

Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

на правах рукописи
УДК 539.1.05, 539.1.07

АЛЕКСАНДРОВ Андрей Борисович

**МЕТОДИКА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА
ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

Специальность: 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2009 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

МЕРЗОН Габриэль Израилевич

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук, профессор

МАЛАХОВ Александр Иванович,

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

кандидат физико-математических наук

ОСЕДЛО Владислав Ильич,

Научно исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

Ведущая организация

Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится « 22 » июня 2009 года в ____ часов на заседании диссертационного совета № Д 002. 023. 02 при Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Я.Н. Истомин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Трековые детекторы широко используются в экспериментах по физике частиц на протяжении уже многих десятилетий. Столь продолжительная долговечность метода, безусловно связана с уникальным пространственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Простота трековых детекторов также обеспечивает им существенное преимущество перед многими другими способами детектирования. Метод трековых детекторов непрерывно развивается и совершенствуется. В настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где бы он не использовался. Это физика высоких энергий, 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, в частности, ядерной фотоэмульсии. Просмотр больших площадей эмульсии, как правило, со значительным увеличением представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Обработка треков в ядерной фотоэмульсии, проводимая оператором на оптических микроскопах вручную, требует огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывается невысокой, что определяет низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому получаемые результаты плохо поддаются проверке на возможные сбои, возникающие в процессе обработки материала (например, потери следов частиц и другие ошибки).

В последние годы этот недостаток в значительной мере был преодолен благодаря прогрессу в создании прецизионной измерительной техники и оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных CCD- и CMOS-видеокамер для регистрации и оцифровки оптических изображений, а также вычислительным возможностям современных компьютеров. Благодаря применению этих достижений прецизионной механики, возможностям средств вычислительной техники и разработке необходимого программного математического обеспечения стала реальностью полная автоматизация труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме

оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в трековых детекторах, полученные при помощи видеокамер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков, восстанавливать их пространственное положение. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с тем, что даёт использование так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличить статистику событий, что прежде было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов имеет большое значение, поскольку оно обеспечивает более высокий уровень проведения экспериментов, в которых применяется трековая техника регистрации частиц, и существенно расширяет круг задач, где эта техника может быть эффективно использована.

Ядерная фотоэмульсия имеет уникальное пространственное разрешение и возможность разделения треков частиц. Ни один из применяемых сейчас детекторов элементарных частиц не может обеспечить лучшее пространственное разрешение. При размере зерна 0.3 – 1 мкм, отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0.8 мкм, а при определенных условиях может быть уменьшено до 0.2 мкм. Использование двусторонней эмульсии позволяет определять направление движения частиц с погрешностью менее 1 мрад. Поэтому в физике высоких энергий в настоящее время активно применяется и развивается метод ядерных фотоэмульсий. Например, в одном из наиболее крупномасштабных экспериментов, OPERA, используется около 100 т ядерной фотоэмульсии.

Дополнительную актуальность диссертации придаёт важность исследования ядро-ядерных столкновений при высоких энергиях. Ожидается, что в таких взаимодействиях может проявиться новый физический эффект – испускание черенковских глюонов. Предсказывается, что механизм их испускания связан с коллективными эффектами в разлёте вторичных частиц, в частности, с образованием кольцевых структур. Таким образом, экспериментальные данные о распределениях частиц могут быть использованы для обнаружения черенковских глюонов. Можно также надеяться получить сведения об адронном показателе преломления ядерной материи и её уравнении состояния.

Цель диссертационной работы.

Данная диссертационная работа нацелена на создание новых методов автоматизации измерений на высокотехнологичном Полностью Автоматизированном Измерительном КОМПлексе (ПАВИКОМ) и развитие методов обработки данных различных трековых детекторов. Результатом выполнения диссертационной работы стало создание методики ядерно-физических исследований на основе автоматизированной обработки данных, зарегистрированных трековыми детекторами.

Комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий (ЯФЭ), облученных пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (CERN) в рамках эксперимента EMU-15. Основной целью этого эксперимента, предложенного и осуществленного физиками ФИАН, является поиск возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах и сверхплотных состояниях материи. Для обработки данных этого эксперимента, в первую очередь, потребовалось создать методику полностью автоматизированной обработки данных фотоэмульсионных камер.

Уникальным достоинством комплекса ПАВИКОМ является универсальность: на его автоматизированных установках обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов. Эта универсальность, во многом, базируется на созданном в ходе выполнения диссертационной работы программном обеспечении. Например, на комплексе производится обработка данных эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, целью которого является изучение процессов фрагментации и кластеризации лёгких ядер с энергией выше $1A$ ГэВ (A – массовое число) с использованием толстослойных ядерных фотоэмульсий. Программный пакет, изначально созданный для обработки данных эксперимента EMU-15, послужил базой для развития методики сканирования и создания программного пакета для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ.

В 2005 г. на ПАВИКОМ начата реализация проекта ОЛИМПИЯ («Оливины из метеоритов: поиск тяжелых и сверхтяжелых ядер») задачей которого являются исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах и поиск среди них трансфермиевых ядер с зарядами $Z \geq 110$. Особенностью методики обработки трековых детекторов данного эксперимента (оливинов из метеоритов) является необходимость в шлифовке, т.е. необратимом разрушении части кристалла. В рамках проекта ОЛИМПИЯ потребовалось создать методику

сканирования всей площади кристалла, а также базу данных изображений для сохранения информации о треках в кристалле.

Свидетельством международного признания высокого потенциала группы ПАВИКОМ служит включение ПАВИКОМ в число европейских автоматизированных центров по обработке эмульсии эксперимента OPERA. Для адаптации комплекса ПАВИКОМ к задачам этого эксперимента потребовалось создать интерфейсную программу для использования стандартной для OPERA библиотеки FEDRA обработки изображений и поиска микротреков в эмульсии, а также разработать методику сканирования двухсторонних ядерных фотоэмульсий OPERA на ПАВИКОМ.

Научная новизна и практическая ценность работы

Автоматизация измерительного процесса является основной задачей комплексов автоматизированных микроскопов. Единственный комплекс подобного уровня в России, удовлетворяющий современным мировым стандартам, – это ПАВИКОМ. Он предназначен для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в различных физических исследованиях. В настоящее время к программному обеспечению для автоматизации измерений на таких комплексах предъявляются весьма жесткие требования. Это связано, в первую очередь, с необходимостью производить измерения с максимально возможной скоростью. Согласованное взаимодействие компонентов сканирующей системы предоставляет новые возможности, недоступные для полуавтоматических систем: безостановочное сканирование и обработка изображений в режиме реального времени. Безостановочное сканирование даёт существенный выигрыш в производительности системы, так как исчезает необходимость в многократных циклах ускорения-замедления движения объектива, что, в свою очередь, положительно сказывается на точности измерений и уменьшает износ оборудования сканирующей системы. Обработка изображений в режиме реального времени, т.е. непосредственно во время сканирования, позволяет получить результаты обработки сразу же по завершению сканирования, сокращая тем самым общее время анализа данных. К тому же возможность обработки в режиме реального времени является необходимым условием для построения сложных сканирующих систем реального времени, способных изменять свои параметры на основании только что обработанных данных (системы с обратной связью).

Разработанные автором методы обработки изображений и поиска

микротреков позволили впервые в России произвести поиск треков вторичных заряженных частиц в центральных ядро-ядерных взаимодействиях с множественностью > 1500 в ядерной фотоэмульсии в режиме реального времени. Созданные в диссертационной работе методы являются необходимым этапом полной автоматизации современных фотоэмульсионных экспериментов в ядерной физике и востребованы рабочими группами как внутри России, так и за рубежом.

Разработанное программное обеспечение позволило задействовать комплекс ПАВИКОМ в обработке данных целого ряда экспериментов (ЕМУ-15, БЕККЕРЕЛЬ, ОЛИМПИЯ и OPERA).

Основные положения, выносимые автором на защиту:

1. Разработанное программное обеспечение (ПО), которое дало возможность автоматизировать труд микроскописта на микроскопе ПАВИКОМ-2. ПО позволяет производить безостановочное сканирование по заданной траектории и производить обработку изображений в режиме реального времени. ПО является универсальным, т.е. не зависит от конкретного типа детектора и схемы эксперимента. ПО обеспечило возможность проектирования и успешной реализации современной многопроцессорной структуры комплекса ПАВИКОМ. Модульное строение ПО делает его весьма гибким и позволяет легко адаптировать к нуждам различных экспериментов.

2. Созданная методика обработки данных эксперимента ЕМУ-15 позволила с высокой (~90%) эффективностью находить микротреки в ядерной фотоэмульсии. При этом разработаны оригинальные алгоритмы обработки изображений: фильтрация, бинаризация и кластеризация (поиск изображений зёрен металлического серебра в ядерной фотоэмульсии). Разработаны высокоэффективные алгоритмы поиска микротреков в ядерной фотоэмульсии, как с использованием, так и без использования информации о вершине события. Реализация методики в виде программного модуля и его применение совместно с ПО автоматизированного микроскопа ПАВИКОМ-2 позволило распознавать и восстанавливать треки вторичных заряженных частиц, рождённых во взаимодействиях ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон, с множественностью более 1500 частиц за время менее 1 мин.

3. На основе разработанной методики автоматизированного сканирования
- создана программа автоматизации измерения заряда ядер для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ;
 - создан метод безостановочного сканирования для получения базы данных изображений треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА;
 - выполнена принципиальная адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента OPERA.

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлялись и докладывались на международных и национальных конференциях: *Vienna Conference on Instrumentation* (VCI 2004), *Channeling* (Italy, Frascati, 2004), *International Conference on Nuclear Tracks in Solids* (China, Beijing, 2006, 2008), *Международная конференция «Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле»* (Москва, 2007, 2008), *САММАС* (2008, Украина, Винница), *Nufact08* (Spain, Valencia, 2008)

Публикации

По материалам представленным в диссертации опубликовано 24 печатные работы в журналах *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research* [1], *Письма в ЭЧАЯ* [4], *Вестник Отделения наук о Земле РАН* [6, 14, 15, 20, 21], *Известия РАН* [9], *Приборы и Техника Эксперимента* [12, 19], *Краткие сообщения по физике ФИАН* [17, 18]; в виде препринтов ФИАН [3, 4, 13], а также в материалах конференций [2, 7, 8, 10, 11, 16, 23, 24].

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 97 страниц без приложения, включая 30 рисунков, 7 таблиц и перечень литературы из 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** к диссертации обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражены новизна и практическая значимость её результатов.

В **первой главе** представлен краткий обзор трековых детекторов. Рассматриваются принципы регистрации заряженных частиц в трековых детекторах различного типа, их основные характеристики (Таблица 1), преимущества и недостатки.

Трековые детекторы, и в их числе ядерные фотоэмульсии, сыграли выдающуюся роль в развитии ядерной физики в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Благодаря этим детекторам были открыты ядерные распады и реакции, новые частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы). Метод трековых детекторов непрерывно развивается и совершенствуется. В настоящее время трудно найти такую область науки и техники, где он бы не использовался. Это физика высоких энергий, физика космических лучей, реакторная физика, металлургия, геология, археология, медицина, биология, исследования метеоритов и образцов лунных пород.

Таблица 1. Характеристики различных трековых детекторов.

Название	Пространственное разрешение, мкм	Временное разрешение	Время восстановления
Ядерная фотоэмульсия	1	—	—
Камера Вильсона	1000	10 мс	10 с
Пузырьковая камера	10 – 150	10 мкс	50 мс
Искровая камера	100	1 мкс	1 мс
Пропорциональная камера	50 – 300	2 нс	200 нс
Стримерная камера	300	2 мкс	100 мс
Дрейфовая камера	50 – 300	2 нс	100 нс
Полупроводниковый детектор	2	10 нс	10 нс
Сцинтилляционные (черенковские) волоконно-оптические детекторы	20 – 30	1 – 10 нс	1 – 10 нс

Вторая глава посвящена фотоэмульсионному методу ядерных исследований, а также существующим методам автоматизированного

сканирования. Здесь излагается краткая история фотоэмульсионного метода, подчёркивается его значимость и описывается его применение для измерения таких характеристик частиц как энергия, импульс, заряд и масса. Завершает главу описание комплекса ПАВИКОМ.

Возможность проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора, надёжность, энергонезависимость, скромные размеры и вес ядерной фотоэмульсии позволяют использовать её как в экспериментах по физике космических лучей на спутниках и стратосферных аэростатах, так и в ускорительных экспериментах. Кроме того, благодаря своей простоте, дешевизне, и наглядности эмульсионные детекторы имеют большие преимущества перед другими системами детектирования, особенно при изучении реакций, для которых характерны сложные топологии распадов, а также при прямом детектировании частиц с малыми временами жизни (до 10^{-16} с).

Ядерные фотоэмульсии широко используются в целом ряде экспериментов проводимых физиками Европы, Америки, Азии. Самые крупные из них содержат тонны ядерной фотоэмульсии, что соответствует тысячам квадратных метров её поверхности (Таблица 2).

Таблица 2. Эксперименты, использующие большие объёмы ЯФЭ.

Эксперимент	Год	Цель	Масса ЯФЭ	Поверхность ЯФЭ	Сканирующие системы
CHORUS	1994 - 1997	Поиск $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ осцилляций	770 кг	500 м ²	TS, NTS, UTS, S-UTS
DONUT	1997	Прямое наблюдение ν_τ	200 кг	200 м ²	UTS, S-UTS
OPERA	2006	Поиск $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ осцилляций	100 т	170·103 м ²	S-UTS, ESS

При многих своих очевидных преимуществах фотоэмульсионный метод имеет и серьёзный недостаток. Его применение требует тяжёлого изнурительного труда, связанного с поиском нужных треков и измерением их параметров.

Первая полностью автоматизированная сканирующая система была создана в Японии в 1982 г. Она состояла из микроскопа, столик и объектив которого приводились в движение специальными электродвигателями, управляемыми

компьютером; была оснащена быстрой CCD-камерой и применяла специальное оборудование Track Selector (TS) для обработки изображений. В TS использовался достаточно простой алгоритм поиска следов заряженных частиц в эмульсии, основанный на быстрой обработке серий изображений. Первым полномасштабным применением системы TS стала обработка данных эксперимента CHORUS. Последующая модернизация применительно к экспериментам DONUT и OPERA позволила существенно увеличить скорость обработки ЯФЭ.

В отличие от TS, в европейских автоматизированных системах для обработки данных трековых детекторов основная часть обработки изображения выполняется специализированным программным обеспечением, что делает эти системы более гибкими для адаптации к условиям различных задач. «Европейская Сканирующая Система» (ESS), разработанная в рамках эксперимента OPERA, использует коммерчески доступное оборудование. Программное обеспечение написано на языке C++ и оптимизировано для работы в многопроцессорных вычислительных системах.

Несмотря на различие подходов, обе указанные системы обеспечивают примерно одинаковую скорость измерения параметров треков заряженных частиц в эмульсии ($\sim 20 \text{ см}^2/\text{час}$) и почти одинаковую эффективность: 95% для ESS и 97% для S-UTS.

Измерительный комплекс ПАВИКОМ был создан в 2000 г. группой сотрудников Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (ФИАН), в первую очередь, для обработки ЯФЭ эксперимента EMU-15. Однако, при создании программного обеспечения и сборке комплекса ставилась задача его многофункционального использования, которая была успешно решена. Поэтому особенностью комплекса ПАВИКОМ, его главным отличием от всех других подобных систем и основным достоинством является универсальность: на автоматизированных установках комплекса успешно обрабатываются и ядерные эмульсии, и пластиковые детекторы, и кристаллы оливинов из метеоритов.

Комплекс ПАВИКОМ состоит из двух независимых автоматизированных установок ПАВИКОМ-1 и ПАВИКОМ-2 (Таблица 3). ПАВИКОМ-1 включает в себя микроскоп MICOS и CCD-видеокамеру, подключённые к персональному компьютеру. Оптическая система микроскопа была создана в ФИАНе с использованием элементной базы ЛОМО. Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 создан на базе микроскопа МПЭ-11, производства ЛОМО и содержит следующие основные узлы: прецизионный стол Carl Zeiss, быструю

CMOS-видеокамеру Mikrotron MC-1310 и персональный компьютер, оборудованный платой обработки изображений Matrox Odyssey XPro.

Таблица 3. Характеристики микроскопов комплекса ПАВИКОМ.

	ПАВИКОМ-1	ПАВИКОМ-2
Диапазон перемещения стола и объектива микроскопа, мм	800 × 400 × 200	120 × 100 × 10
Точность измерения координат, мкм	0.5	0.25
Максимальный размер изображения	1360 × 1024	1280 × 1024
Максимальная глубина цвета, бит	10	10
Максимальное количество кадров в секунду	30	500

Автором настоящей диссертации были решены задачи разработки программного обеспечения для автоматизации измерений на микроскопе ПАВИКОМ-2 и создания универсальной библиотеки программ для автоматизированной обработки данных трековых детекторов.

В третьей главе подробно рассматривается методика автоматизации измерений на комплексе ПАВИКОМ и формулируются требования к программному обеспечению. Описываются его реализация и алгоритмы взаимодействия модулей программы при сканировании. Описание завершается расчетами скорости сканирования и точности измерения Z-координаты изображения при безостановочном сканировании на микроскопе ПАВИКОМ-2, а также демонстрацией результатов, достигнутых с помощью разработанного программного обеспечения.

При создании комплекса ПАВИКОМ был использован опыт европейских физиков, поэтому ПАВИКОМ-2 имеет стандартный для автоматизированных микроскопов набор компонентов, которые являются коммерчески доступными продуктами и не создавались специально для применения в автоматизированных комплексах. Задача программного обеспечения автоматизации – заставить все изначально независимые компоненты микроскопа работать согласованно, как единое целое. К программному обеспечению комплекса ПАВИКОМ предъявляются следующие требования:

- Возможность безостановочного сканирования.
- Способность обработки изображений в режиме реального времени.
- Независимость от типа сканируемого детектора.
- Независимость от характера обрабатываемых данных.
- Возможность быстрой адаптации к новому оборудованию.

- Максимальная гибкость настройки.
- Эффективная работа в многопроцессорных системах.
- Возможность участия в распределённых вычислениях.

Программа автоматизации измерений реализована в виде пяти независимых программных модулей. Интерфейсный модуль представляет собой пользовательский интерфейс. Модули управления видеокамерой и микроскопом предназначены для работы с аппаратурой. Обрабатывающий модуль обрабатывает полученные данные. Наконец, управляющий модуль обеспечивает их совместную работу (рис. 1).

Модули управления видеокамерой и микроскопом при своей инициализации загружают специализированные динамические библиотеки – адаптеры. В адаптерах сосредоточена вся аппаратно-зависимая часть программы, чем достигается необходимая гибкость её настройки и что придает ей способность производить сканирование на микроскопах различных типов. Обрабатывающий модуль состоит из двух частей: независимой части, отвечающей за взаимодействие с другими модулями, и обработчика, зависящего от конкретного эксперимента, данные которого подлежат обработке.

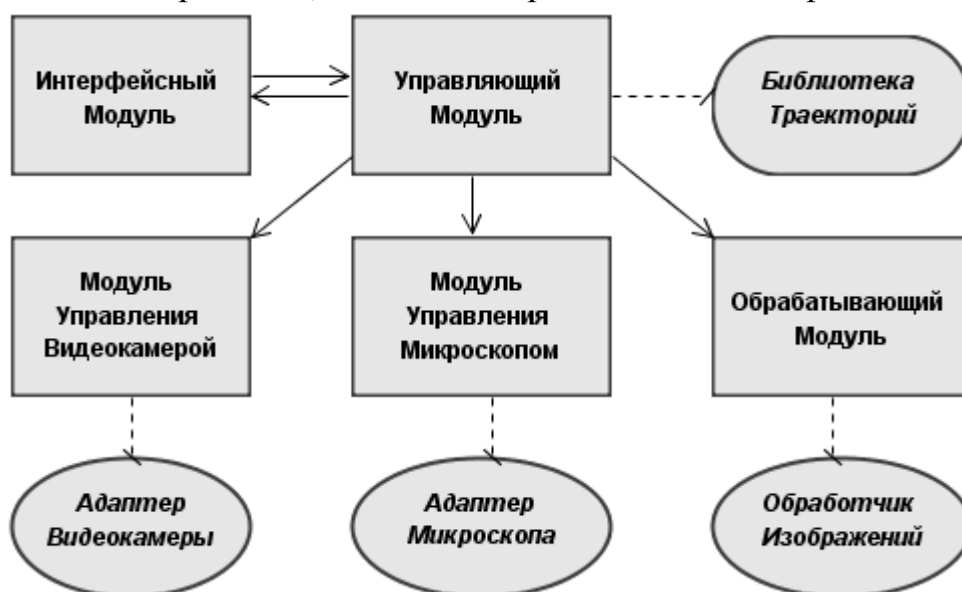


Рис. 1. Архитектура программы PAVICOM. Стрелками обозначены межмодульные связи по типу клиент-сервер, стрелки направлены от клиента к серверу. Пунктиром обозначены связи через интерфейс динамически загружаемых библиотек.

При сканировании с остановками регистрация изображений и передвижение объектива микроскопа происходят поочередно, поэтому производить расчеты координат изображений при движении объектива не

требуется. В случае безостановочного сканирования во время движения микроскопа происходит подхват сразу целой серии изображений, координаты которых рассчитываются. Поскольку часть пути микроскоп движется с ускорением, то рассчитываются расстояния отступов от краёв области сканирования, так чтобы она совпадала с областью равномерного движения, обеспечивая тем самым равномерность шага сканирования. Из полученной серии изображений для обработки отбираются лишь те, координаты которых находятся внутри области сканирования.

Точность σ_z определения z-координаты изображения при сканировании с остановками равна точности микроскопа (~ 0.25 мкм). При безостановочном сканировании её можно представить формулой:

$$\sigma_z = \sqrt{3\sigma_\mu^2 + v^2(3\sigma_t^2 + \sigma_i^2)} \sim 0.5 \text{ мкм},$$

где v – скорость передвижения объектива микроскопа, σ_μ – ошибка измерения z-координаты микроскопом, σ_t – ошибка определения момента измерения координаты и σ_i – ошибка определения момента регистрации изображения.

Поскольку оборудование микроскопа ПАВИКОМ-2 включает немецкую механику, российскую оптику, швейцарскую видеотехнику и всё это собрано на базе российского микроскопа, потребовалось изготовить дополнительные механические узлы и всесторонне проверить характеристики их совместной работы. Поэтому, для исследования и оптимизации различных характеристик микроскопа ПАВИКОМ-2 был произведён ряд методических измерений.

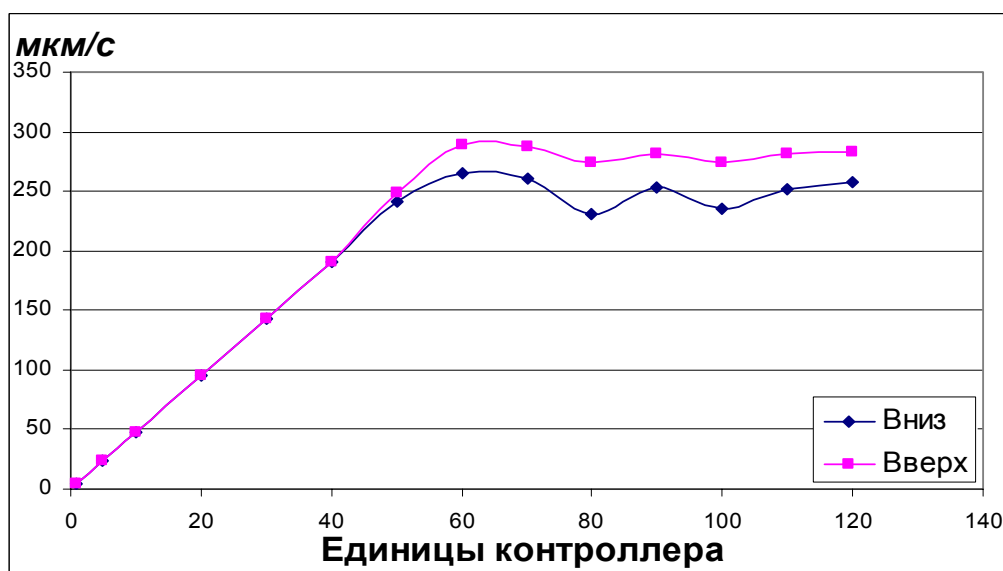


Рис. 2. График скорости движения объектива микроскопа в зависимости от настройки контроллера.

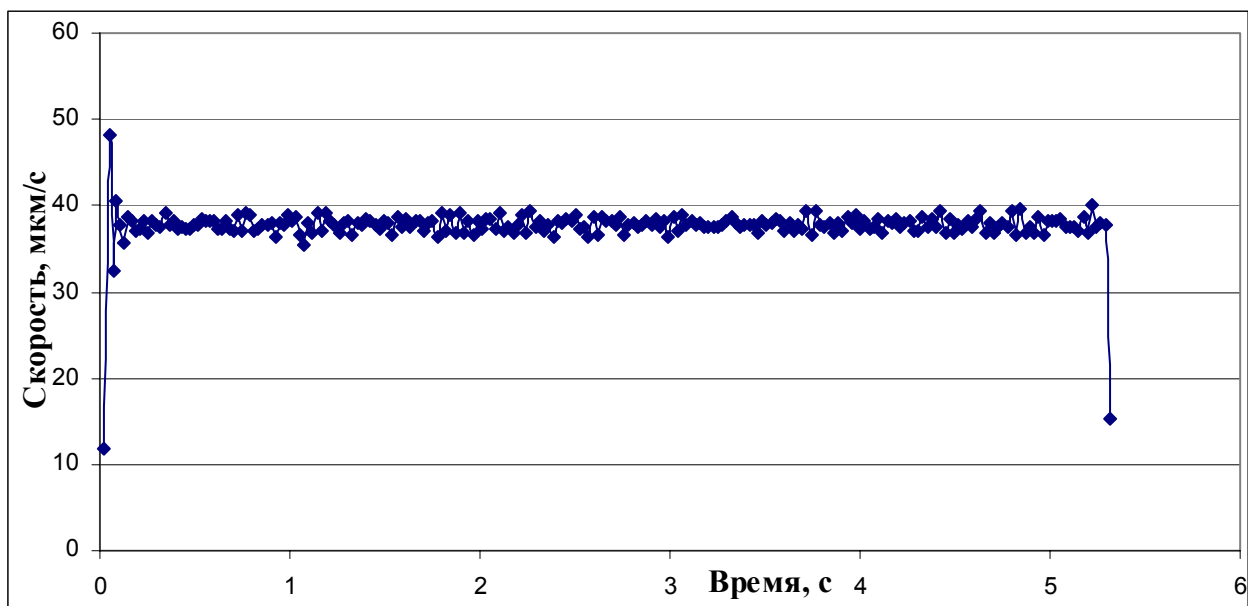


Рис. 3. График зависимости скорости движения объектива микроскопа от времени.

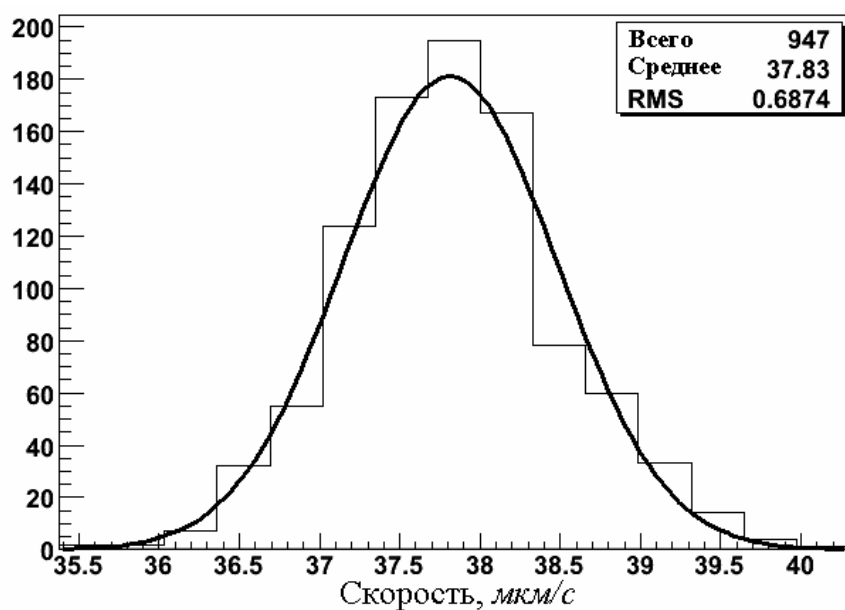


Рис. 4. Распределение значений локальной скорости при равномерном движении объектива.

Они показали (рис. 2) нарушение пропорциональности между скоростью, заданной в единицах контроллера микроскопа, и реальной скоростью смещения объектива при движении со скоростью более 200 мкм/с. Дальнейшее исследование продемонстрировало повышенную вероятность накопления люфтов и других ошибок измерения Z-координаты при передвижении со скоростью выше 40 мкм/с. Исследование равномерности движения на скоростях до 40 мкм/с (рис. 3 и 4) показало, что объектив движется достаточно равномерно

за исключением короткого начального участка. Таким образом, скорость сканирования на микроскопе ПАВИКОМ-2 можно представить формулой:

$$v = \frac{152640}{\alpha^2(\delta + 16)}, \text{ см}^2/\text{ч},$$

где α – увеличение объектива, а δ – толщина детектора в *мкм*.

На основе выполненных методических измерений был выбран оптимальный режим работы сканирующей аппаратуры с сохранением требуемой точности перемещения. Тем самым было успешно выполнено сопряжение отдельных компонентов микроскопа, произведённых в разных странах.

В **четвёртой главе** диссертации описывается методика автоматизированной обработки ядро-ядерных взаимодействий с энергией 158 ГэВ/нуклон при поперечном облучении тонкослойных ядерных эмульсий эксперимента EMU-15. Приведены подробные описания алгоритмов фильтрации, кластеризации, поиска микротреков, поиска вершины взаимодействия и направления движения первоначального ядра (оси события). Приведены примеры применения комплекса ПАВИКОМ и разработанного программного обеспечения для обработки данных экспериментов БЕККЕРЕЛЬ, ОЛИМПИА и OPERA.

Для изучения коллективных эффектов и особенностей разлета вторичных частиц в столкновениях ядер атомов свинца, ускоренных до энергий 158 ГэВ/нуклон, с атомами свинца мишени сотрудниками ФИАН был подготовлен и успешно осуществлен в CERN эксперимент EMU-15.

Для этого эксперимента были изготовлены 16 эмульсионных камер, имевших форму цилиндра длиной 260 мм и диаметром 95 мм. Каждая камера содержала тонкую (400 мкм) свинцовую мишень и 38 слоев ядерной фотоэмульсии (каждый толщиной 50 мкм), политых на майларовую подложку толщиной 25 мкм. Камера помещалась в поперечное магнитное поле напряженностью 2 Т и располагалась таким образом, чтобы плоскости мишени и ядерных фотоэмульсий были перпендикулярны пучку. Суммарное число ядер Рb при облучении каждой из 16 фотоэмульсионных камер составлял около 10^4 частиц. В каждой камере было найдено около 10 центральных взаимодействий с множественностью вторичных частиц более 10^3 . Критерием отбора таких событий служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с зарядом больше 2.

В эксперименте EMU-15 использовалась ядерная фотоэмульсия P2T-50.

При прохождении заряженной частицы в эмульсии образуется трек, который после проявки виден как цепочка зёрен металлического серебра и их скоплений (блобов), плотностью 35 ± 5 блобов на 100 мкм трека. Размер одного блоба составляет примерно 0,7 мкм. Количество фоновых блобов (вуаль): $5,6 \pm 1,3$ на 100 мкм. Коэффициент усадки эмульсии равен $2,5 \pm 0,3$.

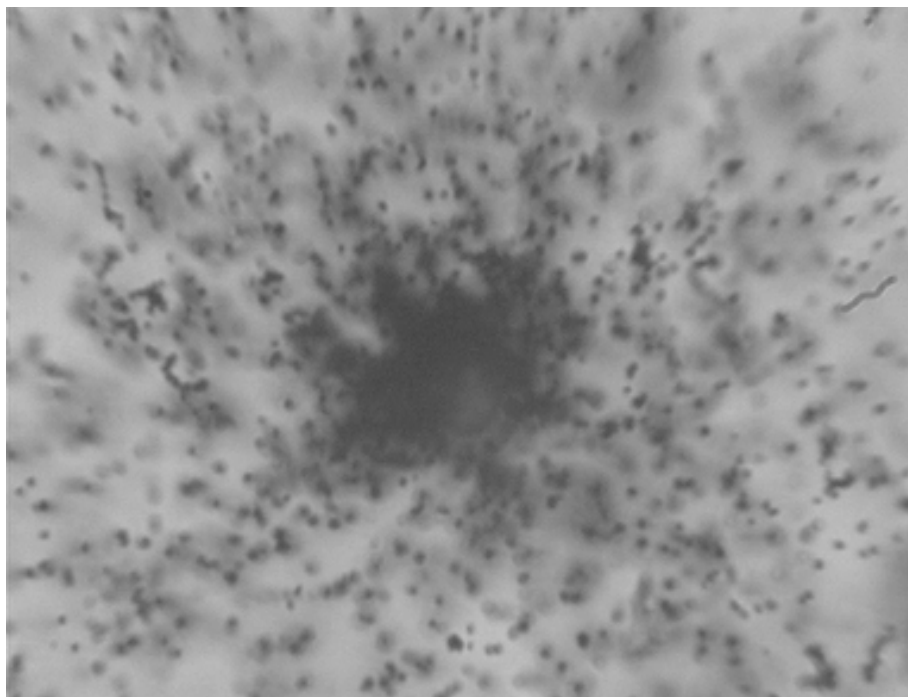


Рис. 5. Центральное поле зрения. Увеличение 60^{\times} . Размер кадра $\sim 82 \times 62$ мкм². В центре следы ещё не успели разойтись и сконцентрированы очень плотно, что делает центральную область более тёмной.

Для анализа данных эксперимента был разработан специализированный программный пакет, позволяющий производить обработку изображений треков в эмульсии и реконструкцию геометрии разлёта вторичных частиц.

Задача обработки разбивается на несколько этапов: обработка изображений, поиск микротреков и продление микротреков в следующий слой эмульсии. При обработке изображений производится их предварительная обработка с помощью специально подобранного фильтра с целью усилить на изображениях пятна, соответствующие блобам и ослабить как ненужные детали изображения, так и неравномерности фона. После фильтрации производится бинаризация и кластеризация изображения, целью которых является выделение изображений блобов и расчет их характеристик (центр масс, размер и т.п.), тем самым сопоставив блобы математическим объектам – кластерам.

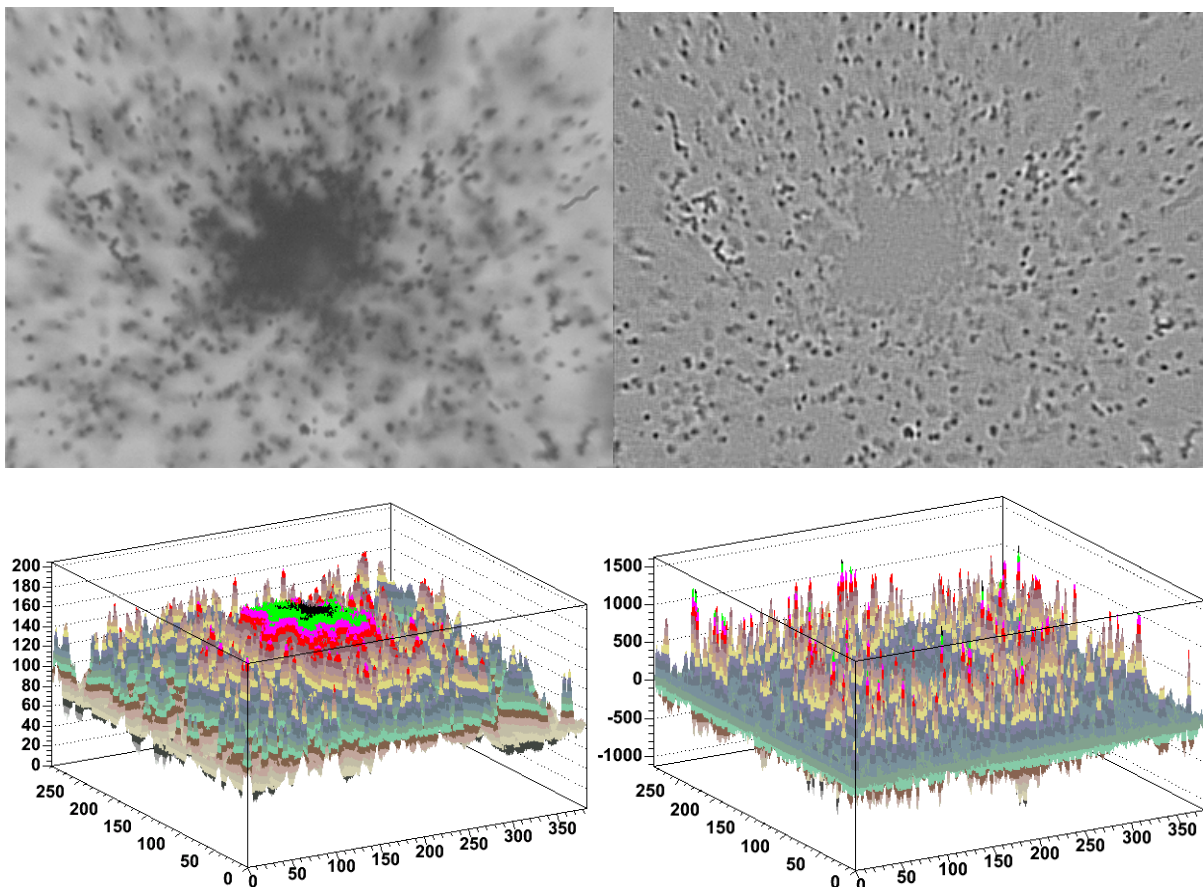


Рис. 6. Слева сверху: исходное изображение. Слева внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Справа сверху: изображение, обработанное высокочастотным фильтром. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр усиливает только пятна определённых размеров и формы.

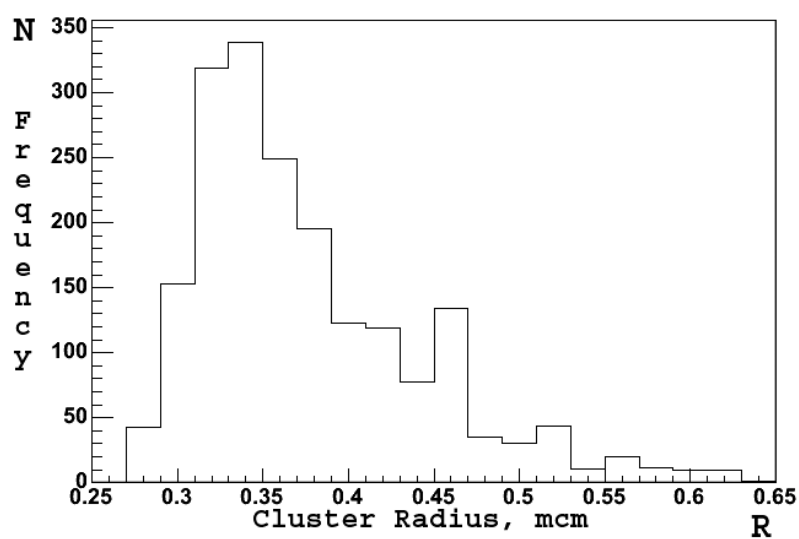


Рис. 7. Распределение $N(R)$ значений (в мкм) средних радиусов кластеров.

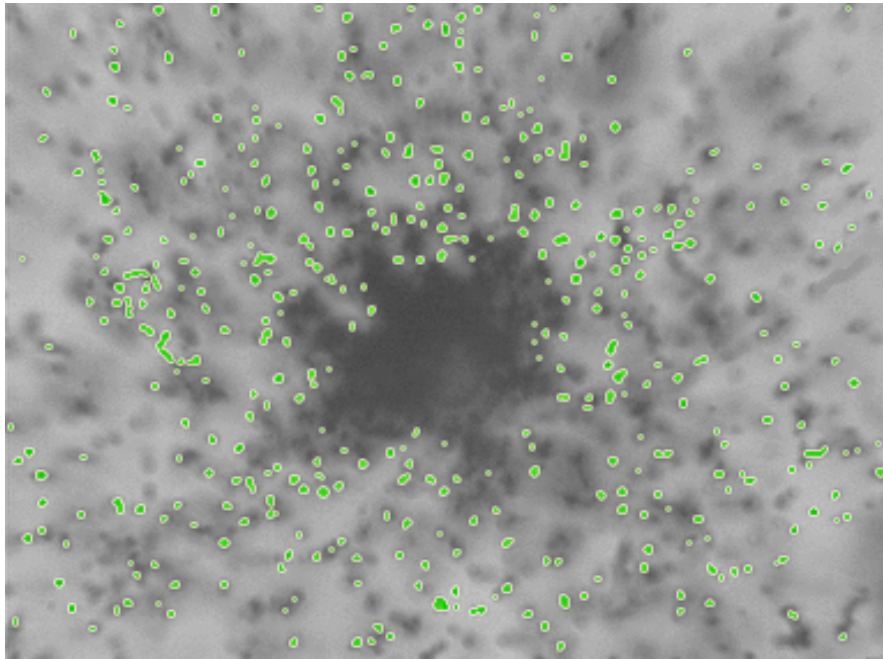


Рис. 8. Результат кластеризации центрального поля зрения. Найденные кластеры выделены.

Проверка результатов процедуры кластеризации показала, что её эффективность, в среднем, равна 94% для центрального поля зрения и 98% для нецентрального. Различие связано с меньшей эффективностью регистрации кластеров вблизи центрального пятна.

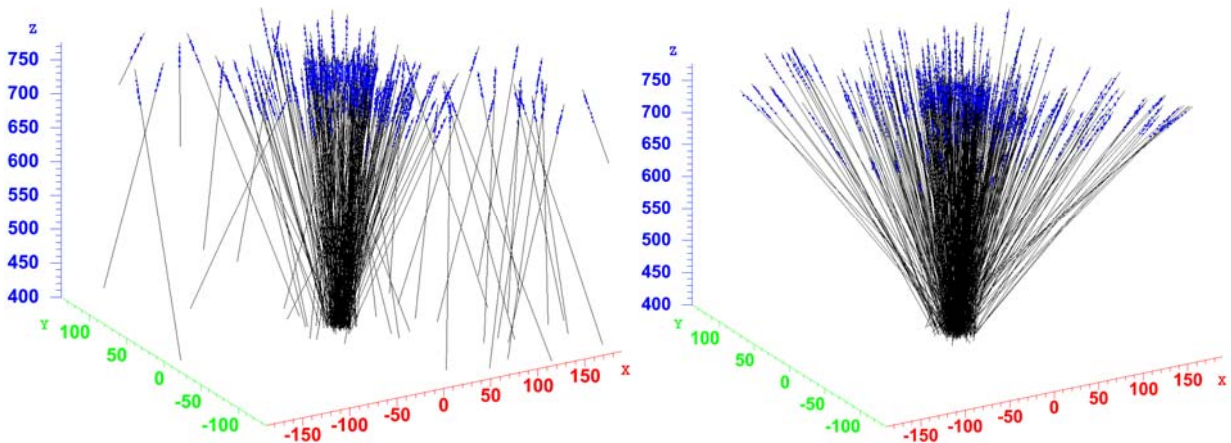


Рис. 9. Результаты свободного трекинга (слева) и вершинного трекинга (справа). Видно что большинство частиц вылетают из общего центра с $z \sim 400$ мкм.

Поиск микротреков производится в три этапа. Сначала происходит грубый поиск микротреков с помощью алгоритма свободного трекинга. Затем производится поиск вершины взаимодействия. И, наконец, осуществляется более тщательный поиск микротреков с использованием информации о вершине взаимодействия (вершинный трекинг).

Сравнение результатов трекинга с ручной обработкой показало (Таблица 4), что его эффективность равна 90%. При этом проверка трекинга на искусственных событиях выявила зависимость его эффективности от плотности микротреков (Таблица 5).

Таблица 4. Проверка эффективности трекинга.

Всего найдено вручную	688
Всего найдено программой	730
Совпало с ручной обработкой	622 (90%)
Не найдено вручную, но найдено программой	56
Найдено ложных	52

Таблица 5. Проверка эффективности трекинга на искусственных событиях.

Количество треков на 1000 мкм ²	10	30	50	100
Эффективность трекинга	99%	98%	95%	92%

Для определения угловых характеристик (псевдобыстрот) вторичных частиц, образовавшихся при ядерном взаимодействии, производится сшивка микротреков из соседних слоев эмульсии и поиск оси события.

В результате работы над настоящей диссертацией был создан банк данных и произведена предварительная обработка 100 событий.

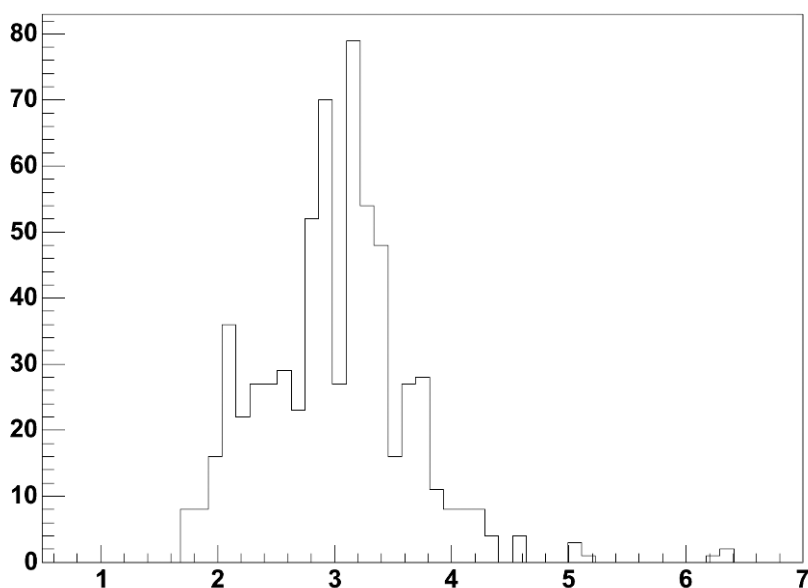


Рис. 10. Распределение псевдобыстрот вторичных заряженных частиц в событии 5c15e после автоматизированной обработки.

В заключении формулируются основные результаты работы:

1. Разработано программное обеспечение (ПО), которое дало возможность автоматизировать труд микроскописта на микроскопе ПАВИКОМ-2. ПО позволяет производить безостановочное сканирование по заданной траектории и производить обработку изображений в режиме реального времени. ПО является универсальным, т.е. не зависит от конкретного типа детектора и схемы эксперимента. ПО обеспечило возможность проектирования и успешной реализации современной многопроцессорной структуры комплекса ПАВИКОМ. Модульное строение ПО делает его весьма гибким и позволяет легко адаптировать к нуждам различных экспериментов.

2. Созданная методика обработки данных эксперимента ЕМУ-15 позволила с высокой (~90%) эффективностью находить микротреки в ядерной фотоэмульсии. При этом разработаны оригинальные алгоритмы обработки изображений: фильтрация, бинаризация и кластеризация (поиск изображений зёрен металлического серебра в ядерной фотоэмульсии). Разработаны высокоэффективные алгоритмы поиска микротреков в ядерной фотоэмульсии, как с использованием, так и без использования информации о вершине события. Реализация методики в виде программного модуля и его применение совместно с ПО автоматизированного микроскопа ПАВИКОМ-2 позволило распознавать и восстанавливать треки вторичных заряженных частиц, рождённых во взаимодействиях ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон и с множественностью более 1500 частиц за время менее 1 мин.

3. На основе разработанной методики автоматизированного сканирования

- создана программа автоматизации измерения заряда ядер для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ;
- создан метод безостановочного сканирования для получения базы данных изображений треков космических лучей в кристаллах оливина из метеоритов проекта ОЛИМПИА;
- выполнена принципиальная адаптация комплекса ПАВИКОМ к задачам эксперимента OPERA.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Aleksandrov A.B., Feinberg E.L., Martynov A.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., ... , Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing, Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A, 535 (2004) 542-545
2. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L., Goncharova L.A., Martynov A.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing, Proc.of "Channeling 2004" - International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (November 2-6, 2004, Frascati), Proc. of SPIE, vol. 5974 (2005), 408-419.
3. Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Мерзон Г.И., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л., Методика автоматизированной обработки данных эмульсионных треконов для исследования Pb-Pb взаимодействий при энергии 158 ГэВ/нуклон, Препринт ФИАН № 23, 2005
4. Александров А.Б., ..., 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.
5. Александров А. Б., Гончарова Л. А., Давыдов Д. А., Фейнберг Е.Л., Полухина Н. Г., Публиченко П.А., Роганова Т.М., Автоматизированные методы обработки трековых детекторов на базе комплекса ПАВИКОМ, Письма в ЭЧАЯ, 2007, т.4, №1 (137), с.170-175.
6. 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
7. Aleksandrov A., Polukhina N., Starkov N., The Pattern Recognition Software for Automatic Treatment of Track Detector Data at the PAVICOM Completely Automated Measuring Facility, 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids; Program&Abstracts; p.84; Beijing, China, September 11-15, 2006.
8. 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.

9. Г.Е.Беловицкий, Е.С.Конобеевский, А.В.Степанов, 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. 2006, Т.70, N5, С. 646-649.
10. Alexandrov A., Kashkarov L., Polukhina N., Starkov N., The Pattern Recognition Software for Automatic Treatment of Track Detector Data at the PAVICOM Completely Automated Measuring Facility, [Radiation Measurements Volume 43, Supplement 1](#), August 2008, Pages S120-S124 Proceedings of the 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids
11. 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 (in press). Proceedings of the 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids, Beijing, China, 11–15 September, 2006 23-rd Int. Conf. on Nucl. Tracks in Solids (Beijing, China, September 11 – 15, 2006). [Radiation Measurements](#) Volume 43, (2008) S266 – S268
12. А.Б.Александров, Л.А.Гончарова, Н.С.Коновалова, Г.И.Орлова, Н.Г.Пересадыко, 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, vol.50, N 4, p.469
13. 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
14. 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
15. 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., О методике “сшивки” участков длиннопробежных треков при последовательном послойном травлении кристаллов оливина миллиметровых размеров из палласитов., "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-10.pdf

16. А.Б.Александров, А.В.Багуля, Л.А.Гончарова, А.И.Ивлиев, Г.В.Калинина, Л.Л.Кашкаров, Н.С.Коновалова, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, В.А.Царев, Разработка методики идентификации заряда ядер космических лучей в кристаллах оливинов из метеоритов на основе автоматизированных измерений структурных микро-нарушений кристаллической решетки., Материалы VIII Международной конференции «Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле», Москва, 9-11 октября 2007 г. С. 173-174
17. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Методика определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов., Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008, т.7, 19-27 ISSN издания 0455-0595
18. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А, Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л, Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Изучение зарядового распределения галактических космических лучей и поиск следов сверхтяжелых ядер в кристаллах оливина из метеоритов , Краткие сообщения по физике ФИАН, 2008, т.9, 34-47 ISSN издания 0455-0595
19. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Калибровочные измерения характеристик треков ядер сверхтяжелых элементов в кристаллах оливина из метеоритов., Приборы и техника эксперимента 2009, т.2, стр. 1-5 ISSN издания 0032-8162
20. 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., Угловое распределение треков ядер VH- и VVH- групп космических лучей в отдельных кристаллах оливина из палласита Марьялахти, Электрон. науч.-информ. журнала «Вестник Отделения наук о Земле РАН» 2008, 1, 25, http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/planet-2.pdf
21. 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» 2008,

- 1, 25, http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2008/informbul-1_2008/planet-15.pdf
22. Александров А.Б., Багуля А.В., Владимиров М.С., Гончарова Л.А., Ивлиев А.И., Калинина Г.В., Кашкаров Л.Л., Коновалова Н.С., Н.М. Окатьева, Полухина Н.Г., Русецкий А.С., Старков Н.И., Царев В.А., Методика определения заряда сверхтяжелых ($Z>50$) ядер космических лучей путем измерения травимой длины и скорости травления треков в оливине из метеоритов., 9-я Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 7-10 октября 2008 г, материалы конференции, 2008, стр. 13-17
23. Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Vladimirov M.S., Goncharova L.A., Ivliev A.I., Kalinina G.V., Kashkarov L.L., Konovalova N.S., Okateva N.M., Polukhina N.G., Rusetskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A., Meteorites as a natural detectors of very heavy galactic cosmic ray nuclei: some aspects of the experimental track studies., Programme and Book of Abstracts Memorial International Conference CAMMAC (COMETS, ASTEROIDS, METEORS, METEORITES, ASTROBLEMS, CRATERS) 2008, Украина, г. Винница, 28 сентября – 3 октября 2008 г., стр. 84-85
24. Vladymyrov M.S., Aleksandrov A.B., Chernyavsky M.M., Goncharova L.A., Orlova G.I., Polukhina N.G., Starkov H.I., Tsarev V.A., Galkin V.I., Publichenko P.A., Roganova T.M., Sazhina G.P., PAVICOM facility for treatment of OPERA experimental data, Proceedings of science, Nufact08, 2008, p. 143, Valencia, June 2008 http://pos.sissa.it/archive/conferences/074/143/Nufact08_143.pdf