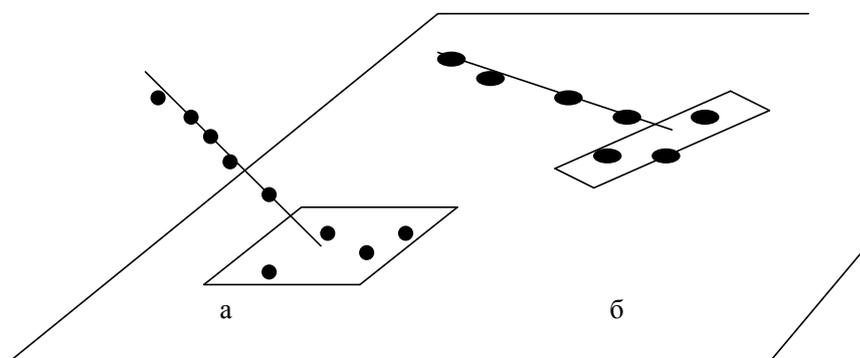


Рисунок 46.

Информация о каждом кластере-кандидате запоминается вместе с его расстоянием до середины области поиска, т.е. до точки продолжения трека.

3. После окончания обработки текущего слоя $i+1$ устраивается процедура конкуренции между треками за обладание кластером-кандидатом, если он попал в область поиска нескольких треков. Кластер считается принадлежащим тому треку, к продолжению которого он ближе.

4. Оставшиеся после конкуренции и не попавшие в какой-либо трек кластеры, рассматриваются как начала новых треков.

В результате указанной процедуры появляются последовательности точек в пространстве, часть которых являются полными треками, а часть их небольшими участками. Распад треков происходит из-за "выпадания" части кластеров в середине эмульсии вследствие недопроявки. Чтобы компенсировать этот эффект, поиск продолжения треков производится на нескольких слоях по глубине, однако и этого бывает недостаточно. Поэтому по окончании процедуры поиска треков производится дополнительная операция сборки их отдельных частей. Для этого окрестность конца неполного трека просматривается с целью поиска начала трека-продолжения. Критерием обнаружения продолжения является близость пространственных направлений сопряженных концов частей треков.

По окончании сбора кластеров треков производится поиск вершин взаимодействия. Для этого окрестность каждого кластера трека просматривается с целью найти начала другого трека. Если такой трек найден, после дополнительной проверки найденная точка пересечения треков считается вершиной. Прилегающие к ней концы треков аппроксимируются прямыми, углы между которыми считаются углами рассеяния и разлёта частиц.

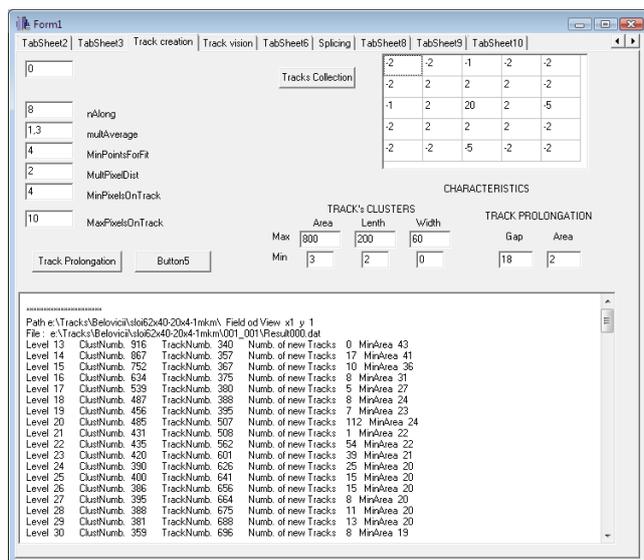


Рисунок 47.

В рамках работы по данному эксперименту был отсканирован участок площадью 7,8x1,5 мм (20x4 полей зрения). На каждом поле зрения отснято более 120 кадров по глубине с шагом 1 мкм (всего 9600 кадров). Все кадры были обработаны в одном сеансе по указанным выше процедурам, включая предварительную обработку и трекинг.

На рассматриваемом этапе отбирались события рассеяния ${}^6\text{He}$ на протоне эмульсии, которые оставляют следы в виде "вилки", когда после взаимодействия из вершины выходят два следа. В результате передачи одного или двух нейтронов продуктами реакции кроме ${}^4\text{He}$ являются тритон (двухнейтронная передача) или дейтрон и нейтрон, который не даёт видимого следа (однойнейтронная передача). Кинематические условия реакции таковы, что

ядра отдачи, являясь достаточно энергичными, имеют пробег в среднем десятки мкм. В результате трекинга на каждом поле зрения найдено средним 5-8 "вилок".

На рисунке 47 представлено окно пользовательской программы, в котором задаются параметры процедуры трекинга. По её окончании можно проверить эффективность восстановления трека и вершин взаимодействия. На рисунке 48 показано окно программы с вершиной взаимодействия в виде проекций на оси x,

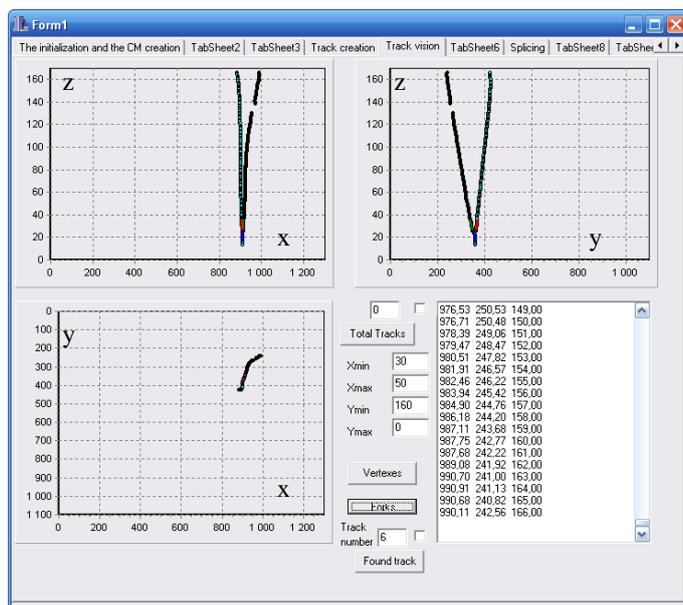


Рисунок 48.

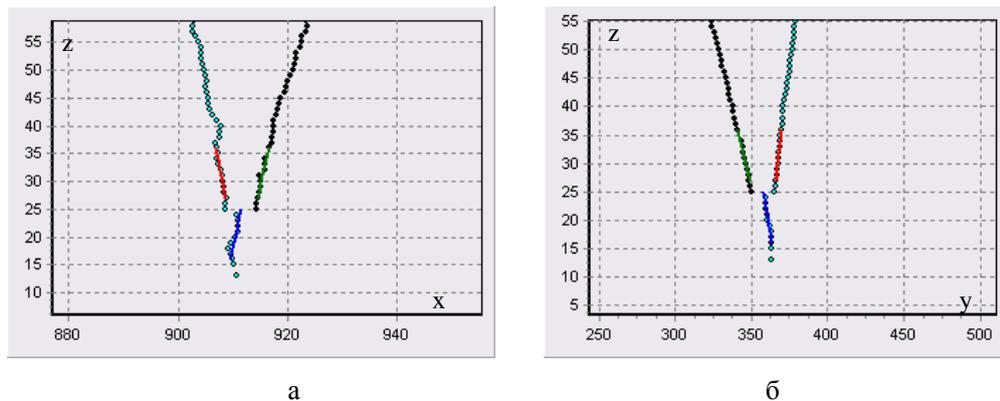


Рисунок 49.

у и z. Взаимодействуют ядра ${}^6\text{He}$ и протона с образованием ядер ${}^4\text{He}$ и T или D. Вылетевший нейтрон в случае образования D, естественно, не виден. На рис. 49 вершина изображена в крупном масштабе. Видны аппроксимирующие отрезки, которые позволяют определить углы вылета вторичных частиц.

Пользовательская программа даёт возможность представить вершину взаимодействия в трёхмерном виде. В качестве примера на рис. 50 показаны две вершины в трёхмерном представлении.

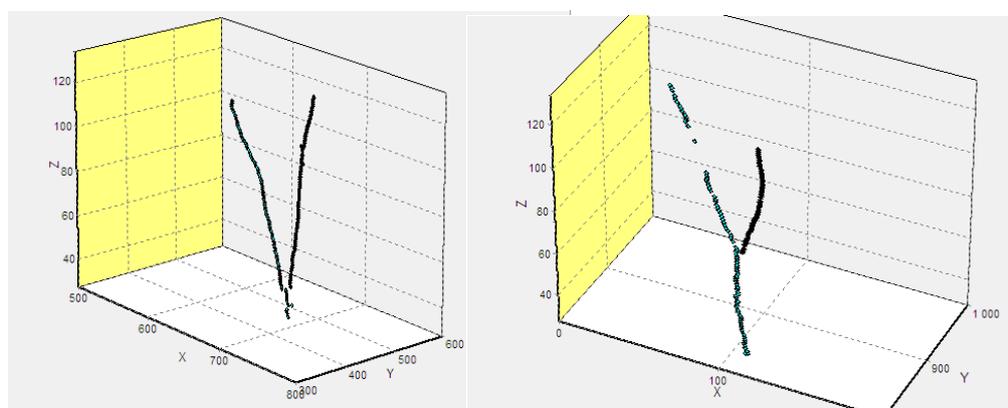


Рисунок 50.

Для оценки энергий частиц находится, во-первых, длина трека налетающей частицы до вершины взаимодействия и, во-вторых, длина треков вторичных частиц до остановки после реакции. Так как не все вторичные частицы останавливаются в пределах одного слоя эмульсии, только для части найденных вилок удалось восстановить кинематику событий. В итоге имеется около 50 восстановленных событий на протоне. На рисунке 51 показана плоскость Далица для событий рассеяния ядра ${}^6\text{He}$ на протоне с образованием ядер T и D. В первом случае реакция происходит с передачей протону двух нейтронов, во втором одного.

Там же приведены результаты розыгрыша этих двух реакций: синим цветом обозначены события с двухнейтронной передачей, жёлтым с однойнейтронной. Видно, что восстановленные события (чёрные точки) ложатся на обе кинематические области, подтверждая присутствие в ${}^6\text{He}$ обеих конфигураций.

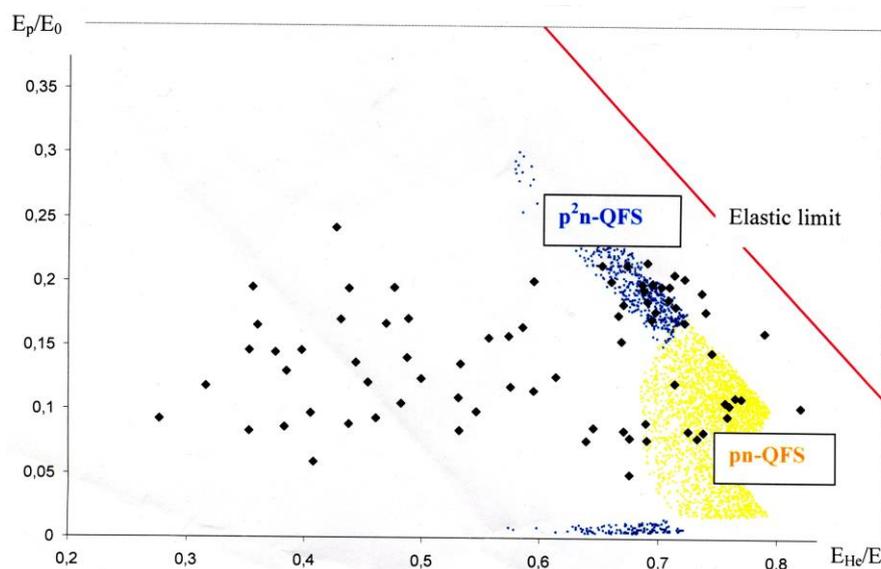


Рисунок 51.

2. Методика измерения зарядов релятивистских ядер в толстослойных эмульсиях.

Одной из важнейших процедур при анализе характеристик ядро-ядерных взаимодействий, зарегистрированных в ядерной фотоэмульсии, является определение заряда фрагментов ядра-снаряда, образовавшихся в процессе взаимодействия.

Определение зарядов фрагментов ядра-снаряда необходимо, например, при изучении внутренней структуры ядер, определении параметра удара взаимодействия, оценки числа нуклонов, участвовавших во взаимодействии и др. Эти вопросы возникают при решении глобальных проблем ядерной физики, таких как, например, исследование синтеза ядер во Вселенной, изучении строения ядер и механизма ядерных взаимодействий.

В процессе взаимодействия ядер при высоких энергиях образуется большое число частиц разной природы. Эти частицы подразделяются на группы по величине заряда, массы, пробега и энергии следующим образом:

1. Частицы, оставляющие в эмульсии следы с ионизацией $I/I_0 < 1,4$ (I_0 - минимальная ионизация в эмульсии). Это однозарядные релятивистские частицы с $\beta \geq 7$; в основном π -мезоны, K-мезоны и протоны, в том числе однозарядные фрагменты ядра-снаряда. Заряд однозарядных релятивистских частиц обычно легко определяется визуально.

2. "Серые" следы оставляют частицы с ионизацией $I/I_0 > 1,4$ и пробегом $R > 3000$ мкм; в основном это протоны отдачи из ядра-мишени с энергией больше 26 Мэв.

3. "Черные" следы оставляют частицы с $R < 3000$ мкм; это, так называемые, испарительные частицы - медленные продукты фрагментации ядра-мишени.

4. Быстрые фрагменты налетающего ядра с величиной заряда от 2 до величины заряда ядра-снаряда, которые вылетают в пределах узкого переднего конуса, угол раствора которого определяется первичным импульсом.

В наших экспериментах используются толстослойные фотоэмульсии толщиной ~ 600 мкм, которые для уменьшения искажений проявляются наклеенными на стекло. Такая технология приводит к тому, что эмульсия проявляется неравномерно по всему объему [83]. Ближе к стеклу число проявленных зерен для одного и того же следа меньше, чем у поверхности эмульсионного слоя. Поскольку следы частиц всегда идут под некоторым углом к плоскости эмульсионной пластины, необходимо учитывать изменение их ионизации с глубиной, для чего вводится поправочный коэффициент. Для определения зарядов фрагментов предварительно строится калибровочная кривая на основе измерений ионизации следов частиц с известным зарядом.

Создание методики измерения в ядерной фотоэмульсии зарядов релятивистских ионов стало первым этапом начавшейся на установке ПАВИКОМ работы по полной автоматизации измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении. Для выбора оптимальной процедуры определения заряда фрагмента были рассмотрены и использованы все известные методы определения заряда частиц по характеристикам их треков. Так, при определении зарядов в интервале $Z=3+7$ используется метод счета числа разрывов (промежутков) между сгустками проявленных зерен на треке. Для частиц с зарядами $Z > 7$, треки которых практически не имеют разрывов,

применяется метод измерения количества и/или длины следов дельта-электронов, образовавшихся в процессе ионизации среды вдоль трека заряженной частицы. Обоснованием метода служит тот факт, что распределение дельта-электронов по энергии и пробегу зависит от заряда Z ионизирующей частицы [83]:

$$\frac{d^2N}{dTdx} = \frac{1}{2} 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z^2 \frac{z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{F}{T^2}, \quad (8)$$

где T - кинетическая энергия дельта-электронов; x - количество вещества, пройденного ионизирующей частицей; A - атомный вес атомов среды; z - заряд атомов среды; β - скорость ионизирующей частицы. Параметр F зависит от спина ионизирующей частицы, но при релятивистских энергиях считается постоянной величиной; m_e и r_e - это масса и классический радиус электрона, поэтому множитель $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ равен $0.3071 \text{ Мэв} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$..

Ранее предпринимались попытки определять заряд частицы по ширине оставляемого ею следа и по степени его почернения, то есть по плотности произведенной ионизации [84-86]. Эти попытки, осуществляемые на фотометрах, не получили широкого распространения.

В данной работе предлагается комплексный метод определения заряда ядер, сочетающий в себе все известные методики. Был создан алгоритм, позволивший осуществлять с хорошей точностью измерение заряда ядер с $Z > 3$.

Исходным материалом для обработки послужили толстослойные ядерные фотоэмульсии типа БР-2 толщиной 600 мкм, облученные пучками релятивистских ядер на ускорителях. На начальном этапе разработки нового комплексного подхода к измерениям зарядов ядер в эмульсионных экспериментах, для построения калибровочной кривой, проводились измерения ионизации среды, производимой частицами с известными зарядами.

Процедура обработки на ПАВИКОМ трека заряженной частицы состояла в следующем. Оптическая система микроскопа, на котором установлен образец ядерной фотоэмульсии, проектировала изображение трека на CCD-матрицу установки ПАВИКОМ-2 [12-15].

Изображения, подлежащие обработке, накапливались в файлах в формате BMP с 256 градациями серого. Размер изображения - 384x288 пикселей². Образец одного из кадров представлен на рис. 5. Следам от частицы соответствуют области более темные по сравнению с окружающим фоном.

Обработка производилась в несколько этапов [87-89].

1. *Фильтрация.* Для увеличения эффективности выделения элементов трека проводилась предварительная обработка изображения с помощью специально подобранного математического фильтра. В результате усиливаются области потемнения, имеющие достаточно резкие границы. Эта процедура позволяет устранить фон и ослабить влияние различий в контрастности и яркости изображений на разных пленках.

2. *Бинаризация и кластеризация.* Все пиксеты отфильтрованного изображения разбивались на два класса: фон и кандидаты на след от частицы. Такое деление осуществляется с помощью обрезания на уровне порога, вычисляемом автоматически по форме гистограммы распределения числа пикселей с определенным значением серого на отфильтрованном изображении. В результате все изображение разбивалось на области, имеющие значение пикселей 0 (фон) и 1 (следы частиц и помехи в виде темных пятен, имитирующие следы). На изображении, полученном после бинаризации, выделялись кластеры - связанные области пикселей, имеющих значение, равное 0, подлежащие дальнейшей индивидуальной обработке.

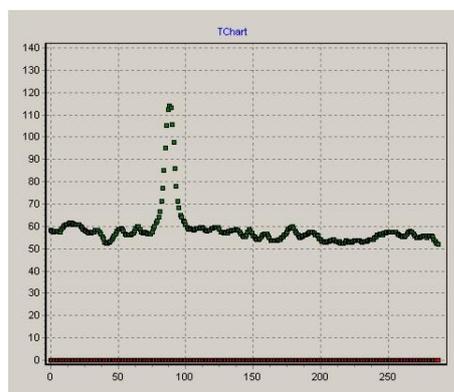


Рисунок 52.

3. *Выделение трека заряженной частицы и поиск его оси.* Исследуемая заряженная частица проходит почти параллельно одной из сторон изображения (ось X). Поскольку заряд частицы довольно большой, ее трек представляет собой почти сплошную линию с небольшим числом разрывов. Если просуммировать пиксели, имеющие значение 0, вдоль оси X при фиксированном значении Y, то при значении Y, соответствующем положению трека, эта сумма будет иметь максимум в точке с $Y=Y_{\max}$ (рис. 52).

Для построения оси трека сторона изображения вдоль оси X разбивается на 20 полос и на каждой полосе аналогичным образом производится поиск максимума $Y_{\max,i}$ $i=1, 2, \dots, 20$. Далее на плоскости задаются 20 точек (X^i, Y^i) имеющие координаты X^i , равные середине соответствующей полосы, и $Y^i=Y_{\max,i}$. Полученные в результате данной процедуры точки аппроксимируются прямой методом наименьших квадратов (см. рис. 53). Отдельные точки, дающие аномально большие значения (выбросы), исключаются из подгонки. Данный алгоритм позволяет получить положение оси для треков, проходящих под углом до 30 градусов к одной из сторон изображения.

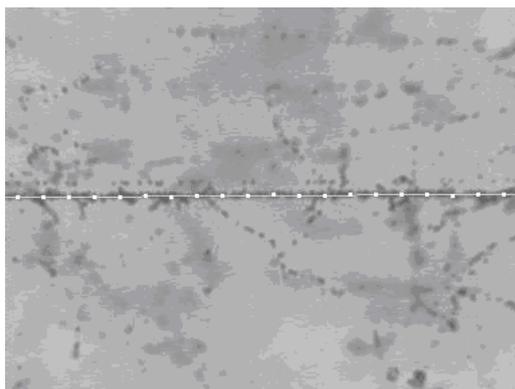


Рисунок 53.

Для выделения кластеров, принадлежащих треку, определяются те из них, которые имеют общие точки с осью. Далее, для всех пикселей, принадлежащих треку, строится распределение числа пикселей N , как функции расстояний пикселя до оси трека D - гистограмма расстояний. Пример такой гистограммы (для того же кадра на рис.5) приведен на рис. 54 точками. Эта гистограмма используется в дальнейшем для вычисления характеристик трека.

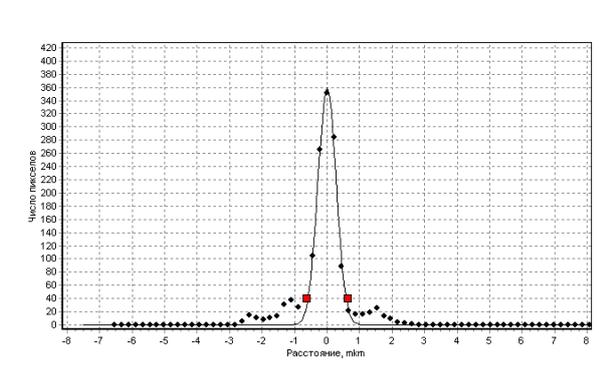


Рисунок 54.

4. *Вычисление характеристик трека.* Для вычисления характеристик определяется ширина основной части трека. Для этого на диаграмме расстояний выделяются точки, лежащие вблизи максимума (D_{\max} , N_{\max}) и имеющие высоту не менее $0,1N_{\max}$. Эти точки аппроксимируются функцией Гаусса. Результат аппроксимации изображен на рис. 54 кривой. Точки трека, лежащие на некотором расстоянии от оси, равном $\frac{3}{4}$ полуширины функции Гаусса (обозначены квадратами на рис. 54, считаются принадлежащими основному треку, остальные - трекам от дельта-электронов. В дальнейшем вычисляются следующие характеристики.

- сумма (Total Sum) числа всех пикселей на площади основного трека заряженной частицы и всех треков от дельта-электронов;
- число (N_e) дельта-электронов. Для вычисления этой характеристики сверху и снизу от оси проводятся две параллельные ей прямые на определенном расстоянии (для обрабатываемой пластинки это было 1.4 мкм). Числом электронов считается величина, равная половине от числа пересечений прямыми

границ кластеров трека;

- сумма (P_e) периметров кривых, огибающих треки дельта-электронов - параметр, позволяющий учитывать длину пробега дельта-электронов;
- количество (N_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- суммарная длина (L_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- зависимость ионизации от глубины прохождения ядра в эмульсии (число дельта-электронов на треках ядер ^{28}Si , проходящих на разной глубине в эмульсии).

Далее представлены результаты, полученные на основе анализа этих характеристик [87, 90, 91].

Исследовались фрагменты во взаимодействиях в фотоэмульсии ядер ^{28}Si с импульсом 4.5 ГэВ/нуклон ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Заряды фрагментов налетающего ядра ^{28}Si (с $Z_{\text{фр}}=3,5,6,7,9,11,12,14,16$) были предварительно определены без применения вычислительной техники вручную методами счета разрывов и/или числа дельта-электронов на их треке. На рис.55 представлена зависимость параметра «Total Sum» от заряда фрагментов, измеренная на ПАВИКОМ по описанной процедуре с использованием автоматизированной обработки эмульсии и компьютерного анализа данных. На рисунке видно, что измеренная интенсивность растет с увеличением заряда фрагмента и может быть аппроксимирована в пределах ошибок линейной функцией. Здесь указаны статистические ошибки измерений по 20 кадрам эмульсии, последовательно расположенным вдоль трека фрагмента. Ошибки вычислялись как стандартное отклонение от среднего для последовательности чисел. Таким образом, данная зависимость может быть использована в качестве калибровочной кривой для обработки эмульсионных экспериментальных данных, т.е. отсканировав на ПАВИКОМ трек частицы в эмульсии на достаточно большой длине и обработав его созданным пакетом программ, можно оценить ее заряд с помощью приведенной на рисунке кривой.

Другим параметром, позволяющим независимо определить или уточнить измеренное другим способом значение заряда ядра, является количество дельта-электронов. Логика процедуры счета числа дельта-электронов при автоматизированной обработке на ПАВИКОМ соответствует процедуре счета

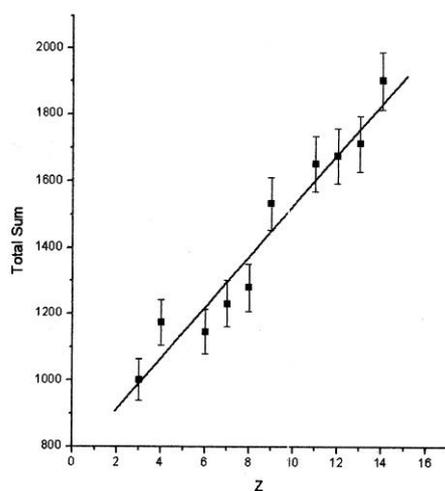


Рисунок 55.

дельта-электронов при ручной обработке данных. Результаты определения этого параметра для того же набора фрагментов приведены на рис. 56. Количество дельта-электронов пропорционально длине пути, пройденного частицей в эмульсии, этот процесс близок к пуассоновскому. Поэтому на рис. 56 для каждого Z приведено среднеквадратичное отклонение, равное корню квадратному из N_e .

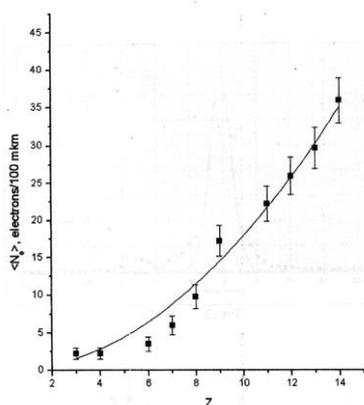


Рисунок 56.

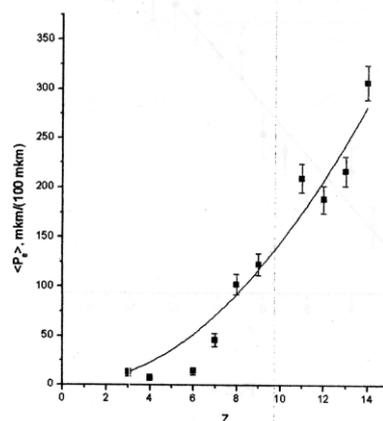


Рисунок 57.

Кроме того, в рамках проведенного методического исследования, была построена калибровочная кривая зависимости от заряда фрагмента длины кривой, огибающей треки дельта-электронов (параметр R_e). Данные, полученные этим методом, представлены на рис. 57. Некоторое искажение параметров, связанных с дельта-электронами, вносят следы фоновых частиц в случае если они пересекают след исследуемой частицы и рассматриваются программой обработки как треки дельта-электронов. Наибольшее влияние этот эффект оказывает на параметр R_e . Степень таких фоновых искажений можно оценить по величине N_e и R_e для частиц с наименьшим зарядом. После вычитания этого фона оставшаяся зависимость аппроксимируется параболой $N_e, R_e \sim Z^2$ (рис.5,6): $N_e = 0.18 \cdot Z^2$, $R_e = 1.44 \cdot Z^2$. Следует отметить, что измерение заряда ядра тремя независимыми методами значительно повышает достоверность результата.

Так же были исследованы зависимости количества промежутков заданной длины между сгустками проявленных зерен на треке $\langle N_g \rangle$ и суммарной длины этих промежутков $\langle L_g \rangle$ от заряда частицы. Полученные зависимости, аппроксимированные функцией $\sim 1/Z$, представлены на рис.58 и 59. Данный метод позволяет определять заряды фрагментов $Z_{эфф} \leq 6$ с высокой надежностью, поскольку в этой области значения $\langle N_g \rangle$ и $\langle L_g \rangle$ особенно чувствительны к заряду частицы. Метод определения заряда, использующий длину промежутков между зернами на треке частицы хорошо дополняет выше

описанные методы, использующие определение числа δ -электронов, которые максимально эффективны для зарядов $Z_{эфф} > 7$.

Кроме того были проведены измерения, позволившие определить и учесть изменение ионизации трека в зависимости от его глубины, как следствие, упоминавшейся выше, неоднородности проявления эмульсионного слоя. Зависимость параметра N_e от глубины прохождения трека в эмульсии представлена на рис. 60. Как видно из рисунка, амплитуда изменения параметра ионизации N_e в зависимости от глубины трека в эмульсии достигает -25 % , однако этот эффект существенен, главным образом, в интервале глубин от 0 до 50 микрон от границы эмульсия-стекло.

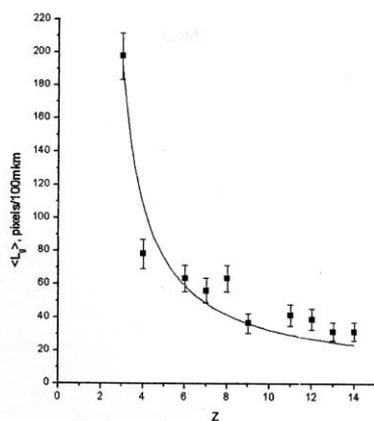


Рисунок 58.

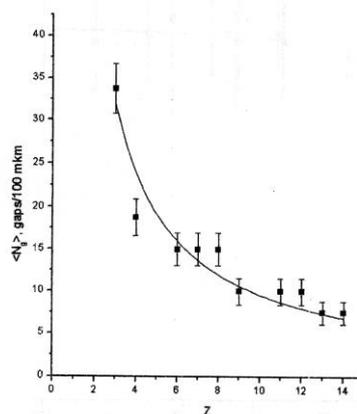


Рисунок 59.

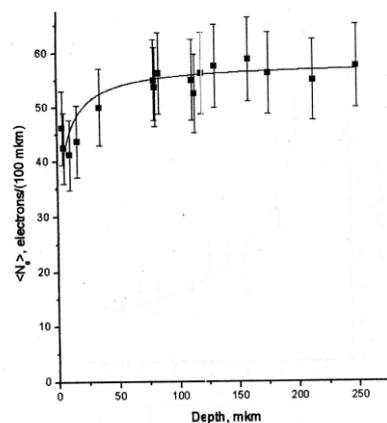


Рисунок 60.

Таким образом, в рамках автоматизации процесса обработки эмульсионных данных с помощью прибора ПАВИКОМ, разработана и протестирована методика определения зарядов релятивистских ядер в толстослойной ядерной

Таблица 1. Результаты определения заряда вручную и в автоматическом режиме в результате работы программного комплекса.

| Номер клетки | Заряд, определенный микроскопистом | | Заряд, определенный по автоматизированной | |
|------------------|------------------------------------|----------|---|----------|
| | первичный | фрагмент | первичный | фрагмент |
| 174-43/153 90-39 | 12 | 10 | 12.2±0.4 | 10.2±0.3 |
| 174-43/174 80-48 | | 5 | | 4.9±0.3 |
| 174-43/180 67-52 | 12 | | 12.2±0.4 | 10.2±0.3 |
| 174-43/88 44-55 | 12 | 6 | 12.2±0.4 | 6.6±0.5 |
| 174-43/129 48-39 | 10 | 6 | 9.3±0.6 | 5.9±0.4 |
| 174-43/59 08-68 | 14 | 13 | 14±0.5 | 13.3±0.5 |

фотоэмульсии. Заряд определяется независимо по нескольким параметрам:

- по площади трека с учетом дельта-электронов;
- по количеству образовавшихся вдоль трека ядра дельта-электронов;

- по длине кривой, огибающей треки дельта-электронов;
- по количеству промежутков между сгустками проявленных зерен в треке и суммарной длине этих промежутков (для малых Z).

На этом этапе работы построены калибровочные кривые, позволяющие определять заряд ядра по измеренным параметрам с точностью, зависящей только от длины отсканированного на ПАВИКОМ участка трека ядра. При сканировании участка трека длиной 1.6 мм, как в данной работе, точность определения заряда по параметру "Total Sum" составляет ~5%. При условии использования других обсуждаемых в статье параметров ошибка в определении заряда уменьшается в 1.5-2 раза. Увеличение длины сканируемого трека до 3 мм, по нашим оценкам, уменьшит эту ошибку еще в 1.5 раза. Таким образом, точность определения заряда по отсканированному на ПАВИКОМ участку трека ядра длиной 3 мм по совокупности параметров, определяемых созданным программным обеспечением, составит ~2% [87, 90].

Разработанный метод существенно ускоряет и повышает надежность определения зарядов в фотоэмульсионных экспериментах. Он является необходимым этапом автоматизации современных экспериментов в ядерной физике и востребован рабочими группами эмульсионных экспериментов как внутри России (ФИАН, ИГЭФ, ОИЯИ, СПб ФТИ, ФТИ (Алма-Ата) и др.) так и за рубежом (Словакия, Румыния, Индия, Китай и др.).

3. Изучение спектров электронов внутренней конверсии ядер группы лантаноидов.

В атласе спектров электронов внутренней конверсии [52] отсутствуют данные об интенсивностях L_2 и L_3 -линий для γ -перехода с энергией 148.16 КэВ в ядре ^{161}No (приведены лишь интенсивности K и L_1 -линий), а мировая база данных [91] включает в себя только информацию о ноль-переходах и уровнях возбуждения ядер. В годы, предшествующие изданию атласа, чувствительность и разрешение установок не позволяло разобраться в столь сложной картине наложения спектральных линий (Рис. 8).

В данном разделе представлены результаты измерений спектра электронов внутренней конверсии (ЭВК) фракции эрбия в области энергий

электронов ~ 140 КэВ. Ядерная фотоэмульсия со спектрограммой фракции эрбия, проэкспонированная на спектрометре ЛЯП ОИЯИ, была затем отсканирована на ПАВИКОМ-1. Из-за обилия спектральных линий в этой области ранее не представлялось возможным определить интенсивности линий ЭВК L_2 и L_3 для γ -перехода с энергией 148.16 КэВ в ядре ^{161}Ho [52]. Использование комплекса ПАВИКОМ-1 с разрешением 0.01 % позволило идентифицировать эти линии и определить их интенсивности.

С появлением автоматизированных микроскопных комплексов высокого разрешения ~ 0.5 мкм [1-4, 92, 93] стало возможным проведение исследований линий ЭВК на более высоком уровне. При этом ошибки, связанные с техникой измерений оказались пренебрежимо малыми по сравнению с ошибками, возникающими при получении спектральных линий.

В атласе Абдуразакова и др. [52] для исследуемого перехода указан только возможный вариант мультиплетности ($E2 + M1$), определенный по квантовым числам начального и конечного состояний ядер. В работе [94] была определена мультиплетность перехода, которая по данным этой работы оказалась $E2$. Однако по нашим измерениям предпочтительней вариант $M1$.

В таблице 2 представлены интенсивности линий ЭВК, измеренные на установке ПАВИКОМ-1 [95-98]. Из этих данных видно, интенсивности линий L_2 и L_3 примерно на порядок меньше интенсивности линии L_1 , что соответствует варианту $M1$. Смещение по энергии электронов вправо или влево всего на 100 эВ приводит к тому, что интенсивности линий L_1 , L_2 и L_3 почти выравниваются, что указывало бы на предпочтительность варианта мультиплетности $E2$ (Рис. 62, 63).

Для того, чтобы убедиться, что наша ошибка в положении спектральной линии не превышает 100 эВ, надо было тщательно проверить все возможные источники ошибок, которые могли бы привести к смещению положения максимума спектральной линии. Например, оказалось, что линии $K(962.32)$ и $K(966.18)$ гольмия-160 смещены на несколько сотен микрон, если шкалу энергий нормировать на линии мягкой части спектра. Это указывало, что ошибка в индукции магнитного поля в спектрометре СП-3, где экспонировалась наша эмульсия, превышает 0.01 %, приведенную в [52]. В этой связи для нормировки пришлось взять K -линию ЭВК с энергией 139.83 кэВ от распада изотопа ^{158}Er .

Во всех этих исследованиях использовалась эмульсия, экспонированная в бета-спектрографе СП-3 ЛЯП ОИЯИ с полем ~ 220 Гс. Фракция эрбия нарабатывалась на ускорителе ЛЯП ОИЯИ при облучении танталовой мишени протонами, с последующим радиохимическим выделением изотопов эрбия. Соль с изотопами эрбия наносилась на золотую проволочку, диаметром 100 мкм и толщиной 2 мкм, которая и вставлялась в пенал магнитного бета спектрографа.

В настоящей работе мы представляем результаты измерений спектров ЭВК, возникающих при распадах изотопов эрбия при времени экспонирования 25 мин в диапазоне энергий от 138 до 140 КэВ.

Величиной, подлежащей определению, является интенсивность почернения пластинки как функция расстояния от источника электронов до точки наблюдения X . Изображение, получаемое при сканировании пластинки, является двумерным и т.о. интенсивность в точке X является результатом статистической обработки Y величин, где Y - высота изображения в пикселях. Для данной серии измерений $Y = 1024$.

Получаемые изображения сильно зашумлены и нуждаются в предварительной обработке. Присутствующий на них шум имеет различное происхождение. При обработке изображения он был разбит на три категории.

1. Почти равномерно распределенная сетка мелких темных и светлых пятен - «белый шум».
2. Отдельные пятна, царапины, расположенные нерегулярным образом - «выбросы».
3. Искажения, возникшие в результате неравномерного освещения при сканировании пластинки.

Для ослабления влияния шума каждой из перечисленных выше категорий применялись разные алгоритмы, учитывающие их специфические особенности.

Ослабление влияния шума первой категории осуществлялось путем разбиения 1024 значений на 32 группы по 32 пикселя в каждой, усреднения значений в каждой группе и вычисления среднего полученных 32 средних. Результат двойной процедуры усреднения принимался за искомое значение.

Для отсеечения отдельных выбросов (шум 2-ой категории) при усреднении средних по описанной выше процедуре они сначала

ранжировались по величине, а затем в полученном наборе отбрасывались первые и последние 10 значений. Оставшиеся 12 усреднялись, и результат принимался за величину почернения в данной точке X.

Для устранения неравномерности освещения принималось во внимание то, что, во-первых, эта неравномерность одна и та же на всех кадрах и, во-вторых, имеется много кадров, где почернения, соответствующие искомым линиям, не намного превышают фон. С учетом этого был принят следующий алгоритм. Изображения, на которых расположены только очень слабые линии (в основном, флуктуации фона), суммировались, а результат делился на число просуммированных кадров. В итоге слабые и до этой процедуры линии ослаблялись во много раз, а результат почти соответствовал распределению света на поверхности пластинки. Это распределение впоследствии вычиталось из распределений, полученных в результате описанных ранее процедур.

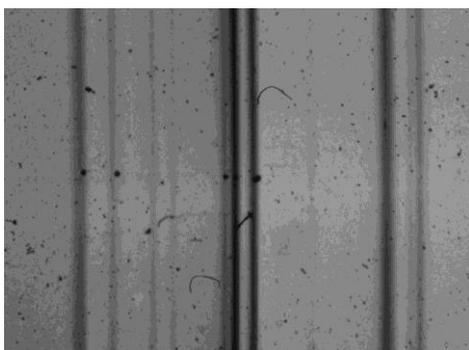


Рисунок 61.

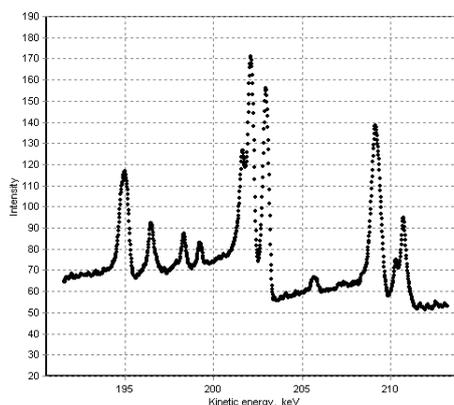


Рисунок 62.

На рисунке 62 показан результат выделения линий на одном из кадров (рис. 61).

На рис. 63а представлена калибровочная K-линия от распада изотопа эрбия-158 с периодом полураспада 2.25 часа (энергия электрона 139.83 кэВ). Справа от максимума на этой линии имеется прилив, который можно аппроксимировать гауссовой кривой и интерпретировать как линию L_3 от обсуждаемого гамма-перехода.

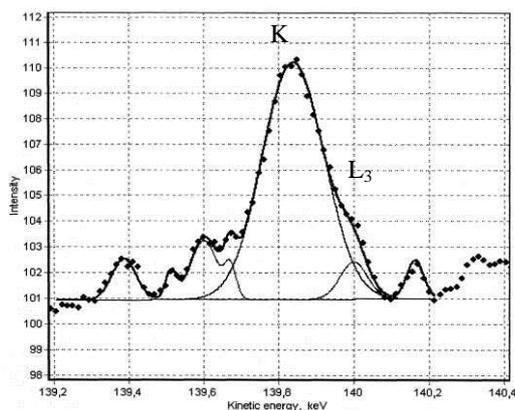
На рис. 63б показан результат применения метода наименьших квадратов к экспериментальному массиву точек в указанном диапазоне энергий. Из этого рисунка видно, что надежно идентифицируется линия L_1 с энергией электронов 138.73 кэВ и линия L_2 с энергией 139.09 кэВ. Укажем, что также можно выделить еще ряд линий, наиболее интенсивная из них линия с энергией 138.84 кэВ.

Полученные линии представлены в таблице 2 [98].

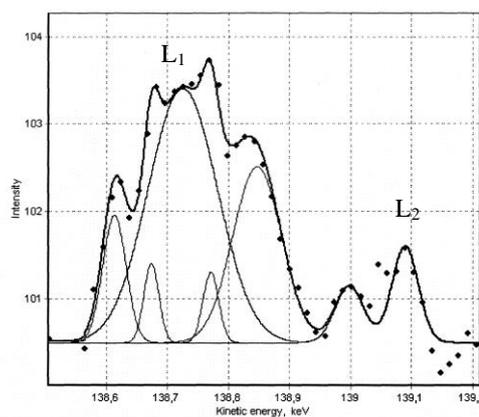
Таблица 2 [61].

| К и L-линии | K | L_1 | L_2 | L_3 |
|----------------|-------|--------|--------|--------|
| Положение, КэВ | 92.64 | 138.73 | 139.09 | 140.01 |
| Положение, КэВ | 92.64 | 138.77 | 139.24 | 140.09 |
| Интенсивность | 4.0* | 0.8* | 0.07 | 0.05 |

* - Интенсивность из [52]. Наши данные нормированы на линию L_1 ЭВК.



а



б

Рисунок 63.

Глава V. Исследования на основе методики твёрдотельных трековых детекторов.

1. Измерение характеристик потока нейтронов в пластиковых детекторах в эксперименте "Энергия плюс трансмутация".

Постановка задачи и описание эксперимента

Ускорители заряженных частиц с энергиями порядка 1 ГэВ и более, созданные в свое время для фундаментальных исследований в области ядерной физики, в последнее время все чаще используются для создания на их базе интенсивных импульсных источников нейтронов и экспериментальных установок для исследования электроядерного способа производства энергии и изучения трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики [49-51, 99]. Обе эти проблемы стали актуальными, когда интенсивности средних токов ускорителей достигли миллиамперных значений [49].

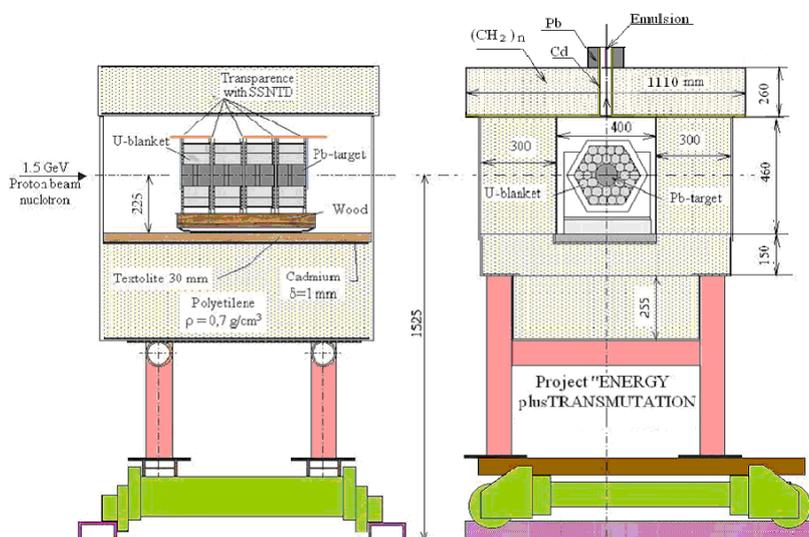


Рисунок 64.

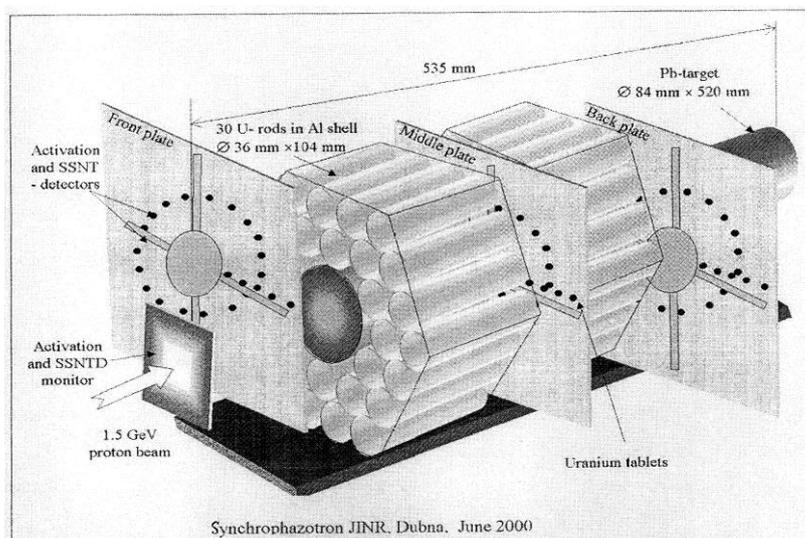


Рисунок 65.

В 1999 г. в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) создана и исследуется модель уран-свинцовой сборки [100] на протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ (рис. 64, 65). Модель состоит из свинцовой мишени (длина 52 см, диаметр 8,4 см), двухсекционного уранового blankets (в каждой секции по 30 стержней из естественного урана в герметичных алюминиевых оболочках, общей массой 103 кг), комплекса диагностических методик и аппаратуры - калориметр деления урана, включающий активационные и твердотельные трековые детекторы (так называемая активационная и трековая томография и осколочная радиография [101]) и термометрические датчики [100, 102] на основе микротермопар и полупроводниковых терморезисторов (см. рис. 64, 65). Установка оснащена также системой мониторинга протонного пучка, состоящей из трековых и активационных детекторов. Для определения парциальных интегралов деления ядер естественного урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами в зависимости от радиуса уранового blankets используются твердотельные трековые детекторы, изготовленные в виде сплошных полосок с радиаторами из урана (обедненного (0,4%) и обогащенного (5%) изотопом уран-235) и расположенные на детекторных пластинах, перпендикулярных оси пучка.

Широкое применение в этом эксперименте твердотельных трековых детекторов на основе лавсана обусловлено его высокой эффективностью регистрации осколков деления, низким собственным фоном и относительной простотой технологии обработки. Программа исследований в этой области предусматривает увеличение размеров и массы уранового blankets, и как следствие этого, значительное увеличение числа трековых детекторов, экспонируемых в составе установки «Энергия плюс трансмутация» [100]. В этих условиях визуальный подсчет треков на большом количестве трековых детекторов (десятки и сотни штук), распределенных по всему объему уран-свинцовой сборки, будет представлять весьма трудоемкую и долговременную процедуру.

Облучение U/Pb-сборки происходило на протонном пучке нуклотрона при этом флюенс составил 4.0×10^{13} протонов. На каждой из пяти пластин было размещено по два набора радиаторов с напылением из металлического урана с разным обогащением и трековых детекторов между ними. Детекторы были изготовлены в виде полосок размером 1x12 см. Детекторы на пластине располагались симметрично в радиальном направлении. (рис. 66). На каждой пластине размещалось два типа комплектов с детекторами. Для верхнего комплекта использовались кадмиевые экраны, нижний использовался без экранов. Место расположения детекторов с экраном выбиралось из условия безопасности и легкости выемки детекторов.

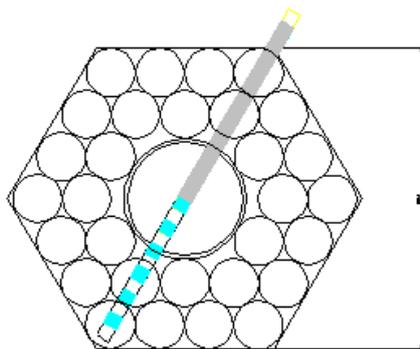


Рисунок 66.

Детекторы были обработаны на установке ПАВИКОМ-2 [103]. Типичные примеры изображений на лавсановых пленочных детекторах приведены на рис.

67 и 68. Первый из них (рис. 67) был получен при облучении пленки пучком частиц, направленным перпендикулярно поверхности трекового детектора, второй (рис. 68) - при облучении частицами, направление падения которых на детектор было практически изотропным. Видна качественная разница этих изображений. В первом случае пятна почернения от треков имеют круглую форму.

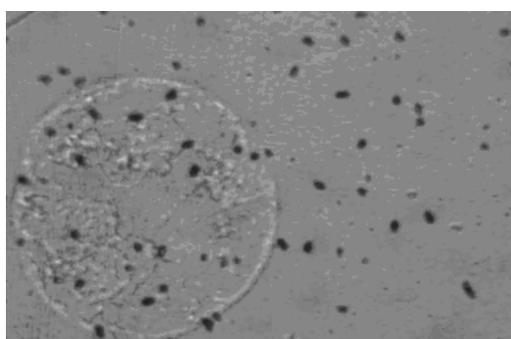


Рисунок 67.

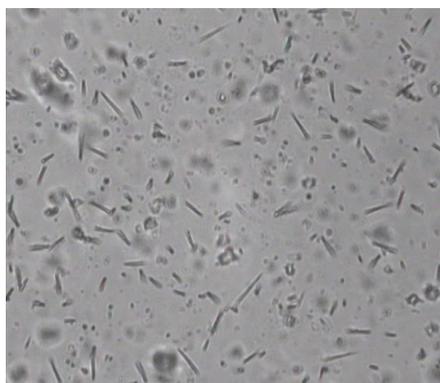


Рисунок 68.

Во втором случае следы от треков имеют очень разнообразную форму: круглую или продолговатую, с резкими или размытыми краями. Некоторые треки от частиц, которые падают под углом, близким к 45° , не помещаются по глубине целиком в область резкого изображения. Определенная доля короткоживущих фрагментов ядер распадается, в результате этого следы от таких ядер имеют расходящиеся раздвоенные «хвосты». Изображение полей зрения, выводимое на экран компьютера и хранимое в файлах, состоит из набора прямоугольных ячеек (пикселей) различных оттенков серого цвета. Эти оттенки принято характеризовать параметром в интервале от 0 до 255 (1 байт), причем величина параметра, равная 0, соответствует черному цвету, а равная 255 - белому цвету.

Рассмотрим вначале алгоритм обработки для случая небольших потоков частиц. Первым шагом решения задачи автоматической обработки является отделение всех пятен почернения от фона. Эта процедура производится путем отсечения изображения пятна на определенном уровне $T_{пор}$. Все пиксели, почернение которых $T_{пик}$ меньше $T_{пор}$, из дальнейшей обработки исключаются.

Оставшиеся пиксели образуют различные по форме кластеры, из которых методом распознавания образов выделяются треки. Очевидно, что форма кластера, а, следовательно, и результат распознавания, существенно зависят от $T_{\text{пор}}$. Несмотря на разнообразие форм треков на изображении, представленном на рис. 68, для процедуры распознавания был разработан простой алгоритм, позволяющий выделять треки с достаточной степенью надежности. Этот алгоритм хорошо работает и при анализе изображений, показанных на рис 67, 66. Алгоритм распознавания следов в лавсановой пленке построен на использовании двух особенностей, характерных для треков. Во-первых, практически все треки на обрабатываемых пленках имели количество пикселей больше 20 и меньше 150. Эти пределы давали возможность осуществить предварительный отбор кластеров, подлежащих дальнейшей обработке и распознаванию следов (треков).

Во-вторых, все треки имели ширину в пределах 7-8 пикселей, а их длины не превышали 50 пикселей. Для использования этого критерия отбора через центр тяжести выделенного кластера проводилась средняя линия. Затем для всех пикселей кластера рассчитывались расстояния до средней линии. Если эти расстояния превышали 4 пиксела, то этот кластер из дальнейшего анализа исключался. Аналогичная проверка осуществлялась и по длине кластера. Эффективность данного алгоритма проверялась путем сравнения результатов, полученных при визуальном и автоматизированном подсчетах числа треков. Проверка показала, что такой, казалось бы, очень простой алгоритм, позволяет добиться степени распознавания 85-90% треков на изображениях типа рис. 67 и более 90% — на изображениях типа рис. 68. Выше уже отмечалось, что результат распознавания следов во многом зависит от выбора величины $T_{\text{пор}}$, алгоритм получения которого должен строиться на основе особенностей каждого изображения. Для построения алгоритма визуально были проведены подсчеты числа треков для нескольких фрагментов изображений. Их результаты сравнивались с результатами, полученными на компьютере при разных значениях порога $T_{\text{пор}}$. На рис. 69 и 90 показаны зависимости общего числа пятен

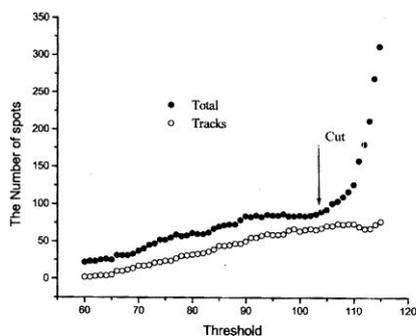


Рисунок 69.

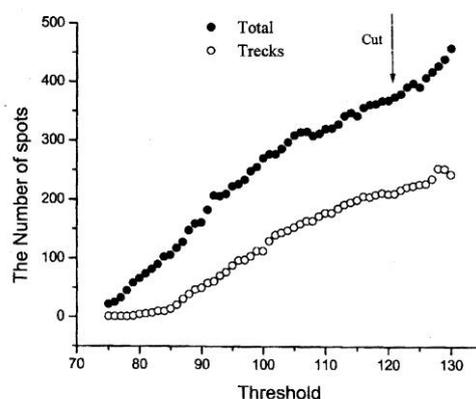


Рисунок 70.

и выделенных треков от величины $T_{\text{пор}}$ для изображений, приведенных на рис. 67 и 68, Стрелками обозначено значение оптимального порога, при котором автоматизированный и визуальный просмотры дают одинаковый результат. Из сравнения рис. 69 и 70 можно сделать вывод о необходимости разных алгоритмов при обработке двух рассматриваемых типов изображений, поскольку зависимость числа пятен и треков от величины $T_{\text{пор}}$ совершенно разная. В случае изображения на рис. 67 следы треков, в основном, имеют одинаковую форму и четкие границы. С другой стороны, на изображении практически отсутствуют посторонние (фоновые) пятна. Поэтому такие пленки имеют широкий интервал $T_{\text{пор}}$, внутри которого практически не появляются новые пятна. В результате зависимость числа пятен от порога имеет четко выраженное плато. На рис. 69 видно, что оптимальное значение $T_{\text{пор}}$ находится в самом конце плато. Аналогичная картина наблюдается для всех изображений такого типа. Зависимость числа пятен от $T_{\text{пор}}$ для изображений второго типа, приведенных на рис. 68, более монотонная, плато на рис. 70 отсутствует. По этой причине описанный выше алгоритм для этих изображений не подходит. В таком случае для оценки величины $T_{\text{пор}}$ были использованы особенности гистограммы почернений пикселей изображения, график которой приведен на рис. 71. Напомним, что по горизонтальной оси откладывается параметр, значение которого, равное 0, соответствует черному пикселу, а 255 - белому.

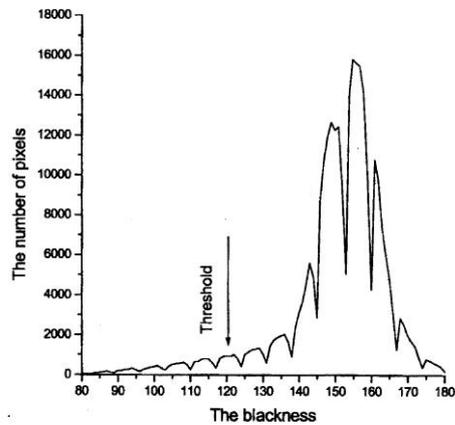


Рисунок 71.

Периодическая структура, явно видимая на гистограмме, имеет аппаратное происхождение и связана с особенностями видеоплаты, осуществляющей интерфейс с видеокамерой. Стрелкой обозначена оптимальная величина порога. Видно, что гистограмма состоит из двух областей. Первая включает пиксели, находящиеся внутри пятен как посторонних (фоновых), так и исследуемых треков, вторая, в основном, включает пиксели фона. Оптимальная величина порога отсекающая несколько отстоит от границы между этими двумя областями. Как показало исследование, относительная величина этого «отступа» (порога) с большой степенью точности одинакова во всех изображениях данного типа. На основе этой особенности был разработан алгоритм оценки $T_{пор}$. Проверка показала, что этот алгоритм хорошо работает и на изображениях первого типа, хотя степень порога (отступа) от границы там другая. Качество распознавания треков можно увидеть на рис. 72 и 73, на которых показаны силуэты следов треков, полученные после обработки изображений, показанных на рис. 67 и 68. Следует отметить, что рассмотренный выше алгоритм распознавания треков может быть использован только при подсчете одиночных следов при небольших загрузках детектора. Пересекающиеся треки в данном алгоритме отбрасываются как посторонние пятна. Это означает, что возможности такого алгоритма ограничиваются обработкой пленок, полученных при небольших потоках исследуемых частиц.



Рисунок 72.

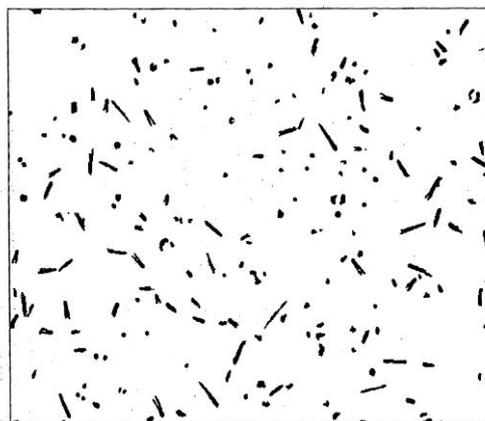


Рисунок 73.

Таким образом, распознавание треков на лавсановых пленках, выделение их на фоне дефектов пленки и их подсчет является сравнительно простой задачей при отсутствии пересечений, то есть при плотностях треков не больше 10^5 тр/см². Реальная плотность треков, наблюдаемая в эксперименте, порядка 10^6 - 10^7 тр/см² [63], зависит от координат детектора, и очевидно будет возрастать с увеличением интенсивности первичного протонного пучка. Пример изображения лавсанового детектора при большой плотности нейтронов ($>10^7$ нейтронов в импульсе) приведён на рис. 74. Выделение самих кластеров не является проблемой (рис. 26), однако подсчет числа пересекающихся следов частиц затруднён. В этих условиях необходимо либо искусственно уменьшать плотность треков, уменьшая время экспозиции или телесный угол вхождения осколков, либо вырабатывать дополнительные критерии подсчета плотности треков по степени почернения плёнки. Последний вариант выглядит более естественным и предпочтительным.

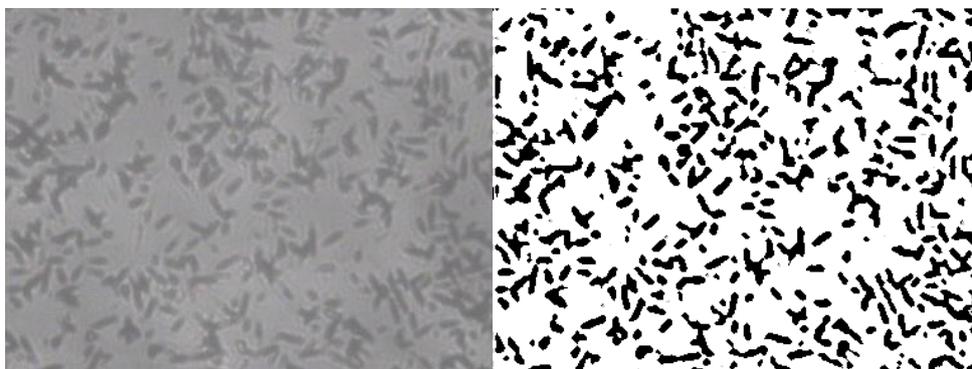


Рисунок 74.

Для осуществления этой задачи в программный комплекс был включён блок обработки изображений ТТД на основе метода нечётких множеств [56, 57]. Для лучшего понимания использованных приёмов приведём основные сведения об этом методе.

В обычной теории множеств [104] принадлежность элементов множеству определяется однозначным образом: "Элемент a принадлежит множеству A , что символически записывается $a \in A$ или $A \ni a$. Запись $a \notin A$ или $A \not\ni a$ означает, что элемент a не принадлежит A ." На основе этого определения строятся логические операции AND, OR, NOT, вводятся понятия "истина и "ложь", определяются понятия других математических разделов. В теории нечётких множеств принадлежность множеству определяется неоднозначно путём задания вероятности для элемента принадлежать тому или иному множеству с помощью так называемой функции принадлежности $m_A(a)$. Эта функция показывает вероятность того, что элемент a принадлежит множеству A . Для достижения математической непротиворечивости естественными являются требования, чтобы элемент принадлежал какому-нибудь множеству и полнота принадлежности, т. е. сумма $\sum m_A(a) = 1$ по всем A . На основе нечётких множеств строятся операции нечёткой логики, когда исходные функции принадлежности преобразуются в функции принадлежности результата.

В нашем случае неоднозначность принадлежности заключается в том, что кластеры одного и того же размера могут быть результатом пересечения разного числа треков, т. е. принадлежать разным множествам, характеризуемым разным

числом треков. Для решения задачи подсчёта общего числа треков диапазон возможных площадей кластеров был поделён на j^{\max} диапазонов и введена матрица вероятности $W(N, S_j)$, каждый член которой задаёт вероятность того, что кластер площади из диапазона S_j ($j=1, \dots, j^{\max}$) является результатом пересечения N кластеров. Если эта матрица известна, то можно определить среднее количество треков $\hat{N}(S_j)$, содержащихся в кластере с площадью из диапазона S_j

$$\hat{N}(S_j) = \sum_{N=1}^{N^{\max}} N \cdot W(N, S_j); \quad (9)$$

Тогда подсчитав число кластеров из диапазона S_j , расположенных на изображении n_j , можно оценить среднее число треков на нём:

$$\bar{N} = \sum_{j=1}^{j^{\max}} n_j \cdot \hat{N}(S_j) \quad (10)$$

Матрица вероятности зависит от характеристик следов частиц, которые в свою очередь определяются свойствами детектора (радиатор и пластик) и условиями обработки (состав раствора и условия травления). Для её получения можно использовать две возможности. Во-первых, матрицу вероятности можно смоделировать, разыгрывая заполнение площади изображения треками с известными характеристиками. В условия розыгрыша можно включить положение трека, углы по отношению к поверхности детектора, появление частиц разных сортов (разные осколки ядер), плотность потока и т. д. Обработав полученное "изображение" можно получить матрицу вероятности.

В программном комплексе принят другой вариант, основанный на диалоге эксперта и программы. Для реализации этого диалога программа, прежде всего, обрабатывает реальное изображение треков и собирает полученные кластеры по группам в соответствии с набором S_j . Затем кластеры последовательно предъявляются по группам эксперту, который производит оценку того, сколько кластеров пересекается в данном кластере. Полученные данные обрабатываются, и вычисляется матрица вероятности. На рисунке 75 изображено диалоговое окно её построения для одного из диапазонов площади (200 пикселей) $<S<$ (250 пикселей). Голубым цветом в окне выделен кластер, оценку которого

необходимо провести в данный момент.

По построенной матрице вероятности производится вычисление средних чисел треков $\hat{N}(S_j)$ для каждого диапазона S_j и программа готова к определению потоков нейтронов.

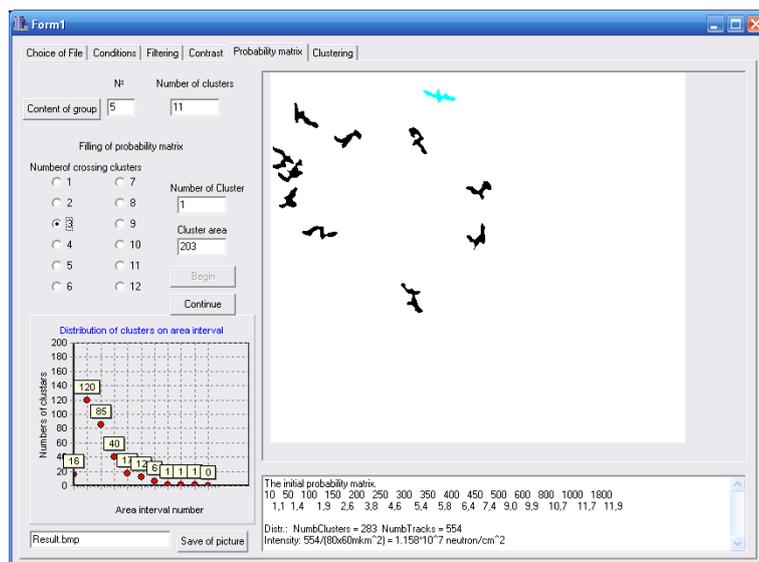


Рисунок 75.

После обработки очередного изображения программа определяет количество кластеров n_j в диапазонах S_j и, используя величины $\hat{N}(S_j)$ производит оценку количества \bar{N} треков частиц на изображении.

Для приведённого на рис. 74 изображения получено 283 кластера, что с учётом распределения кластеров по площади и матрицы вероятности даёт 554 трека. Учитывая, что размер изображения составляет величину $80 \times 60 \text{ мкм}^2$, получим оценку потока $\sim 1,15 \cdot 10^7$ треков/см² на импульс. Очевидно, что для многократного использования полученной матрицы вероятности геометрия облучаемой детекторной сборки и режимы травления должны быть идентичными, а средняя площадь почернения, создаваемая единичным треком, хорошо промеренной.

2. Изучение зарядового распределения тяжёлых и сверхтяжёлых ядер космических лучей по их следам в оливинах из метеоритов.

Регистрация тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 100$ принадлежит к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики [105].

Вопрос о существовании сверхтяжёлых ядер имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Прежде всего, представляет интерес проверка предсказания [40] значительного увеличения стабильности ядер вблизи магических чисел $Z = 114$ и $N = 184$ (N - число нейтронов), которое могло бы приводить к существованию в этой области "островов стабильности" сверхтяжёлых ядер. Подтверждения этого предсказания получены в экспериментах под руководством Ю.Ц. Оганесяна на ускорителе ОИЯИ, где недавно были открыты ядра 114-го и 116-го элементов [106] и заявлено открытие 117-го [107]. Время жизни некоторых из этих ядер составляет несколько секунд и даже минут, что в десятки тысяч раз превышает время жизни ядер с меньшим зарядом.

Несмотря на этот успех, дальнейшие поиски сверхтяжёлых элементов сохраняют свою актуальность. Дело в том, что эксперименты на ускорителях приводят к созданию изотопов ядер, находящихся не в зоне стабильности, а вблизи неё. Эти изотопы имеют время жизни в лучшем случае минуты, что на много порядков больше чем у ядер в зоне нестабильности $94 < Z < 100$, но много порядков меньше того, что должны иметь стабильные ядра. Результаты дубнинского эксперимента стимулируют продолжение таких поисков, требуют дальнейшей проверки и подтверждения. Необходимы поиски и других возможных сверхтяжёлых ядер. Если закономерности, связанные с магическими числами, продолжают быть существенными и для очень больших значений N и Z , то нельзя исключить существования "островов стабильности" и для еще более тяжелых ядер. Несомненный интерес представляет также проверка возможности существования других стабильных форм ядерной материи, содержащих, например, странные [108] или другие, более тяжелые кварки [109].

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, и моделей удержания космических лучей в галактике. Существующие в настоящее время экспериментальные данные по распространенности тяжелых ядер ($Z > 50$) во Вселенной, а также по спектрам и потокам этих ядер в космических лучах весьма бедны, а для трансформированных ядер достаточно надежные данные вообще отсутствуют. Точно так же отсутствуют какие-либо данные и о возможном существовании экзотических сверхтяжелых ядер.

Согласно существующим представлениям, элементы, начиная с углерода и тяжелее, образуются в недрах звезд и при взрывах сверхновых [105]. Тяжелые и сверхтяжелые элементы, находящиеся в Таблице Менделеева за висмутом, образуются в результате r (*rapid*)-процессов, которые происходят при высокой концентрации нейтронов и могут приводить к образованию сверхтяжелых ядер с числом нейтронов вплоть до $N = 184$. Кроме этих традиционных механизмов, обсуждается возможность образования очень тяжелых ядер (с массовым числом до 500) при большой плотности нейтронов (порядка 10^{30} см^{-3}) и умеренной температуре $T < 10^8 \text{ К}^\circ$ [110]. Такая ситуация может реализоваться в неравновесных оболочках нейтронных звезд, выбросы из которых приведут к появлению сверхтяжелых элементов в межзвездной среде, звездах и планетах [111].

Рассмотрим более детально проблему образования сверхтяжелых элементов в процессах, происходящих во Вселенной, на примере последних результатов, полученных в оболочечной модели [112]. Для реализации сценария длительной нейтронной экспозиции с плотностью нейтронов более 10^{19} см^{-3} необходимы условия, возникающие при выбросе в межзвездную среду сильно нейтронизованного вещества при слиянии нейтронных звезд в процессе эволюции тесных двойных систем [113] или струй с поверхности нейтронных звезд, где начальное для r -процесса отношение числа нейтронов к зародышевым ядрам достаточно велико (более 300) [112]. В работе [112] рассматривалась

эволюция химических элементов из области в пределах $20 < Z < 111$ в модели слияния нейтронных звёзд. В момент наивысшей плотности нейтронного потока картина распространённости элементов представлена на рис. 76. Видно, что область распространённости охватывает и сверхтяжёлые элементы с $Z \approx 110$. После спада плотности нейтронов ниже 10^{19} см^{-3} , когда скорость β - и α -распада превышает процесс захвата нейтронов, происходит распад многих радиоактивных ядер и через 10^{10} с остаётся узкая полоса стабильных ядер, в том числе в области $Z=110$ (рис. 77).

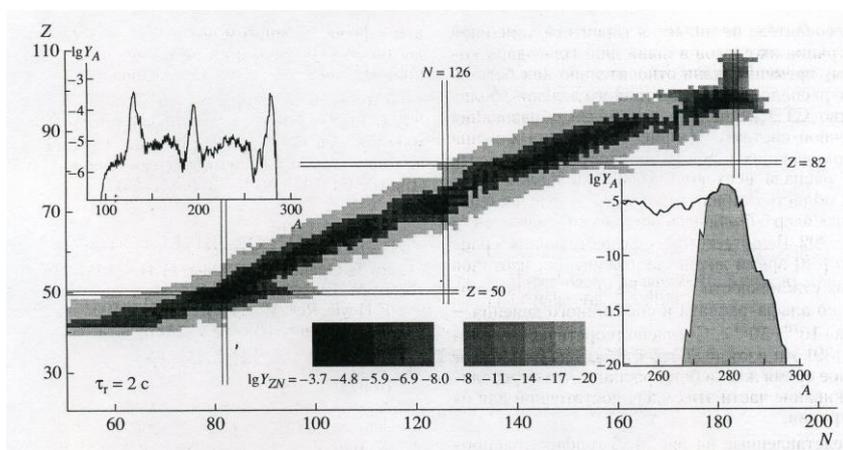


Рисунок 76.

Различными оттенками серого показана распространённость изотопов в условиях высокой плотности нейтронов.

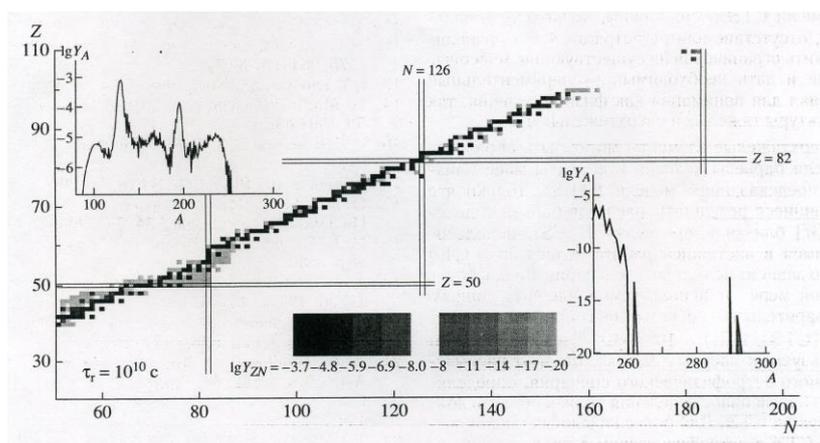


Рисунок 77.

Распространённость элементов через 10^{10} с после окончания r-процессов.

Таким образом, поиск сверхтяжёлых элементов представляет собой реальную задачу, хотя их поток может быть очень мал в силу редкости условий для их рождения. Эксперименты по поиску сверхтяжелых ядер в составе космических лучей первоначально проводили с использованием толстых слоев ядерной эмульсии, экспонировавшейся в верхних слоях атмосферы на шарах-зондах [114]. В дальнейшем для этой цели использовали также многослойные детекторы из полимерных материалов в сочетании с черенковскими детекторами [115] на спутниках.

На рисунке 78 приведены существующие данные о распространенности элементов, полученные на баллонах, аэростатах, спутниках и из метеоритов [116]. Видно, что поток сверхтяжёлых элементов (свинец, висмут, уран и торий) более чем на 10 порядков слабее по сравнению с потоком водорода. Это является причиной, по которой данных об этой области таблицы Менделеева в Космосе очень мало.

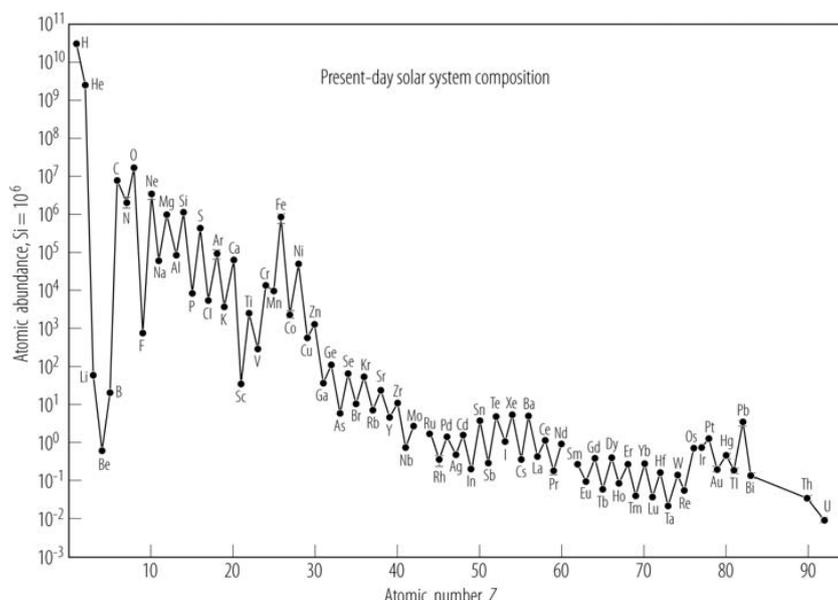


Рисунок 78.

На рисунках 79-84 приведены результаты экспериментов по регистрации сверхтяжёлых ядер на аэростатах и спутниках. На рисунке 85 собраны данные о самых тяжёлых ядрах ($Z > 86$), полученных в указанных выше экспериментах.

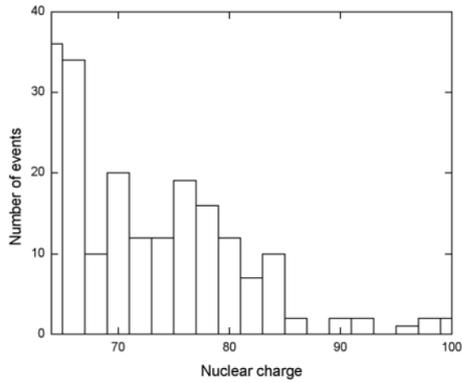


Рисунок 79.

Рисунок 79. **Skylab**; E.K. Shirk, P.V. Price; 1978 $Z \geq 65$. Спутник, 430 км, 230 дней, пластик (стопки лексана) [114]

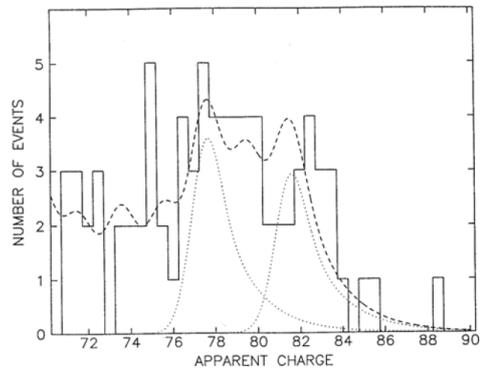


Рисунок 80.

Рисунок 80. **Ariel 6**; P.H. Fowler et al. 1987 $Z \geq 70$. Спутник, 625 км, 427 дней, электроника [115].

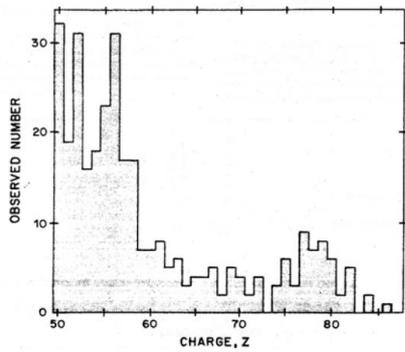


Рисунок 81.

Рисунок 81. **HNE (HEAO 3)**; W.R. Binns et al. 1989 $Z \geq 50$. Спутник, 495 км, 454 дня, электроника [117].

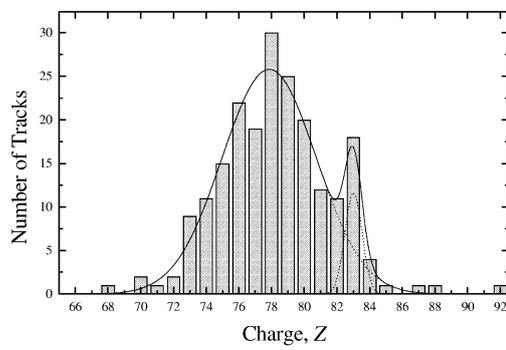


Рисунок 82.

Рисунок 82. **UHCRES**; C. Domingo, J. Font et al. 1995 $Z \geq 68$. Спутник, 450 км, 6 лет, пластик (стопки лексана) [118].

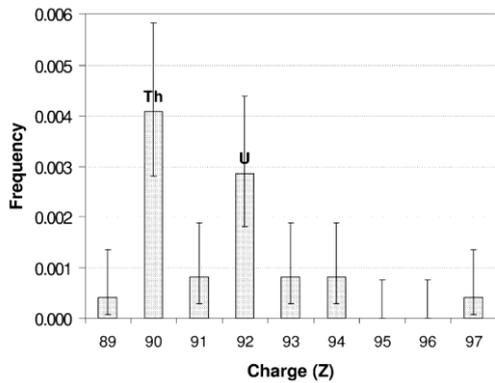


Рисунок 83.

Рисунок 83. **UHCRC**; J. Donelly, ICRC-2001 [119].

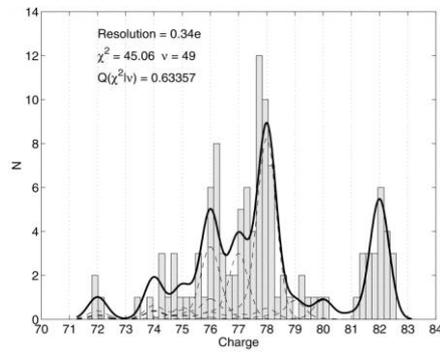
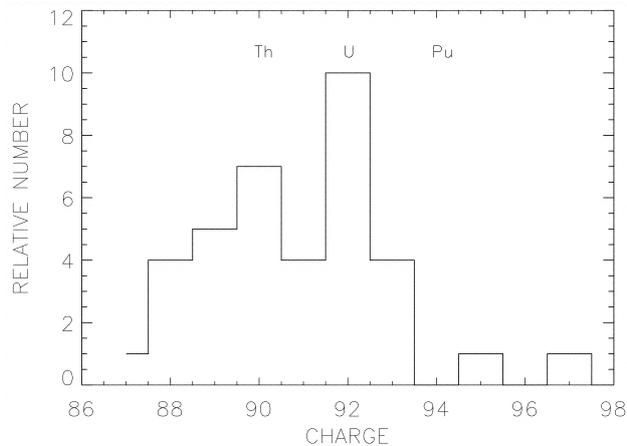


Рисунок 84.

Рисунок 84. **Trek**; В. А. Weaver, А. J. Westphal. Станция "Мир", 5 лет, 450 км, стопки стёкол [120.]

Рисунок 85. Распространённость ядер с $Z > 86$.

Таким образом, в области ядер с $Z > 86$ имеется только несколько десятков событий и очень неопределённые данные об их энергетическом распределении (*HEAO 3*; *Ariel 6*; *Skylab*; *UHCRC*; *Trek*). Причина этого в ничтожно малых потоках таких частиц: $F \sim 1-2 \text{ nucl./m}^2/\text{year}$. Преодолеть эту трудность возможно двумя путями: либо значительно (на несколько порядков) увеличивать площади детекторов, что в космосе сделать довольно трудно, либо

увеличивать время экспозиции. В настоящее время эксперименты на спутниках длятся годы, однако этого всё-таки недостаточно для эффективной регистрации сверхтяжёлых ядер.

В то же время в природе существуют твёрдотельные «детекторы», облучавшиеся длительное время (десятки и сотни миллионов лет) частицами космического происхождения - это метеориты. Более того, наибольшее количество информации, которое легло в основу построения обобщенной кривой распространённости элементов Солнечной системы, получено из данных по изотопному содержанию метеоритов [116]. Таким образом, они уже давно используются для получения информации об изотопном составе вещества Солнечной системы. На рисунке 86 [116], например, показана относительная распространённость элементов, полученная путём изучения фотосферы Солнца и хондритов из метеоритов. Видно, что эти данные хорошо согласуются.

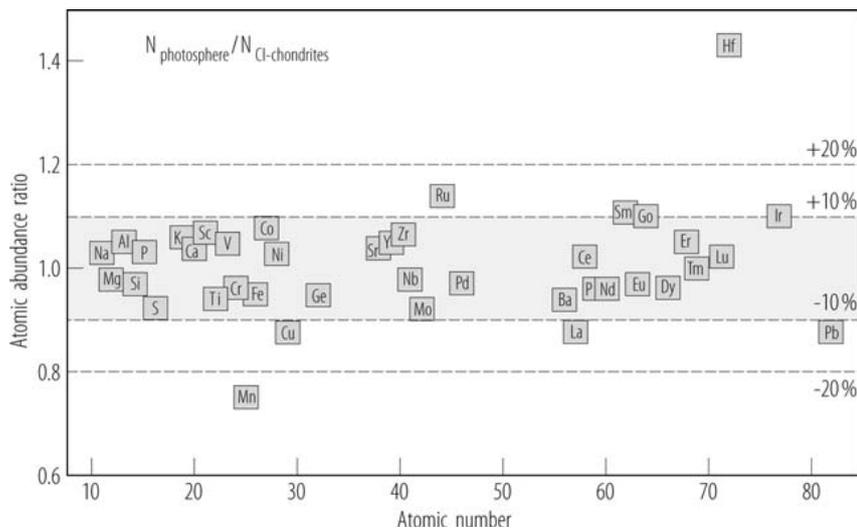


Рисунок 86.

Изучение галактических космических лучей в метеоритах началось в середине 60-х годов прошлого века. Впервые в метеоритах тяжелые галактические ядра ($Z \sim 26$) были обнаружены в 1964 г. [121]. Более тяжёлые ядра обнаружены в 1967 г. [122] (Fleischer et al.).

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 [123]. Была разработана эффективная методика выявления треков путем отжига и травления образцов. Среди выявленных треков ядер с $Z > 60$ более 1000 было отнесено к трекам ядер группы тория-урана (длина отоженных треков 190-220 мкм). Обнаружены также следы длиной 365 мкм, которые авторы интерпретируют как треки ядер с $Z \geq 110$ (рис. 87) [124-127].

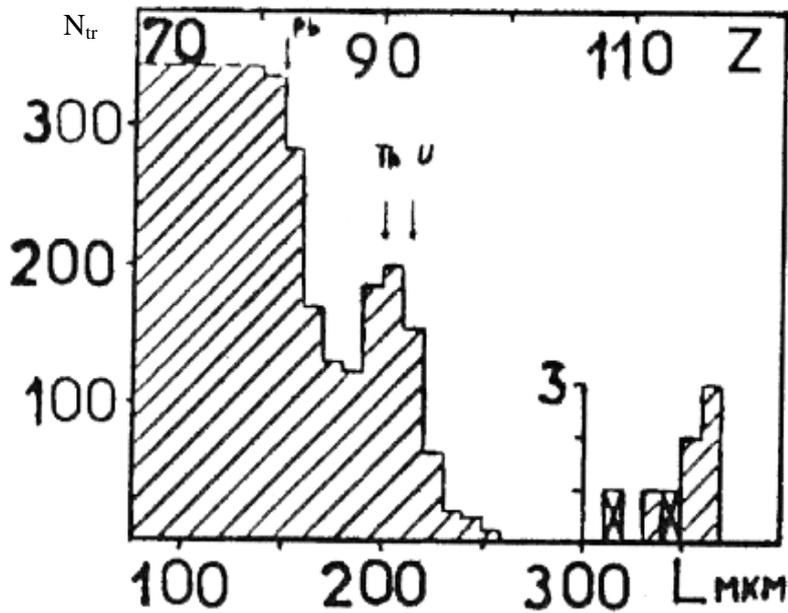


Рисунок 87 (Из [125]).

Приведённый результат возвращает нас к известному вопросу о существовании сверхтяжёлых ядер ($Z > 100$) в природе.

В 2005 г. группа сотрудников ФИАН выступила с предложением эксперимента ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов - Поиск тяжелых и сверхтяжелых Ядер), в котором для просмотра образцов и поиска и обработки треков тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов предполагается использовать современный высокоэффективный

комплекс ПАВИКОМ [128]. Как и предыдущие работы с оливинами, эксперимент ОЛИМПИЯ основан на использовании метода твердотельных трековых детекторов, в котором частицы регистрируются по производимым ими радиационным повреждениям в объеме материала детектора. При поиске реликтовых треков, оставленных частицами космических лучей в минералах, входящих в состав некоторых метеоритов [10,129], используется способность силикатных кристаллов, входящих в состав метеоритов (оливинов, пироксенов), регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($>10^8$ лет) треки ядер с $Z > 20$ [122]. Типичный возраст метеоритов и, следовательно, время их экспозиции в потоке космических лучей оценивается как 10^7 - 10^9 лет. Поэтому они могут содержать большое число треков космических ядер. Как показывают оценки [124, 130], в 1 см^3 таких кристаллов, расположенных на глубине <5 см от доатмосферной поверхности метеорита, за 10^8 лет может быть образовано 10^2 - 10^3 треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из поверхностных участков метеорита (глубина < 1 см) до 10^4 треков. Таким образом, использование фактора длительной экспозиции метеоритов в космосе приводит к огромному преимуществу данного метода по сравнению с методами, основанными на использовании различных спутниковых и аэростатных детекторов. Измеряя параметры треков, можно не только идентифицировать частицы, но и определить их энергетические спектры.

Метеориты класса палласиты состоят из железо-никелевой "матрицы", в объеме которой имеются включения кристаллов оливина - полупрозрачного минерала жёлтого цвета размером до 1-2 см. (рис. 88). К сожалению, в настоящее время обработке доступны только образцы размером не более 3-х-4-х мм из-за наличия многочисленных трещин.

Возможность изучать свойства ядер в метеоритах основана на том факте, что тяжелые ядра, проходя через оливин, создают в нем повреждения. В результате в этих областях происходят изменения его химических свойств. Такие изменения проявляют себя в резком (на порядки) изменении скорости растворения материала в некоторых химических растворах [10, 129]. В результате при обработке оливина этими растворами (травлении) в местах прохождения частицы образуется канал, длина и ширина которого зависит от

степени повреждений молекулярных и кристаллических связей. На рисунке 89 условно представлена геометрия образующегося канала [129].



Рисунок 88.

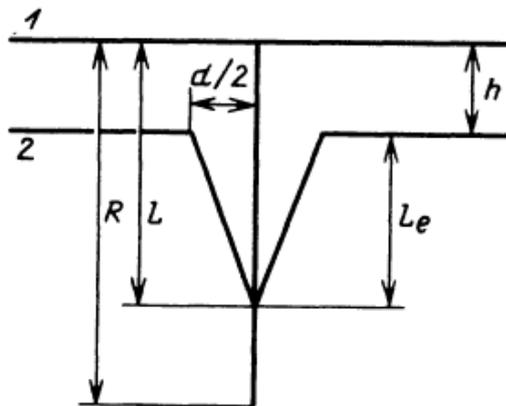


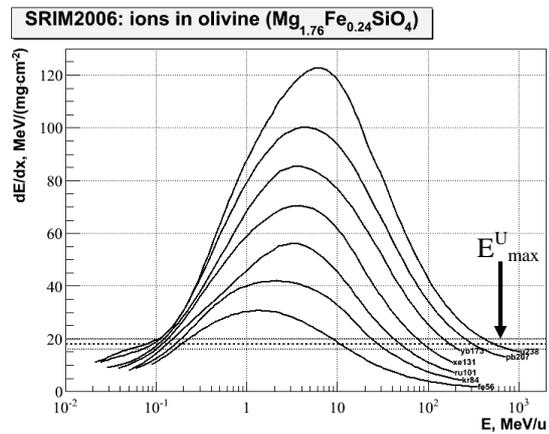
Рисунок 89.

Физико-химический механизм травления таков, что только при достаточно больших повреждениях материала образуются каналы, видимые в оптический микроскоп. Степень повреждений определяется, в основном, величиной ионизационных потерь. Причём существует минимальная величина потерь,

зависящая от материала, приводящая к протравленным каналам достаточно больших размеров (с диаметром несколько мкм и более). Для оливина пороговая величина ионизационных потерь составляет около $D \approx 18$ МэВ/(мг·см⁻²). На рисунке 90 представлены расчёты ионизационных потерь ядер с зарядом выше $Z \geq 26$ как функция энергии частицы (90а) и остаточного пробега (90б), полученные с помощью программы SRIM2006, модели расчёта которой описаны в [131]. Горизонтальными линиями отмечен порог D и полоса $D \pm 2$ МэВ/(мг·см⁻²), являющаяся переходной областью режимов травления (см. ниже). Таким образом, только частицы, имеющие потери больше $D - 2$ МэВ/(мг·см⁻²) и, соответственно, энергию меньше E_{\max} , могут привести к видимому в оптический микроскоп каналу. На рисунке 90а стрелкой отмечена энергия E_{\max} для урана.

Исходя из физико-химической картины взаимодействия, можно следующим образом описать схему формирования травимого канала. Если энергия частицы больше E_{\max} , то видимый канал после травления не возникает.

Модель формирования травимых следов частиц в минералах



а

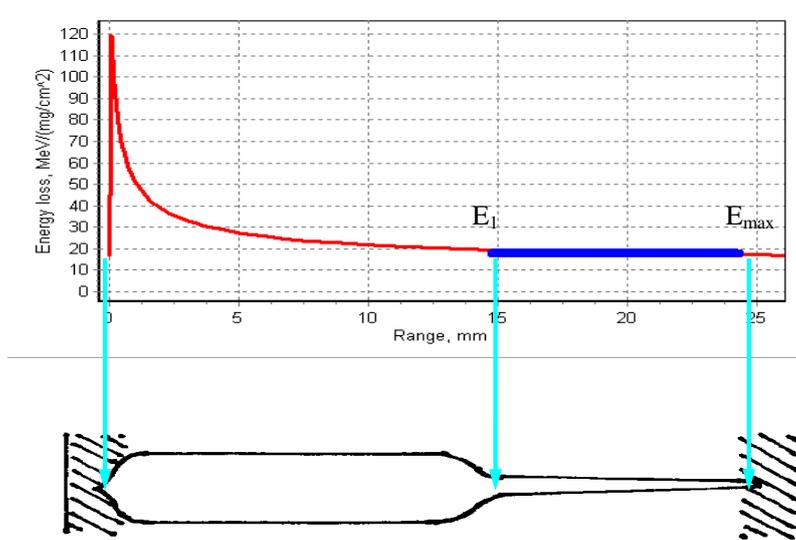
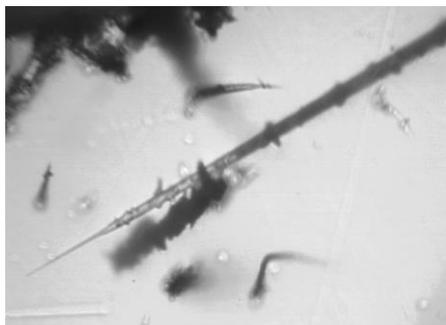
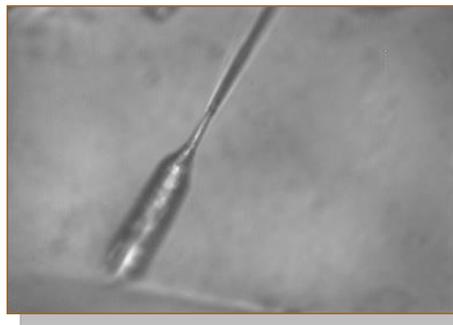


Рисунок 91.

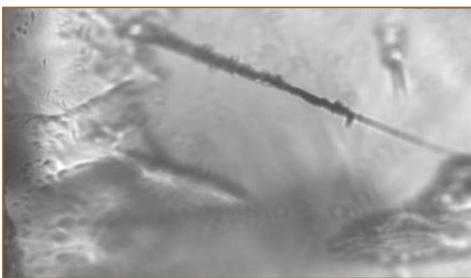
Схема формирования травимого участка трека в оливине. Вверху величина ионизационных потерь. Внизу - форма различных участков трека.



а



б



в



г

Рисунок 92.

Как видно на рис. 90а длина травимого канала может достигать нескольких мм или даже больше. В то же время размеры большинства кристаллов оливина, доступных для анализа, составляют 2-3 мм. Это означает, что в случае очень тяжёлых ядер часть травимого участка трека оказывается за пределами кристалла. На рисунке 93 показаны возможные положения травимого канала по отношению к объёму кристалла. Чёрными точками обозначены точки останова, а поперечным к треку штрихом начало травимого участка, когда $E=E_{\max}$.

Из рис. 93 следует, что травимая часть каналов может иметь начало или конец внутри объёма кристалла. При этом возникает проблема подачи травящего раствора внутрь кристалла. В группе В. Перельгина В.П. эта проблема решалась методом "трек в треке" [132]. В этом методе до начала травления кристаллы облучались тяжёлыми ионами (в основном, Кг и Хе) с энергией $E < E_{\max}$. Во время травления в первую очередь возникали каналы от ядер Хе и раствор проникал в объём оливина, а затем уже из этих каналов протравливались пересекающие их треки космических частиц, находящиеся внутри объёма. При плотности пучка Хе $\sim 10^5$ частиц/см² с дополнительными каналами пересекалось большинство треков космического происхождения.

Другой особенностью метода, использованного Перельгиным В.П., являлся предварительный отжиг кристаллов с целью сократить длину травимых каналов, а также устранить треки ядер группы железа, затрудняющие выделение более тяжёлых ядер. В этом случае в кристалле оказывается больше треков, лежащих внутри объёма. Однако такая процедура приводит к дополнительным непредсказуемым изменениям длин треков, которые могут зависеть даже от направления трека по отношению к кристаллическим осям [133]. Это может сказываться на точности определения заряда.

Ввиду этого в группе ПАВИКОМ было решено использовать метод последовательного среза и травления. При этом методе травление происходит послойно [134-137]. После травления очередного слоя срезается часть кристалла

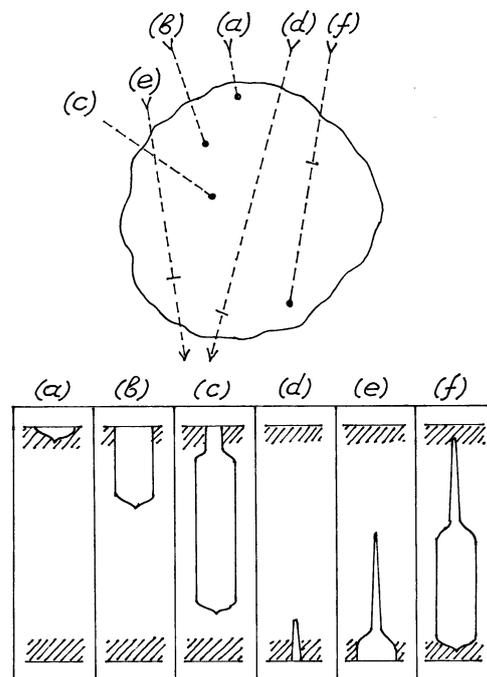


Рисунок 93.

- (a) – $E \ll E_{\max}$. Конечный участок пробега иона перед его остановкой;
- (b) – $E \approx E_1$. Наиболее эффективно растравливаемая основная зона трека
- (c) – $E_{\max} > E > E_1$. Травление основной зоны трека через узкий конусообразный участок.
- (d) – $E \gg E_{\max}$. Часть конуса начального высокоэнергетического участка зоны формирования трека.
- (e) – $E > E_{\max}$. Полностью зафиксированная конусообразная часть с переходным участком основной зоны трека.
- (f) – $E \approx E_{\max}$. Начальная и конечная границы зоны формирования химически протравливаемого трека находятся внутри объема кристалла.

толщиной 50 - 100 мкм (точность среза порядка нескольких мкм) и травление повторяется. После каждой процедуры травления производятся измерения геометрических параметров каналов, видимых на данном этапе. На рисунке 94 схематично изображены последовательные этапы обработки. При обработке очередного слоя производится процедура его сшивки с предыдущим слоем, во время которой осуществляется поиск продолжения уже найденных треков

(треки 1 и 3 на рис 94). Полная длина треков суммируется в конце всей процедуры обработки с учётом угла по отношению к поверхности кристалла.

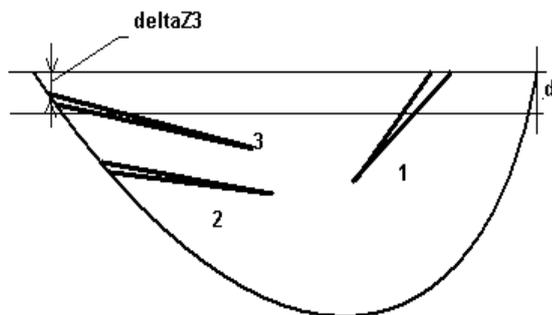


Рисунок 94.

Для выполнения процедур обработки кристаллов они упаковываются по несколько штук в эпоксидную таблетку, затем шлифуются и полируются (рис. 95).



Рисунок 95. Эпоксидная таблетка (жёлтый прямоугольник) с несколькими кристаллами оливина в специальной обойме для крепления на столике микроскопа установки ПАВИКОМ-2.

На рисунке 96 представлен прецизионный инструмент для среза (рис. 96а) и полировки (рис. 96б), разработанный в Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, где выполняются эти операции.



а

б

рисунок 96

Прецизионный инструмент для среза и шлифовки кристаллов оливина.

Как следует из рисунка 93 форма протравленного участка трека в кристалле может быть двух типов "морковка" и "шприц" (рис. 97). На рисунке 30 изображён пример выделения "шприца", а на рисунке 98 пример выделения "морковок" с помощью программного комплекса. Тонкими линиями обозначены оси соответствующих кластеров.

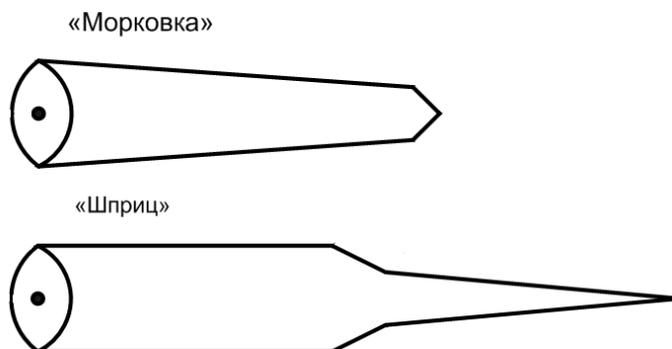


Рисунок 97.

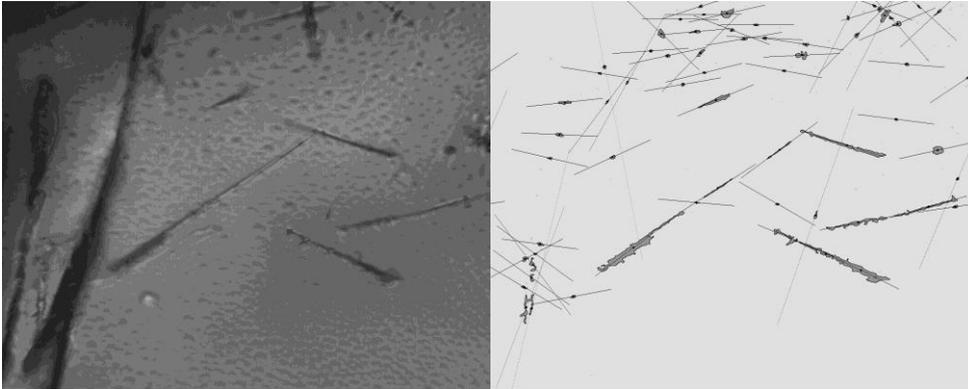


Рисунок 98.

Кроме "стандартных" по форме треков встречаются более сложные конфигурации такие, как на рисунке 99а (распад остановившейся частицы) и 99б (взаимодействие с одним из ядер оливина).

Как уже указывалось, основная задача данного исследования заключается в определении зарядового состава космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Величина заряда связана с характеристиками протравленного трека. Основной из них является травимая длина $L_{тр}$, однако, как уже говорилось, для очень тяжёлых ядер она превышает размеры образцов

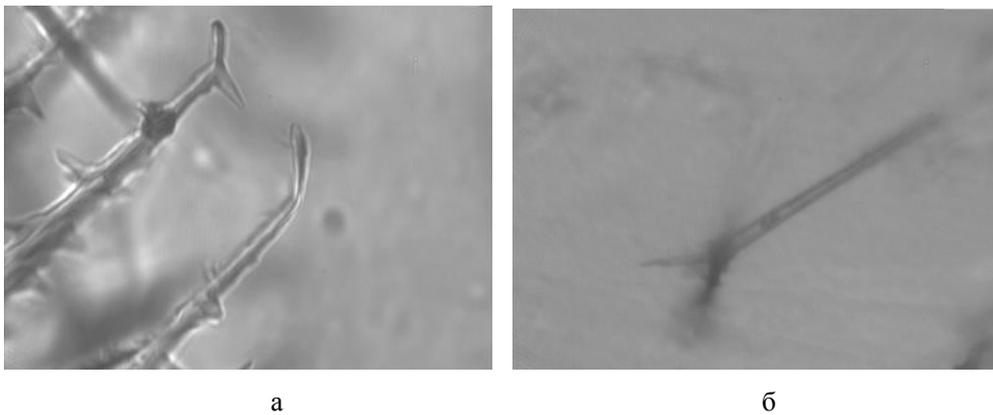


Рисунок 99.

оливина и не может быть найдена имеющимися средствами. Для выхода из создавшегося положения было предложено использовать дополнительную

величину - скорость травления. Эта величина меняется во время травления и растёт по мере приближения к точке останова частицы [138, 139]. На рис. 100 показана зависимость скорости травления от заряда и остаточной длины RR

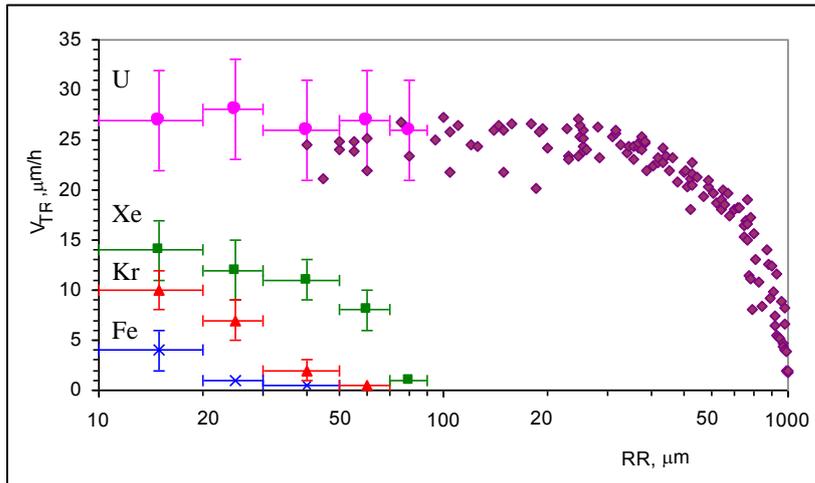


Рисунок 100.

[139], т.е. практически до точки останова.

К сожалению, данные зависимости скорости травления от L и Z не полны и для их дополнения Перелыгиным В.П. были проведены калибровочные эксперименты, которые он, к сожалению, не успел обработать. Такая обработка была проведена в группе ПАВИКОМ с использованием программного комплекса. На рисунке 100 новые результаты для U , Xe , и Kr показаны точками с ошибками. На рисунках 101а и 101б показаны изображения треков ядер Xe с энергией 10 МэВ/нуклон на поверхности кристаллов оливина [140, 141].

К настоящему времени в группе ПАВИКОМ проведено дополнительное облучение кристаллов оливина ядрами Au с энергией 11,4 МэВ/нуклон на ускорителе в Дармштадте (рис. 101в). На рис. 102 показано соответствующее распределение длин треков. Сравнение полученной в эксперименте величины длины (77 ± 5 мкм) и рассчитанной нами по программам SRIM и GEANT4 (69 ± 6 мкм) показывает достаточную точность расчётов. В ближайшее время планируется несколько сеансов облучения другими ядрами, включая U .

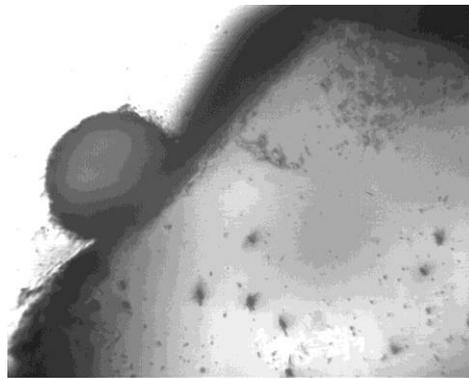
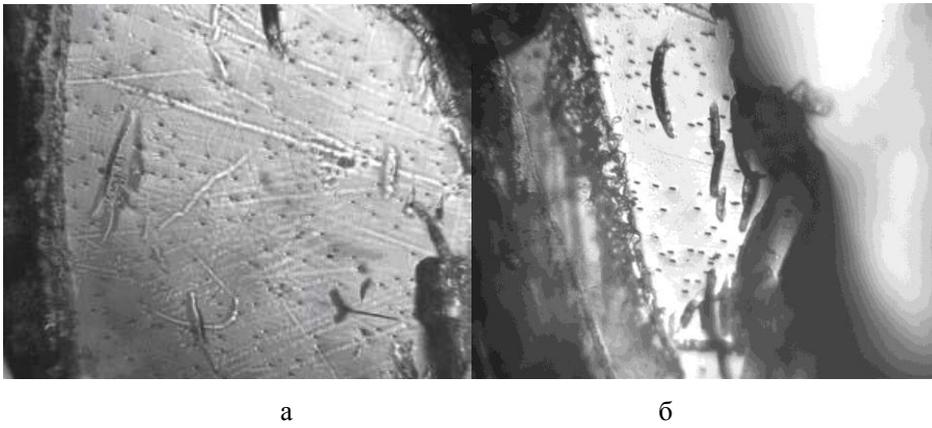


Рисунок 101.

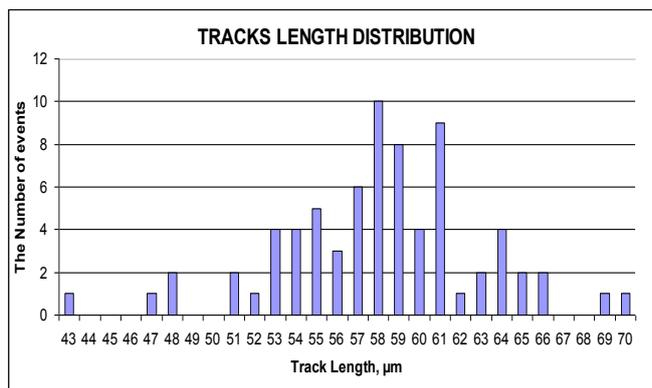


Рисунок 102.

Зависимость скорости травления V от заряда Z и остаточной длины L может быть представлена в виде поверхности, изображённой на рис 103, значения которой для отсутствующих зарядов получены путём интерполяции.

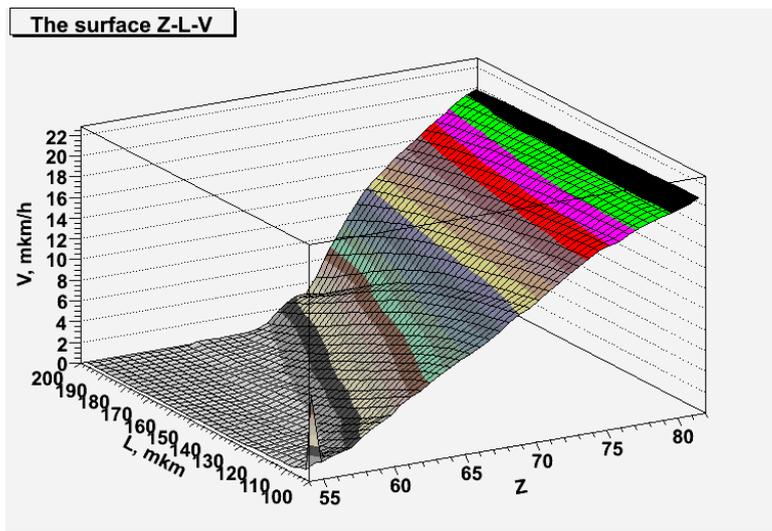


Рисунок 103.

Методика оценки величины заряда заключается в двумерной интерполяции поверхности (рис. 103) по измеренным значениям величин V и L для протравленного в оливине трека. На рисунке 104 показан результат такой процедуры для самых тяжёлых ядер. Семейство кривых, изображённых цветными квадратами, представляет собой зависимость $Z(V,L)$. Голубые кружки с ошибками - результат наших измерений. Размер ошибок по вертикали и горизонтали отражает точность измерений. Видно, что точность определения заряда зависит от положения точек на плоскости (V,L) и составляет от ± 1 до ± 2 .

На рисунке 105 показаны суммарные результаты обработки оливинов из метеоритов Марьялахти (Marjalahti) (рис. 105а) и Иглстейшен (Eagle Station) (рис. 105б). Всего обработано более 6000 треков. Из них около 2500 с зарядом более 55 представлены на рис. 105а,б.

Результаты обработки частиц с $Z' > 83$
Точность нижней оценки ($\pm 1 \div \pm 2$)e.

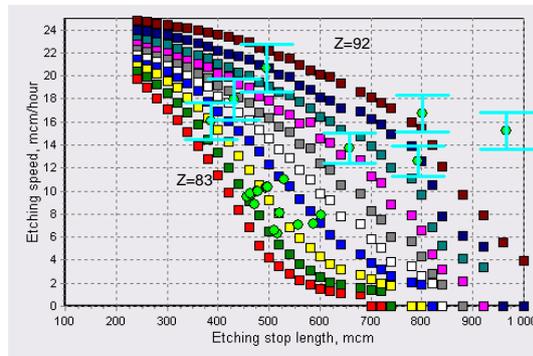


Рисунок 104.

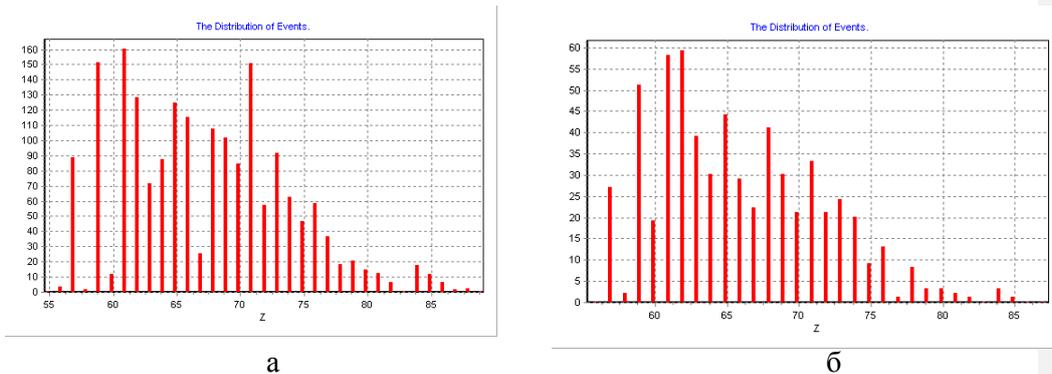
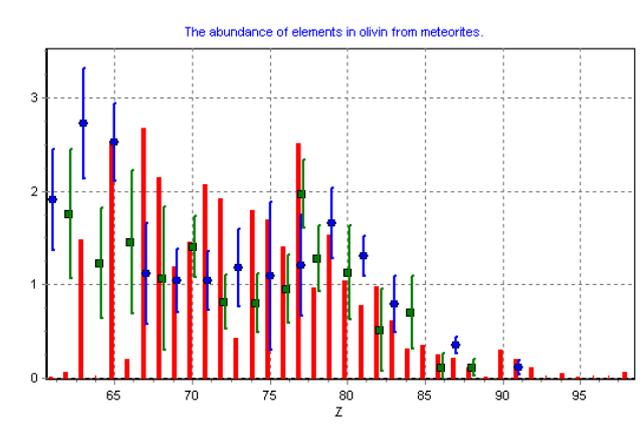


Рисунок 105.

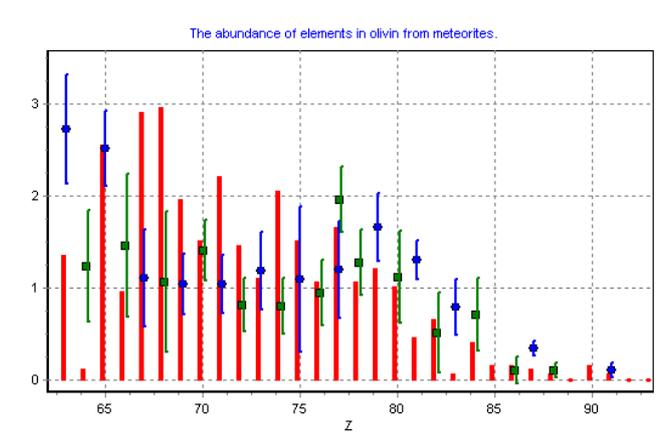
Ранее уже говорилось о том, что наши измерения длины L не всегда дают полную травимую длину из-за малости размеров кристаллов оливина. Поэтому распределения на рис 105 представляют собой распределение нижних границ зарядов ядер, прошедших через оливин. Полученные результаты соответствуют средней скорости травления за 48 часов. Контрольное определение Z , проведённое за более короткие (12 и 24 часа) промежутки времени, показали, что максимальная величина систематической ошибки Z в сторону её занижения лежит в пределах 4-5 единиц заряда.

С учётом этого для сопоставления наших результатов (рис. 105) [142-146] с экспериментальными данными других авторов [115, 117], распределения были сдвинуты на $\Delta Z = 5$ вправо и нормированы на величину распространённости

элементов, так, что относительная распространённость ядер Fe равна 10^6 . Результаты такого преобразования показаны на рис. 106. Видно, что имеется соответствие между нашими данными и экспериментом.



а



б

Рисунок 106.

Распространённость сверхтяжёлых галактических ядер в оливине из метеорита Марьялахти (а) и Игльштейшен (б). Зелёные квадраты - Ariel 3 [115], синие круги - NEA0 [117], красные столбцы - наши результаты.

Помимо зарядового распределения большой интерес представляет также и энергетический спектр частиц. В области сверхтяжёлых ядер он практически не изучен. В данной работе представлена новая методика его оценки. Особенность

процедуры травления треков ядер в оливине, связанная с ограниченностью доступного интервала энергий, даёт возможность произвести оценку энергии частицы. На рисунке 107 для разных ядер приведены интервалы энергий, при которых травление трека соответствующей частицы приводит к видимому в оптический микроскоп каналу. Для U, например, этот интервал составляет $0,1 < E^U < 500$ МэВ/нуклон. Однако прежде, чем космическая частица достигнет кристалла оливина, она проходит некоторое расстояние L через материал самого метеорита и тормозится в нём. Если расстояние L известно, то можно рассчитать интервал энергий (E_{\max}, E_{\min}), внутри которого находилась энергия частицы до входа в метеорит. Результат такого расчёта приведён на рисунке 108 для ядра урана. Видно, что, например, если ядро урана прошло в железно-никелевой оболочке метеорита расстояние 40 мм и дало при травлении видимый трек, то при входе в метеорит оно имело энергию в интервале $1900 < E^U < 2200$ МэВ/нуклон. Ясно, что для каждого ядра существует свой набор кривых типа показанных на рисунке 108.

Для оценки величины L предложена методика, основанная на использовании известной зависимости плотности потока ядер группы железа от глубины залегания оливина h по отношению к доатмосферной поверхности метеорита (рис. 109) [129]. В соответствии с этой методикой прежде, чем производится просмотр основных треков, осуществляется подсчет плотности треков группы железа¹ и таким образом оценивается глубина залегания кристалла h.

Примечание [LPI1]:

Далее, если найти ещё распределение треков железа по углам θ и φ относительно некоторой системы координат, связанной с поверхностью кристалла оливина, то максимум этого распределения укажет направление на точку, ближайшую к доатмосферной поверхности. Для определения расстояния L для космической частицы внутри метеорита необходимо определить угол Θ по отношению к этому направлению. Тогда может быть найдена величина L.

¹ Отметим, что плотность треков группы железа на много порядков больше плотности треков сверхтяжёлых ядер ($Z > 60$), но их длина намного короче ($L \sim 3-5$ мкм). По этой причине до просмотра треков ядер с $Z > 60$ производится полировка поверхности оливина, чтобы убрать с неё сетку от многочисленных треков железа.

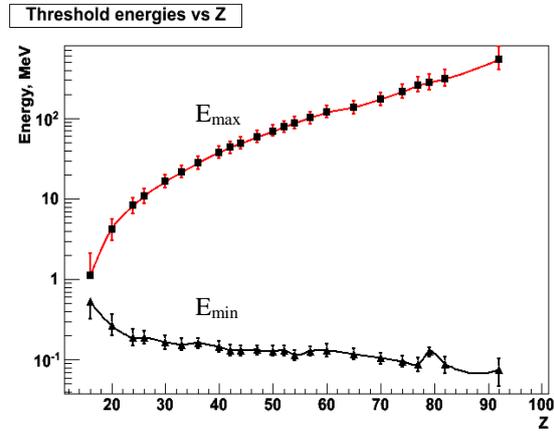


Рисунок 107

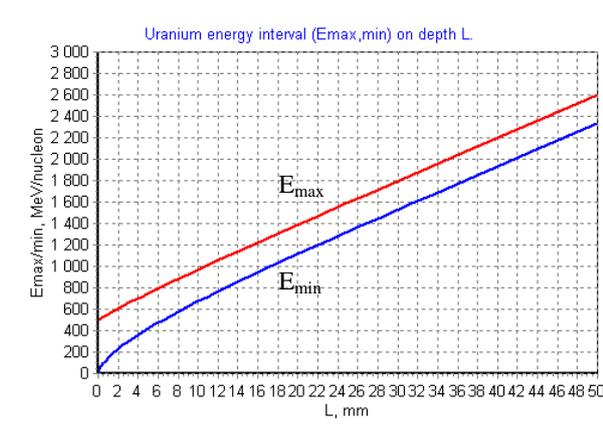


Рисунок 108.

Один из вариантов заключается в предположении о сферичности метеорита (рис. 110) и оценке его радиуса R . В этом случае определение L является простой геометрической задачей (рис. 110):

$$L = R \frac{\sin(\Theta)}{\sin(\Phi)}, \quad (11)$$

где

$$\Theta = \Phi - \arcsin\left(\left(1 - \frac{h}{R}\right) \sin(\Phi)\right). \quad (12)$$

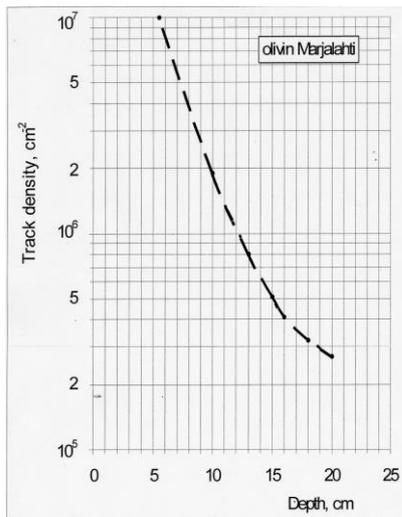


Рисунок 109.

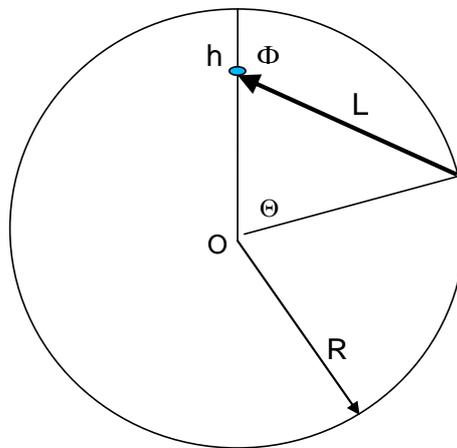


Рисунок 110.

Другой вариант основывается на более точном измерении угловых распределений $F(\theta, \phi)$ ядер железа в оливине. Это распределение отражает распределение расстояний до кристалла оливина от доатмосферной поверхности и отклонение формы метеорита от сферической в зависимости от (θ, ϕ) . По тому, какова плотность треков группы железа в определённом направлении (θ, ϕ) , можно судить о расстоянии до доатмосферной поверхности $L(\theta, \phi)$. Затем эту зависимость можно использовать для анализа треков сверхтяжёлых ядер.

Если треков сверхтяжёлых ядер достаточно много, то подобную зависимость от (θ, ϕ) можно получить и для них. На рисунке 111а показано распределение треков ядер с $Z > 50$ по углам для одного кристалла оливина с большим числом треков (около 200). Видно, что имеются области сгущения треков. На рис. 111б треки рисунка 111а собраны на участках со сторонами $\Delta\theta =$

$10^\circ \Delta\varphi = 20^\circ$, причём диаметры кругов пропорциональны количеству треков на соответствующем участке. Виден пик в районе углов $\theta=70^\circ$, $\varphi=40^\circ$.

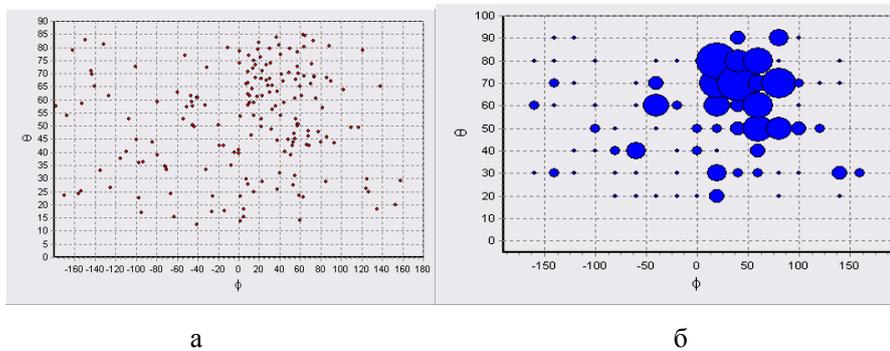


Рисунок 111.

Таким образом, распределение по θ и φ даёт возможность оценить размеры метеорита, длину пути ядра в нём до попадания в оливин и в результате дать оценку величины энергии до входа в метеорит.

Глава VI. Применение нейронной сети для обработки данных RICH- детектора.

В проекте магнитного спектрометра AMS (рис. 112) [147], предназначенного для изучения антивещества, вещества и скрытого вещества в околоземном космическом пространстве, предусмотрено использование детектора колец черенковского излучения (RICH-детектора, на рис. 112 выделен красным овалом) [148]. Использование RICH детектора значительно расширяет возможности AMS в решении следующих задач:

- дискриминация частиц альбедо, идущих снизу вверх, с эффективностью, близкой к 100%;
- определение заряда частицы Z_e со среднеквадратичной ошибкой $\Delta Z < 1$;
- измерение скорости частицы $v = \beta c$ с точностью $\Delta \beta = 0.003 - 0.004$ в пределах диапазона импульсов частиц 1-10 ГэВ/(с нуклон) и при углах падения меньше 12° ;
- определение массы частицы M (с использованием значения импульса, измеренного в AMS) с точностью $\Delta M/M = 0.1$ в пределах того же диапазона импульсов.

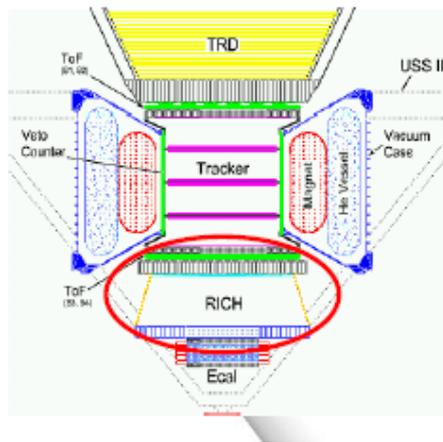


Рисунок 112.

С целью изучения возможности решения перечисленных задач было проведено численное моделирование процессов рождения, распространения и регистрации черенковского излучения в RICH детекторе методом Монте-Карло и процедуры восстановления кинематических параметров частиц по полученным черенковским образам.

Модельный вариант RICH детектора содержит радиатор NaF [149] толщиной $h=1$ см и матрицу фотодетекторов площадью ~ 1 м², расположенные параллельно друг другу на расстоянии $H=10$ см. Матрица собрана из -1200 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) с диаметром фотокатода $d=25$ мм и внешним диаметром $d'=32$ мм. Входные окна ФЭУ изготовлены из стекла. Это приводит к ограничению спектра фотонов, регистрируемых RICH-детектором, диапазоном длин волн 300-650 нм (где показатель преломления радиатора NaF $n=1.334$, а его дисперсия составляет менее 1% [149-152]). Релятивистская заряженная частица, проходя через радиатор со скоростью $v=\beta c$, излучает черенковские фотоны под углом

$$\theta = \arccos(1/(\beta n)) \quad (\beta n > c) \quad (13)$$

к ее траектории. По форме и размерам изображения, образованного конусом черенковского излучения на плоскости матрицы фотодетекторов, можно восстановить угол падения и скорость частицы. Ее заряд Ze определяется по суммарной амплитуде A выходного сигнала (или по числу N_p инициированных ФЭУ), исходя из известного спектрального распределения числа фотонов, излученных частицей на единице длины пути в единицу диапазона длин волн,

$$A \approx \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \left(\frac{d^2 n}{d\lambda dn} \right) f(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \left(\frac{2\pi}{137} \right) (Ze)^2 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \frac{1}{\lambda^2} f(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

где $\lambda_1=300$, $\lambda_2=650$ - нижняя и верхняя границы регистрируемого волнового интервала, а $f(\lambda)$ - усредненная аппаратная функция RICH детектора.

Моделирование RICH детектора включает расчет конфигурации и размеров изображения (т.е. сечения черенковского конуса плоскостью матрицы фотодетекторов), а также числа фотонов, упавших на фотодетекторы, количества инициированных фотодетекторов по контуру изображения и их суммарного выходного сигнала. Необходимо решить и обратную задачу: восстановить вектор скорости частицы \vec{v} и (привлекая данные об импульсе частицы, измеренном в магнитном спектрометре AMS) массу частицы M , а также ее заряд по суммарной амплитуде сигнала или числу инициированных фотодетекторов.

При решении прямой задачи заряд, масса, импульс (скорость) частицы, полярный и азимутальный углы ее траектории, а также точка ее падения на радиатор считались заданными.

Вследствие равновероятного распределения точек рождения черенковских фотонов на траектории частицы внутри радиатора, точка и азимутальный угол эмиссии каждого черенковского фотона выбирались случайным образом. Учитывалось также ослабление потока фотонов из-за поглощения внутри радиатора, а также возможного отражения от его нижней плоскости.

По формулам Френеля для поляризованного электромагнитного излучения [153] было вычислено изменение направления распространения и ослабление интенсивности фотонов из-за преломления и отражения на нижней поверхности радиатора. Формулы Френеля определяют также интенсивность и число фотонов, проникших через входные окна ФЭУ. Наконец, была вычислена результирующая вероятность того, что фотон достигнет фотокатода ФЭУ, избежав поглощения внутри радиатора и обратного отражения от его поверхности и поверхности входного окна ФЭУ. Расчет траектории черенковского фотона позволяет определить, в какой ФЭУ попал данный фотон. Далее, зная полное число фотонов, попавших в этот ФЭУ, и известную спектральную чувствительность его фотокатода, можно рассчитать вероятность выбивания из него любого количества фотоэлектронов и, таким образом, вероятность инициирования ФЭУ, а также относительную амплитуду его выходного сигнала.

При построении программы, моделирующей прохождение частицы и её черенковских фотонов через установку, были учтены следующие эффекты.

1. *Генерация черенковского света.* Угол вылета и число черенковских фотонов, генерированных релятивистской заряженной частицей в радиаторе, описываются соотношениями Франка-Тамма (13) и (14).

2. *Поглощение черенковского света в радиаторе.* Интенсивность I_1 черенковского света, падающего на нижнюю границу плоского радиатора, зависит от глубины z точки образования черенковского фотона внутри радиатора, черенковского угла θ и угла наклона α траектории заряженной частицы к плоскости радиатора

$$I_1 = I_0 \exp[-(z - H)/L_a \cos \chi]. \quad (15)$$

Здесь χ - угол падения черенковского фотона на нижнюю плоскость радиатора (т.е. полярный угол траектории фотона, отсчитываемый от вертикали к плоскости радиатора и матрицы фотодетекторов),

$$\chi = \arccos \left(\frac{\cos \alpha \cdot \cos \theta + \sin \alpha \cdot \sin \phi \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \phi}}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \phi} \right) \quad (16)$$

Координата z отсчитывается от плоскости матрицы фотодетекторов, I_0 - начальная интенсивность света, ϕ - азимутальный угол траектории черенковского фотона, L_a - длина поглощения света в радиаторе. Вероятность P_1 того, что черенковский фотон достигнет нижней поверхности радиатора, избежав поглощения, равна $P = I_1/I_0$.

3. *Полное внутреннее отражение черенковского света.* При угле $\chi > \kappa = \arcsin(1/n)$ черенковский фотон испытывает полное внутреннее отражение. Таким образом, при $\chi < \kappa$ вероятность выживания фотона в радиаторе равна $P_{1'} = P_1$, а в случае $\chi > \kappa$ она равна $P_{1'} = 0$.

4. *Преломление черенковского света на границе радиатора.* Из-за различия коэффициентов преломления среды над и под нижней плоскостью радиатора выходящий из радиатора черенковский свет преломляется. Для траекторий, нормальных к поверхности радиатора, черенковский свет выходит из него под углом

$$\theta' = \arccos(n \cdot \sin \theta). \quad (17)$$

Для наклонных траекторий частицы ($\alpha \neq 0$) угол преломления χ' черенковского фотона по выходе из радиатора равен

$$\chi' = \arcsin(n \cdot \sin \chi) \quad (18)$$

и, согласно (16), зависит от азимутального угла ϕ . Вследствие этого черенковский конус трансформируется в квазиконус, лучи которого, если их продлить назад, пересекают траекторию частицы в различных точках.

5. *Интенсивность черенковского света, выходящего из радиатора.* Даже при углах $\chi < \chi_c$ часть черенковского света отражается от нижней поверхности радиатора и теряется. Интенсивность I_2 выходящего света зависит от угла его падения χ на нижнюю поверхность радиатора. Как известно, черенковское излучение поляризовано, так что электрический вектор находится в плоскости, содержащей фотон и ось черенковского конуса (т.е. фотон и траекторию частицы).

Согласно формулам Френеля, для нормального падения частицы на границу радиатора интенсивность I_2 луча, выходящего из радиатора, равна

$$I_2 = I_1 \left[\frac{2 \sin \theta' \cdot \cos \theta}{\sin(\theta + \theta') \cos(\theta - \theta')} \right]^2 \quad (19)$$

В случае наклонного падения частицы появляются нормальная I_{1n} и тангенциальная I_{1t} к плоскости падения черенковского фотона компоненты поляризации:

$$I_{1n} = I_1 \cos \psi, \quad I_{1t} = I_1 \sin \psi, \quad (20)$$

где

$$\psi = \arccos[(\cos \alpha - \cos \chi \cdot \cos \theta) / (\sin \chi \cdot \sin \theta)] \quad (21)$$

- угол между плоскостями падения частицы и черенковского фотона на радиатор. Формула Френеля (19) в этом случае преобразуется следующим образом:

$$I_{2n} = I_{1n} \left[\frac{2 \sin \chi' \cdot \cos \chi}{\sin(\chi + \chi') \cdot \cos(\chi - \chi')} \right]^2 \quad I_{2t} = I_{1t} \left[\frac{2 \sin \chi' \cdot \cos \chi}{\sin(\chi + \chi')} \right]^2 \quad (22)$$

Полная интенсивность излучения, выходящего из радиатора, равна $I_2^2 = I_{2n}^2 + I_{2t}^2$. Вероятность P_2 того, что черенковский фотон, упавший на границу радиатора, выйдет из него, не отразившись назад, равна $P_2 = I_2/I_1$.

6. *Прохождение черенковского света через входные окна ФЭУ.* Частичное отражение черенковского света от стеклянного входного окна ФЭУ (коэффициент преломления $n' = 1,5$) и его прохождение сквозь стекло на фотокатод также описываются формулами Френеля. Поэтому, как и выше, необходимо рассматривать две компоненты черенковского излучения, выходящего из радиатора, с векторами поляризации, находящимися в плоскости преломления (I_{2t}) и в ортогональной плоскости (I_{2n}). Интенсивность I_3 черенковского света, достигающего фотокатода ФЭУ, можно записать как $I_3^2 = I_{3n}^2 + I_{3t}^2$, где

$$I_{3n} = I_{2n} \left[\frac{2 \sin \chi'' \cdot \cos \chi'}{\sin(\chi' + \chi'') \cdot \cos(\chi' - \chi'')} \right]^2 \quad I_{3t} = I_{2t} \left[\frac{2 \sin \chi'' \cdot \cos \chi'}{\sin(\chi' + \chi'')} \right]^2, \quad (23)$$

причем

$$\chi'' = \arcsin[(1/n') \sin \chi']. \quad (24)$$

Таким образом, вероятность P_3 того, что фотон достигнет фотокатода ФЭУ, равна $P_3 = I_3/I_2$.

7. *Квантовая эффективность фотокатода ФЭУ.* Спектральная чувствительность фотокатода $P_4 = q(\lambda)$ зависит от длины волны фотона λ и также учитывается процедурой моделирования. По числу черенковских фотонов, достигших фотокатода ФЭУ, и спектральной чувствительности типичных мультищелочных фотокатодов рассчитывалась вероятность инициации данного конкретного ФЭУ, лежащего на контуре изображения черенковского конуса.

8. *Влияние дискретной структуры матрицы фотодетекторов.* Дискретная структура матрицы фотодетекторов вносит свою специфику в регистрацию черенковских фотонов RICH детектором. Во-первых, эффективность регистрации зависит от координаты попадания фотона на эту матрицу фотодетекторов. В ней имеются мертвые зоны, обусловленные тем, что диаметр d фотокатода меньше чем внешний диаметр ФЭУ d' ($d=2,5$ см, $d'=3,2$

см). Кроме того, даже в случае плотной гексагональной упаковки остаются промежутки между соседними ФЭУ (приблизительно 6% площади). Таким образом, геометрическая эффективность P_5 меньше чем $(d/d')^2$, т.е.

$$P_5 = (d/d')^2 - 0.06 = 0.55. \quad (25)$$

Во-вторых, дискретная структура матрицы фотодетекторов приводит к тому, что черенковское изображение, в частности, число ФЭУ и их взаимное расположение на изображении черенковского конуса могут меняться в зависимости от координат траектории частицы при одном и том же угле падения.

9. *Полная вероятность регистрации черенковского фотона.* Средняя эффективность регистрации черенковских фотонов зависит от положения траектории и угла падения заряженной частицы, и определяется выражением

$$\langle P \rangle = \langle P_1 \rangle + \langle P_2 \rangle + \langle P_3 \rangle + \langle P_4 \rangle + \langle P_5 \rangle \quad (26)$$

где $\langle P_i \rangle$ ($i=1,2,\dots,5$) - усредненная вероятность выживания черенковского фотона в каждом из описанных выше процессов.

Результаты компьютерного эксперимента, проведённого с помощью программы моделирования, дали следующие результаты.

1. *Изображения индивидуальных событий.* Черенковские кольцевые изображения, смоделированные для ядер He^4 с импульсом 3 (ГэВ/с)/нуклон в случае нормального падения на радиатор. В этом случае изображения имеют форму кольца, радиус которого зависит от скорости частицы, и состоят из дискретных элементов (рис. 113а). Для углов наклона траектории частицы $\alpha \neq 0$ изображения не имеют круговую форму (рис. 113б и 114). Они преобразуются в квазиэллипсы или незамкнутые кривые гиперболической формы. На рис 113б приведено изображение черенковской фигуры для ядер He^4 с импульсом 3 (ГэВ/с)/нуклон и углом падения 20° , а на рис. 114 - с импульсом 5 (ГэВ/с)/нуклон и углом падения 8° . На рисунках кругами отмечены ФЭУ, на которые попал хотя бы один фотон, а двойными кружками ФЭУ, которые при этом ещё и сработали.

В последнем случае (рис 113б и 114) большинство черенковских фотонов (или инициированных ФЭУ) сконцентрированы в центральной части изображения, тогда как в периферийных участках интенсивность черенковского света падает. Для $\beta=1$, даже при $\alpha=20^\circ$, число черенковских фотонов, вышедших из радиатора, достаточно для регистрации изображения матрицей фотодетекторов.

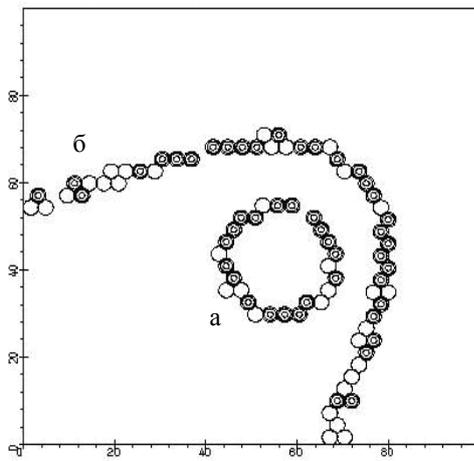


Рисунок 113.

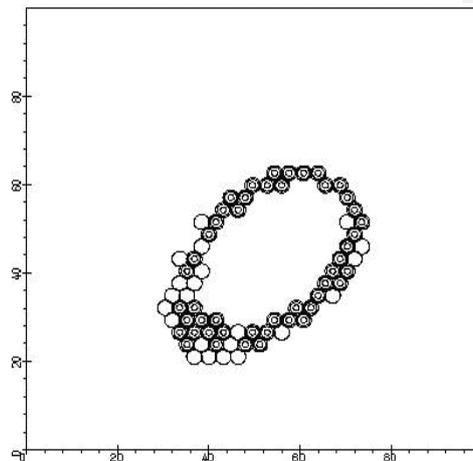


Рисунок 114.

Рис. 113. Черенковские изображения, полученные для ядер He^4 с импульсами 3 ГэВ/нуклон при углах падения 0° (а) и 20° (б). Круги соответствуют ФЭУ, на фотокатод которых попали черенковские фотоны. Двойными кругами отмечены ФЭУ, которые были при этом иницированы.

Рис. 114. То же, что на рис. 113, но импульс He^4 5 ГэВ/нуклон и угол 8° .

2. Число зарегистрированных фотоэлектронов и инициированных ФЭУ.

Число зарегистрированных фотоэлектронов пропорционально интенсивности излучения. Интенсивность черенковского света, генерированного в радиаторе, увеличивается со скоростью частицы, оставаясь пропорциональной квадрату ее заряда. С увеличением угла наклона частицы интенсивность черенковского света, выходящего из радиатора, падает из-за частичного или полного

отражения на нижней плоскости радиатора. В этом случае число зарегистрированных фотонов и инициированных ФЭУ уменьшается. Как показано на рис. 115, в области насыщения кривых число зарегистрированных фотоэлектронов N_{pe} (т.е. измеренная полная амплитуда сигнала), а также число Np' инициированных ФЭУ, являются мерой заряда частицы Z : $N_{pe} \sim Z^2$.

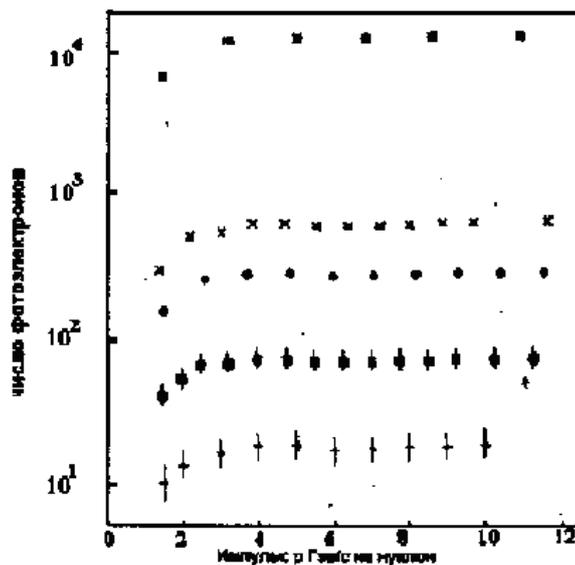


Рис. 115. Число фотоэлектронов, зарегистрированных матрицей фотодетекторов от различных ядер в зависимости от их импульса. * - Fe⁵⁶, x - C¹²; ◇ - Be⁹; □ - He³; + - p. Указаны только статистические погрешности.

3. Возможность разделения частиц.

Выделение изотопа ³He на фоне ядер ⁴He в потоке космических лучей с дифференциальным энергетическим спектром $N(E) \sim E^\gamma$, $\gamma = -2,8$ (рис. 116). В расчетах методом Монте-Карло использовано отношение потоков ${}^4\text{He}/{}^3\text{He} = 10/1$. Суммарное распределение ядер ⁴He (103 события) и ³He (102 события) с энергией выше порога черенковского излучения маркировано +. Плавные кривые - наилучшая аппроксимация точек распределением Гаусса. Анализ перекрытия кривых показывает, что разделение происходит с

неопределенностью $2,4\sigma$ (т. е. менее 2%) на уровне достоверности 90%.
Восстановленные массы (а.е.м.): ${}^3\text{He} - 2,820 \pm 0,19$; ${}^4\text{He} - 3,76 \pm 0,25$.

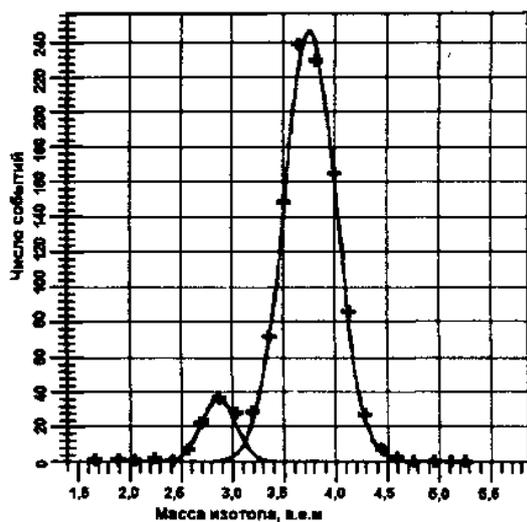


Рисунок 116.

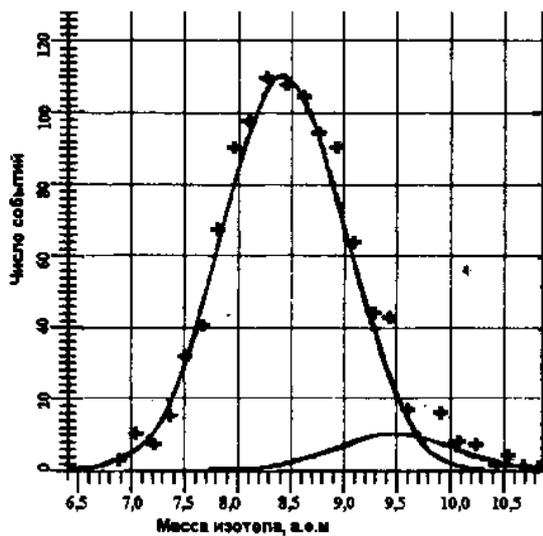


Рисунок 117.

Выделение изотопа ${}^9\text{Be}$ на фоне ядер ${}^{10}\text{Be}$ в потоке космических лучей с дифференциальным энергетическим спектром $N(E) \sim E^\gamma$, $\gamma = -2,8$ (рис. 117). В расчетах методом Монте-Карло использовано отношение потоков ${}^9\text{Be}/({}^9\text{Be}+{}^{10}\text{Be})=0,91$. Суммарное распределение ядер ${}^9\text{Be}$ (103 события) и ${}^{10}\text{Be}$ (102 события) с энергией выше порога черенковского излучения маркировано +. Плавные кривые - наилучшая аппроксимация точек распределением Гаусса. Восстановленное соотношение отвечает значению $0,91 \pm 0,03$. Восстановленные массы (а.е.м.): ${}^9\text{Be} - 8,44 \pm 0,58$; ${}^{10}\text{Be} - 9,40 \pm 0,61$.

Приведенные выше результаты моделирования показывают широкие возможности RICH-детектора по определению характеристик заряженных частиц и их разделению. Однако реализация этих целей затрудняется необходимостью решать обратную задачу, описываемую цепочкой формул (13-24). Если при нормальном падении это с некоторой степенью точности возможно, хотя и осложнено наличием дисперсии, при падении под углом возможность решения становится проблематичной. В связи с этим возникла задача найти альтернативный вариант обработки изображений на плоскости ФЭУ RICH-детектора. В результате было принято решение использовать для этой цели нейронные сети (НС) [154]. Эти устройства работают в самых разных сферах [155], в том числе они хорошо проявили себя при обработке целого ряда экспериментов в физике элементарных частиц и высоких энергий [156-160].

Прежде чем описывать конкретное применение НС рассмотрим основные принципы их работы.

Принцип работы НС. В данной работе была использована многослойная нейронная сеть – многоуровневый персептрон, с обратным распространением ошибки. Она используется для установления нелинейного многопараметрического отображения одного многомерного пространства векторов (вектора входа V_{in} , пространство признаков) на другое (вектора выхода V_{out} , пространство значений) с помощью обучающего набора. Это означает, что, будучи подготовленная к работе, при подаче на вход сети одного из векторов V_{in} , она должна дать на выходе соответствующий вектор V_{out} .

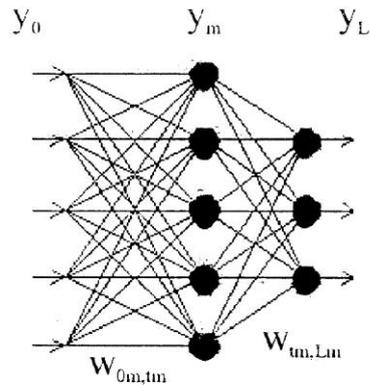


Рисунок 118.

$$s_{i,m} = f\left(\sum_{j=1}^{N_{m-1}} s_{j,m-1} \cdot W_{i,m;j,m-1} - b_{i,m}\right), \quad (27)$$

где

$$f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}. \quad (28)$$

Устройство и принцип работы нейронных сетей описаны во многих работах (см., например, [7]). Поэтому здесь мы приведем только упрощенную схему действия нейронной сети Хопфилда с обратным распространением ошибки (рис. 118).

Нейронная сеть такого типа состоит из трех или большего числа последовательных слоев, каждый из которых включает некоторое количество нейронов (узлов). Первый и последний слои являются входом и выходом, соответственно, поэтому количество нейронов в них должны быть равны размерностям соответствующих пространств. Промежуточные слои носят название скрытые. Каждый нейрон одного слоя имеет связь с каждым нейроном предыдущего и последующего слоев.

Отдельный i -ый нейрон слоя m характеризуется числовым значением $s_{i,m}$ (которое, как правило, входит в интервал $[0,1]$) и "порогом" $b_{i,m}$, а его связь с j -м

нейроном на предыдущем слое своим весом $W_{i,m,j,m-1}$. Нейроны первого слоя имеют значения, равные компонентам входного вектора. Значения нейронов последующих слоев являются нелинейной функцией значений нейронов предыдущего слоя и соответствующих весов связей и вычисляются по формуле (27). Нелинейная неубывающая функция $f(s)$, которую называют функцией активации, имеет область значений в интервале $[0,1]$. Наиболее часто для неё используют форму (28).

Работа сети происходит в прямом направлении, т.е. величины входного вектора подаются на первый слой НС и затем преобразуются в значения нейронов второго слоя в соответствии с формулами (27), (28). Значения второго слоя подаются на третий и т.д. вплоть до последнего слоя. Сеть считается готовой к работе, если при подаче на её вход входного вектора, на выходе получается соответствующий выходной вектор. Т.е. если она в результате сложных нелинейных преобразований способна отображать пространство входных векторов в соответствующее пространство выходных для анализируемой задачи.

Однако чтобы добиться этого, сеть должна быть обучена. Для этого с помощью экспериментов или их программных имитаторов формируется обучающее множество $\{V_{in}; V_{out}\}$ которое представляет собой набор пар входного и соответствующего выходного векторов. Размер обучающего множества (количество пар) зависит от сложности анализируемого отображения и общего числа слоев и нейронов на них. Входные вектора включают непосредственно наблюдаемые величины (показания приборов или их комбинации), а выходные – физические характеристики процесса, которые требуется определить в результате анализа (типы частиц, их заряды, скорости и т.д.). Величинами, подлежащими изменению в процессе обучения, являются веса $W_{i,m,j,m-1}$. В начале обучения значения $W_{i,m,j,m-1}$ НС иницируются небольшими случайными значениями и на ее вход по очереди подаются значения входных векторов из обучающего множества. Порядок следования векторов определяется случайным образом, чтобы предотвратить "привыкания" сети к их фиксированной последовательности. Такая процедура повторяется для всех слоев вплоть до последнего - выходного. Каждый раз значения нейронов

последнего слоя сравниваются с соответствующими значениями выходного вектора из обучающего множества и вычисляется ошибка, например, сумма квадратов разности или сумма модулей разности.

По величине ошибки с помощью специального алгоритма обратного распространения ошибки [161] вычисляются поправки к значениям весов связей последнего и предпоследнего слоев. По этим поправкам последовательно вычисляются поправки к весам более ранних слоев вплоть до первого. Затем происходит подача на вход следующего входного вектора и процедура уточнения весов повторяется до получения приемлемого результата. Процедура обучения, охватывающая весь обучающий набор, принято называть эпохой. По мере обучения ошибка, как правило, уменьшается и процесс сходится, но весь цикл обучения может занять не один десяток, а то и сотни эпох. Успех обучения зависит от целого ряда причин, в том числе от удачного выбора пространства признаков и достаточного объема обучающего множества. Упрощая, можно сказать, что процесс обучения является подгоночной процедурой для описания многопараметрической функцией (параметрами являются величины $w_{i,mj,m-1}$) упомянутого выше отображения пространства входных векторов на пространство выходных.

На эффективность работы и сходимость процесса обучения НС большое влияние оказывает правильный выбор входных сигналов. Они должны быть такими, чтобы в многомерном пространстве – пространстве признаков, образуемом ими, области с различными значениями выходных векторов разделялись как можно лучше.

Второй этап представляет собой непосредственную работу обученной НС по анализу физической информации.

Исходная информация RICH-детектора, из которой можно построить пространство входных векторов, включает количество инициированных ФЭУ, их координаты и амплитуду сигнала, снимаемого с них. Теоретически возможен вариант установки, когда доступна информация об амплитуде сигнала от каждого ФЭУ, но он сложен в технической реализации и здесь рассматриваться не будет.

При обсуждении возможностей нейронной сети ограничимся рассмотрением углов, меньших 8° , при которых фигура на матрице ФЭУ остается замкнутой. На самом деле НС можно применить и в случае незамкнутой фигуры при небольшой модификации, связанной с описанием ее геометрии.

Фигура, создаваемая черенковским светом на светочувствительной матрице симметрична относительно проекции траектории на плоскость матрицы. Это свойство можно было бы использовать для идентификации азимутального угла. Однако, не все ФЭУ, на которые падают фотоны, иницируются. Кроме того, рассматриваемая конструкция обладает большой дискретностью чувствительной области, которая занимает только 55% площади детектора, что приводит к ломаному контуру фигуры и непостоянству ее формы. Особенно сильно это эффект проявляется при малых скоростях β . Вследствие этого угол φ определяется с большой погрешностью, которая сильно снижает надежность определения остальных характеристик частицы. По этой причине будем считать, что угол φ известен.

Анализ свойств RICH-детектора показал, что для определения величины заряда (вплоть до величин $q=38-40$) недостаточно знания полной амплитуды снимаемого сигнала N_a или полного количества иницированных ФЭУ N_{pmt} , так как эти величины могут быть одинаковыми у частиц с разными зарядами при разных скоростях. Кроме того, при большом количестве черенковских фотонов, то есть при больших зарядах и скоростях, вероятность срабатывания ФЭУ близка к единице, что приводит к насыщению величины N_{pmt} и снижению чувствительности RICH-детектора к заряду.

К величине скорости частицы и наклону траектории θ очень чувствительна геометрическая форма фигуры, создаваемой черенковскими фотонами. Наиболее полная информация о ней содержится в координатах положения иницированных ФЭУ. Однако для определения скорости эта информация избыточна. Анализ показал, что величины геометрического размера фигуры содержат достаточно полную информацию. В итоге в качестве основного параметра, определяющего скорость, был выбран максимальный размер фигуры Y_{max} в направлении перпендикулярном проекции траектории частицы ("малая

ось" квазиэллипса) на плоскость радиатора. Он может быть найден из координат инициированных ФЭУ и угла φ . Другим возможным параметром может служить величина максимального размера фигуры X_{\max} в направлении параллельном проекции траектории частицы ("большая ось" квазиэллипса). Этот параметр чувствителен, кроме того, к величине угла θ , однако, он испытывает сильный разброс вследствие дискретности чувствительной области и поэтому фиксирует угол с большой ошибкой.

В итоге, после проведенного анализа в качестве входного вектора был выбран набор (N_a, Y_{\max}) , а в качестве выходного – набор (q, β) . На рисунке 119 показаны распределения величины N_a , а на рисунке 120 Y_{\max} от скорости, полученные в результате розыгрыша 2400 событий для трех ядер (${}^4\text{He}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$) при 10 значениях скорости и 8 значениях угла θ . Видно, что в пространстве (N_a, Y_{\max}) заряды и скорости довольно хорошо пространственно разделены. Это дало основание надеяться на возможность решения поставленной задачи с помощью НС.

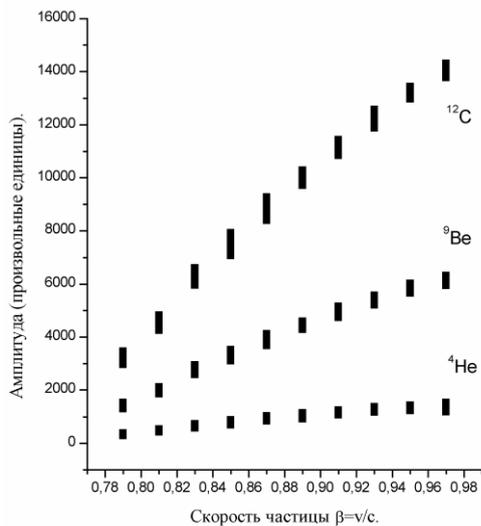


Рисунок 119.

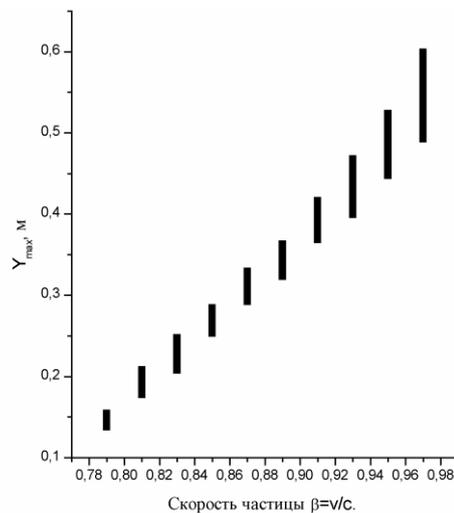


Рисунок 120.

Рисунок 119. Зависимость от скорости частицы величины сигнала от инициированных ФЭУ для трех ядер. Приведены точки обучающего множества, всего 2400 событий: 3 ядра, 10 скоростей, 8 углов. По 10 событий при каждом значении.

Рисунок 120. Зависимость от скорости частицы величины Y_{\max} фигуры, создаваемой иницированными ФЭУ. Приведены точки обучающего множества.

Для имитации работы НС была создана программа, реализующая алгоритм обратного распространения ошибки [154]. В качестве обучающего множества был взят упомянутый выше набор из 2400 событий. В процессе выбора оптимальной конфигурации НС рассматривались варианты с различным числом скрытых слоев и нейронов на них. Увеличение их числа приводит к росту времени обучения и требует большего объема обучающего множества, а уменьшение ухудшает качество описания. Окончательный вариант НС включал три скрытых слоя по 10 нейронов на каждом. Обучение по 2400 образцам потребовало около 200 эпох.

На рисунке 121 приведено окно, демонстрирующее процесс обучения и его сходимость. Точки на графике показывают изменение ошибки между выходными векторами сети и выходными векторами обучающего множества. По оси абсцисс отложены шаги обучения, каждый из которых включает 50 предъявлений входного вектора обучающего множества. Видно, что в процессе обучения ошибка падает на несколько порядков.

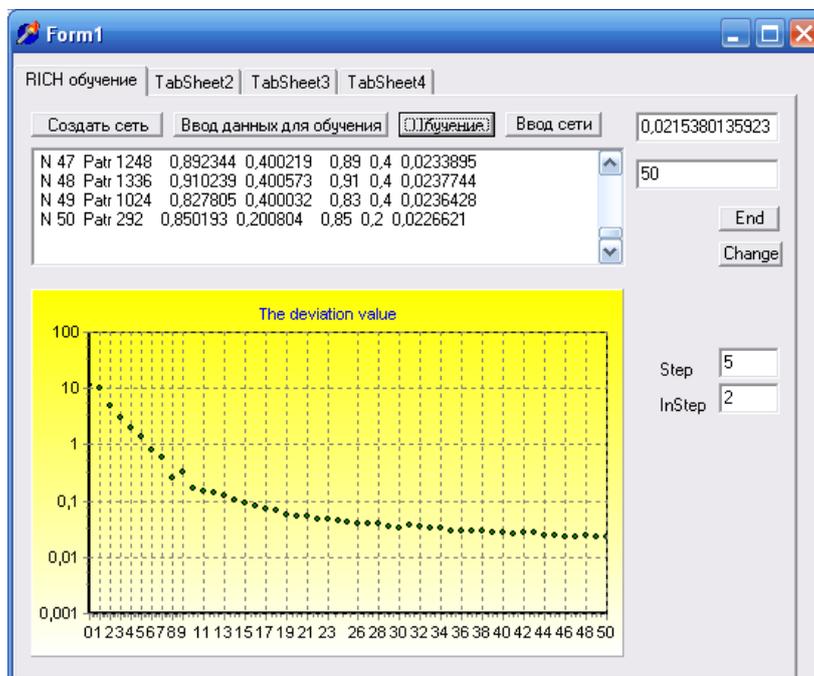


Рисунок 121.

Для проверки качества работы НС был сгенерирован тестовый набор входных и выходных векторов, включающий 840 событий для тех же ядер, но с промежуточными значениями скорости и угла θ . На рисунке 122 приведено окно контроля обучения сети. На графике изображены распределения полученных величин вместе с исходными значениями, обозначенными треугольником. Видно, что заряды частиц, будучи дискретными, определяются практически с абсолютной точностью. Точность определения скорости частиц колеблется в интервале от 0,1% до 0,4%. На рисунке 123 приведено распределение в одной точке ($q=2$, $\beta=0,933$), где разброс найденных значений β наибольший: $\beta=0,934\pm 0,004$. Добавление X_{\max} к набору входных параметров не улучшает описания.

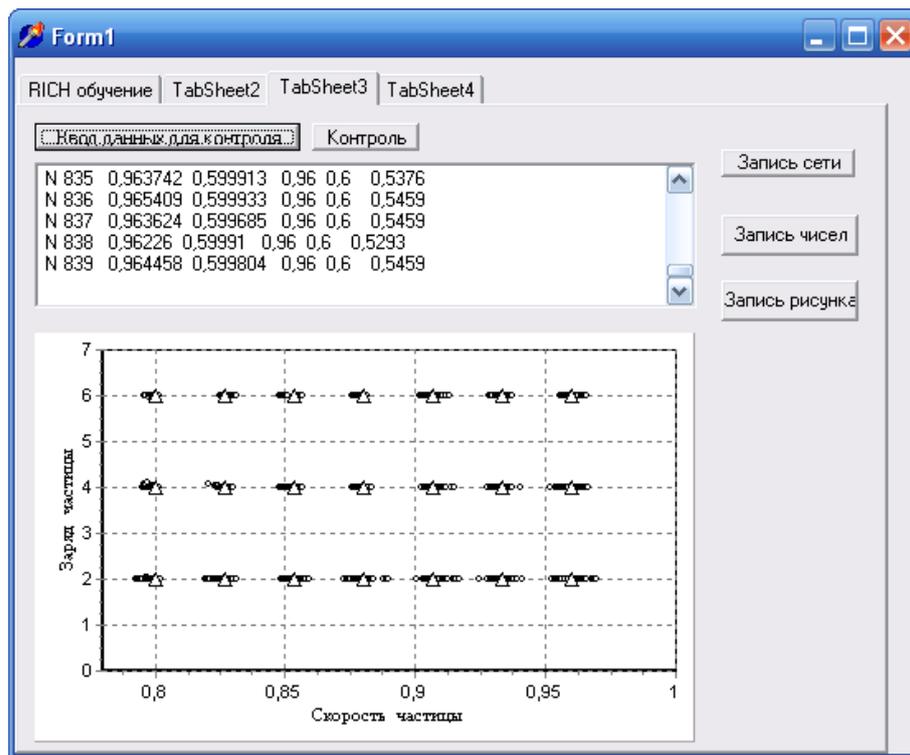


Рисунок 122. Распределение величин заряда и скорости, полученных в результате работы нейронной сети с тестовым набором (3 ядра, 7 скоростей, 4 угла, по 10 событий в каждой точке).

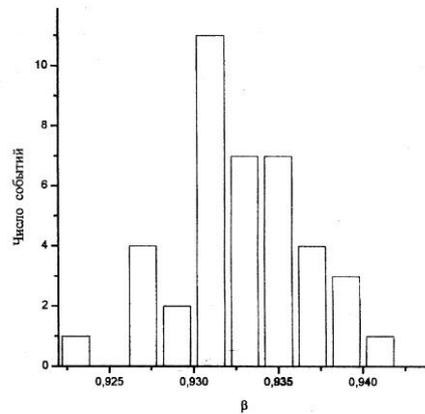


Рисунок 123. Распределение скоростей, полученных в результате работы нейронной сети с тестовым набором, в точке наибольшего разброса скорости: $\beta=0,933\pm 0,004$. Истинное значение скорости $\beta=0,933$.

В рассмотренном выше варианте совсем не участвовала информация о полярном угле θ и точке входа (x_0, y_0) частицы. Дополнительный анализ показал, что эти две характеристики очень сильно коррелируют друг с другом. В связи с этим были рассмотрены варианты работы НС с расширенными наборами входных и выходных векторов. Было использовано то обстоятельство, что центр масс инициированных ФЭУ с большой точностью попадает на проекцию трека на чувствительную плоскость и в качестве дополнительного параметра можно выбрать расстояние от центра масс ФЭУ до проекции точки входа частицы в радиатор R_0 . Зная угол φ , R_0 и координаты ФЭУ можно легко восстановить координаты точки входа частицы x_0 и y_0 . В результате, были выбраны два новых набора входных и выходных векторов: $\{(N_a, X_{\max}, Y_{\max}, \theta); (q, \beta, R_0)\}$ и $\{(N_a, X_{\max}, Y_{\max}, R_0); (q, \beta, \theta)\}$. Параметр X_{\max} был добавлен в набор входных векторов, т.к. он также чувствителен к углу θ и точке входа и делает их определение более точным.

Проверка возможностей этих наборов производилась в той же конфигурации сети и с тем же обучающим множеством, включающим 2400 событий. Проверка результативности обучения на тестирующем множестве из

840 событий показала высокую эффективность определения величин выходного вектора и в этом случае. Так точность определения угла θ составляет около 1° , а точность определения R_0 – от 3 до 5 миллиметров. Кроме того, точность определения скорости β в этом случае повышается.

В последнем из рассмотренных варианте предполагалось знание точного значения величин входного вектора, в том числе угла θ или R_0 . Может случиться так, что имеется информация об обеих этих величинах, но эта информация не точная, а с некоторой ошибкой. Учитывая сильную корреляцию θ и R_0 можно надеяться, что если во входной вектор включить эти, пусть даже и не точные, значения, с помощью нейронной сети можно будет уменьшить эту неопределенность на выходе.

VII. Заключение.

Таким образом, в данной работе создан универсальный программный комплекс на базе современных информационных технологий, предназначенный для обработки данных трековых детекторов практически всех используемых в настоящее время типов. На его основе разработаны пользовательские программы для анализа данных конкретных экспериментов и получены новые важные результаты по физике высоких энергий, элементарных частиц, и космических лучей.

Основными результатами работы являются следующие положения:

1. Создан универсальный программный комплекс блочно-модульного типа для обработки данных трековых детекторов. На основе методов распознавания образов разработаны алгоритмы автоматизированного распознавания треков в твёрдотельных детекторах.
2. Исследована структура нейтроноизбыточного ядра ${}^6\text{He}$. Разработан метод автоматической настройки обработки изображений в зависимости от их качества. В результате проведённого анализа подтверждено существование динейтронной конфигурации в нём.
3. Создана программа по измерению распределений потоков нейтронов в эксперименте "Энергия плюс трансмутация". Использование метода

нечётких множеств позволило проводить измерения в условиях больших загрузок.

4. Разработана методика автоматизированного измерения зарядов релятивистских ядер в толстослойных фотоэмульсиях, на основе которой построены калибровочные кривые, позволяющие в автоматическом режиме определять заряд релятивистских ядер. Эффективность и корректность определения заряда с использованием автоматизированной методики доказана сравнением с результатами ручной обработки.
5. Проведён анализ данных эксперимента по исследованию электронов внутренней конверсии ядер группы лантаноидов. Таблицы линий для ядра ^{161}Ho дополнены новыми, ранее неизвестными линиями.
6. Проведён анализ треков космических частиц в оливинах из метеоритов. Разработаны алгоритмы обработки треков сложной конфигурации с перемежающимися тёмными и светлыми участками, разработана методика продолжения треков на соседние поля зрения. Получены зарядовые распределения тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов.
7. Для анализа свойств RICH-детектора создана программа, имитирующая его работу и позволяющая определять характеристики релятивистских ядер. Для повышения эффективности определения характеристик создана программа с использованием нейронных сетей для анализа изображений RICH-детектора. Проведено сравнение результатов, полученных обычным методом и с помощью нейронной сети. Показано преимущество нового подхода по сравнению с обычными методами.

Важным достоинством программного комплекса является его универсальность, позволяющая собирать отдельные элементы комплекса в пользовательскую программу без существенных доработок и исправлений.

Перспективами работы являются следующие направления:

- Использование программного комплекса для обработки экспериментальных данных в работах с трековыми детекторами,

например, в работах по исследованию двойного бета-распада, или в исследованиях внутренней структуры промышленных объектов методами мюонной радиографии.

- Расширение возможностей программного комплекса на распознавание объектов на изображениях в различных инновационных работах, например, в автоматизации медицинских измерений параметров крови.

VIII. Приложение. Краткое описание структуры программного комплекса.

Программный комплекс построен таким образом, чтобы можно было по возможности легко перестраивать его составляющие, воспроизводя структуру соответствующего алгоритма для обработки конкретного эксперимента. Для реализации таких свойств был выбран язык программирования C++, позволяющий строить иерархию объектов и структур с заданными свойствами.

Набор средств для осуществления процедур обработки изображений и анализа следов частиц зависит от используемой платформы, под которой понимают тип операционной системы и компилятора языка программирования. Данный программный комплекс реализован для операционной системы Windows (98, XP, Vista) с использованием двух интегрированных сред программирования Visual C++ и Builder C++. Наиболее полный вариант разработан для последней. Среда Builder C++ выбрана в качестве основной из-за более удобных и гибких возможностей, предоставляемых ею для создании пользовательских программ, включая реализацию диалоговых режимов с пользователем и графическое представление результатов анализа.

Программный комплекс включает несколько крупных блоков. Для построения полноценной программы обработки и анализа следов частиц необходимо написать дополнительную часть, осуществляющую пользовательский интерфейс и запуск блоков программного комплекса в необходимой последовательности. Её задача заключается в объединении блоков

в единую пользовательскую программу, позволяющую в диалоге с компьютером осуществлять выбор режимов и последовательности обработки изображений и следов частиц, а также производить настройку необходимых параметров для оптимизации работы комплекса. При разработке пользовательской программы для осуществления интерфейса используются различные компоненты Builder: TEdit, TButton, TImage, TScrollBar, TPageControll и т.п.

На рисунке 124 представлена упрощённая структура программного комплекса в виде отдельных блоков. Далее эти блоки описаны более подробно.

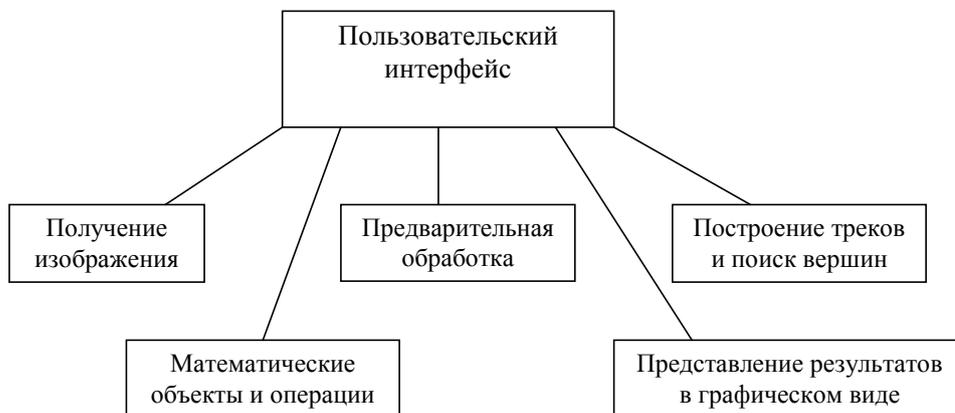


Рисунок 124.

Структура пользовательских программ.

1. Работа с графическими изображениями.

Изображения, передаваемые из микроскопа на компьютер с помощью CCD-камеры, могут размещаться в видеопамяти компьютера или видеопроцессора, а также накапливаться в файлах на жёстких дисках. Для их обработки необходимо извлечь из них содержательную часть, описывающую свойства пикселей изображения.

Приёмы, используемые для доступа к графическим файлам, зависят от их формата. Данный программный комплекс работает с графическими файлами трёх форматов: bmp, jpg и psx. Для bmp-файлов в программных библиотеках

Windows имеются средства их обработки. Во-первых, содержащееся в файле изображение можно загрузить в одно из пользовательских окон и затем попиксельно считать. Во-вторых, содержащееся в файле изображение можно загрузить в компонент TBitmap с помощью функции LoadFromFile, а затем получить из него набор пикселей с помощью функции GetDIBits. С файлами jpeg-формата такие же манипуляции можно осуществлять с помощью свободно распространяемой библиотеки функций jpeglib. Для файлов формата psx используются специальные программы, разработанные в группе ПАВИКОМ, для непосредственного чтения содержимого файла и восстановления пикселей изображения.

Как правило, на каждый пиксел отводится один байт. Полученные таким образом пиксели изображения размещаются во временной области памяти компьютера размером Height·Width байт, где Height и Width - высота и ширина изображения, соответственно.

2. Блок предварительной обработки изображений.

В блок входят операторы линейных и нелинейных преобразований изображений, анализа гистограмм и выбора порога отсечения, алгоритмы определения характеристик и дополнительной обработки кластеров (рисунок 125). Пользовательские программы, как правило, строятся с использованием многостраничных окон, которые изображаются в виде множества перекрывающихся страниц. Каждая из этих страниц содержит управляющие элементы, которые содержат диалоговые окна для выбора полей зрения и файлов, подлежащих обработке, выбора режимов обработки, в том числе набор

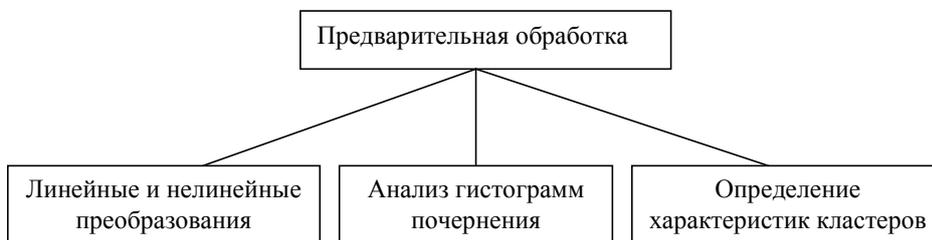


Рисунок 125.

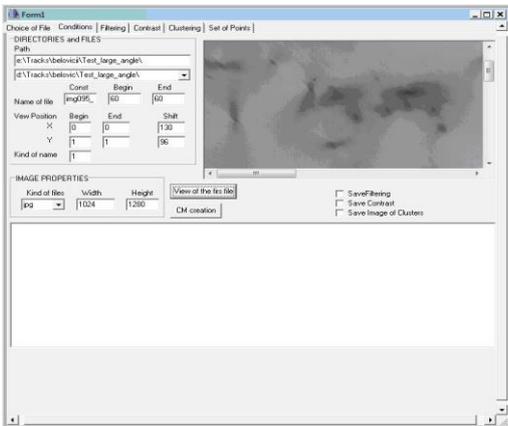


Рисунок 126.

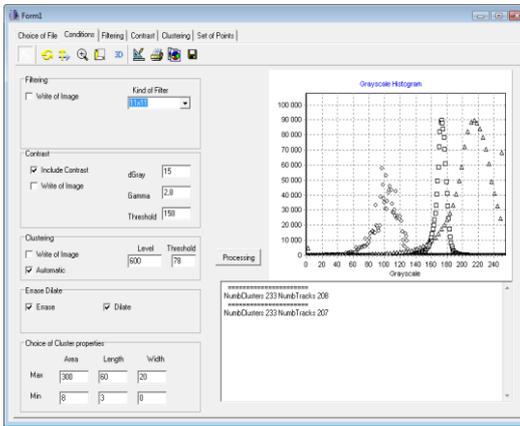
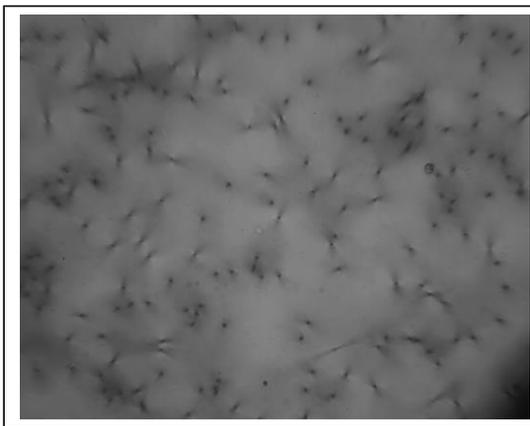


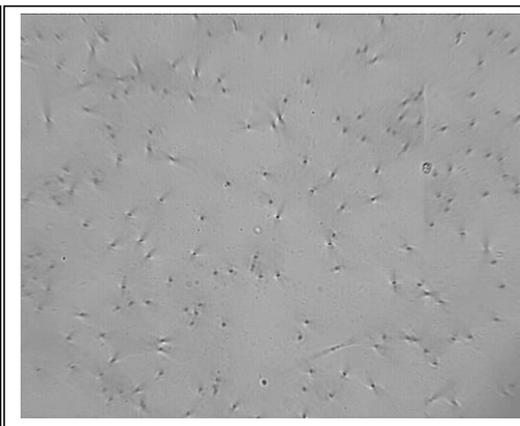
Рисунок 127.

фильтров, условия изменения контраста и т.д. На рисунке 126 показано окно программы со страницей выбора изображений, подлежащих обработке, а на рисунке 127 со страницей выбора режимов предварительной обработки, анализа гистограмм и результатом подсчёта числа кластеров.

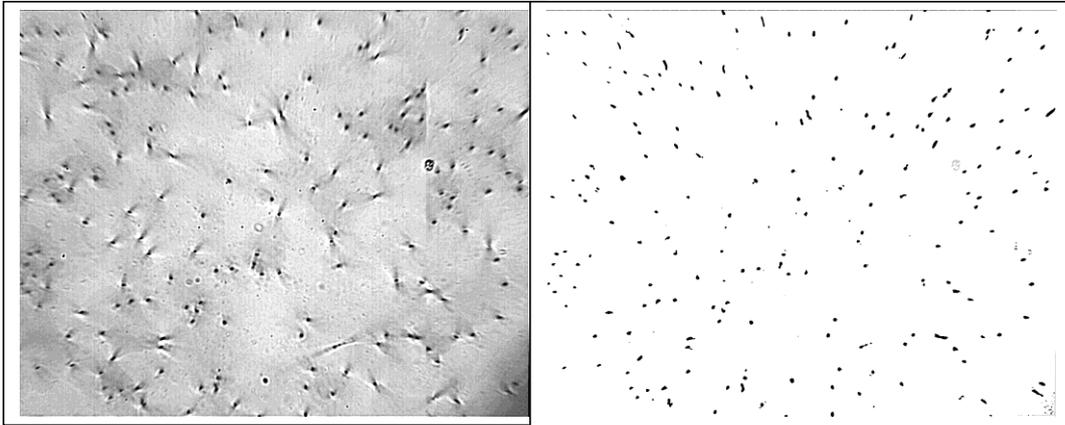
В начале цикла обработки на этапе настройки важно контролировать её качество. С этой целью предусмотрена возможность просмотра промежуточных результатов преобразования изображений. На рисунках 128а, б, в и г показаны



а



б



в

г

Рисунок 128.

исходное изображение (а) взаимодействия ядер ${}^6\text{He}$ с фотоэмульсией и результаты последовательного преобразования модифицированным фильтром Лапласа (б), нелинейным оператором контраста (в) и операцией бинаризации (г).

В рабочем режиме промежуточные результаты не показываются в целях экономии времени, поскольку в одном сеансе могут обрабатываться более десяти тысяч изображений.

Результатом работы данного этапа является набор кластеров со своими характеристиками. Они накапливаются в специальных классах, структура которых зависит от степени детализации их свойств. В Таблице 3 приведён фрагмент заголовочного файла блока предварительной обработки. Для экономии места во фрагмент не включено тривиальное содержимое конструкторов и операторов копирования и присвоения классов. Класс Cluster накапливает информацию об отдельных кластерах, а класс CClusters набор кластеров на одном поле зрения. Класс Track предназначен для хранения точек в пространстве, принадлежащих отдельным трекам. Поскольку количество кластеров и треков заранее неизвестно они собираются в контейнеры <vector> и <map>. В класс CClusters входит также набор функций, осуществляющих предварительную обработку изображений и определение характеристик треков.

Таблица 3.

```

class Track
{
public:
    Track()
    {
        .....
    }
    Track(const Track & a)
    {
        .....
    }
    ~Track() {};

    const Track & operator= (const Track & a)
    {
        .....
    }
    uint8    State;
    VecPoints TrackPoints;
};
// =====
class Cluster
{
public:
    Cluster()
    {
        .....
    }
    Cluster(const Cluster & a)
    {
        .....
    }
    ~Cluster() {};

    const Cluster & operator= (const Cluster & a)
    {
        .....
    }
    uint8    State;
    uint16   NumbPixels;
    MyPoint  Centroid;
    VecPoints ClusterPoints;
    double   Width, Length, Axis1, Axis2;
};
// =====
typedef vector<Track>      SetOfTracks;
typedef vector<Cluster>   SetOfClusters;
typedef map<double, Track> MapTrack;
// =====
class CClusters
{
public:
    CClusters()
    {
        .....
    }
    ~CClusters() {};
};

public:
    void    GetHistogram(uint16 w, uint16 h, uint8 *
                puImage);
    uint8   ThreshEval( uint16 w, uint16 h, uint8 *
                puImage, uint8 F);
    double  FillMask5(uint16 Width, uint16 heigh,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask7(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask11(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask99(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask55(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask1717(uint16 Width, uint16
                Height, uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask77(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin);
    double  FillMask65(uint16 Width, uint16 Height,
                uint8 * puImBin, double * puOutBin,
                uint8 Dim);
    double  TransformD2I(uint16 width, uint16 height,
                uint8 * puImBin, double * duMask);

    uint8 * MakeBinary(uint8 * puIMin, uint16 w,
                uint16 h, uint8 HowFind, uint8 aThresh);
    void    Tracking(uint16 h, uint16 w, uint8 *
                uTracks);
    void    Contrast(uint16 h, uint16 w, uint8 * uT,
                uint8 * Out, uint8 Thresh, double Contr);
    void    FindClusters(uint8 * puIMin, uint16 w,
                uint16 h, uint8 uThresh, uint8 * puTracks);
    bool    TestOfCluster(int iterPixel, uint16 *
                puCluster, double *Width, double *Height);
    void    ArrangeArray(unsigned long * Clusters,
                uint16 uN1, uint16 uN2, uint16 uCons);
    double  MidLine(double X0, double Y0, double
                Xmin, uint8 Numb, double * Average, int H);

    uint16   NumbClusters, NumbTracks;
    unsigned long Histogram[256];
    uint16   Width, Height, PixelNumb;
    double   Mask[5][5], X0, Y0, Axis1C, Axis2C;

    uint16   MaxLength, MinLength, MaxWidth,
                MinWidth;
    uint8   WhatMask, MaxHistI;
    unsigned long MinClust, MaxClust, NumbClust,
                NumbClust0, MaxHist;
    double  G[3], H[3], A[3];

    VecPoints  Blob;
    VectVecPoints  VecBlobs;
    SetOfClusters  Clusters;
};

```

3. Блок построения треков и поиска вершин.

Блок предварительной обработки во многом является универсальным и различается в разных задачах только детализацией требуемой информации о кластерах. На этапе построения и анализа треков задачи различаются более существенно. Тем не менее, в большинстве из них используется схожая схема, условно представленная на рисунке 129.

Для восстановления треков используется информация о кластерах, полученная на этапе предварительной обработки. Основным алгоритмом при этом является прослеживание в пространстве последовательности центров масс кластеров, путём аппроксимации их прямыми, с учётом их дополнительных характеристик (направление оси, площадь и т.д.). В экспериментах с толстыми эмульсиями может происходить дисторсия при проявке, что приводит к существенной деформации треков. В этом случае аппроксимация прямой линией сразу всего трека невозможна, поэтому для нахождения продолжения обрабатываются только несколько последних точек поиска. Кроме того, в силу неравномерности проявки эмульсии возможна потеря следов частицы на отдельных глубинах, в особенности, в середине. Поэтому допускается, что поиск продолжения трека может проводиться с пропусками нескольких уровней.

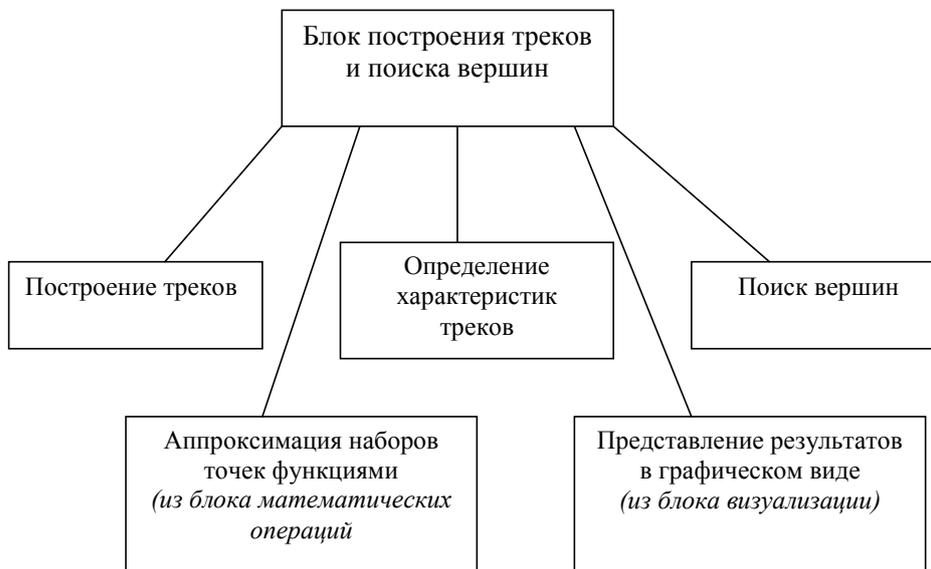


Рисунок 129.

Однако даже и в этом случае трек может восстановиться не полностью, поэтому необходима дополнительная проверка и сбор отдельных кусков.

Треки, имеющие большую длину, могут располагаться на нескольких полях зрения. Это также приводит к необходимости сбора треков из отдельных частей. Для облегчения этой операции съёмка кадров производится с частичным их перекрытием. При сшивке кадров использовались неоднородности изображения (следы частиц, посторонние пятна и т.д.), расположенные на перекрывающихся областях.

Обработка данных трековых детекторов основана на анализе характеристик треков частиц. В разных задачах требуется знание разных характеристик, поэтому в программном комплексе предусмотрена возможность получения, хранения и анализа различной информации о треках. В приведённой выше Таблице 3 класс Track включает минимальную информацию: перечень точек в пространстве (центры масс соответствующих кластеров), включённых в данный трек. Более детальная информация о свойствах треков может включать характеристики составляющих его кластеров, протяжённость, площадь, форму и т.д. треков. Для её получения используются функции, включённые в блок определения характеристик треков.

Для анализа кинематических свойств взаимодействия частиц в трековых детекторах необходимо восстановить вершину. Для этой цели в блоке поиска вершин предусмотрено несколько функций. Основной алгоритм поиска заключается в просмотре окрестности трека с целью поиска конца или начала другого трека. При обнаружении трека-кандидата производится дополнительная проверка по кинематическим признакам, например, планарность в случае двухчастичной реакции.

4. Блок математических объектов и операций.

Блок математических операций включает несколько разделов (рисунок 130). В частности, определение элементарных объектов, используемых при проведении обработки треков частиц в трековых детекторах. Это точки и линии на плоскости и в пространстве, а также операции с ними, т. е. определение

расстояний, вычисление углов между прямыми, между прямой и плоскостью и т.д.



Рисунок 130.

Другой важной частью является блок аппроксимации наборов точек функциями нескольких переменных путём подбора параметров с помощью метода наименьших квадратов путём минимизации соответствующего квадратичного функционала. Так как предполагается, что вид функций может быть самым разным, используется алгоритм минимизации функции методом деформируемого симплекса Нелдера-Мида [162], не требующим знания производных функции по параметрам. В программном комплексе реализованы варианты аппроксимации точек отрезками прямых, наборами из функций Гаусса и Ландау. При этом предусмотрен вариант аппроксимации с учётом возможных выбросов, т.е. случаев, когда в наборе присутствует одна или несколько точек, не принадлежащих треку, но случайным образом попавшие в него при трекинге. Алгоритм минимизации реализован в программном комплексе, как самостоятельная функция (MinAB) и может быть использована для минимизации произвольно заданной функции с параметрами.

Отдельный блок включает программную реализацию нейронной сети Хопфилда с обратным распространением ошибки. В данной работе она использовалась для обработки данных RICH-детектора, но может быть применена и в других задачах.

5. Представление результатов в графическом виде

Для контроля качества обработки данных во время отладки и настройки параметров предусмотрен блок визуализации, позволяющий представить промежуточные и окончательные результаты в наглядном виде. Для этого, например, результаты шагов предварительной обработки изображений выводятся в окна пользовательской программы (рис. 128), а результаты трекинга и зависимости анализируемых величин представляются в виде 2-х и 3-х мерных графиков (например, рис. 48-50, 63 и др.). Для этого используются как встроенные в интегрированную среду программирования средства (например, TeeChart в Builder C++), так и специально разработанные для программного комплекса методы.

Литература.

1. 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.
2. 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.
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.
3. Aleksandrov A.V., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L. et al., Completely automated measurement facility (PAVICOM) for track-detector data processing, Nucl. Instr. & Meth., 2004, v. A 535, p. 542.
4. 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.
5. К.В. Александров и др., "Эффективность регистрации черенковских фотонов рич-детектором с радиаторами из LiF и MgF₂, Письма в ЖТФ, 1996, т. 22, вып. 18, стр. 11-15.

6. К.В. Александров и др., "Моделирование RICH детектора AMS и реконструкция кинематических параметров регистрируемых частиц", Математическое моделирование, 1997, т. 9, № 11, стр. 33-45.
7. 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.
8. 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.
9. Fleischer R.L., Price P.B. and Walker R.M. (1975). Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, Berkeley.
10. С.Дюррани, Р.Балл «Твердотельные ядерные детекторы» М., Энергоатомиздат, 1990.
11. М. А. Маренный; Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радио-биологическом эксперименте, М. Энергоатомиздат, 1987.
12. Chernavskaya O.D., Dobrotin N.A., Dremin I.M....Polukhina N.G. et.al. «The Central Pb-Pb Interactions with Energies 158 GeV/Nucleon» 28th International Conference on High Energy Physics Warsaw, 1996, v.1, p.941-942.
13. N.M.Astafyeva, N.A.Dobrotin, I.M.Dremin et al, «Peculiarities of Secondary Particle Generation Process in Pb-Pb Interactions at 158 A Gev», 6th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, 1997, p.269-273.
14. Добротин Н.А., Дремин И.М., Фейнберг Е.Л....Полухина Н.Г. и др. «Исследования центральных Pb-Pb взаимодействий при высоких энергиях» Изв.АН, сер.физ., т.63, N.3, 1999, стр. 485-488.
15. Dobrotin N.A., Dremin I.M., Feinberg E.L.Polukhina N.G. et. al. "Central Pb-Pb Interaction at High-Energies" Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.63:393-395,1999.
16. «Автоматическая обработка данных с пузырьковых и искровых камер», под ред. Б.С.Розова, Москва, Атомиздат, 1971.
17. "Bubble and Spark Chambers" edited by R.P.Shutt, vol.II, Academic Press New York and London, 1967.
18. Alvarez L.W., Round Table Discussion on Bubble Chambers. Proceedings 1966 International Conference on Instrumentation for High Energy Physics (1966).
19. А.Л.Горелик, В.А.Скринкин Методы распознавания, Москва, Высшая школа, 1984.
20. 1989.К.Фу, Структурные методы в распознавании образов, Москва,

МИР, 1977.

21. Дж.Фу, Р.Гонсалес, Принципы распознавания образов, Москва, МИР, 1978.

22. James A. Freeman, David M. Skapura, Neural Networks. Algorithms, Applications, and Programming Techniques, Addison-Wesley Publishing Company Inc., New York, Bonn, Paris, 1991.

23. L. Fausett, Fundamentals of Neural Network. Architectures, Algorithms and Applications, Prentice-Hall Inc., London, Toronto, 1994.

24. Cellular neural networks and visual computing. Foundation and applications, Leon O. Chua, Tamas Roska, Cambridge University Press, 2004.

25. F. Rosenblatt, The Perceptron: a Probabilistic Model for Information Storage and Organisation in the Brain, Psychological Review, 1958. v. 65, p. 386.

26. Основные концепции нейронных сетей, Р. Калан, изд. дом "Вильямс", Москва, С.-Петербург, 2001.

27. А. Розенфельд, Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин, М. "Мир", 1972.

28. Sing-Tze Bow , Pattern Recognition and Image Preprocessing, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc. New York B· Basel, 2002.

29. Обработка изображений и цифровая фильтрация, Ред. Т. Хуанг, Миз, Москва, 1979.

30. Л.П. Ярославский, Введение в цифровую обработку изображений. М. "Советское радио", 1979.

31. Tinku Acharya, Ajoy K. Ray, Image Processing Principles and Applications Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005.

32. Р. Гонсалес, Р. Вувз, Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений, ТЕХНОСФЕРА, Москва, 2005.

33. Image Processing and Analysis. A practical research, ed. by R. Baldock and J. Graham, Oxford University Press, 2000.

34. First events from the CHGS neutrino beam detected in the OPERA experiment, New Journal of Physics 8 (2006) 303

35 The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam, JINST, 4, p. 06018, 2009

36 The detection of neutrino interactions in the emulsion/lead target of the OPERA experiment, JINST, 4, p. 06020, 2009

37. Гинзбург В.Л., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Царев В.А., Проблемы и перспективы поиска следов тяжелых и сверхтяжелых ядер в оливинах из метеоритов; ДАН, 2005, т.402, № 4, с.1-3.

38. Кашкаров Л.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Калинина Г.В., Ивлиев А.И., Александров А.Б., Гончарова Л.А., Апачева И.Ю., Новая методика определения параметров треков, образованных в оливине палласитов ядрами сверхтяжелых элементов космических лучей; Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» № 1(24), 2006. ISSN 1819-6586

http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbut-1_2006/planet-6.pdf; 3.

39. . Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Starkov N.I., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Aleksandrov A.B., Goncharova L.A., Tarasova I.Yu., Geometrical track parameters in the pallasite olivine: identification of the cosmic ray heavy nuclei.; Radiation Measurements, v. 43, pp. S266-S268. 2008.

40. Strutinsky VM., Nucl. Phys. 1967. V. A95. P. 420.

41. Адамович М.И., Браднова В., Вокал С. и др. «Исследование кластеризации легких ядер в процессах релятивистской фрагментации» Ядерная физика, 2004, т.67, с. 533-536.

42. Bradnova V , Chernyavsky M.M., Gaitinov A.Sh., Goncharova L.A. "Studies of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process" Acta Physica Slovaca, 2004, vol.54, N 4, 351-365.

43. Андреева Н.П., Браднова В., Вокал С. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Препринт ОИЯИ Р1-2004-91.

44. Андреева Н.П., Браднова В., Вокал С. и др. «Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер» Ядерная физика, 68, 484-494, 2005.

45. Tanihata I. Nucleon halo nuclei // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. - 1996. - Vol. 22. - P. 157 - 198.

. Riisager K. Nuclear halo states // Rev. Mod. Phys. - 1994. - Vol. 66. - P. 1105 - 1116.

46. Bertsch G.E., Esbensen H. Pair correlation near the neutron drip line //Ann. Phys. - 1991. - Vol. 209. - P. 327 -363.

47. Zhukov M.V., Chulkov L.V., Danilin B.V., Korshennikov A.A. Specific structure of the ${}^6\text{He}$ nucleus and fragmentation experiments, Nucl. Phys. - 1991. - Vol. A533. - P. 440.
- 48 - Zhukov M.V., Jonson B. Particle momentum distributions in an analytical threebody approach, Nucl. Phys. - 1995. - Vol. A589. - P. 1 - 16.
49. Р.Г.Васильков, В.И. Гольданский, В.В.Орлов. Об электроядерном бридинге. УФН, 1983, стр.139,435.
50. В.Н.Михайлов, Интенсивные нейтронные пучки на ускорителях. Краткие сообщения ОИЯИ 6 (80)-96, 17, Дубна, 1996.
51. В.П.Дмитриевский. Электроядерный метод получения энергии. ЭЧАЯ, 1997, 28,3,0.815
- 52 А.А.Абдуразаков, А.Х. Холматов, А.А. Тангабаев и др., Атлас спектров электронов внутренней конверсии нейтронодефицитных радиоактивных нуклидов в области $A = 131-172$. Ташкент, Узбекистон, 1991.
53. Бьерн Страуструп, Язык программирования C++, 3-е издание, М., "Бином", СПб, "Невский диалект" , 1999.
Гради Буч, Объектно-ориентированный анализ и проектирование, 2-е издание, М., "Бином", СПб, "Невский диалект", 1999.
54. I.T. Young, J.J. Gerbrands, L.J. van Vliet, Fundamentals of image processing, Delfi University Technology, Netherlands, 1998.
55. John C. Russ, The image processing handbook, Fourth edition, CRC Press, London, New York, 2006.
56. Прикладные нечёткие системы, ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено, изд. Мир, 1993.
57. Кофман А., Алуха Х. Хил, Введение теории нечётких множеств в управление предприятием, Минск, Высшая школа, 1992.
Аверин А.Н. и др., Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта, Под ред. Поспелова Д.А., М., Наука 1986.
58. Александров А.Б., Багуля А.В.; Владимиров М.С., и др., Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжёлых элементов в кристаллах из метеоритов; Приборы и техника эксперимента, 2009, № 2, 38.
59. Oganessian Yu.Ts., Zagrebaev V.I., Vaagen J.S. "Di-neutron" configuration of ${}^6\text{He}$ // Phys. Rev. Lett. - 1999. -Vol. 82. - P. 4996 - 4999; Dynamics of two-neutron transfer reactions with Borromean nucleus ${}^6\text{He}$ // Phys. Rev. -1999. - Vol. C60. - 044605. - P. 1.

60. Ter.-Akopian G.M. et al. Two-neutron exchange observed in the $6\text{He} + 4\text{He}$ reaction search for the “di-neutron” configuration of 6He // Phys. Lett. - 1998. - Vol. B420. - P. 251 - 256.
61. Беловицкий Г.Е., Заварзина В.П., Конобеевский Е.С. и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, 2001, № 5, с. 26.
62. Marques G.M. et al., Two-neutron interferometry as a probe of the nuclear halo, Phys. Lett, 2000, v. B476, p. 219;
Detection of neutron clusters, Phys. Rev., 2002, v. C65. - 044006, p. 1.
63. Беловицкий Г.Е., Заварзина В.П., Конобеевский Е.С., Степанов А.В., Гончарова Л.А., Котельников К.А., Старков Н.И., Стариков Е.В.; Исследование корреляций нейтронов в гало-ядрах в реакциях с передачей двух нейтронов; Препринт ФИАН, № 17, 2003.
64. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov, V.Zavarzina, S.Zuyev, N.Polukhina, N.Starkov, A.Aleksandrov, S.Lukyanov, Yu.Sobolev ,Determination of charged particle trajectories in nuclear photoemulsion; Proc. of LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus”, 2005, Saint-Petersburg, p.321.
65. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov, V.Zavarzina, S.Zuyev, N.Polukhina, N.Starkov, A.Aleksandrov, S.Lukyanov, Yu.Sobolev, Photoemulsion Method of Study of neutron Halo Using Neutron Transfer Reaction; Proc. of 5th Conference Nuclear and Particle Physics, 2005, Cairo, Egypt, 78.
66. Г.Е. Беловицкий, В.П. Заварзина, С.В. Зуев, Е.С. Конобеевский, А.В. Степанов, Н.Г. Полухина, И.Н. Старков, С.М. Лукьянов, Ю.Г. Соколев, ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ НЕЙТРОННОГО ГАЛО В РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДВУХ НЕЙТРОНОВ; International Conference Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2006) May 29-June 03, 2006 Book of Abstracts, Киев, Институт ядерных исследований НАН Украины , 2006, p. 51.
67. G.E.Belovitsky, E.S.Konobeevski, A.V.Stepanov, V.P.Zavarzina, N.G. Polukhina, N.I.Starkov, S.M.Lukyanov, Yu.G. Sobolev, S.V.Zuev, A.Aleksandrov, Study of structure of neutron halo using neutron transfer reaction; EPJA 2006 v.34.
68. G.E.Belovitsky, E.S.Konobeevski, A.V.Stepanov, V.P.Zavarzina, S.V.Zuev, N.G. Polukhina, N.I.Starkov, S.M.Lukyanov, Yu.G. Sobolev, Study of the neutron halo structure in the two neutron transfer reaction.; In Proc. of International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, Kiev, 2006, p.51.
69. G.E.Belovitsky, E.S.Konobeevski, A.V.Stepanov, V.P.Zavarzina, N.G. Polukhina, N.I.Starkov, S.M.Lukyanov, Yu.G. Sobolev, S.V.Zuev, A.Aleksandrov, Study of structure of neutron halo using neutron transfer reaction.; In Proc. of 7th

International Conference on Radioactive Nuclear Beams, Cortina d'Ampezzo, 2006, p.72.

70. Г.Е. Беловицкий, В.П. Заварзина, С.В. Зуев, Е.С. Конобеевский, А.В. Степанов, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, С.М. Лукьянов, Ю.Г. Соболев. "Изучение структуры нейтронного гало в реакции передачи двух нейтронов "; Доклад на международной конференции "Current problems in nuclear physics and atomic energy" (НРАЕ-Київ 2006). May 29- June 03, 2006. Proceedings of the Conference. Kyiv 2007. Part I. P. 237-245. (2007).

71. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, N. Starkov, S. Lukyanov, and Yu. Sobolev " Study of structure of neutron halo using neutron transfer reaction"; EPJST. V.150. №1. P. 5-7. (2007).

72 G. Belovitsky. E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, N. Starkov, A. Aleksandrov, S. Lukyanov, Yu. Sobolev "Photoemulsion method of study of neutron halo using neutron transfer reaction"; in. proc. of international conference NUPPAC 05. EGYPT. CAIRO. 17-23 November 2005. P. 78-80. Proc. of Conference. EGYPT. CAIRO. 2007. P. 389-398.

73. G. Belovitsky. E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, A. Rusetsky, N. Starkov, S. Lukyanov, Yu. Sobolev. "Study of the two-neutron transfer reaction included by ${}^6\text{He}$ radioactive beam"; 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics. Pisa, Italy. 10-14 September 2007. Book of Abstracts. P.169-170.

74. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, A. Rusetsky, N. Starkov, S. Lukyanov, and Yu. Sobolev, STUDY OF NEUTRON HALO STRUCTURE IN INTERACTION OF ${}^6\text{He}$ WITH NUCLEI OF PHOTOEMULSION; "NUPPAC' 07" 6th International Conference on Nuclear and Particle Physics 17-21 Nov. 2007, Luxor, Egypt.

75. Г.Е. Беловицкий, Е.С. Конобеевский, В.П. Заварзина, С.В. Зуев, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, А.Б. Александров, С.М. Лукьянов, Ю.Г. Соболев, Выделение траекторий заряженных частиц в ядерных фотоэмульсиях. ; Известия РАН, сер. физ. Т. 70, № 5, стр. 646-649.(2006).

76. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, N. Starkov, S. Lukyanov, Yu. Sobolev. Study of structure of neutron halo using neutron transfer reaction; Report on 7th International Conference on Radioactive Nuclear Beams, July 3-7, 2006. Cortina d'Ampezzo (Italy). Proc. of Conference, 2006, p. 72.

77. G.E. Belovitsky, V.P. Zavarzina, S.V. Zuyev, E.S. Konobeevski, A.V. Stepanov, N. G. Polukhina, N.I. Starkov, S.M. Lukyanov, Yu.G. Sobolev, Study of the neutron halo structure in the two neutron transfer reactions; Доклад на международной конференции "Current problems in nuclear physics and atomic

energy” (NPAE-Kyiv 2006). May 29- June 03, 2006. Proceedings of the Conference. UKRAINE Kyiv 2007. Part I. P. 237-245.

78. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, A. Rusetsky, N. Starkov, S. Lukyanov, Yu.G. Sobolev, STUDY OF THE TWO NEUTRON TRANSFER REACTION INDUCED BY ${}^6\text{He}$ RADIOACTIVE BEAM ; Book of Abstracts. 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics. Pisa, Italy, 10-14 September 2007 P. 169-170.

79. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov et al., Measurements of the two-neutron transfer reaction induced by ${}^6\text{He}$ radioactive beam; 57 International Conference on Nuclear Physics “NUCLEUS 2007”. Book of Abstracts. June 25-29, 2007. Voronezh. Russia. P. 113.

80. G. Belovitsky, E. Konobeevski, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, A. Rusetsky, N. Starkov, S. Lukyanov, Yu. Sobolev, Photoemulsion method of study of neutron halo using neutron transfer reaction; Proceedings of the Conference NUPPAC 05. (Egypt. Cairo. 17-23 November 2005). Egypt. Cairo. 2007. P. 389-398.

81. Г.Е. Беловицкий, В.П. Заварзина, С.В. Зуев, Е.С. Конобеевский, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, С.М. Лукьянов, Ю.Г. Соболев, “Измерение реакции передачи двух нейтронов на пучке радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$ ”; BRAS: Physics , 2008. V. 72. №3, p. 311.

82. Г.Е. Беловицкий, В.П. Заварзина, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, С.М. Лукьянов, Ю.Г. Соболев, Измерение реакции передачи двух нейтронов на пучке радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$; Известия РАН, сер. Физическая, т. 72, № 3, сс. 336-339, 2008.

E. Konobeevski, G. Belovitsky, A. Stepanov, V. Zavarzina, S. Zuyev, N. Polukhina, A. Rusetsky, N. Starkov, S. Lukyanov, Yu. Sobolev, Study of the neutron halo structure in interaction of ${}^6\text{He}$ with nuclei of photoemulsion; Few-Body Systems, ISSN: 0177-7963, Vol: 44, Issue: 1-4, 2008, pages 277-282.

83 С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, Исследование элементарных частиц фотографическим методом, Москва, 1962.

84. Д.Г. Баранов, Ю.Ф. Гагарин, Н.С. Иванова и др., Фотометрическое определение заряда ядер в фотоядерной эмульсии, Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 654, Ленинград, 1980.

85. Войковский Б.А., Галактионов А.И., Третьякова М.И., Чудаков А.Е. «Фотометрирование следов заряженных частиц в фотоэмульсии» ПТЭ, 1957, № 6, стр.38-41.

86. Воронков А.Е., Соловьева М.Ф., Третьякова М.И., Сухов Л.В., Чернявский М.М. «Опыт работы на приборе по автоматическому измерению

ионизации и импульса на следах релятивистских частиц» ПТЭ, 1964, № 4, стр. 75-77.

87. Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Коновалова Н.С., Орлова Г.И., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ; Препринт ФИАН № 29, 2005.

88. Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Коновалова Н.С., Орлова Г.И., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Изучение структуры гало нейтроноизбыточных ядер в реакции передачи двух нейтронов. Известия РАН, сер. физ. Т.70, № 5, стр. 650-655. 2006.

89. А.Б. Александров, Л.А. Гончарова, Н.С. Коновалова, Г.И. Орлова, Н.Г. Пересадько, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, И.Ю. Тарасова, М.М. Чернявский, А.О. Щелканов, Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ; ПТЭ, 2007, № 4, с. 46-50.

90. А.Б. Александров, М.С.Владимиров, Л.А. Гончарова, Н.С. Коновалова, Г.И. Орлова, Н.Г. Полухина, Н.И. Старков, М.М. Чернявский, А.О. Щелканов, Автоматизация измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении ядрами с энергией 1 ГэВ на нуклон с целью получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц; Препринт ФИАН № 4, 2007; 23.

91. C.W. Reich et al., Nucl. Data Sheets. 105, 557 (2005).

92. Егоров О.К., Котельников К.А., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л.; Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-1; ПТЭ, 2003, № 6, с.130-132.

93. Егоров О.К., Котельников К.А., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л.; Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2; ПТЭ, 2003, № 6, с.133-134.

94. . К.Н. Kaun, L. Funke, P. Kemnitz et al., Nucl. Phys., A194. 1972. P. 177

95. Азаренкова И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А., Калинин В.Г., К.А.Котельников, Солнышкин А.А., Старков Н.И., Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном микроскопном комплексе ПАВИКОМ; ПТЭ, 2004, № 1, с.66-68.

96. Апачева И.Ю., Егоров О.К., Исламов Т.А., Калинин В.Г., Котельников К.А., Солнышкин А.А., Старков Н.И., Методика исследования электронов внутренней конверсии на полностью автоматизированном

микроскопном комплексе ПАВИКОМ; Труды 54 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Белгород, 2004, стр.276.

97. О.К.Егоров, В.Г.Калинников, Н.Г.Полухина, Л.Н.Семенова, А.А.Солнышкин, Н.И.Старков, Обнаружение $L_{2,3}$ -линий γ -перехода с энергией 148.16 КэВ в ядре ^{161}Ho ; Труды 56 Международной конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 4-8 сентября 2006 г., г.Саров, стр.93.

98. О.К. Егоров, В.Г. Калинин, Н.Г. Полухина, Л.Н. Семёнова, А.А. Солнышкин, Н.И. Старков, Обнаружение $L_{2,3}$ -линий γ -перехода с энергией 148,16 кэВ в ядре ^{161}Ho ; Известия РАН, сер. Физическая, т. 72, № 6, сс. 790-792, 2008.

99. Ж.-П. Риволь, Электроядерная установка для уничтожения ядерных отходов, УФН, 2003, т. 173, № 7, с. 747-755.

100. Кривоустов М.И. и др. О первом эксперименте по калориметрии уранового blankets на модели U/Pb - сборки электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1,5 ГэВ, Препринт ОИЯИ Р1-2000-168, Дубна.

First experiments with a large uranium blanket within the installation "energy plus transmutation" exposed to 1.5 GeV protons, Kerntechnik, 2003, v. 68, p. 48.

101. Ts.Tumendelger, M.LKrivopustov, D.Chultem et al. Activation and Track Tomography and Calorimetry of Target for U/Pb-Assembly at Energy of Proton 1,5 GeV. Abstract for 3rd Int. Conf. ADTTA-99 (Praha, June 1999), p. 129. Препринт ОИЯИ Р1-99-247, Дубна, 1999.

102. Р.Брандт, М.И.Кривоустов, Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм и др. Исследование температурного и нейтронных полей в свинцовой среде при взаимодействии релятивистских протонов. Сообщение ОИЯИ Р1-99-117, Дубна, 1999.

103. Гончарова Л.А., Котельников К. А., Кузнецов С. П., Полухина Н. Г., Старков Н. И. и др., Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом blankets электроядерной системы, Препринт ФИАН, № 25, 2001, с. 1-15.

104. А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин, Элементы теории функций и функционального анализа, "Наука", Москва, 1968.

105. Гинзбург ВЛ., Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас наиболее важными и интересными?, УФН. 1999. Т. 169. С. 419.

106. Оганесян Ю.Ц., Вестн. РАН. 2001. Т. 71. С. 590.

107. "117-ый – наш", Известия, от 15 апреля 2010 г.

108. Rujula A.De, Glashow S.L. II Nature. 1984. V. 312. P. 734.
109. Frieman J.A., Guidice G.F., Nucl. Phys. 1991. V. B335. P. 162.
110. Зельдович Я.Б., ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 1123.
111. Бисноватый-Коган Г.С., Чечеткин В.М., УФН. 1979. Т. 127. С. 263.
Крамаровский Я.М., Чечев В.П., Синтез элементов во Вселенной, М., Наука, 1987.
112. Панов И.В., Корнеев И.В., Тилеман Ф.-К., Сверхтяжёлые элементы и r-процесс, Ядерная физика, 2009, т. 72, № 6, с. 1070.
113. Lattimer J.M. Schramm D.N., Astrophys. J. Lett., 1974, V. 192, L145.
114. Shirk E.K., Price P.B., Charge and energy spectra of cosmic rays with $Z \geq 60$: the SKYLAB experiment, Astrophys. J., 1978, v. 220, p. 719.
115. Fowler P.H., Walker N.F., Mashedier R.W. et al., ARIEL 6 measurements of the fluxes of ultraheavy cosmic rays, Astrophys. J., 1987, v. 314, p. 746.
116. 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.
117. Binns W.R., Garrard T.L., Gibner P.S. et al., Abundances of ultraheavy elements in the cosmic radiation: results from HEA0, Astrophys. J., 1989, v. 346, p. 997.
118. Font J., Domingo C., Dependence of the propagation of ultra-heavy cosmic ray nuclei of first ionization potential, Acta Physica Polonica, 1998, v. 29 B, p. 357.
119. Donnelly J., Thompson A., O'Sullivan D. et al., The abundances of actinide nuclei in the cosmic radiation as clues to cosmic ray origin, Proceedings of 27-th ICRC, Hamburg, Germany, 2001, p. 1715.
120. Weaver B.A., Westphal A.J., Astrophys. J., 2001, v. 569, p. 493.
121. Maurette M., Pellas P., Walker R.M., Cosmicray-induced particle tracks in a meteorite, Nature 204 (1964) 821.
122. Fleischer R.L.; Price, P.B; Walker R.M et al., Journal of Geophysical Research (1967), 72(1), 331; 355.
123. Otgonsuren O., Perelygin V.P., Stetsenko S.G. et al., Abundance of $Z > 52$ nuclei in galactic cosmic rays: long-term averages based on studies of pallasites, Astrophys. J., 1976, v. 210, p. 258.

124. Перельгин В.П., Стеценко С.Г., Поиск следов галактических космических ядер с $Z \geq 110$ в оливинах из метеоритов, Письма в ЖЭТФ. 1980. т. 32. с. 622.
125. Перельгин В.П., Стеценко С.Г., Флёров Г.Н., Поиск следов тяжёлых и сверхтяжёлых космических ядер в оливинах из метеоритов, Краткие сообщения ОИЯИ, № 7-85, 1985, с. 5.
126. Перельгин В.П., Стеценко С.Г., Результаты калибровки оливинов из метеоритов ядрами ^{238}U на ускорителе Бэвалак, Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. С. 257.
127. Perelygin V.P., Bondar Yu.V., Brandt R. et al., On search and identification of relatively short-lived superheavy nuclei ($Z \geq 110$) by fossil track studies of meteoritic and lunar olivine crystals, Ядерная физика, 2003, т. 66, с. 1612.
128. Гинзбург В.Л., Полухина Н.Г., Старков Н.И. и др., Проблемы и перспективы поиска следов тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов, Доклады Академии наук, 2005, т. 402, № 4, с. 472.
129. Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М., Треки заряженных частиц в твёрдых телах, в 3-х частях, 1981, М., Энергоатомиздат.
130. Lhagvasuren D., Otgonsuren O., Perelygin V.P. et al. Solid State Nuclear Tracks Detector. Oxford: Pergamon Press, 1980. 997 p.
131. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U., The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, NY, Oxford, 1985
132. Lal D., Rajan R.S., Tamhane A.S., Chemical Composition of Nuclei of $Z > 22$ in Cosmic Rays using Meteoritic Minerals as Detectors, Nature, 1969, v. 221, p. 33.
133. Perron C., Bourot-Denise M., Perelygin V.P. et al., Relation of heavy ion tracks in olivine: orientation dependent annealing or etching?, Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1988, v. 15, No 1-4, p. 231.
134. Александров А.Б., Багуля А.В., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Формирование треков высокоэнергетичных ядер в силикатных минералах: некоторые результаты расчета ионизационных потерь ядер тяжелых элементов в оливине.; "ВЕСТНИК ОТДЕЛЕНИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН" электронный научно-информационный журнал № 1(25)2007 ISSN 1819 – 6586 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-8.pdf;
135. Goncharova L.A., Ivliev A.I., Kalinina G.V., Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Roussetski A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., Wladimirov M.S., The first results

of the "OLIMPIA" Project Investigation.; Abstracts of papers to 38th Lunar and Planetary Science Conference, Houston 2007, CD-ROM #1575.

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

137. Александров А.Б., Багуля А.В.; Владимиров М.С., Гончарова Л.А.; Ивлиев А.И.; Калинина Г. В.; Кашкаров Л.Л.; Коновалова Н.С.; Полухина Н.Г.; Русецкий А.С.; Старков Н.И.; Царев В.А., Метод определения заряда ядер космических лучей по параметрам треков в кристаллах оливина из палласита Марьялахти; Электрон. науч.-информ. журнала «Вестник Отделения наук о Земле РАН», т. 1, № 25, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/planet-15.pdf.

138. Perron C., Maury M., Very heavy ion track etching in olivin, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., D Nuclear Track*, 1986, v. 11, No 1/2, p. 73.

139. Perron C., Bourot-Denise M., Heavy ion track etch rate measurements and track structure in a mineral, *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., D Nuclear Track*, 1986, v. 12, No 1-6, p.29.

140. Александров А.Б., Багуля А.В., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Калибровочные измерения динамических и геометрических параметров треков в кристаллах оливина, образованных ускоренными ядрами Хе и U.; "ВЕСТНИК ОТДЕЛЕНИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН" электронный научно-информационный журнал № 1(25)2007 ISSN 1819 – 6586 URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/planet-9.pdf;

141. 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. Царёв, Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжёлых элементов в кристаллах оливина из метеоритов; Приборы и техника эксперимента, М. Наука, т. 2, с. 1-5, 2009.

142. Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Starkov N.I., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Alexandrov A.B., Goncharova L.A., Apacheva I.Yu., Geometrical Track Parameters in the Pallasite Olivine: Identification of the Cosmic Ray Heavy Nuclei; 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids; Program&Abstracts; p.226; Beijing, China, September 11-15, 2006.

143. Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Starkov N.I., Kalinina G.V., Ivliev A.I., Aleksandrov A.B., Goncharova L.A., Tarasova I.Yu., Geometrical track parameters in

the pallasite olivine: identification of the cosmic ray heavy nuclei.; Radiation Measurements, v. 43, pp. S266-S268
2008.

144. Goncharova L.A., Ivliev A.I., Kalinina G.V., Kashkarov L.L., Polukhina N.G., Rusetskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., Wladimirov M.S., CHARGE SPECTRUM OF THE COSMIC RAY HEAVY NUCLEI DETERMINATION; XXXVI Lunar and Planetary Science Conference, March 12-16, 2007, League City, Texas.

145. 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. Царёв, Изучение зарядового распределения галактических космических лучей и поиск следов сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливина из метеоритов; Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, стр. 34-47, 2008.

146. Bagulya A.V., Goncharova L.A.; Ivliev A.I.; Kalinina G.V.; Konovalova N.S.; Okat'eva N.M.; Polukhina N.G.; Rusetskii A.S.; Starkov N.I.; Tsarev V.A., Charge composition of the VVH nuclei cosmic rays at the 1-2 GeV/nucl of energy: the results of track investigations of the olivine from the pallasite Marjalahti, Radiation Measurements, v. 44, pp. 898-900, 2009.

147. Balebanov V.M. et al. An Antimatter Spectrometer in Space (General Description), 1995; Balebanov, V.M. et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 1994, v. 350, p.351

148. Seguinot J. and Ypsilantis T. Nucl. Instr. Meth., 1977, v. 142, p.377.

149. Carlson P. et al. Nucl. Instr. Meth., Phys. Res., 1994, v. A349, p. 577.

150. Hempstead et al. Nucl. Instr. Meth., Phys. Res., 1991, v. A306, p. 207.

151. Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. -М.: Наука, 1976.

152. Воронкова Е.М. и др. Оптические материалы для инфракрасного света. -М.: Наука, 1965.

153. Ландсберг Г. С. Оптика. -М.: Наука, 1976.

154. Старков Н.И., Анализ изображений RICH-детектора с помощью нейронной сети; Препринт ФИАН, № 25, 2003, с. 1-13.

155. Leon O. Chua, Tamas Roska, Cellular neural networks and visual computing. Foundation and applications, Cambridge University Press, 2004.

156. С.В. Клименко, Е.А. Слободюк, В.Д. Самойленко, Т.Л. Ухова, Искусственные нейронные сети в физике высоких энергий, Препринт ИФВЭ 96-75, Протвино, 1996.
157. M.F.A. Graham, L.M. Jones, S. Herbin, "Neural network classification of quark and gluon jets", Phys. Rev., 1995, v. 51, p. 4789.
158. R. Bellotti et al., "A neural network for positron identification by transition radiation detector", Nucl. Instr. and Meth., 1994, v. A350, p. 556.
159. P. Pavlopoulos et al., "Identification of $\bar{p}p \rightarrow K^+\pi^+K^0(\bar{K}^0)$ events using artificial neural network", Nucl. Instr. and Meth., 1995, v. A359, p. 566.
160. J. Koga, T. Takeda, "Neural network reconstruction of longitudinal beam phase space from the synchrotron radiation spectrum", Nucl. Instr. and Meth., 1995, v. A363, p. 580.
161. R. Callan, "The Essence of Neural Network", Prentice Hall Europe, 1999.
Laurene Fausett, "Fundamentals of Neural Networks", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1994.
J. Hertz, A. Krogh, R.G. Palmer, "Introduction to the Theory of Neural Computation", Addison-Wesley, Redwood City, Ca., 1991.
P.C. Rognvaldsson, "An Introduction to Artificial Neural Networks", CERN School of Computing, 1991.
162. Химмельблау Д., Прикладное нелинейное программирование, М., Мир, 1975.
- Nelder J.A., Mead R., Computer J., 1964, v. 7, p. 308.