



## Актуальность работы

Работа выполнена в Институте теоретической и экспериментальной физики, г. Москва.

### Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор М.А. Кумахов,  
Институт рентгенооптических систем,  
г. Москва

доктор физико-математических наук,  
профессор Г.И. Меерзон,  
Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, г. Москва

доктор физико-математических наук,  
профессор С. Вокал,  
Университет им. П.И. Шафарика,  
г. Кошице, Словакия

### Ведущая организация:

Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург

Защита состоится " " \_\_\_\_\_ 2010 года в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.720.001.02 при Объединенном институте ядерных исследований. 141980, г.Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



В.А.Арефьев

Первые теоретические работы по теории детектирования начались почти сразу же после первой фотографической регистрации радиоактивности в 1896 году. За прошедшее время детекторы стали эффективным инструментом для изучения атомного мира и физики элементарных частиц. По мере развития методов регистрации увеличивалось количество твердотельных материалов, используемых для регистрации разнообразных ионизирующих излучений, и со временем они были условно объединены в класс ядерных твердотельных трековых детекторов (ЯТТД). Несмотря на различия, все материалы класса ЯТТД обладают рядом идентичных регистрационных свойств, вытекающих из существования общих закономерностей взаимодействия частиц с веществом различных сред, и из существования статистического подобия последовательности событий, приводящих к регистрируемому эффекту. В защищаемом подходе предполагается, что результат воздействия любого ионизирующего излучения на материалы ЯТТД таков, как будто все они состоят из дискретного множества чувствительных микрообъемов (ЧМ), способных находиться в двух состояниях «Нет» и «Да». Локальный отклик на ионизирующее излучение в некоторой точке детектора заключается в переходе ЧМ в этой точке из состояния «Нет» в состояние «Да». Объектом исследования настоящей работы являются треки заряженных частиц и ионов, образующиеся в виде трехмерных пространственных распределений локальных откликов (ПРЛО). В ЯТТД такой трек остается латентным до проведения специального процесса его визуализации.

Теория детектирования постоянно совершенствовалась и развивалась по мере развития методов детектирования и расширения круга физических задач с использованием ЯТТД. В пятидесятых годах прошлого столетия в центре внимания были слабоионизирующие частицы, необходимо было

Объединенный институт  
ядерных исследований

создать материалы и методы регистрации, обладающие высокой чувствительностью к однозарядным частицам. К. С. Богомоловым была создана Флуктуационная Теория фотографического действия слабоионизирующих частиц /Л3/. В конце шестидесятых лет растет интерес к регистрации многозарядных ядер на ускорителях и к изучению спектров космического излучения. Американский физик Р. Катц разрабатывает Единую Теорию Треков /Л4/. В ней предполагается, что, во-первых, любое излучение воздействует на детектор через выбиваемые им потоки  $\delta$ -электронов и, во-вторых, что пространственные распределения выделенной этими потоками энергии однозначно описывают пространственные распределения локальных откликов, т.е. используется допущение об адекватности связи доза-эффект. В начале семидесятых лет возникает особый интерес к поиску сверхтяжелых элементов (СТЭ) острова стабильности, появляется необходимость более точного учета вклада  $\delta$ -электронов в образование латентного трека. Поэтому в 1972 году ставится задача по разработке метода расчёта параметров треков в фотоэмульсии для ядер с большими атомными номерами, для которых калибровочная информация в те времена отсутствовала. В процессе проведения настоящей работы выяснились новые аспекты актуальности этого исследования, постановка задачи была обобщена на весь класс ЯТТД.

### Цель и основные задачи диссертации

Для расчета параметров треков необходимо, как минимум, знать пространственное распределение локальных откликов (ПРЛО) по объему латентных треков. Поэтому целью настоящей работы является построение теории детектирования, пригодной для описания этих распределений, и разработка на основе этой теории методов, предназначенных для расчета разнообразных измеряемых параметров треков в материалах ЯТТД.

Достижение поставленной цели включает:

- Обоснование возможности создания единого теоретического подхода ко всему классу ЯТТД и установление общих математических выражений для описания ПРЛО по объему ядерных твердотельных детекторов при прохождении через них потоков многократно рассеиваемых электронов;
- Установление общих математических выражений для вероятностей появления локального отклика при прохождении через ЯТТД смешанного потока частиц разного типа;
- Описание зависимости регистрационных параметров детекторов от различных физических факторов;
- Решение задач теории многократного рассеяния электронов с целью разработки методов и алгоритмов расчета трехмерных ПРЛО вокруг точечного источника электронов для дальнейшего их использования при расчете вклада  $\delta$ -электронов в формирование латентных треков быстрых ионов или заряженных частиц;
- организацию банка данных по различным твердотельным детекторам и создание программ по обслуживанию банка данных при поиске или записи информации;
- Разработку методов и создание цикла компьютерных программ для расчета ПРЛО по объему латентного трека регистрируемого ядра в любом материале ЯТТД;
- Разработку методов расчета кинетики фронта травления при известных полях скоростей травления;
- Описание зависимости вероятностей появления ЛО от промежутка времени между моментами облучения ЯТТД и процесса визуализации;

- Использование разработанной теории ЯТТД и методов для создания цикла программ по расчету разнообразных параметров треков в различных материалах ЯТТД;
- Разработку методов поиска регистрационных параметров детекторов из экспериментов при визуализации треков процессом травления.

### Научная новизна

1. Предлагаемая теория ЯТТД, является дальнейшим логическим звеном эволюции теории детектирования, истоки которой восходят ещё к работам Н. Бора /Л1/, биофизиков М. Блау и К. Альтенбургера /Л2/, впервые применивших модель многих ударов для биотканей, позднее использованной в теориях К.С. Богомолова /Л3/ и Р. Катца /Л4/. В защищаемой теории ЯТТД учитывается энергетический спектр потока многократно рассеиваемых  $\delta$ -электронов, проходящих через чувствительный микрообъем детектора в заданной точке  $\vec{r}$ . Защищаемая теория ЯТТД, позволяя рассчитать параметры латентных треков в любом твердотельном детекторе и их зависимости от различных факторов, охватывает гораздо более широкий круг физических явлений, чем предыдущие теории, такие как теория К.С.Богомолова или Р. Катца.
2. Впервые теория ЯТТД по отношению к ядерным фотографическим эмульсиям имеет завершённый вид и позволяет рассчитать любой параметр проявленного трека ядра или частицы, как в режиме счета зерен, так и в режиме измерения оптических плотностей.
3. Впервые теория ЯТТД по отношению к детекторам, обрабатываемых избирательным травлением треков, позволяет строить ряд приближений для описания измеряемых параметров вытравливаемых пор, избегая решений сложных химико-диффузионных задач, как для случая, когда

радиусы вытравливаемых пор больше пробегов  $\delta$ -электронов, так и для случая, когда они намного меньше пробега  $\delta$ -электрона максимальной энергии.

### Автор защищает;

- теорию ядерных твердотельных детекторов, которая учитывает флуктуации взаимодействия заряженных частиц или ядер-снарядов с атомами вещества внутри чувствительных микрообъемов детекторов и позволяет:

- а) построить с помощью модели многих ударов и дифференциальной функции потока  $f(\vec{\Omega}, \vec{r}, s)$  теории многократного рассеяния электронов математические выражения для вероятностей появления отклика чувствительного микрообъема в заданной точке ЯТТД после воздействия на него потока электронов;
- б) различать случаи адекватности и неадекватности связи доза-эффект;
- в) обобщить полученные выражения для вероятностей отклика на случай смешанного потока частиц различного типа;
- г) выделить частный случай расчета интегральные характеристики ПРЛЮ не зависят от многократного рассеяния частиц и расчёт вероятностей появления отклика значительно упрощается, т.к. сводится к интегралам вдоль траекторий рассеиваемых частиц;
- д) получать из общих выражений для вероятностей локального отклика в одном частном случае соответствующие вероятности Флуктуационной теории Богомолова, в другом - вероятности отклика Единой Теории Катца, а в третьем частном случае позволяет получать линейный отклик на выделенную в чувствительном микрообъеме детектора энергию;
- е) обобщить выражения для вероятностей отклика на случай, когда присутствует собственный или внешний радиационный фон ЯТТД;
- ё) провести обобщение понятия локального отклика, при котором

локальный отклик рассматривается как результат визуализации некоторой доли физического ансамбля внутренних состояний чувствительных микрообъемов, и учесть внутренние физические состояния чувствительных микрообъемов;

ж) использовать для нахождения пространственных распределений локального отклика методы теории многократного рассеяния электронов;

з) Оценивать зависимость скорости травления вдоль трека от температуры растворителя и величины дополнительного однородного фонового облучения.

– операторный метод решения системы рекуррентных уравнений для пространственно-угловых моментов дифференциальной функции потока многократно рассеиваемых электронов, в котором отыскиваются коэффициенты разложения моментов по полиномам Лежандра, зависящим от угла вылета электронов. Это позволяет многократно использовать их для различных углов вылета электронов из источника, не решая рекуррентных уравнений заново;

– модификацию метода моментов Спенсера для геометрии точечного аксиально-симметрического источника, в которой электроны излучаются под некоторым углом к оси симметрии. Такая геометрия соответствует выбиванию  $\delta$ -электронов ядром-снарядом. Эта модификация позволяет отыскивать ПРЛО, а также пространственные распределения поглощенной энергии и потока электронов не только отдельно по радиальным или продольным, но и одновременно по обеим координатам;

– метод расчёта пространственных распределений локального отклика по объему латентного трека ядра в ЯТТД;

– структуру банка данных для ЯТТД, а также цикл программ для обслуживания банка данных;

– методы расчета различных параметров треков на основе предварительно найденных ПРЛО;

– методы поиска регистрационных параметров ЯТТД, обрабатываемых избирательным травлением.

– метод автоматической идентификации релятивистских ядер с небольшими атомными номерами одновременно по распределениям блобов и разрывов, измеряемых на комплексе микроскоп-компьютер;

– метод прогнозирования регрессии треков в фотоэмульсии, предназначенной для нейтринного эксперимента;

– положение, в котором формулируется принцип расчёта кинетики и геометрической формы фронта травления трека для известных полей скоростей травления в сплошных и кристаллических ЯТТД;

– критерий, указывающий, когда при травлении треков необходимо учитывать радиальные распределения локального отклика по поперечному сечению треков, и когда такой учет не нужен;

– последовательность приближений для описания продольной скорости вытравления треков в материалах, обрабатываемых процессом травления;

– приближенный метод расчета зависимости избирательности травления вдоль трека и дискриминационной способности ЯТТД от температуры травления и от  $\gamma$ -дозы однородного дополнительного облучения детектора.

– всю совокупность программ для ЭВМ, реализующую перечисленные выше методы расчёта, а также программы, использующие ПРЛО для расчёта различных параметров треков как в фотографических, так и не в фотографических материалах ЯТТД;

– выражения для оценки предельно минимальных пространственно-временных интервалов  $(\Delta x_{\min}, \Delta t_{\min})$  взаимодействия ионизирующих частиц и ядер-снарядов с веществом, соответствующих их скоростям  $\beta$  и потерям  $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ .

– все представленные в диссертации результаты расчётов.

## Научное и практическое значение работы

Класс ЯТТД /8/ имеет широкую быстро развивающуюся область применения. В неё входят ядерная физика и биология, медицина и контроль окружающей среды, археология и геология, промышленность, нанотехнология и т.д. Предлагаемый теоретический подход позволяет рассчитывать ПРЛО латентного трека ионизирующей частицы в любом материале ЯТТД. Знание ПРЛО позволяет рассчитать любые параметры треков в ядерных фотоэмульсиях. Нужно отметить, что, являясь самым первым детектором, с помощью которого открыта радиация, фотоэмульсия выдержала столетнюю конкуренцию с нефотографическими детекторами, и продолжает широко использоваться в современных физических исследованиях /Л6, Л8/, /6, 16, 18, 19, 24, 25/. Область применения детекторов, обрабатываемых травлением, гораздо шире, чем для фотоэмульсий и они тоже используются во многих фундаментальных физических исследованиях, например, в /Л7/.

Исследован актуальный для микродозиметрии и теории детектирования вопрос о существовании области адекватности связи доза-эффект. Найден критерий появления адекватности связи доза-эффект, с помощью которого проанализировано около тридцати различных ЯТТД /2/.

Связь между ПРЛО и измеряемыми параметрами треков в детекторах, обрабатываемых травлением, намного сложнее, чем у фотоэмульсий. Тем не менее, знание ПРЛО в таких ЯТТД позволяет отыскивать достаточно большой набор разнообразных измеряемых параметров треков ядер, строить последовательности приближений для описания скоростей травления, и находить из калибровочных экспериментов регистрационные параметры детекторов.

Новый операторный метод решения рекуррентных уравнений теории многократного рассеяния электронов также имеет самостоятельное

значение и может быть использован не только в областях, связанных с теорией детектирования /22, 26/. Однажды найденные коэффициенты разложения пространственных моментов по полиномам Лежандра от угла вылета электронов, и записанные в специально созданный банк данных /22/, можно многократно использовать для различных источников электронов в этом же материале.

В рамках теории многократного рассеяния электронов проанализированы источники электронов нового типа, поэтому разработанные методы расчёта ПРЛО вокруг такого источника сами по себе имеют самостоятельное значение. Так, например, для теории записи фотографических изображений с помощью электронного луча этот метод позволяет рассчитать любые характеристики получаемых изображений /20, 23/.

Теория детектирования была использована для расчета параметров треков ионов во всем диапазоне атомных номеров таблицы Менделеева, включая СТЭ в интервале скоростей от пика Брэгга до релятивистских скоростей.

Предлагаемые в диссертации методы расчёта полностью реализованы в цикле программ для ЭВМ и ПК, которые могут быть использованы не только в научных задачах, но также и в различных научно-технических и прикладных областях /26/.

Теория детектирования может быть использована в многочисленных задачах по идентификации быстрых ядер и частиц, в исследованиях космических спектров ядер, включая поиск сверхтяжелых элементов.

Защищаемая теория детектирования может служить основой для постановки новых исследований. Например, управление чувствительностью детекторов с помощью дополнительных однородных облучений  $\gamma$ -квантами, ультрафиолетом, электронами и т.д. Другим

направлением – использование расчетных пространственных распределений по объему латентных треков для дальнейшего точного решения химико-диффузионных задач при описании кинетики фронта травления конкретного материала. Третьим направлением - моделирование процессов внутри вытравливаемых нанопор травлением необлученного материала при повышенных температурах и концентрациях растворителя и др.

### Апробация работы

Основные результаты диссертации регулярно докладывалась на сессиях секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». (ИТЭФ, Москва, X, 1979 г.; ФИАН, 1983г.; ИТЭФ, 1998; 2000; 2003; 2005; 2007); на одиннадцати Международных конференциях по ЯТТД: (IX - Мюнхен, ФРГ, 1976 г.; X - Лион, Франция, 1979; XVI - г. Пекин, КНР, 1992 г.; XVII - Дубна, 1994 г.; XVIII - Каир, Египет, 1996; XIX - Безансон, Франция, 1998; XX - Порторож, Словения, 2000 г.; XXI - Дели, Индия, 2002; XXII - Барселона, Испания, 2004; XIII – Пекин, Китай, 2006; XXIV – Болонья, Италия, 2008); на Международной конференции Nuclear Energy for New Europe 2006 (Порторож, Словения, 2006); представлены на XII Международной конференции по ЯТТД (Акапулько, Мексика, 1983 г.), на Международном конгрессе по научной фотографии (Кембридж, Англия, 1982 г.); доложены на Всесоюзной конференции по предельным свойствам фотографических материалов (Черноголовка, 1979г.), на четырех Всесоюзных конференциях по микродозиметрии ( III - Москва, 1979 г.; IV - Усть-Нарва, 1983 г.; V - Усть-Нарва, 1985; VI - Канев, Украина, 1988;), на Всесоюзной конференции "Фотографические процессы на основе галогенидов серебра" (Черноголовка, 1983 г.); на XXXIII Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Москва, 1983 г.); представлены на Международном Конгрессе Фотографической науки.

(ФРГ, Cologne/Koln. 1986), доложены на Всесоюзной научно-технической конференции (Москва, 1988); Представлены на International Congress of Photographic Science (China\Beijing, oct. 15-19, 1990); Доложены на двух Всесоюзных школах-семинарах по твердотельным трековым детекторам (II – Одесса, апрель, 1986; III - Одесса, 5-11 Сентябрь, 1991); Доложены на двух Международных рабочих совещаниях “*Solid State Nuclear Detectors and their Applications*” (Дубна, 1990 и 1993) и на трех международных конференциях по радонной дозиметрии "Internat. Conferences of Rare Gas Geochemistry" (II - Besancon – France, 5-9 Juillet, 1993; III - Amritsar, India, 9-15 December.; IV - 1995. Rome, Italy, 9-15, June, 1997); на четырех совещаниях международной колаборации EMU01 “Meetings of the EMU01 Collaboration and perspectives of the emulsion technique in the experiments at the Nuclotron relativistic nuclear beams” LHE, JINR Dubna (Апрель, 1996; Февраль, 1998; Май, 1999; Май 2000;).

Основные результаты опубликованы в 38 работах, 22 из которых входят в перечень ВАК 2008.

### Достоверность результатов работы

В диссертации используются достижения в теории детектирования, известные к моменту постановки работы. Построение теоретического подхода является дальнейшим развитием этой теории и основано на известных законах физики взаимодействия быстрых ионизирующих частиц с веществом. Аналогично методы расчёта ПРЛО включают достижения теории многократного рассеяния электронов и являются дальнейшим развитием её методов применительно к проблемам детектирования.

Правильность метода расчёта ПРЛО, создаваемого потоком электронов, подтверждена согласием с экспериментом теоретической зависимости от толщины плоского фотоэмульсионного слоя значения энергии, при котором обеспечивается максимальная чувствительность, а также хорошим согласием экспериментальной и теоретической зависимостей спектральной

чувствительности фотоэмульсии фиксированной толщины от энергии электронов.

Правильность метода расчёта ПРЛО по объему трека в фотоэмульсии подтверждена совпадением расчётных и экспериментальных профилей треков ядер. Также хорошее согласие между теорией и экспериментом достигнуто для нефотографических материалов. Так для минерального детектора оливина теоретическая зависимость МД треков от атомного номера регистрируемого ядра, полученная после калибровки ядрами с атомными номерами в диапазоне  $Z=24-36$ , дала хорошее предсказание  $L_{max}$  трека ядра урана  $Z=92$ : экспериментальное значение  $L_{max} = 1100-1200$  мкм, а расчётное  $L_{max} = 1160$  мкм. Удовлетворительное согласие теории с экспериментом получено для радиальных скоростей травления в полимерном детекторе Макрофоль-КГ.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения, списка цитированной литературы из 315 работ. Основное содержание диссертации изложено на 354 страницах, имеется 36 таблиц и 147 рисунков.

### Содержание диссертации

Во введении освещается история постановки работы, отмечается актуальность проведения настоящего теоретического исследования, сформулирована цель диссертационной работы и положения, выносимые автором на защиту. Дано краткое описание диссертации по главам.

В первой главе представлен литературный обзор, посвященный изложению физических основ теории детектирования и состоянию теории детектирования к моменту постановки настоящей работы. В обзоре показана возможность объединения большого количества детектирующих материалов

в один класс ЯТГД. Формулируется цель настоящей работы.

Заряженные частицы или ядра при прохождении через вещество вызывают разнообразные радиационные эффекты, зависящие от структуры материала и их энергии. К ним можно отнести всевозможные температурные эффекты, образование зон новой фазы вещества, выброс материала с оси трека с образованием полых или разряженных областей уменьшенной плотности, появление точечных дефектов, возбуждение фононов и экситонов в кристаллических материалах и т.д. В общем случае структура латентного трека состоит из сердцевин, ствола и кроны. Основной вклад в сердцевину трека вносят упругие ядерные взаимодействия ядра-снаряда с ядрами материала, ствол формируется  $\delta$ -электронами малых энергий с пробегами порядка размеров чувствительных микрообластей, а корона создается многократно рассеиваемыми длиннопробежными  $\delta$ -электронами более высоких энергий. Соотношение между элементами структуры латентного трека зависит от проводимости материала детектора – чем она выше, тем меньше роль  $\delta$ -электронов. Первичные акты взаимодействия имеют дискретный характер. Из соотношения неопределенностей Гейзенберга можно получить значения минимальных пространственно-временных интервалов их локализации при прохождении через материал частицы или иона с зарядом  $Z$ , скоростью  $\beta$  и удельными потерями энергии  $dE(Z, \beta)/dx$ :

$$\Delta x_{\min}(Z, \beta) = \sqrt{\beta \cdot c \cdot \hbar / \left( \frac{dE(Z, \beta)}{dx} \right)} \quad (1); \quad \Delta t_{\min}(Z, \beta) = \sqrt{\hbar / \left( \left( \frac{dE(Z, \beta)}{dx} \right) \cdot \beta \cdot c \right)} \quad (2);$$

Так для протона, движущегося через ядерную фотоэмульсию тип-Р2 со скоростью, равной половине скорости света, эти интервалы равны  $\Delta x_{\min} = 8.7$  нм и  $\Delta t_{\min} = 5.8 \cdot 10^{-17}$  с. При движении этого же протона через детектор CR-39 можно получить, что  $\Delta x_{\min} = 13.2$  нм и  $\Delta t_{\min} = 8.8 \cdot 10^{-17}$  с. Обратные им величины дают предельные максимальные пространственные



и временные частоты актов первичных взаимодействий /36/. Первичные акты взаимодействия вызывают локальные отклики на оси трека. Кроме этого, наряду с другими радиационными эффектами, во всех материалах первичные взаимодействия ядер с атомами среды приводят к выбиванию из атомных оболочек потоков  $\delta$ -электронов, энергетический спектр которых может быть очень широким – от нескольких кэВ до нескольких МэВ и выше. Их пробеги могут достигать сотен микрон и более /31/. При прохождении через среду детектора  $\delta$ -электроны испытывают сильное многократное рассеяние. Если материал детектора не является проводником, то в результате воздействия общего потока электронов в нём появляется некоторое пространственное распределение локальных откликов, каждый из которых заключен в малом микрообъеме, диаметра порядка микрона или нескольких нанометров. Это является первым фактором, объединяющим различные материалы в один класс ЯТТД. В фотоматериалах и биотканях на дискретность структуры детектора случайным образом накладывается дискретность актов взаимодействия. В макроскопически сплошных детекторах дискретность локального отклика определяется дискретностью первичных актов взаимодействия, что позволяет рассматривать любой такой детектор так, как будто он тоже состоит из множества ЧМ. Это является другим важным объединяющим фактором. Размер ЧМ может формироваться как микро- или наноструктурой детектора, так и вторичными процессами, инициированными первичными актами взаимодействия. Длительность вторичных процессов может намного превышать  $\Delta t_{\min}$ . Она может измеряться долями секунды, месяцами /3, 6/ и даже годами. Размер области, содержащий отдельный локальный отклик, после визуализации обычно превышает размер чувствительного микрообъема. Так размер проявленного зерна ядерной фотоэмульсии тип-Р2 при стандартном проявлении в 1.5 раза превышает размер не проявленного микрокристалла

AgBr, радиус которого равен 0.28 мкм. В общем случае размер проявленного зерна зависит от методики проявления.

Пространственные распределения локальных откликов формируются множеством траекторий  $\delta$ -электронов с пробегами, превосходящими размеры ЧМ. Эти  $\delta$ -электроны на своем пути выбивают медленные  $\delta$ -электроны второго поколения меньшей энергии. Именно эти  $\delta$ -электроны с малыми пробегами, непосредственно участвуют в вызове локального отклика вдоль траекторий  $\delta$ -электронов первого поколения. События, приводящие к образованию таких вторичных  $\delta$ -электронов, являются эффективными по отношению к появлению локального отклика ЧМ, при прохождении через него одного или нескольких быстрых  $\delta$ -электронов первого поколения. Для всех материалов ЯТТД применима многоударная модель отклика, в которой под «ударом» понимается одно эффективное событие внутри ЧМ. Математическое описание стадии формирования ПРЛО является общим для всего класса ЯТТД. В то же время, так как появление отдельного локального отклика вызывается радиационными эффектами, зависящими от свойств материала и вида радиации, то для изучения природы локального отклика в каждом конкретном материале необходимо проводить отдельное большое исследование.

Радиационные эффекты, вызывающие локальный отклик, совместно с дальнейшими процессами визуализации треков формируют свойства ЧМ, которые в теории описываются регистрационными параметрами. Эти параметры могут быть вычислены теоретически, как это было сделано для фотоэмульсий Богомоловым, или могут быть найдены из калибровочных экспериментов, подобно тому, как это делалось в работах Катца.

В обзоре описано состояние теории детектирования на момент постановки настоящей задачи и проведена аналогия в свойствах между различными материалами ЯТТД. Может существовать, например,

качественное подобие температурной или временной зависимости характеристик треков в сильно различающихся материалах ЯТТД.

В первой главе на основе анализа теории детектирования и теории многократного рассеяния установлено, что к моменту постановки задачи в литературе отсутствовали работы, в которых:

- строился бы единый теоретический подход к описанию регистрационных свойств различных материалов ЯТТД на основе детального учёта вероятностных событий, происходящих в ЧМ при прохождении через детектор потока электронов, и были бы получены общие выражения для пространственных распределений локального отклика, позволяющие проводить расчёты в модели  $\nu$ -ударов с учётом многократного рассеяния электронов;

- решалась бы соответствующая случаю испускания  $\delta$ -электронов задача теории многократного рассеяния, в которой аксиально-симметричный источник излучает электроны под некоторым углом к оси симметрии;

- разрабатывались бы методы расчёта ПРЛО в треке быстрого многозарядного ядра с детальным учетом многократного рассеяния  $\delta$ -электронов, применимые для всего класса ЯТТД;

- изучалась бы связь кинетики травления и формы фронта травления с ПРЛО в треке частицы.

Общие черты обоснования возможности и необходимости единого теоретического рассмотрения были изложены автором впервые на Всесоюзном рабочем совещании по воздействию радиации на биологические объекты в 1979 г. (Март, г. Пущино).

**Во второй главе** строится теория регистрации потоков заряженных частиц с помощью ЯТТД [2]. Рассматриваются потоки электронов и выводятся выражения для вероятностей появления отклика  $P_{\nu}^{+}(\vec{r})$  в ЧМ с координатой  $\vec{r}$ . Вывод производится в три этапа. Сначала строятся

вероятности появления локального отклика при условии попадания в ЧМ количества  $q$  электронов с заданным набором остаточных пробегов  $S_i$ , направлений  $\vec{\Omega}$ , и точек входа в ЧМ  $\vec{\eta}$ . Затем с помощью дифференциальной функции распределения электронов  $f(\vec{\Omega}, \vec{r}, s)$  в пространстве  $(\vec{\Omega}, \vec{r}, s)$  записывается распределение электронов на поверхности ЧМ и выводится вероятность прохождения через поверхность ЧМ  $q$  электронов. Далее проводится суммирование по формуле Байеса вероятностей всех перечисленных событий, что для частных случаев  $\nu = 1, 2, 3$  дает:

$$P_1^+ = 1 - e^{-N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (3)$$

$$P_2^+ = 1 - \left\{ 1 + N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle \right\} \cdot e^{-N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (4)$$

$$P_3^+ = 1 - \left\{ 1 + N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle + \frac{1}{2} \cdot \left[ N \cdot \langle \xi^2 \cdot e^{-\xi} \rangle + (N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle)^2 \right] \right\} \cdot e^{-N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (5)$$

Здесь угловые скобки обозначают интеграл:

$$\langle \dots \rangle = \int_{(\vec{\Omega}, \vec{\eta}) > 0} d\vec{\Omega} \int dQ \left[ (\vec{\Omega} \cdot \vec{n}) \cdot dQ \int f(\vec{\Omega}, \vec{\eta}, s) \cdot (\dots) ds \right] \quad (6)$$

$\vec{n}$  - нормаль к элементу поверхности  $dQ$  чувствительного микрообъема.

Далее в диссертации анализируются свойства полученных выражений для распределения  $P_{\nu}^{+}(\vec{r})$ . Например, если принять, что число эффективных событий  $\xi(s)$  задается отношением энергетических потерь электрона  $\Delta E$  внутри отдельного ЧМ к характеристической величине энергетической чувствительности  $\Delta E_0$  этого ЧМ, то можно показать, что адекватность связи доза-эффект имеет место, когда выполняется условие:

$$\xi(s) = \frac{\Delta E(s)}{\Delta E_0} \ll 1 \quad (7)$$

Также показано, что при малых плотностях потоков электронов отклик детекторов с низкой чувствительностью становится линейным что было, например, применено к трекам в двухфазовых камерах с жидким ксеноном [11, 34, 35].

В таблице I приведен ряд материалов ЯТТД, упорядоченных по величине  $\xi_{r_{\min}}$  в релятивистском минимуме ионизации электронов. Как следует из таблицы, в этом самом благоприятном случае для выполнения условия адекватности  $\xi_{r_{\min}} < 0.1$ , все равно неадекватность связи доза-эффект имеет место для 41% представленных материалов, а для энергий электрона  $E=5.4$  кэВ неадекватность имеет место уже для трех четвертой части материалов. В пятой колонке таблицы даны энергетические потери  $(dE/ds)_0$ , которые характеризуют чувствительность ЧМ - чем больше  $(dE/ds)_0$ , тем меньше чувствительность. С помощью  $(dE/ds)_0$  величину  $\xi(s)$  можно записать так:

$$\xi(s) = (dE(s)/ds)/(dE/ds)_0 \quad (8)$$

В диссертации показано, что выражения (3-5) справедливы для любых потоков ионизирующих частиц, а не только для электронов. В каждом конкретном случае должна использоваться  $f(\bar{\Omega}, \bar{r}, s)$  рассматриваемого типа частиц. Вероятности  $P_v^*(\bar{r})$  относятся к неаддитивным функционалам.

С помощью выражений (3-5) они выражены через аддитивные -  $\langle \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle$ .

В диссертации показывается, что выражения (3-5) будут справедливыми также для смешанных потоков частиц, если в них произвести замену:

$$N \cdot \langle \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle \rightarrow \sum_i N_i \cdot \langle \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle_i, \quad \text{где } N_i \text{ и } \langle \dots \rangle_i \text{ относятся к } i\text{-ому компоненту}$$

смешанного потока. Далее показывается справедливость следующего утверждения: *При изотропном источнике частиц, равномерно распределенном по всему пространству детектора, интегральные характеристики пространственных распределений локальных откликов детектора не зависят от многократного рассеяния регистрируемых частиц, включая электроны, если чувствительные микрообъемы имеют сферическую форму с диаметром, намного меньшим величины*

*остаточного пробега частиц, испытывающих многократное рассеяние.* Эта теорема значительно упрощает расчёты интегральных показаний детектора /26, 28/.

Далее в главе рассматривается возможность дальнейшего обобщения выражений для вероятности появления отклика  $P_v^*(\bar{r})$  на случай, когда необходим учёт внутренних физических состояний ЧМ. Если предположить, что локальный отклик является результатом визуализации определенной доли физического ансамбля внутренних состояний ЧМ, то тогда величина  $\xi$  должна зависеть от некоторого вектора состояния  $\vec{k}$  /3/. Компонентами этого вектора могут являться различные параметры состояния. Например, температура  $T^0$ , промежуток между временем изготовления материала и временем экспозиции, или между моментами экспозиции и визуализации и др. Физическое состояние ЧМ может изменяться как в результате внешнего воздействия, так и самопроизвольно. Так возможны спонтанные обратные переходы ЧМ из состояния отклика в состояние, когда отклик отсутствует. В фотографических эмульсиях это приводит к регрессии, а в биотканях к процессам репарации и т.д. Возможны также противоположные спонтанные переходы в состояние отклика, что будет давать собственный фон материала. В фотоматериалах это вуаль, а в материалах, подвергаемых процессу травления, - собственная скорость травления. Для учёта этих двух типов спонтанных переходов число эффективных событий может быть представлено в виде суммы двух слагаемых:

$$\xi = \xi_{ion} \cdot e^{-t/\tau} + \xi_0 \quad (9)$$

Первый член представляет частоту эффективных взаимодействий ионизирующей частицы со средой детектора, а второй - добавку за счёт спонтанного перехода ЧМ в состояние отклика. Появление отклика нужно рассматривать не только как результат воздействия на ЧМ ионизирующей

Таблица I. Упорядочение детекторов по чувствительности отдельной чувствительной области, задаваемой по количеству эффективных актов ионизации, приходящемуся на одну область при прохождении через нее отдельного электрона /2/.

№	Детекторы	$\frac{\Delta E}{E_{\text{min}}} = \frac{\Delta E}{\Delta E_0}$	$\frac{\Delta E}{E_{\text{с.а. кр}}} = \frac{\Delta E}{\Delta E_0}$	$\left(\frac{dE}{ds}\right)_{\text{МэВ}} \frac{\text{МэВ}}{\text{см}}$	$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{ds}\right)_{\text{МэВ}} \frac{\text{МэВ}}{\text{г}}$	$a_0$ нм
1	2	3	4	5	6	7
1	Стекло	750	1700	0.059	0.0267	1
2	Термолюминесцентный дозиметр LiF	23.4	500	0.196	0.0849	1
3	Цитидин	11.0	230	0.392	0.195	0.998
4	Кристаллы NaI(Tl)	7.20	129	8.25	2.16	3.25
5	Кодак NTB-2	3.20	57.0	1.54	0.399	150
6	$\alpha$ -Аланин	0.81	18.6	2.81	2.81	2
7	Дозиметр Фрике	0.536	12.2	7.05	4.03	6
8	Ильффорд К-5	0.510	9.0	9.80	4.99	100
9	Минеральное масло на жидком сцинтилляторе с PPO	0.453	13.3	3.72	4.37	15
10	Ильффорд G-5	0.221	3.9	22.6	5.93	170
11	Нитрат целлюлозы	0.118	2.31	17.0	17.0	1.7
12	Аэрированный дозиметр Фрике	0.110	2.46	35.2	17.7	5.64
13	Твердая бактериофага Т-1	0.068	1.55	29.2	29.2	6.18
14	Твердая бактериофага OX-174	0.064	1.46	31.2	31.2	5.64
15	Оливин- ES	0.055	0.806	96.1	28.43	1.5
16	$\beta$ -галактозидаз	0.050	1.13	60.0	39.9	3.14
17	Лексан поликарбонат	0.050	1.10	39.6	39.6	2.0
18	Твердая бактериофага Т*-1	0.050	1.10	40.2	40.2	6
19	Ильффорд К-2	0.0258	0.455	195	51.2	130
20	Макрофоль KG	0.0194	0.101	111.2	91.9	8.18
21	Трипсин	0.0148	0.340	135	135	1.38
22	CR-39	0.0123	0.0876	90.7	70.42	-
23	Ильффорд К-1	0.00136	0.024	3680	976	120
24	Ильффорд К-0	0.0007	0.013	6740	16200	120
25	Дрожжевые клетки	0.00048	0.011	4140	4130	4030
26	Бактериальные споры O <sub>2</sub>	0.00031	0.00714	6360	6360	244
27	Слюда	0.00025	0.0059	2460	749	6.51
28	Бактериальные споры N <sub>2</sub>	0.00025	0.0057	7920	7920	243
29	Бактериальные споры H <sub>2</sub> S	0.000136	0.0031	14600	14600	234

частицы, но и как результат дальнейшего процесса визуализации. Так, например, если  $\tau$  характерное время обратного перехода из состояния «Да» в состояние «Нет», то при визуализации через время  $t$  после

экспозиции  $P_{v,\xi_0}^+(\bar{r}, \tau)$  будет такой, как будто частица произвела в  $e^{t/\tau}$  раз меньше эффективных событий по отношению к процессу визуализации сразу же после экспозиции /3, 6/.

В диссертации показано, что в присутствии собственного фона вероятности  $P_{v,\xi_0}^+(\bar{r}, \tau)$  для первых трех частных случаев  $\nu=1,2,3$  описываются как /3/:

$$P_{1,\xi_0}^+ = 1 - e^{-(\xi_0 + N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)} \quad (10)$$

$$P_{2,\xi_0}^+ = 1 - \{1 + \xi_0 + N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle\} \cdot e^{-(\xi_0 + N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)} \quad (11)$$

$$P_{3,\xi_0}^+ = 1 - \left\{1 + \xi_0 + N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle + \frac{1}{2} \cdot \left[ N \cdot \langle \xi^2 \cdot e^{-\xi} \rangle + (\xi_0 + N \cdot \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle)^2 \right]\right\} \cdot e^{-(\xi_0 + N \cdot \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)} \quad (12)$$

Как указано в выводах второй главы, предлагаемая теория детектирования для описания пространственных распределений локальных откликов по объёму латентных треков включает четыре основные регистрационные параметра: пороговую кратность ударов  $\nu$ ; радиус чувствительного микрообъёма  $a_0$ ; характеристические потери энергии  $(dE/ds)_{\omega_{cut}}$  величину обрезания энергии  $\delta$ -электронов второго поколения  $\omega_{cut}$ . Эти параметры определяются только физико-химическими свойствами материала детектора и не должны зависеть от свойств регистрируемых частиц или ядер. Если же рассматриваются параметры трека после визуализации, то необходимо введение дополнительных характеристических параметров самого процесса визуализации.

**В третьей главе** решаются задачи теории многократного рассеяния с целью нахождения пространственных распределений величин  $\langle \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle$ , входящих в выражения для  $P_v^+(\bar{r})$  теории детектирования. Для этого необходимо использовать кинетическое уравнение переноса электронов:

$$-\frac{\partial f(\bar{\Omega}, \bar{r}, s)}{\partial s} + \bar{\Omega} \cdot \nabla f(\bar{\Omega}, \bar{r}, s) = N \cdot \int [f(\bar{\Omega}, \bar{r}, s) - f(\bar{\Omega}', \bar{r}, s)] \cdot \sigma(|\bar{\Omega} - \bar{\Omega}'|) \cdot d\bar{\Omega}' \quad (13)$$

Здесь N-число электронов в см<sup>3</sup> среды;  $\sigma(|\bar{\Omega} - \bar{\Omega}'|)$  - дифференциальное сечение рассеяния электронов из направления  $\bar{\Omega}'$  в направление  $\bar{\Omega}$ .

С помощью уравнения (13) можно получить рекуррентные соотношения между пространственно-угловыми моментами отыскиваемых распределений, из соотношений найти пространственные моменты, а затем по ним восстановить отыскиваемые распределения. Теория детектирования накладывает на эту схему ряд существенных особенностей [8, 26]. Во-первых, обычные методы решения рекуррентных уравнений в теории детектирования трудно применимы, так как при учете всего начального энергетического спектра  $\delta$ -электронов требуют много времени для расчёта ПРЛО объема треков различных ядер. В диссертации предлагается специально разработанный операторный метод решения рекуррентных уравнений, в котором реализуются те же идеи, что и в методе функции Грина. В нем отыскиваются не сами пространственно-угловые моменты распределений, а их разложения по полиномам Лежандра от угла вылета электронов  $\theta_0$ . Найденные один раз для набора энергий электронов в каком-либо материале, они могут многократно использоваться для любых сечений трека любого ядра в рассматриваемом материале. Сущность этого операторного метода такова [26]. Рекуррентные соотношения для моментов могут быть представлены в операторном виде:

$$f_{l,m}^{n,p,q} = \hat{G}_{1,m}^k f_{l,m}^{n,p,q+k+1} + \hat{G}_{2,m}^k f_{l,m}^{n,p,q+k+2}. \quad (14)$$

Операторы  $\hat{G}_1^k$  и  $\hat{G}_2^k$  связаны между собой соотношениями:

$$\hat{G}_1^{k+1} = \hat{G}_1^k \cdot \hat{G}_1^k + \hat{G}_2^k; \quad \hat{G}_2^{k+1} = \hat{G}_1^k \cdot \hat{G}_2^k. \quad (15)$$

В диссертации исследуются свойства этих операторов и на основе этих свойств с помощью соотношений (15) строится алгоритм поиска коэффициентов  $B_{l,m,l'}^{n,p,q}$  для разложения по полиномам Лежандра, зависящим от угла вылета электронов  $\theta_0$ :

$$f_{l,m,l'}^{n,p,q}(\theta_0) = \sum_l B_{l,m,l'}^{n,p,q} \cdot P_l^0(\cos \theta_0). \quad (16)$$

При восстановлении пространственных распределений необходимо учесть две другие особенности, накладываемые теорией детектирования. Во-первых, нужно восстанавливать распределения функций, которые относятся к более широкому классу функции, чем обычно рассматриваемые в теории многократного рассеяния, и, наконец, нужно решать задачу для источника, в котором электроны излучаются по образующим конуса из его вершины, лежащей на оси трека первичной частицы:

$$I(\bar{\Omega}, z, \rho, s) = \delta(z) \cdot \frac{1}{2\pi\rho} \cdot \delta(\rho) \cdot \delta(\cos \theta_0 - \cos \theta) \cdot \delta(R_0 - s). \quad (17)$$

В основе метода восстановления распределений использован метод моментов Спенсера [15], который, в соответствии с перечисленными особенностями, был подвергнут модификации практически на всех звеньях решения. Для трехмерных распределений сначала отыскивались распределения по глубине величин радиальных моментов  $\langle \rho^n \cdot \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle$ , а затем по ним восстанавливались радиальные распределения при заданных значениях координаты z [26].

**В четвертой главе** описывается организация вычислительных работ, даются алгоритмы расчёта и приводятся некоторые результаты расчёта для распределений проявленных зерен в фотографической эмульсии вокруг точечного моноэнергетического источника электронов. Организация работ на ЭВМ должна удовлетворять следующим требованиям [26]:

1. В связи с общностью развиваемого теоретического подхода все алгоритмы и программы для расчёта ПРЛО должны быть применимы для любого материала ЯТТД.

2. Коэффициенты разложения  $B_{l,m,l'}^{n,p,q}$  должны храниться на долговременном носителе памяти ЭВМ или персонального компьютера (ПК) для обеспечения возможности многократного их использования.

3. Коэффициенты разложения должны быть упорядочены определенным образом, т.к. они могут принадлежать различным материалам, различным значениям энергии  $\delta$ -электронов, а также различным типам восстанавливаемых функций и различным вариантам расчёта.

Для того, чтобы эти требования были удовлетворены специально разработан и создан банк данных для ЯТГД. В начале четвертой главы дается обоснование и описание структуры банка данных. В соответствии с последовательностью перечисленных в третьем пункте признаков информация записывается и отыскивается по четырем индексным ключам - NDET, NENO, NFUN и NVAR (рис.1).

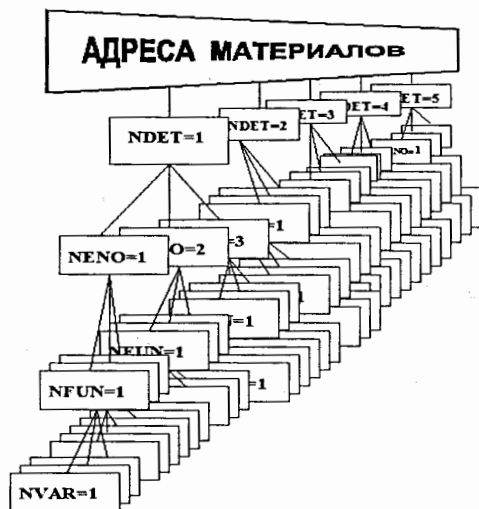


Рис.1. Структура банка данных

Для обслуживания банка данных разработан специальный цикл подпрограмм. Далее в главе дается описание алгоритма и программы "STAR" для расчёта коэффициентов разложения  $B_{l,m,p}^{n,q}$ , а также алгоритмы подпрограмм, которые предназначены для расчёта распределений по

глубине  $z$ , радиальной координате  $\rho$  и по обеим координатам  $(z, \rho)$  одновременно.

На рис.2-а изображены распределения проявленных зерен по глубине плоского слоя для десяти углов вылета электронов энергии 1 МэВ. Источник находится внутри бесконечно толстого слоя. На Рис. 2-б приведена компьютерная денситограмма, вычисленная по этим распределениям. На Рис. 3 трехмерное ПРЛЮ вокруг точечного источника для трех углов вылета электронов энергии 100 кэВ представлено семейством эквиденсит для  $\langle 1 - e^{-z} \rangle$  из (3). Величина  $\langle 1 - e^{-z} \rangle$  на каждой новой эквиденсите при движении в направлении от источника уменьшается вдвое /7/.

В конце главы описывается общая схема расчета на ЭВМ или компьютере пространственного распределения вероятности появления локального отклика по объему латентного трека.

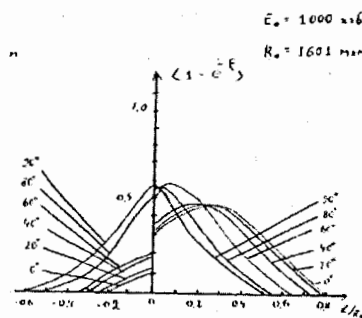


Рис.2-а. Расчетные распределения проявленных зерен по глубине плоского слоя для десяти углов вылета электронов с энергией 1 МэВ.

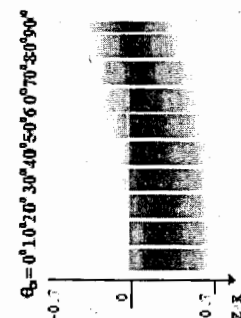


Рис. 2-б. Расчетная денситограмма плоского источника для десяти углов вылета электронов с энергией 1 МэВ.

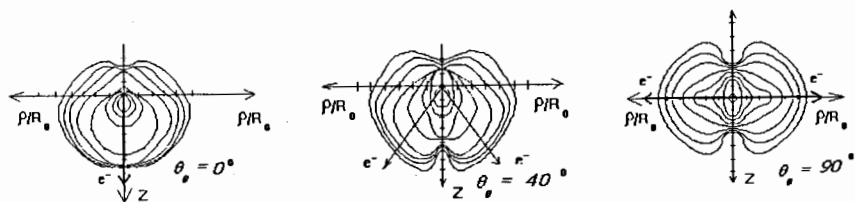


Рис.3. Поверхности эквиденсит величин  $\langle 1 - e^{-\xi} \rangle$  в фотоэмульсии тип Р-2 вокруг источника электронов с  $E = 100$  кэВ

**Пятая глава** посвящена ядерной фотоэмульсии. В первом разделе главы рассматривается фотографическое действие потока электронов. Разработанные методы и алгоритмы применимы к поиску пространственных распределений широкого класса функций - от распределений поглощенной энергии и пространственного распределения  $f(z, \rho)$  до распределений величин  $\langle \xi^k \cdot e^{-\xi} \rangle$ . Вид функций при расчетах задается специальными управляющими параметрами, поэтому с помощью одной и той же программы можно рассчитать пространственные распределения проявленных зерен, пространственные распределения плотности поглощенной энергии электронов или потока электронов для трех геометрий различных энергий и начальных углов вылета электронов. Так в работе /7/ найдены радиальные распределения фотографической эффективности поглощенной дозы и потока электронов по сечениям треков (Рис.4). По поведению распределений эффективностей были изучены области линейности и нелинейности отклика как по отношению к поглощенной дозе, так и по отношению к плотности потока электронов.

Далее в пятой главе демонстрируется применение разработанных методов применительно к работе  $\beta$ -спектрографов: даются результаты расчета спектральной чувствительности эмульсии тип Р-2 различной толщины к потокам электронов, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными /20, 24, 25/. Кроме того, приводятся расчеты

отношения сигнал-шум для различных толщин эмульсионных слоев и предлагается таблица предельных толщин, обеспечивающих оптимальное соотношение сигнал-шум для конкретных энергий искомых линий  $\beta$ -спектра /20/.

Во втором разделе пятой главы рассматриваются треки ядер в фотоэмульсии. Приводятся результаты расчета для ПРЛО треков ядер в ЯТТД и методы расчета с помощью ПРЛО различных параметров треков ядер в фотоэмульсиях и приводятся результаты расчета поперечных распределений оптической плотности треков, зависимостей ширины треков от атомного номера регистрируемых ядер во всем диапазоне таблицы элементов, включая СТЭ с  $Z = 114$ . В главе приводятся формы профилей треков ряда ядер и даются радиальные распределения оптических плотностей треков шестнадцати релятивистских ядер с атомными номерами от  $Z = 8$  до  $Z = 114$  для двух скоростей  $\beta = 0.72$  и  $\beta = 0.85$ . Также приводятся зависимости полуширин треков релятивистских ядер от атомного номера с  $\beta = 0.85$  /10/.

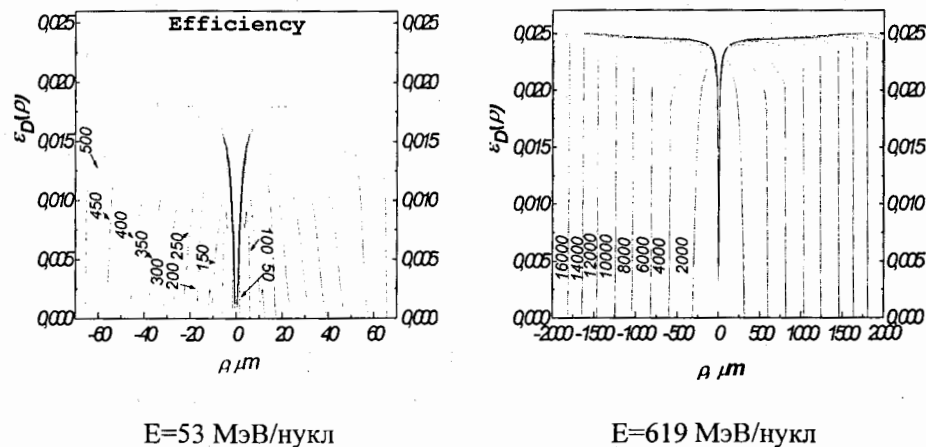


Рис. 4. Эффективность поглощенной дозы по сечению трека  $^{196}\text{Au}$ .

На рис.5 приведены эквиденситы треков для  $Z = 114$ , ядра тория  $Z = 90$  и ядра железа  $Z = 26$ . Расчетный профиль трека ядра железа дает полное совпадение с экспериментальным. На основе расчетов получены и приводятся компьютерные изображения треков ядер в фотоэмульсии. Рис. 6 демонстрирует компьютерное изображение треков ядер золота  $53.6$  МэВ/нукл и  $619$  МэВ/нукл.

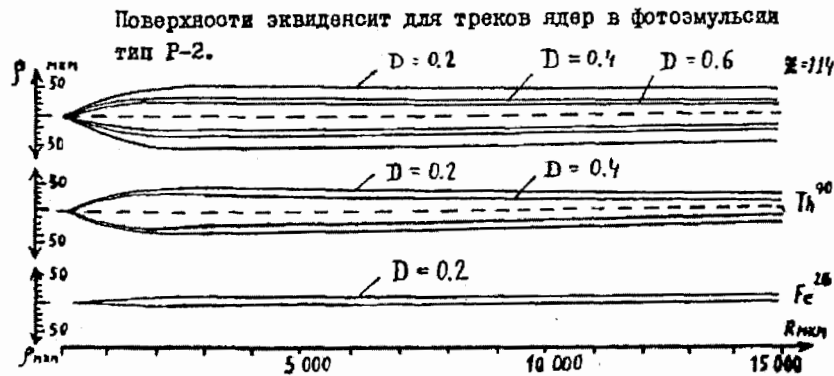


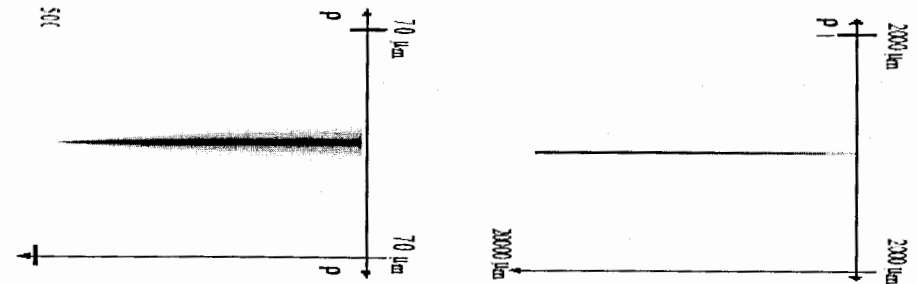
Рис.5. Профили треков трех ионов в фотоэмульсии тип -P2.

В диссертации подробно описан эксперимент по изучению сверхтяжелой компоненты космического излучения с помощью восьмикратно разбавленной эмульсии тип-P2x8, облученной на борту космического корабля «Союз». Идентификация производилась по количеству проявленных зерен в брусках, параллельных оси трека. Первая интерпретация была проведена с помощью приближенного учета геометрии испускания  $\delta$ -электронов /1/. Вторая интерпретация была проведена при точном учете геометрии источника электронов и их углов вылета /29/ по соотношению (3). Увеличение точности обработки привело к уменьшению разброса по скоростям для четырех измеренных треков группы железа и к увеличению разброса по атомным номерам.

В главе дается метод расчета ширины трека по координате края зерна

трека с учетом многократного рассеяния  $\delta$ -электронов и метод идентификации ядер небольших энергий с малыми атомными номерами по рассчитанной ширине. Работоспособность этих методов успешно проверена на ядре гелия /10/.

Далее описывается метод идентификации ядер также с небольшими атомными номерами, но уже с релятивистскими скоростями. Этот метод основывается на одновременном измерении двух распределений по размерам – блоков и просветов между ними. Для измерений этих распределений использовалась полуавтоматическая установка микроскоп-компьютер. Для моделирования трека использовался метод Монте-Карло. Показаны хорошие перспективы использования метода идентификации ядер /9/.



а. Остаточный пробег = 500 мкм  $E = 53$  МэВ/нукл  
 б. Остаточный пробег = 20000 мкм  $E = 619$  МэВ/нукл

Рис.6. Расчетное компьютерное изображение трека иона золота  $^{196}\text{Au}$  в ядерной фотоэмульсии тип-P2.

В конце пятой главы на трех задачах демонстрируется реализация описанного во второй главе положения о появлении локального отклика в результате визуализации определенной доли физических состояний ЧМ. Сначала это положение испытывается на регрессии треков  $\pi$ -мезонов /3/, затем используется для прогнозирования регрессии треков в нейтринных экспериментах /6/. Обработка литературных экспериментальных данных



по регрессии треков  $\pi^-$ -мезонов и влияния вуали на плотность треков в ядерной эмульсии подтвердила правильность их описания. Величина времени распада центров проявления в эмульсионных кристаллах у треков  $\pi^-$ -мезонов оказалась равной 150 суткам.

### Шестая глава.

Можно выделить три основных метода визуализации: проявление, травление и декорирование. Шестая глава посвящена детекторам, визуализация латентных треков в которых производится избирательным травлением. Локальный отклик в таких детекторах является активным центром травления (АЦТ), поэтому ПРЛО совместно со скоростями химических реакций и скоростями диффузии формирует трехмерное поле скоростей травления /5, 13, 14, 17/.

На практике полости вытравливаются как до диаметров, значительно превышающих поперечные размеры латентных треков, так и до размеров, сравнимых или меньших поперечных сечений латентных треков. Возможный наименьший диаметр вытравливаемой полости определяется размером чувствительного микрообъема конкретного детектора. Выше, в седьмой колонке таблицы 1, указаны радиусы чувствительных микрообъемов различных детекторов. Можно увидеть, что только ядерные фотоэмульсии и биоткани имеют размеры чувствительных микрообъемов порядка микрона и выше. Все же остальные детекторы, приведенные в этой таблице, включая обрабатываемые травлением, имеют гораздо меньшие размеры ЧМ - всего от одного до нескольких нанометров.

В начале шестой главы строятся два численных метода расчета кинетики фронта травления на расстояниях от оси латентного трека, меньших его поперечных размеров. При этом допускается, что поле

скоростей травления известно. Один метод строится для расчета макроскопически сплошных детекторов, а другой для детекторов с кристаллической или ячеистой структурой.

Для детекторов из сплошных сред предполагается, что через каждый подинтервал времени новая поверхность травления будет огибать семейство шаров с центрами в узлах предыдущего фронта травления, и каждый из которых расширяется со скоростью, задаваемой полем скоростей травления в их центрах. С помощью модельных полей травления численно исследуется кинетика фронта травления, и выявляется сильная зависимость формы фронта от формы поля скоростей травления. Предлагается критерий, указывающий, при каких тангенсах угла вершины острия полости необходимо учитывать трехмерное поле скоростей травления, и когда достаточно использование одномерного распределения скоростей травления вдоль оси трека. Показано, что продольная скорость травления  $V_t$  формируется уже на нанометровых радиальных расстояниях от оси трека (см. рис.7.).

Таблица 2. Функции и параметры к расчету профилей рисунка 7.

№ кривой	Вид распределения скоростей травления $f(\rho)$ и $f(\rho, Z)$	$t$	$\alpha$	$V_0$
		Время травления	угол наклона	мкм/час
1	$\begin{cases} \rho > 1 : f(\rho) = V_b \\ \rho \leq 1 : f(\rho) = \frac{0.01}{0.01 + \rho} + V_b \end{cases}$	1 час	$90^\circ$	0.1
2	$\begin{cases} \rho > 1 : f(\rho) = V_b \\ \rho \leq 1 : f(\rho) = \frac{0.01}{0.01 + \rho} \cdot \frac{1}{1+z} + V_b \end{cases}$	1 час	$90^\circ$	0.1
3	$\begin{cases} \rho > 1 : f(\rho) = V_b \\ \rho \leq 1 : f(\rho) = \frac{0.01}{0.01 + \rho} \cdot (1+z) + V_b \end{cases}$	1 час	$90^\circ$	0.1
4		1 час	$45^\circ$	
5		2 часа	$45^\circ$	

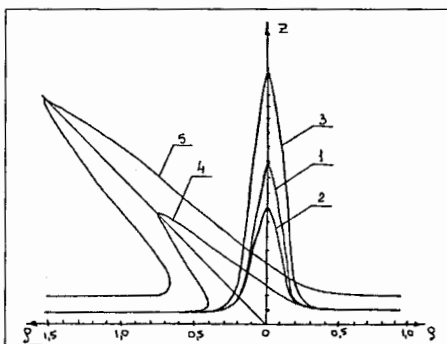


Рис. 7. Расчетные нанопрофили вытравливаемых пор вдоль треков для радиальных распределений АЦП, номера и распределения которых приведены в таблице 3

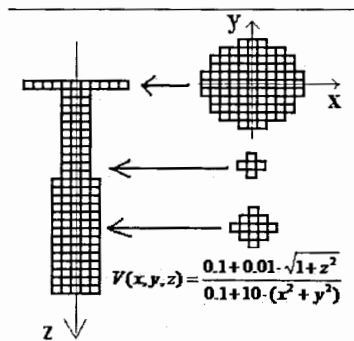


Рис. 8. Бутылеобразная форма нанопрофиля вытравленной поры вдоль трека для модельного распределения АЦТ в ячеистой структуре.

При описании кинетики травления кристаллических детекторов (например, рис. 8) предполагается существование вытравливаемых ячеек формы брусочков, расположенных вплотную друг к другу. Выбирается трехмерная ортогональная система координат и полагается, что время травления вдоль какого-либо направления равно размеру бруска в этом направлении, деленному на скорость травления в этой точке поля скоростей травления. Исследована кинетика геометрических форм продольных профилей и поперечных сечений вытравливаемых полостей для различных модельных пространственных распределений полей скоростей травления.

Когда диаметры вытравливаемых полостей значительно превышают поперечные размеры латентных треков, кинетика геометрии фронта травления описывается с помощью всего двух параметров – продольной скорости травления на оси трека  $V_l$  и собственной скорости травления необлученного материала  $V_B$ . Этот режим травления соответствует режиму счета отдельных зерен или блоков вдоль трека в ядерной фотоэмульсии.

Измерения радиальных скоростей травления внутри объема латентного трека доступны при электрохимическом травлении, что соответствует измерениям радиальных распределений оптических плотностей треков в ядерных фотоэмульсиях. В диссертации описывается применение обоих этих методов к исследованию треков ядер золота Au и ксенона Xe в полимерной пленке Макрофоль-КГ. Сначала рассматривалось продольное травление, для чего предполагалось, что продольная скорость травления пропорциональна вероятности появления локального отклика и ее зависимость от атомного номера  $Z$  и остаточного пробега  $R$  записывалась в виде:

$$V_l(Z, R) = V_B + C \cdot P_v^*(\xi(Z, R)) \quad (18) \quad \xi(Z, R) = \frac{REL(Z, R)_{\text{exp}}}{REL_0} \quad (19)$$

Из экспериментальной зависимости  $V_l(Z, R)$  по методу наименьших квадратов были найдены регистрационные параметры для восьми микронного слоя детектора,  $\nu=4$ ,  $m=1$ ,  $REL_0=11.12$  кэВ/мкм и коэффициент пропорциональности между скоростью и вероятностью отклика  $C=21.45$  мкм/час. С помощью теории Катца был оценен размер ЧМ  $a_0=7.5$  нм. Затем найденные параметры были использованы без каких-либо новых подгонок в нашем теоретическом подходе для расчета радиальных скоростей травления трека в поперечных сечениях треков ядер  $^{79}\text{Au}$ , длиной 127 и 8850 мкм. Как можно увидеть из рис.8-а получено хорошее согласие расчета с экспериментом для расстояний более 20 нм от оси трека ядра с остаточным пробегом 127 мкм (кривая 1 и экспериментальные точки 2) и для радиальных расстояний более 100 нм для  $R=8850$  мкм (кривая 3, и экспериментальные точки 4). Скорости травления на более близких к оси трека расстояниях оказалась ниже расчетных. Это указывает на то, что в таких узких каналах и при больших объемных плотностях АЦТ диффузия «не справляется» со своевременной подачей травящего раствора и со своевременным отводом продуктов реакции. Теория Р. Катца (Рис. 9-а)

дает меньшее согласие с экспериментом по сравнению с нашими расчетами (9-b), а расчеты в приближении линейного отклика еще больше расходятся с экспериментом, чем теория Р. Катца (9-с).

Далее в шестой главе делается оценка положений второй главы о смешанных облучениях и о температурной зависимости регистрационных параметров. С этой целью проанализирован взятый из литературы эксперимент с полимерной пленкой ПЭТФ, облученной ионами Au (7.6 МэВ/нукл.) и Хе 0.75 (МэВ/нукл.), и с использованием дополнительного  $\gamma$ -облучения от кобальта Со дозами экспозиций от 0.2 рад до 250 Мрад. Вытравливание треков проводилось при двух температурах 30 и 50 С.

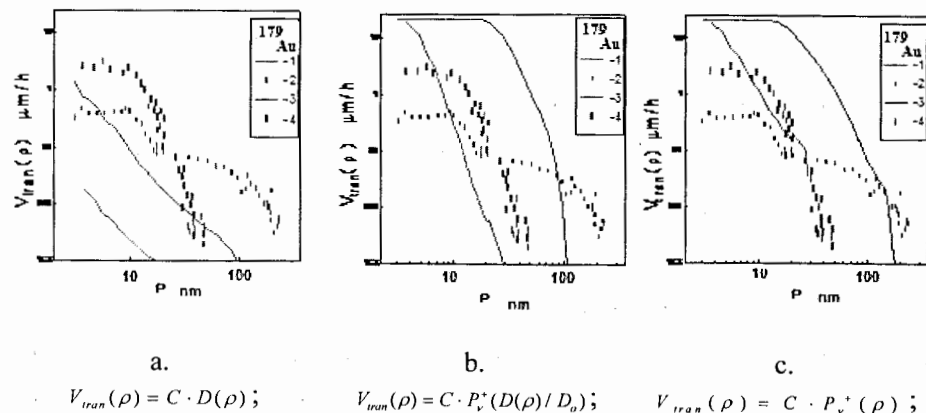


Рис. 9. Радиальные распределения радиальной скорости травления  $V_{\text{etch}}(\rho)$  для двух поперечных сечений трека иона золота Au в полимерном детекторе Makrofol KG с остаточными пробегами 127 мкм и 8850 мкм.

Кривые 1 представляют  $V_{\text{etch}}(\rho)$ , рассчитанные для трека иона Au с остаточным пробегом 127 мкм и кривые 3 для 8850 мкм. Заполненные прямоугольники 2 являются экспериментальными точками для сечения трека с остаточным пробегом 127 мкм, полые прямоугольники 4 принадлежат треку иона Au с остаточным сечением 8850 мкм.

Измерялись продольные скорости травления как функции четырех аргументов  $V_i(Z, T, E, D_i)$ . В нулевом приближении модели многих ударов

найлены регистрационные параметры ПЭТФ. С помощью найденных температурных зависимостей регистрационных параметров рассчитаны продольные скорости травления во всем диапазоне атомных номеров ядер и зависимость дискриминационной способности ПЭТФ от  $\gamma$ -дозы дополнительного облучения. Было обнаружено, что при дозах порядка  $D_\gamma \geq 100$  Мрад дискриминационная способность стремится к нулю,  $V_i$  не зависит от атомного номера ядра. Это означает, что сердцевина латентного трека после достаточно больших  $\gamma$ -доз переходит в состоянии отклика как одно целое.

Возможны также реализации найденных ПРЛО по объёму латентного трека без описания поля скоростей травления, например, для расчётов максимальных длин (МД) полостей, вытравливаемых вдоль латентных треков, находящихся внутри материала детектора. Травящий раствор поставляется во внутренние треки через расщелины материала или через вспомогательные полости треков других ядер, пролетевших через исследуемый латентный трек с поверхности материала после специального дополнительного облучения детектора. Метод расчета построен на введении величины, подобной сечению инактивации биоклетки.

Предполагалось, что треk будет вытравливаться только в том случае, если его сечение  $\sigma = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^\infty (P_v^*)^m \cdot \rho \cdot d\rho$ , будет больше некоторой критической величины  $\sigma_0$ . Отклик полагался  $\nu$ -ударным и  $m$ -мишенным. Из калибровочных МД треков пяти ядер группы железа найдены регистрационные параметры метеоритного оливина. В результате расчёта длин треков для 1372 наборов параметров  $a_0, \nu, m$  и  $(dE/ds)_0$  было показано, что для оливина эти параметры равны  $a_0 = 15 \text{ \AA}, \nu = 4, m = 1$  и  $(dE/ds)_0 = 9.61 \text{ кэВ/мкм}$ . При этом найдено, что  $\sigma_0 = 0.27 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$  и для

критической величины радиуса латентного трека получаем  $\sqrt{\sigma_0/\pi} = 92.59 \text{ \AA}$ , что равно трем диаметрам ЧМ.

На рис. 10 приведена рассчитанная с помощью этих параметров зависимость МД от атомного номера регистрируемого ядра  $Z/30$ .

Далее рассматриваются эксперименты с  $V_I$  и  $V_B$  для набора ядер в детекторе CR-39 с энергиями в области пика Брэгга. Эти исследования интересны тем, что в конце пробега ядра выбивают  $\delta$ -электроны небольших энергий, которые образуют ствол трека. По трекам разных ядер первого эксперимента в нулевом приближении выражения (18), т.е. без обрезания  $\delta$ -электронов, были найдены регистрационные параметры CR-39. В этом приближении оказалось, что значения регистрационных параметров сильно зависят от того, по трекам

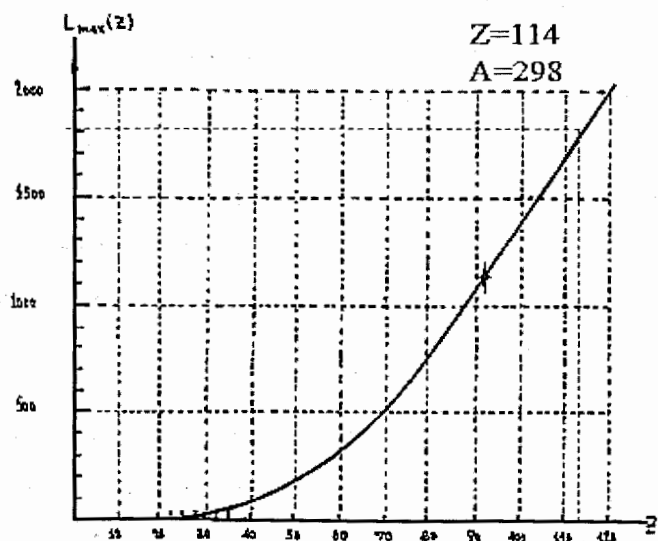


Рис.10. Расчетная зависимость  $L_{max}(Z)$  для треков в оливине без отжига какого ядра они были найдены /12/. Это указывает на необходимость учета дополнительных физических факторов, так как регистрационные

параметры должны зависеть только от свойств детектора и процесса визуализации. При математической обработке второго эксперимента /14/ уже предполагалось, что не все  $\delta$ -электроны принимают одинаковое участие в формировании латентного трека и в качестве еще одного регистрационного и подгоночного параметра использовалась энергия обрезания  $\omega_{cut}$ . Было найдено:  $\nu=1$ ;  $C=3.24$  мкм/час;  $REL_o=9.07$  кэВ/мкм;  $\omega_{cut}=50$  эВ. В этом приближении разброс значений регистрационных параметров оказался значительно меньше.

В конце главы предлагается описание процесса травления с помощью модели многих-ударов, где под ударом уже понимается атака молекулы травящего раствора на молекулы материала. Апробация метода проводится на экспериментальных зависимостях скоростей травления необлученного материала  $V_B$  от концентрации и температуры раствора. Показана важность исследований  $V_B(C,T)$  при предельно больших значениях концентраций раствора  $C$  и температур травления  $T$  для понимания процессов, протекающих внутри узких полостей вытравливаемых треков /13, 17/.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан теоретический подход к проблеме детектирования, общий как по отношению к различным материалам ЯТТД, так и по отношению к различным типам излучений.
2. Получены выражения для оценки предельно минимальных пространственно-временных интервалов  $(\Delta x_{min}, \Delta t_{min})$  взаимодействия движущихся ионизирующих частиц и ядер с веществом.
3. На основе единого для всего класса ЯТТД теоретического подхода получены вероятности появления локального отклика ЧМ  $P_v^*(\bar{r})$  после прохождения через детектор потока ионизирующих частиц, подвергающихся многократному рассеянию.

4. Исследованы свойства полученных вероятностей появления локального отклика. Эти вероятности, обобщены сначала на многокомпонентные потоки частиц, а затем на случай присутствия собственного фона.

5. Получены критерии, когда из вероятностей отклика ЧМ теории ЯТТД в одном частном случае получается вероятность проявления микрокристалла Флуктуационной теории К.С. Богомолова, а в другом соответствующая вероятность Единой Теории Р. Катца. При одновременном выполнении обоих критериев локальный отклик становится линейным.

6. Проведено обобщение понятия «локального отклика». Разработаны методы учета спонтанных переходов и температурных зависимостей.

7. Описан процесс формирования латентных треков потоками многократно рассеиваемых  $\delta$ -электронов.

8. Разработан новый метод решения рекуррентных уравнений, который позволяет находить коэффициенты разложения пространственно-угловых моментов распределений по полиномам Лежандра, зависящим от угла вылета электронов.

9. Разработан многоуровневый банк данных и создан цикл программ по его обслуживанию. Банк данных позволяет накапливать исходную и расчётную информацию для различных материалов ЯТТД. Все созданные в процессе проведения диссертационной работы программы работают с обращением к банку данных.

10. Решена задача восстановления ПРЛО вокруг точечного моноэнергетического источника с аксиальной симметрией для модели произвольной кратности ударов. Разработан цикл алгоритмов и программ для расчета ПРЛО вокруг такого источника. Решение этой задачи, возникшей при рассмотрении  $\delta$ -электронов, может быть также использовано при записи изображений в фотоэмульсии с помощью пучка электронов.

11. Предложен метод подбора оптимальной толщины фотоэмульсионного слоя, при котором достигается минимальное соотношение сигнал-шум для конкретной спектральной линии при работе на  $\beta$ -спектрографах. Оптимальная толщина отыскивается на основе расчета распределения проявленных зерен по глубине фотослоя с помощью метода расчета ПРЛО.

12. Приведены результаты расчёта различных параметров треков в фотоэмульсиях для ядер из всего диапазона периодической таблицы элементов, включая СТЭ, при этом рассматривались скорости ядер от пика Брэгга до релятивистских.

13. Обработан эксперимент с поиском СТЭ в разбавленных эмульсиях. Указан рабочий интервал радиальных расстояний, наиболее эффективный для идентификации СТЭ с  $Z=114$ , который может быть использован при проведении новых поисков СТЭ в космическом излучении.

14. Предложен метод вычитания фона, который был опробован на продольной плотности проявленных зерен однозарядных частиц. Этот метод может быть использован при проведении экспериментов с ЯТТД в присутствии однородного радиационного фона.

15. Разработан метод учета регрессии треков в фотоэмульсии для учета временных факторов при планировании длительных экспериментов, например, в нейтринных экспериментах или при изучении космического излучения.

16. Для автоматической идентификации релятивистских ядер с малыми атомными номерами  $Z=1\div 10$  разработаны методы расчета плотности блобов и разрывов треков ядер в фотоэмульсии. Этот метод может быть использован при изучении компоненты космического спектра с низкими атомными номерами.

17. Для идентификации ядер с низкими атомными номерами в конце пробега в ядерной фотоэмульсии испытан метод расчета ширины треков,

определяемой по координате внешнего края проявленного зерна.

18. Разработаны два метода расчёта кинетики и формы фронта травления треков в материалах ЯТГД, когда известны поля скоростей травления в сплошных и ячеистых средах. Исследовано влияние формы этих полей на кинетику и форму фронта травления. Найден критерий, с помощью которого можно оценивать степень этого влияния. Оба метода могут быть использованы для расчета размера и формы нанопор, получаемых при вытравливании треков.

19. Построен метод расчёта МД треков. На основе этого метода обработан калибровочный эксперимент для оливина и найдены регистрационные характеристики этого материала. Получена расчётная зависимость МД от атомного номера ядер во всем диапазоне таблицы элементов. Эта зависимость предназначена для исследования компоненты космического излучения во всем диапазоне атомных номеров, включая СТЭ.

20. Для травления, соответствующего режиму «счета зерен», когда измеряется отношение  $V_r/V_b$  показано, что переход к выражениям модели многих ударов от традиционно используемых ранее эмпирических формул Бентона значительно повышает точность описания зависимости этого отношения  $V_r/V_b$  от энергии или пробегов ионов, причем используемые при этом параметры имеют ясный физический смысл /5, 12, 14, 26/.

21. В нулевом приближении теории многих ударов предложен метод расчета зависимости скоростей травления вдоль трека от дозы дополнительного облучения детектора  $\gamma$ -квантами и температуры травления. Показано, что в сердцевине трека возможен фазовый переход одновременно во всей сердцевине трека, при котором исчезает дискриминационная способность детектора. Таким образом, модель многих ударов может также описать переход от прерывистого трека к непрерывному треку.

22. В диссертации параметры треков в фотоэмульсиях и в материалах, обрабатываемых травлением, рассчитаны на основе разработанной теории детектирования в широком диапазоне энергий ядер: от низких энергий в области пика Брэгга до релятивистских энергий в диапазоне атомных номеров таблицы Менделеева, включая СТЭ.

23. Указано значение исследований процесса травления необлученного материала вне рабочих диапазонов концентраций и температуры растворителя для понимания процессов, происходящих внутри узкого канала травления вдоль полости с нанометровым диаметром. Предложен комбинированный подход, включающий модель многих ударов к растворению материала детектора, скорости химических реакций и диффузии /13, 17/.

#### Цитируемая литература:

- Л1. Bohr N. On the Theory of the Decrease of Velocity of Moving Electrified Particles on Passing Through Matter. *Phil. Mag.*, 1913, v,25, p.10.
- Л2. Blau M., Altenburger K., 1922. *Uber einige Wirkungen von Strahlen II. Z. Physik*, 12, p. 315.
- Л3. Bogomolov K.S. La theorie fluctuatoire de l'action photographique des particules nucleares faiblement ionisantes. – In: *Ergebnisse der Int. Konferenz f. Wiss. Photographe. Hellwich Koln*, 1958, S.352-360.
- Л4. Katz R., Unified track theory. – In: *7th Intern. Colloq. On corpuscular Photography and visual solid detectors. Barcelona*, 1970, p. 1-29.
- Л5. Spencer L.V. Energy Dissipation by fast electrons: *Natl. Bur. Std. Monograph*, №1. – Washington, February 10, 1959, p. 1-70.
- Л6. Dracos M. Detecting Double Beta Decays Using Nuclear Emulsions. *arXiv:0805.3061* (May 2008).
- Л7. I. De Mitri. Results of dark matter searches with the MACRO experiment.

Proceeding of 4th International Workshop on the Identification of Dark Matter (IDM 2002), York, England, 2-6 Sep 2002. pp. 519-524.

Л8. Naka Tatsuhiro. Future Planning of Dark Matter Search with Nuclear Emulsion. Nagoya university. Presentation at IDM2008, 18-22 August, 2008, Stockholm,

**Основное содержание диссертации отражено в публикациях:**

1. Bogomolov C.S. and Ditlov V.A. The Determination of nuclear Charges by the method of Grain Counting Heavy Particles Tracks. Rad. Eff., 1977, 2, p.105-115 and in: Solid St. Nucl. Tr. Detectors. Pergamon Press, Ltd., 1978, p.511-521.
2. Ditlov V.A. Theory of spatial calculation of primary action of  $\delta$ -electrons in track detectors with account of multiple scattering. - In: Solid St. Nucl. Tr. Detectors. Pergamon Press, Ltd., 1980, p.131-141.
3. Ditlov V.A. "Local response of sensitive microregion in solid state track detectors as a visualization result of some part of its physical states." Nucl. Tracks Radiat. Meas., v.22. Nos 1-4, 1993. pp. 105-111.
4. Ditlov V.A., 1995. Calculated Tracks in Plastics and Crystals. Radiation Measurements, 25, (1-4), 89-94.
5. Ditlov V.A., Gatchegov A.U., Enge W. et al. The Radial Etching velocity for tracks in polymer film. Nucl, Tracks Radiat. Meas., 28, 1997, (1-6), 137-144.
6. Ditlov V.A., Egorov.O.K., Myltseva V.A. Theoretical Prediction of Latent Track Regression in Neutrino Experiment with nuclear emulsions. Nucl, Tracks Radiat. Meas., 28, (1-6), 1997, pp. 31-32.
7. Ditlov V.A., Registration efficiency of electrons for point sources and delta-electrons in volume of quick ion tracks in solids. In: *19<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Tracks in Solids. 31 August - 4 September, 1998.*

Besanson, France. Radiation Measurements, 31, (1-6), 1999, pp. 57-64.

8. Ditlov V.A. "The evolution of track theory throughout the history of the international solid state detector conferences". Radiation Measurements 34(2001) 19-26.
9. Ditlov V.A., Dubinina V.V., Krotkova V.I., Pozharova E.A., Smirnitsky V.A. Semi-automatic measurement of gap-blob sizes along tracks of relativistic ions for computer identification. In: 21<sup>st</sup> International Conference on Nuclear Tracks in Solids. New Delhi, India, October 21-25, 2002. Radiation measurements, V.36, nn.1-6, 2003, pp. 169-174.
10. Ditlov V.A., Zuravlev D.A., Kondratieva M.A., Romanovskaya K.M. Identification of short-range nuclei with low atomic numbers. In: 21<sup>st</sup> International Conference on Nuclear Tracks in Solids. New Delhi, India, October 21-25, 2002, Radiation measurements, V.36, nn.1-6, 2003, pp. 189-192.
11. Д.Ю.Акимов, В.М.Данилов, В.А. Дитлов и др. Развитие двухфазового ксенонового детектора темной материи. Ядерная физика, т.66, н.3, 2003, стр. 497-499.
12. M. Fromm, E.M. Awad and V. Ditlov. Many-hit model calculations for track etch rate in CR-39 SSNTD using confocal microscope data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 226, Issue 4, December 2004, pp. 565-574.
13. V.A. Ditlov. Formation model of bulk etching rate for polymer detectors. In: Journal: Radiation Measurements Volume:40 Issue : 2-6 [SPECIAL ISSUE] Date :Nov-2005 Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Tracks in Solids pp 240-248.
14. V.A. Ditlov, E.M. Awad, M. Fromm, D. Hermsdorf. The Bragg-peak studies in CR-39 SSNTD on the basis of many-hit model for track etch rates. In: Journal: Radiation Measurements Volume: 40, Issue : 2-6 [SPECIAL

- ISSUE] Date :Nov-2005 Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Tracks in Solids. pp 249-254.
15. V.A. Ditlov, V.V. Dubinina, V.I. Krotkova, et al. Study of number of black prongs in two generations of nuclear interactions in photoemulsion irradiated by 72 GeV <sup>22</sup>Ne. In: Journal: Radiation Measurements Volume: 40 Issue: 2-6 [SPECIAL ISSUE] Date :Nov-2005 Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Tracks in Solids. pp 448-459.
  16. В. А. Дитлов, В.В. Дубинина, Н.П. Егоренкова, В.И. Кроткова, Е.А. Пожарова, В.А. Смирнитский. Определение энергии возбуждения ядер по числу испарительных частиц. Ядерная Физика, т.68, 2005, стр. 1849-1851.
  17. V.A. Ditlov, E.M. Awad, D. Hermsdorf, M. Fromm. Interpretation of the bulk etching process in LR-115 detectors by the many-hit model. Rad. Meas. v.43, Suppl. 1, August 2008, pp.882-886.
  18. R. Brandt, V.A. Ditlov, K.K. Dwivedi, et. al. Studies with SSNTD and nuclear chemistry on nuclear reactions induced by relativistic heavy ions in thick targets: A review. Rad. Meas.,V. 43, Suppl. 1, August 2008, pp. 132-138.
  19. R. Brandt, V.A. Ditlov, K.K. Dwivedi, et al. Interactions of relativistic heavy ions in thick heavy element targets and some unresolved problems. ЭЧАЯ, Вып. 39, стр. 259 (2008) (NSR code: JOUR PPNUE 39 259), а также Препринт ОИЯИ Е1-2005-167.
  20. Богомолов К.С., Дитлов В.А. Обеспечение предельного отношения сигнал-шум при работе на бета-спектрографах. — В кн.: Светочувствительные материалы и процессы их обработки: Сборник научных трудов. Госниихимфотопроект, М., 1980, с.30-41.
  21. Дитлов В.А., Богомолов К.С. Распределение фотографической эффективности поглощенной дозы электронов по глубине эмульсионного слоя. - В кн.: III Всесоюзное совещание по микродозиметрии: Тез. докл., М., 1979, с.126.
  22. Дитлов В.А., Мыльцева В.А. «Изучение связи между действием ионизирующего излучения на фотоматериал и на другие энергочувствительные системы» В кн.: Отчет по теме 44/136/78-80/Госниихимфотопроект. рб N г.р. 80044569 Москва, 1980, 82 стр.
  23. Ditlov V.A., Bogomolov K.S. "The dependence of the spatial distribution of developed emulsion grains on defocusing angle of recording electron beam." In: Paper from the Int. Congr.of Photogr.Science. Cambridge, 1982, p.231-232.
  24. Абдуразаков А.А., Громов К.Я., Дитлов В.А., Караходжаев А., Холматов А.Х. В «Спектральная чувствительность фотоэмульсий тип-Р2 к электронам». кн. XXXIII Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., 1983, 1 стр.
  25. Дитлов В.А., Исламов Т.А., Холматов А.Х., Яшин С.П. «Выбор оптимальной толщины фотослоя при исследовании электронов внутренней конверсии». В кн.: XXXIII Совещание по ядерной спектрометрии и структуре атомного ядра Л., 1983, 1 стр.
  26. Дитлов В.А. «Разработать методы математического расчета воздействия ионизирующего излучения на галогенсеребряные и бессеребряные среды и организовать банк данных на ЭВМ.» В кн.: ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ 0-098828300191. ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ: N г.р.01828063926 Москва, 1984. 59 стр.
  27. Ditlov V.A., 1990. Upon physical ground of track formation in solid state nuclear track detectors. In: Proc. of International Workshop "Solid State Nuclear Detectors and their Applications". Dubna, pp. 8-12.
  28. Ditlov V.A., 1993. Theoretical Approach for Registration of Mixed Charged Particles Flux of Different Type by Solid State Detectors. In: Proceedings of II International Workshop" SSNTD and their Applications. Dubna. pp. 7-12.
  29. Ditlov V.A., Bradnova V.Y. "Method of Grain counting for identification of



- nuclear tracks in diluted photographic emulsion." In: Radiation Measurements. 24, (2), 1995, pp. 145-151.
30. Ditlov V.A., Pereygin V.P., Stetsenko S.G. Track Parameters of Multicharged Particles in Crystalline Detectors. In Proceedings of II International Workshop "SSNTD and their applications". Dubna.1993,pp.40-43.
31. Ditlov V.A. Upon a Role of delta-electrons and of Dissipated Energy Spatial Distributions in Ion Track Formation. In Proceedings: XVII Meeting of the EMU01 collaboration and perspectives of the emulsion technique in the experiments at the nuclotron relativistic nuclear beams. Dubna, Russia, May 18-20, 1999,(2000), JINR, pp.185-190.
32. Aleshin Yr. D., Ditlov V.A., Egorov O.K., Pozharova E.A., Shamanov V.V., Smirnitsky V.A.. "Properties and tests of FOMOS R-2T emulsion." In Proceedings: XVII Meeting of the EMU01 Collaboration and perspectives of the emulsion technique in the experiments at the nuclotron relativistic nuclear beams. Dubna, Russia, 2000, pp.213-216.
33. Возможности измерения треков в ядерной фотоэмульсии на микроскопе МАС-1 [Text] / Алешин Ю.Д., Дитлов В.А., Егоров О.К. и др. – В кн: Научная сессия МИФИ - 1999. Сборник научных трудов. - М., 1999. - Ч.4: Астрофизика. Космофизика. Ускорительная техника. Физика элементарных частиц. Ядерная физика. - С. 206-207.
34. V.A. Ditlov, D.U. Akimov, M.V. Danilov, et al. Three-dimensional reconstruction of event space coordinates in Xenon chamber. In book: The identification of Dark Matter. York, UK, 2-6 September 2002. Edited by Neil J.C. Spooner, Vitaly Kudryavtsev. Singapore-London-Hong Kong, pp. 383-389.
35. D.U. Akimov, V.F.Batayev, S.P. Borovlev, M.V. Danilov, V.A.Ditlov, et al. Liquid Xenon for wimp searches measurement with a two phase prototype. In book: The identification of Dark Matter. York, UK, 2-6 Sept. 2002. Edited by Neil Spooner, Vitaly Kudryabtsev. Singapore-London-Hong Kong, pp. 371-376.
36. V.A. Ditlov. Track Theory and Radiation Effects. Radiation Measurements 44, 2009, pp. 1100–1104.
37. V.A. Ditlov. Probability of local response at the axis of ion trace in Solid State Nuclear track detector. Abstracts of 24<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Tracks on Solids, ID 176, 2008, p.158.
38. E.M. Awad, V.A. Ditlov, M. Fromm, D. Hermsdorf. Description of the bulk etching rate of CR-39 by an extended Arrhenius-like law in increased intervalls of temperature and etchant concentration. Radiation Measurements 44, 2009, pp. 813-820.

Получено 6 мая 2010 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 11.05.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,12. Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ № 56983.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)