

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Δ-49

7-84-29

ДИТЛОВ УДК 539.1.074

Валерий Анатольевич

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА
ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена во Всесоюзном государственном научно-исследовательском и проектном институте химико-фотографической промышленности (Госнихимфотопроект), Москва

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **К.С. Богомолов**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор М.А. Кумахов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Г.М. Тер-Акопьян

Ведущая организация: Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита состоится "24" января 1985 года в 15 часов на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований 141980, г.Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "12" декабря 1984 г.

Учёный секретарь
Специализированного совета

В.В.Таран

Актуальность работ

Из многочисленного ассортимента материалов, разработанных для регистрации ионизирующих излучений, в последнее десятилетие оказалось возможным выделить широкий класс ядерных твердотельных трековых детекторов (ЯТТД). Объединение детекторов в этот класс является условным, так как материалы, входящие в него, порой обладают совершенно различными физико-химическими свойствами и природой чувствительности. Однако все материалы класса ЯТТД обладают рядом идентичных регистрационных свойств, вытекающих из существования общих закономерностей взаимодействия частиц с веществом различных сред, и из существования для этих материалов статистического подобия последовательности событий, приводящих к детектирующему эффекту. Настоящая работа была поставлена в 1972 году в связи с актуальностью проблемы поиска сверхтяжелых элементов из острова стабильности с $Z=114$. Предполагалось создание метода расчёта параметров треков релятивистских тяжелых ядер в фотоэмульсии для области больших атомных номеров и скоростей, для которой калибровочная информация отсутствовала. В процессе проведения работы выяснились новые аспекты актуальности этого исследования, вытекающие из необходимости развития общего теоретического подхода к описанию параметров треков ядер в различных материалах. Постановка задачи была обобщена на весь класс ЯТТД.

Цель и основные задачи диссертации

1. Теоретическое обоснование возможности единого рассмотрения всего класса ЯТТД и установление общих математических выражений для описания пространственных распределений локального отклика (ПРЛО) по объёму трека, образованного после прохождения быстрой заряженной частицы через ЯТТД.
2. Решение задач теории многократного рассеяния электронов с целью расчёта ПРЛО вокруг точечного моноэнергетического источника электронов с аксиальной симметрией, моделирующего выбивание δ -электронов быстрой частицей из атомов вещества ЯТТД.
3. Разработка метода и создание программы для ЭВМ с целью расчёта ПРЛО по объёму трека регистрируемого ядра в любом материале ЯТТД.
4. Разработка и создание банка данных на ЭВМ для хранения исходной и рассчитанной информации о различных ЯТТД, а также создание цикла программ по обслуживанию банка данных.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

5. Разработка и создание цикла программ, в которых ПРЛО используется для нахождения различных параметров треков ядер в материалах ЯГТД.

6. Для материалов, в которых параметры треков измеряются после травления, разработка метода, а также создание программы для расчёта на ЭВМ кинетики и формы фронта травления получаемых отверстий при произвольном аксиальносимметричном распределении активных центров травления.

7. Разработка и создание метода определения регистрационных параметров детектирующего материала из калибровки с помощью набора известных ядер с последующим расчётом параметров трека для всей периодической таблицы, включая остров стабильности сверхтяжелых элементов (СТЭ).

Научная новизна

В диссертации получены следующие основные результаты:

- сформулирована теория первичного воздействия потока электронов на твердотельный детектор. В её основе лежит использование дифференциальной функции распределения электронов теории многократного рассеяния для построения вероятностей появления локального отклика чувствительного микрообъема (ЧМ) произвольной геометрической формы в модели многих ударов;

- получены вероятности локального отклика ЧМ после прохождения через ЯГТД смешанного потока ионизирующих частиц. Выведены выражения для интегральных характеристик отклика ЯГТД, выделен случай, когда интегральные характеристики не зависят от многократного рассеяния частиц потока;

- обобщены на случай присутствия собственного фона выражения для вероятностей появления локального отклика ЧМ. На примере анализа известных экспериментальных данных по влиянию вуали фотоэмульсии на плотность трека частиц проверена правильность этих выражений. Дан способ учёта в выражениях для вероятностей отклика физических состояний ЧМ. Проанализирован эксперимент по регрессии треков в фотоэмульсии;

- разработан операторный метод решения рекуррентных соотношений для пространственно-угловых моментов дифференциальной функции пространственного распределения электронов, который позволяет найти ядра

интегрального преобразования функции Грина теории многократного рассеяния электронов. Результатом решения рекуррентных соотношений с помощью этого метода являются коэффициенты разложения пространственно-угловых моментов по полиномам Лежандра от угла вылета электронов из источника;

- проведена модификация метода моментов Спенсера применительно к восстановлению распределений по радиальной и продольной координатам в отдельности, а также распределений по обеим цилиндрическим координатам одновременно. При этом рассматривался новый тип источника электронов и новый, более широкий класс восстанавливаемых функций;

- разработана структура банка данных на ЭВМ с циклом обслуживающих программ для записи-поиска информации о различных ЯГТД. Основное назначение банка данных - хранение коэффициентов разложения пространственно-угловых моментов для дискретного набора энергетических точек спектра электронов различных ЯГТД;

- разработан цикл программ для расчёта на ЭВМ ПРЛО трех типов пространственных распределений - по радиальной координате, продольной и одновременно по обеим координатам;

- разработана программа для расчёта распределений ПРЛО по объему трека быстрых ядер в ЯГТД. Разработана цикл программ для расчёта набора параметров трека, таких как поперечное распределение оптической плотности трека в фотоэмульсии, ширина трека, радиальное распределение числа проявленных зерен в брусках, параллельных оси трека, сечения треков в ЯГТД, совпадающих с сечением инактивации в случае биотканей;

- проведена интерпретация треков в разбавленных фотоэмульсиях типа Р-2х8, исследованных с помощью метода счёта зерен в брусках, параллельных оси трека. Для этого метода приведены результаты расчёта радиальных распределений релятивистских ядер во всем диапазоне таблицы элементов, включая СТЭ;

- проведен расчёт поперечных распределений оптических плотностей релятивистских треков в фотоэмульсии тип Р-2 для ядер всей таблицы элементов, включая СТЭ. Приведены результаты расчёта оптических профилей треков нескольких ядер, среди которых профиль трека ядра с $Z = 114$;

- проведены расчёты и сравнение с экспериментом ширины концов треков в фотоэмульсии тип М для ядер с малыми атомными номерами;

- разработан метод и программа для расчёта кинетики и фронта

травления пластиков. С целью исследования влияния формы пространственных распределений активных центров травления (АЦГ) материала на кинетику и форму фронта травления проведен анализ результатов расчёта для различных модельных распределений АЦГ;

- разработан метод и программа на ЭВМ для определения регистрационных параметров материалов, обрабатываемых с помощью травления, из калибровки известными ядрами по максимальным длинам вытравливаемых треков (МД). Найдены регистрационные параметры метеоритного оливина из калибровки по МД и рассчитана зависимость МД от атомного номера регистрируемого ядра для всей таблицы элементов, включая СТЭ. Получено хорошее согласие прогноза с экспериментальным значением МД для ядра урана.

Автор защищает:

- теорию формирования пространственного распределения первичного отклика ЯТТД, которая позволяет:

а) получить в модели многих ударов математические выражения для вероятностей появления отклика чувствительного микрообъёма в заданной точке ЯТТД после воздействия на него потока электронов, испытывающих многократное рассеяние;

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, когда многократное рассеяние не влияет на интегральное показание ЯТТД и расчёт вероятностей появления отклика значительно упрощается;

д) обобщить выражения для вероятностей отклика на случай, когда присутствует собственный фон ЯТТД;

е) учитывать внутренние физические состояния чувствительных микрообъемов;

ж) производить расчёт пространственных распределений отклика с помощью методов теории многократного рассеяния;

- метод решения системы рекуррентных уравнений для пространственно-угловых моментов теории многократного рассеяния электронов, в котором отыскиваются коэффициенты разложения моментов по полиномам Лежандра от угла вылета электронов;

- метод восстановления распределений локального отклика вокруг

источника электронов с аксиальной симметрией для трёх видов распределений: продольного, радиального и распределения по обеим цилиндрическим координатам сразу; электроны излучаются под некоторым углом к оси симметрии;

- метод расчёта пространственных распределений локального отклика по объёму трека ядра в ЯТТД;

- положение, в котором формулируется принцип расчёта кинетики и геометрической формы фронта травления трека с учетом пространственного распределения активных центров травления в ЯТТД;

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

- метод определения регистрационных параметров травимых ЯТТД, основанный на калибровке по максимальным длинам (МД) вытравливаемых треков известных ядер;

- всю совокупность программ для ЭВМ, реализующую перечисленные выше методы расчёта, а также программы, использующие пространственные распределения локального отклика (ПРЛО) для расчёта различных параметров треков;

- все представленные в диссертации результаты расчётов.

Научное и практическое значение работы

Предлагаемый теоретический подход позволяет рассчитывать ПРЛО в треке ионизирующей частицы для всего класса ЯТТД / 4 /, который имеет широкую быстро развивающуюся область применения. В неё входят ядерная физика, биология, медицина, геология, археология, контроль за окружающей средой, промышленность и т.д.

Проведен расчёт ПРЛО и ряда параметров треков в различных материалах. Для метода счёта зерен в разбавленных фотоэмульсиях проведен расчёт числа проявленных зерен в брусках для разных расстояний от оси трека релятивистских ядер во всём диапазоне атомных номеров, включая СТЭ. С целью апробации этого метода проведена интерпретация четырех треков в разбавленной эмульсии тип Р-2х8 для ядер космического излучения / I /. Продемонстрированы возможности этого метода и подтверждена перспективность постановки дальнейших экспериментов с разбавленными фотоэмульсиями для поиска СТЭ. Проведен расчёт поперечных распределений оптических плотностей треков релятивистских ядер в фотоматериале тип Р-2 и найдены зависимости ширины трека, задаваемой опреде-

ленным значением оптической плотности от атомного номера ядра. Найдены профили почернения треков для нескольких ядер, среди которых СТЭ с $Z = 114$. Рассчитаны зависимости от атомного номера ширины трека нерелятивистских ядер с малыми Z в фотоэмульсии тип М. Найдены регистрационные параметры метеоритного оливина и зависимости МД от величины атомного номера $Z / 11$ /. Эти результаты расчётов могут быть использованы для идентификации треков ядер в экспериментах по поиску СТЭ и в экспериментах, проводимых с целью исследования зарядового спектра космического излучения во всем диапазоне Z .

В диссертации рассмотрен ряд вопросов, относящихся к исследованию связи показаний ЯТТД с механизмом чувствительности. Развиваемый подход учитывает стохастичность этой связи, и получаемые в нём методы расчёта могут быть использованы для исследования природы чувствительности конкретного ЯТТД / 9 / .

Создание метода расчёта ПРЛО по объёму трека частицы включает в себя в качестве необходимого промежуточного этапа решение задач теории многократного рассеяния электронов с новым источником электронов. Разработан метод и составлены программы для расчёта ПРЛО вокруг такого источника, что само по себе имеет принципиальное значение. Так, например, для теории записи фотографических изображений с помощью электронного луча этот метод позволяет рассчитать любые характеристики получаемых изображений / 3,6-8 / .

Разработан метод, который позволяет для каждого значения энергии электронов решать рекуррентные системы уравнений для пространственно-угловых моментов распределений безотносительно к углу вылета. В результате для расчёта ПРЛО любого поперечного сечения трека любого ядра для конкретного детектора используется один и тот же набор коэффициентов разложения моментов. Этот метод может быть использован также в областях, не связанных с теорией детектирования / 5,10 / .

Разработан банк данных для хранения исходной и полученной в результате расчёта информации о ЯТТД, который, кроме основного назначения, может быть использован для систематизации и накопления информации о различных материалах ЯТТД / 4 / .

Рассмотрен актуальный для микродозиметрии и теории детектирования вопрос о существовании области адекватности связи доза-эффект. Найдены критерии появления адекватности связи доза-эффект, с помощью которого проанализировано около тридцати различных ЯТТД и показано, что адекватность имеет место для одной трети из них, да и то только

при выполнении определенных условий. Следовательно, подходы к проблемам детектирования, основанные на предположении существования адекватности связи доза-эффект, в большинстве случаев неравномерны /2,4/.

Предлагаемые в диссертации методы расчёта полностью реализованы в цикле программ на ЭМ, распечатки которых приведены в приложении. Язык программирования - фортран-4. Программы, разработанные для исследования влияния пространственных распределений АЦГ на кинетику и форму фронта травления могут быть использованы также в технических целях, например, для расчёта микрофилтров, в которых диаметры отверстий треков не превышают пробеги δ -электронов, формирующих эти распределения АЦГ. Программы для определения регистрационных параметров детекторов по МД треков могут быть применены к любому материалу ЯТТД, обрабатываемому с помощью процесса травления / 11 / . Программа, предназначенная для расчёта сечений активации вытравливаемых треков, может быть использована для расчёта сечений инактивации биоткани, поэтому предлагаемый в диссертации подход и программы можно использовать для расчёта коэффициентов относительной биологической эффективности излучений (ОБЭ).

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на Сессиях ОЛФ АН СССР (ИГЭФ, Москва, X, 1979 г.; ФИАН, апрель, 1983г.), на IX и X Международных конференциях по ЯТТД (Мюнхен, ФРГ, 1976 г., Лион, Франция, 1979 г.), а также были 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, 1979 г.), на III и IV Всесоюзных конференциях по микродозиметрии (Москва, 1979 г.; Усть-Нарва, 1983 г.), на Всесоюзной конференции "Фотографические процессы на основе галогенидов серебра" (Черноголовка, 1983 г.) и на XXXIII Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Москва, 1983 г.). Всего опубликовано 11 работ.

Достоверность результатов работы

В диссертации используются достижения в теории детектирования 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 совпадением 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 объёму трека подтверждена совпадением расчётных профилей треков ядер с экспериментальными в фотоэмульсии. Теоретическая зависимость МД треков оливина от атомного номера регистрируемого ядра, полученная после калибровки ядрами с атомными номерами в диапазоне $Z = 24-36$, дала хорошее согласие для урана $Z = 92$: экспериментальное значение $L_{max} = 1100-1200$ мкм, а расчётное $L_{max} = 1160$ мкм.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка цитированной литературы из 193 названий. Основное содержание диссертации изложено на 150 страницах, имеется 20 таблиц и 50 рисунков.

Содержание диссертации

Во введении кратко 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 ЯТД. Треки быстрых ядер в материалах ЯТД имеют сложную ветвящуюся структуру. Первичные взаимодействия ядер с атомами среды приводят к выбиванию из атомных оболочек потоков δ -элект-

ронов, пробеги которых могут достигать сотен микрон и более. Дельта-электроны первого поколения способны вызывать генерацию потоков

δ -электронов второго поколения, а те, в свою очередь, потоки следующих поколений и т.д. При прохождении через среду детектора

δ -электроны испытывают сильное многократное рассеяние, из-за чего их траектории искривляются и перепутываются. В результате воздействия на детектор общего потока электронов в нём появляется некоторое пространственное распределение локальных откликов, каждый из которых заключен в малом микрообъеме, диаметра порядка микрона и меньше. Размер этого микрообъема является характеристической величиной для конкретного материала и поэтому можно считать, что все ЯТД содержат множество чувствительных микрообъемов определенного размера, жестко закрепленных и равномерно распределенных по всему объему детектора. Пространственные распределения локального отклика формируются в основном δ -электронами с пробегами, превосходящими размер ЧМ, в то время как непосредственное появление локального отклика вызывается с большей вероятностью δ -электронами, пробеги которых порядка размеров ЧМ и меньше. Именно события, приводящие к образованию таких

δ -электронов, являются эффективными по отношению к появлению локального отклика. Для всех материалов ЯТД применима многоударная модель отклика, в которой полагается, что для появления локального отклика необходимо количество эффективных событий в чувствительной области, превосходящее некоторое пороговое число V , (модель V -ударов). Несколько ЧМ могут входить в одну регистрирующую единицу тоже малых размеров. В этом случае нужно говорить о локальном отклике микроэлемента, который появляется только после откликов m ЧМ, входящих в его структуру, (модель m -мишеней). В обзоре проведена аналогия в свойствах между различными материалами ЯТД. Может существовать, например, качественное подобие температурной или временной зависимости характеристик треков в различных материалах ЯТД.

На основе анализа теории детектирования и теории многократного рассеяния установлено, что в литературе отсутствовали работы, в которых:

- строился бы единый теоретический подход к рассмотрению различных материалов ЯТД на основе 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 V -ударов с учётом многократного рассеяния электронов;

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

- разрабатывались бы алгоритмы и программы для расчёта ПРЛО в треке быстрого многозарядного ядра, применимые для всего класса ЯТТД;

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

Восполнение указанных пробелов в исследованиях теории детектирования явилось причиной постановки настоящей диссертационной работы. Общие черты представленного в первой главе обзора с вытекающими из него выводами о 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.Пушино).

Во второй главе строится теория регистрации потоков заряженных частиц с помощью ЯТТД. Сначала рассматриваются только потоки электронов и выводятся выражения для вероятностей появления отклика $P_v^*(\vec{r})$ в ЧМ с координатой \vec{r} . Вывод производится в три этапа. Сначала записываются вероятности появления отклика при условии попадания в ЧМ количества q электронов с заданным набором остаточных пробегов S_i , направлений \vec{R}_i и точек входа в ЧМ \vec{r}_i , затем с помощью дифференциальной функции распределения электронов $f(\vec{r}, \vec{r}, s)$ в пространстве (\vec{r}, \vec{r}, s) , записывается распределение электронов на поверхности ЧМ и с помощью этой же функции записывается вероятность прохождения через поверхность ЧМ q электронов. Далее проводится суммирование по формуле Байеса вероятностей всех перечисленных событий, что для частных случаев $v = 1, 2, 3$ дает:

$$P_1^*(\vec{r}) = 1 - e^{-N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (1)$$

$$P_2^*(\vec{r}) = 1 - (1 + N \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle) \cdot e^{-N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (2)$$

$$P_3^*(\vec{r}) = 1 - (1 + N \langle \xi \cdot e^{-\xi} \rangle + \frac{N \langle \xi^2 e^{-\xi} \rangle + N^2 \langle \xi e^{-\xi} \rangle^2}{2}) \cdot e^{-N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle} \quad (3)$$

Здесь угловые скобки обозначают интеграл:

$$\langle \dots \dots \rangle = \int d\vec{r} \int_{(\vec{r}, \vec{n}) < 0} (\vec{r}, \vec{n}) dQ f(\vec{r}, \vec{r}, s) (\dots \dots) ds \quad (4)$$

\vec{n} - нормаль к поверхности ЧМ Q .

Далее в диссертации анализируются свойства полученных выражений для $P_v^*(\vec{r})$. Например, если принять, что число эффективных событий $\xi(s)$ задается отношением энергетических потерь электрона ΔE внутри отдельного ЧМ к характеристической величине энергетической чувствительности ΔE_0 для этого ЧМ, то, как показано в рассматриваемой главе, можно получить условие, при выполнении которого для одноударной модели отклика имеет место адекватность связи доза-эффект:

$$\xi(s) = \frac{\Delta E(s)}{\Delta E_0} \ll 1 \quad (5)$$

В таблице I приведен ряд материалов ЯТТД, упорядоченных по величине ξ_{min} в релятивистском минимуме ионизации электронов. Как следует из таблицы, в самом благоприятном случае для выполнения адекватности связи доза-эффект $\xi_{min} < 0.1$ имеет место всего для двух третьей представленных материалов, а для энергий электрона $E=5.4$ кэВ адекватность имеет место только для одной четвертой части материалов, да и то лишь при выполнении дополнительных условий, т.к. эти материалы описываются многоударной моделью отклика. В третьей 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:

$$\xi(s) = (dE/ds) / (dE/ds)_0 \quad (6)$$

Подробное содержание этой части главы было изложено в работе /4/.

В диссертации показано, что выражения (1-3) справедливы для любых потоков ионизирующих частиц, а не только для электронов. В каждом конкретном случае должна использоваться $f(\vec{r}, \vec{r}, s)$ рассматриваемого типа частиц. Вероятности $P_v^*(\vec{r})$ относятся к неаддитивным функциям. С помощью выражений (1-3) они выражены через аддитивные $\langle \xi^k e^{-\xi} \rangle$. В диссертации показано, что выражения (1-3) будут справедливыми для смешанных потоков частиц, если в них произвести замену: $N \langle \xi^k e^{-\xi} \rangle \rightarrow \sum_i N_i \langle \xi_i^k e^{-\xi_i} \rangle$, где N_i и $\langle \dots \rangle_i$ относятся к i -ому компоненту смешанного потока. Далее показывается справедливость следующего утверждения, аналогичного известной теореме Фано для γ -излу-

чения: ПРИ ИЗОТРОПНОМ ИСТОЧНИКЕ ЧАСТИЦ, РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОМ ПО ВСЕМУ ПРОСТРАНСТВУ ДЕТЕКТОРА, ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПОКАЗАНИЕ ДЕТЕКТОРА НЕ ЗАВИСИТ ОТ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ, ВКЛЮЧАЯ ЭЛЕКТРОНЫ, ЕСЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МИКРООБЪЕМЫ ИМЕЮТ СФЕРИЧЕСКУЮ ФОРМУ С ДИАМЕТРОМ, НАМНОГО МЕНЬШЕМ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНОГО ПРОБЕГА ЧАСТИЦ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ. Эта теорема значительно упрощает расчёты показаний детектора. Далее в главе рассматривается возможность дальнейшего обобщения выражений для $P_v^+(\vec{r})$ 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 ξ должна зависеть от некоторого вектора состояния \vec{x} , компонентами которого 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. Например, возможны спонтанные 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, 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:

$$\xi = \xi_{\text{ср}} e^{-t/\tau} + \xi_0 \quad (7)$$

Первый член относится к эффективным событиям, вызываемым ионизирующей частицей, а второй - добавка за счёт спонтанного перехода ЧМ в состояние отклика. Появление отклика нужно рассматривать не только как результат воздействия на ЧМ ионизирующей частицы, но и как результат процесса визуализации. Поэтому при визуализации через время t после экспозиции $P_{v,t}^+(\vec{r}, t)$ будет такой, как будто частица произвела в $e^{-t/\tau}$ раз меньше эффективных событий, чем по отношению к процессу визуализации сразу же после экспозиции. В диссертации показано, что в присутствии собственного фона вероятности $P_{v,t}^+(\vec{r}, t)$ описываются выражениями:

Таблица I. Упорядочение ЯТД по количеству эффективных актов ионизации $\xi_{\text{r min}}$, производимых в ЧМ отдельным релятивистским электроном / 4 /

№	Детекторы	$\xi_{\text{r min}} = \frac{\Delta E}{\Delta E_0}$	$\xi_{5.7 \times 10^6} = \frac{\Delta E}{\Delta E_0}$	$\left(\frac{dE}{ds}\right)_0$ мэВ/см	$\frac{1}{\rho(ds)}$ мэВ см ² /г
1	Стекло	750	1700	0.0588	0.0267
2	Термолюминесцентный дозиметр LiF	23.4	500	0.196	0.0849
3	Цитидин	11.0	230	0.392	0.195
4	Кристаллы NaI(Tl)	7.20	129	8.25	2.18
5	Кодак NTB-2	3.20	57.0	1.54	0.399
6	A-Аланин	0.81	18.6	2.81	2.81
7	Дозиметр Фрике	0.538	12.2	7.05	4.03
8	Минеральное масло на жидком спандилляторе с PPO	0.453	13.3	3.72	4.37
9	Ильфорд K-5	0.510	9.00	9.80	4.99
10	Ильфорд G-5	0.221	3.90	22.6	5.93
11	Нитрат целлюлозы	0.118	2.31	17.0	17.0
12	Воздушный дозиметр Фрике	0.110	2.46	35.2	17.7
13	Твёрдая бактериофага T-I	0.068	1.55	29.2	29.2
14	Твёрдая бактериофага X-174	0.064	1.46	31.2	31.2
15	β -галактозидаз	0.050	1.13	60.0	39.9
16	Лексан поликарбонат	0.050	1.10	39.6	39.6
17	Твёрдая бактериофага T*-I	0.050	1.10	40.2	40.2
18	Ильфорд K-2	0.0258	0.455	195	51.2
19	Трипсин	0.0148	0.340	135	135
20	Ильфорд K-I	0.00136	0.024	3680	976
21	Ильфорд K-0	0.0007	0.013	6740	1620
22	Дрожжевые клетки	0.00048	0.011	4140	4140
23	Бактериальные споры O ₂	0.00031	0.0074	6360	6360
24	Слюда	0.00025	0.0059	2460	749
25	Бактериальные споры N ₂	0.00025	0.0057	7920	7920
26	Бактериальные споры H ₂ S	0.000136	0.0031	14600	14600

$$P_{1, \xi_0}^+(\vec{r}) = 1 - e^{-(\xi_0 + N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)}$$

$$P_{2, \xi_0}^+(\vec{r}) = 1 - \{1 + \xi_0 + N \langle \xi e^{-\xi} \rangle\} \cdot e^{-(\xi_0 + N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)} \quad (8)$$

$$P_{3, \xi_0}^+(\vec{r}) = 1 - \left\{1 + \xi_0 + N \langle \xi e^{-\xi} \rangle + \frac{1}{2} [N \langle \xi^2 e^{-\xi} \rangle + (\xi_0 + N \langle \xi e^{-\xi} \rangle)^2]\right\} \cdot e^{-(\xi_0 + N \langle 1 - e^{-\xi} \rangle)} \quad (9)$$

$$(10)$$

В диссертации проводится обработка литературных экспериментальных данных по регрессии треков и влияния вуали на плотность треков в ядерной эмульсии. Величина \bar{T} в треках \bar{W} -мезонов оказалась равной 150 суткам. Эксперимент по вуали подтвердил правильность выражения для $P_{v, \xi_0}^+(\vec{r})$. Эта часть диссертации опубликована в / 9 /.

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

$$-\frac{\partial f(\vec{x}, \vec{z}, s)}{\partial s} + \vec{\kappa} \nabla f(\vec{x}, \vec{z}, s) = N \int [f(\vec{x}, \vec{z}, s) f(\vec{x}', \vec{z}, s)] \delta(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x}' \quad (II)$$

Здесь N - число электронов в cm^3 среды; $\delta(\vec{x} - \vec{x}')$ - дифференциальное сечение рассеяния электронов из направления $\vec{\kappa}'$ в направлении $\vec{\kappa}$.

С помощью уравнения (II) можно получить рекуррентные соотношения между пространственно-угловыми моментами отсчитываемых распределений, найти из соотношений моменты, а затем по ним восстановить отсчитываемые распределения. Теория детектирования накладывает на эту схему ряд существенных особенностей. Во-первых, обычные методы решения рекуррентных уравнений в теории детектирования трудно применимы, так как требуют нереально большого количества машинного времени для расчёта ПРЛО в объеме 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 отсчитываются не сами пространственно-угловые моменты распределений, а их разложения по полиномам Лежандра от угла вылета электронов θ_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. Рекуррентные соотношения для моментов могут быть представлены в операторном виде:

$$f_{e, m}^{n, p, q} = \hat{G}_1^k f_{e, m}^{n, p, q + k + 1} + \hat{G}_2^k f_{e, m}^{n, p, q + k + 2} \quad (I2)$$

Операторы \hat{G}_1^k и \hat{G}_2^{k+1} связаны между собой соотношениями:

$$\hat{G}_1^{k+1} = \hat{G}_1^k \cdot \hat{G}_2^k + \hat{G}_2^k; \quad \hat{G}_2^{k+1} = \hat{G}_1^k \hat{G}_2^k \quad (I3)$$

В диссертации исследуются свойства этих операторов и на основе этих свойств с помощью соотношений (I3) строится алгоритм поиска коэффициентов $B_{e, m, e'}^{n, p, q}$ для разложения по полиномам Лежандра от угла вылета электронов θ_0 :

$$f_{e, m}^{n, p, q}(\theta_0) = \sum_{e'} B_{e, m, e'}^{n, p, q} P_{e'}^0(\cos \theta_0) \quad (I4)$$

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

$$I(\vec{x}, \vec{z}, \rho, s) = \delta(z) \frac{1}{2\pi\rho} \delta(\rho) \frac{1}{2\pi} \delta(\cos \theta_0 - \cos \theta) \cdot \delta(\rho, s) \quad (I5)$$

В основе метода восстановления распределений использован метод моментов Спенсера / I, 2, 10 /, который в соответствии с перечисленными особенностями, был подвергнут модификации практически на всех звеньях решения. Для трехмерных распределений сначала отсчитывались распределения по глубине величин радиальных моментов $\langle \rho^p \xi^k e^{-\xi} \rangle$, а затем по ним восстанавливались радиальные распределения при заданных значениях координаты z .

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

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

2. Коэффициенты разложения $B_{e, m, e'}^{n, p, q}$ должны храниться на долговре-

менном носителе памяти ЭВМ для обеспечения возможности многократного их использования.

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

Для того, чтобы эти требования были удовлетворены, на магнитном носителе памяти ЭВМ специально разработан и создан банк данных для ЯТТД. В начале четвертой главы дается обоснование и описание структуры банка данных. В соответствии с последовательностью перечисленных выше признаков информация записывается и отыскивается по четырем индексным ключам - $NDET$, $NENO$, $NFUN$ и $NVAR$ (рис.1).

Структура банка данных

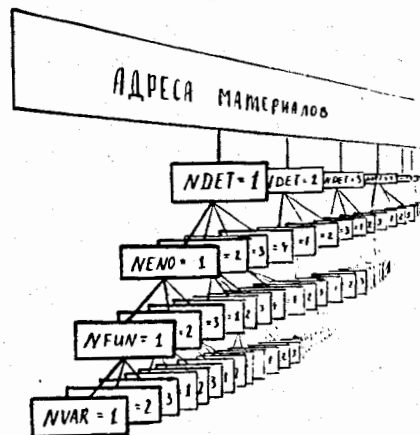


Рис.1.

Для обслуживания банка данных разработан цикл из трех подпрограмм. Далее в главе дается описание алгоритма и программы "STAR" для расчёта коэффициентов разложения $B_{e,m,e}$, а также алгоритмы подпрограмм "SPENCZ", "SPENCK" и "POTZR", которые предназначены для расчёта распределений по глубине Z , радиальной координате ρ и по обеим координатам одновременно.

На рис.2 приведены изображения эквиденсит вокруг точечного источника для трёх углов вылета электронов. Величина $\langle 1 - e^{-f} \rangle$ на каждой новой эквиденсите при движении в направлении от источника уменьшается вдвое.

Поверхности эквиденсит величин $\langle 1 - e^{-f} \rangle$ в фотоэмульсии тип Р-2 вокруг источника электронов с $E_0 = 100$ кэВ

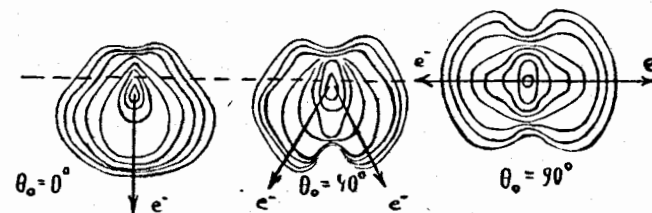


Рис.2.

Вид рассчитываемых распределений задается с помощью входных параметров в подпрограмме-функции "AP", что позволяет рассматривать широкий класс функций - от распределений поглощенной энергии и пространственного распределения $f(z, \rho)$ до распределений величин $\langle 1 - e^{-f} \rangle$. На рис.3 приведены результаты расчёта распределений по глубине фотографической эффективности поглощенной дозы энергии, которые задавались как отношения двух отдельно рассчитанных распределений по глубине плоского слоя - распределение проявленных зерен к распределению поглощенной дозы / 2 /. Поток электронов принимался излучающимся под прямым углом к плоскости $z = 0$ в положительном направлении оси oz . Расчёт произведен для пяти значений энергий.

Распределение фотографической эффективности поглощенной энергетической дозы потока электронов по глубине плоского слоя

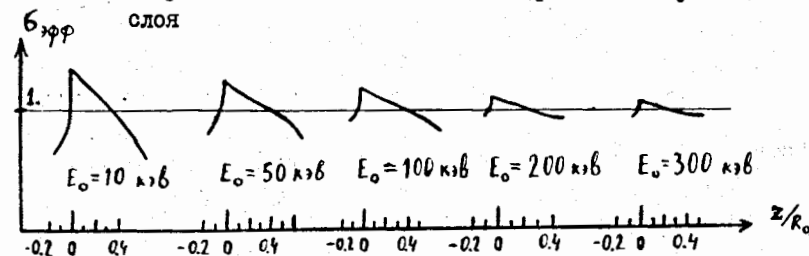


Рис.3.

Как следует из рисунка, при малых энергиях электронов эффективность дозы вблизи источника со стороны положительных значений максимальна, а затем резко уменьшается. При увеличении начальной энергии электронов различие эффективности постепенно сглаживается и при $E_0 = 300$ кэВ почти полностью исчезает. Такая трансформация кривых отображает постепенный переход от неадекватности к адекватности связи доза-эффект, что находится в соответствии с найденным ранее критерием (5). По отношению к проблеме описания треков ядер этот результат ясно показывает, что вблизи оси трека, где наибольший вклад дают δ -электроны малых энергий, неадекватность связи доза-эффект будет максимальной. В конце четвертой главы даются результаты расчета спектральной чувствительности эмульсии тип Р-2 различной толщины к потокам электронов, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными / 5,7,8 /.

В пятой главе приводится метод, алгоритмы, программы и результаты расчета для ПРЛО треков ядер в ЯГТД. Для нахождения ПРЛО необходимо проинтегрировать по спектру δ -электронов распределения величин $\langle \gamma^* c^{-1} \rangle$ моноэнергетического источника с учетом зависимости угла вылета от энергии δ -электронов и скорости регистрируемого ядра. Необходимо преодолеть трудность, которая связана с тем, что пределы интегрирования могут меняться в зависимости от скорости ядра в большом интервале значений, а для программ расчета должны использоваться предварительно найденные коэффициенты $B_{c,m,\rho}^*$ для дискретного набора энергий, записанные в банк данных. В диссертации дается метод вычисления этого интеграла, в котором используется линейная интерполяция величин $\langle \gamma^* c^{-1} \rangle$ в недостающих точках интервала интегрирования, и ряд других приемов, позволяющих достичь большой точности интегрирования. Этот метод реализован в подпрограмме "ACTEL". В главе приводятся 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 $Z = II4$. Также приводятся профили треков ряда ядер.

На рис.4 приведены эквиденситы треков для $Z = II4$, ядра тория $Z = 90$ и ядра железа $Z = 26$. Расчетный профиль трека ядра железа дает полное совпадение с экспериментальным.

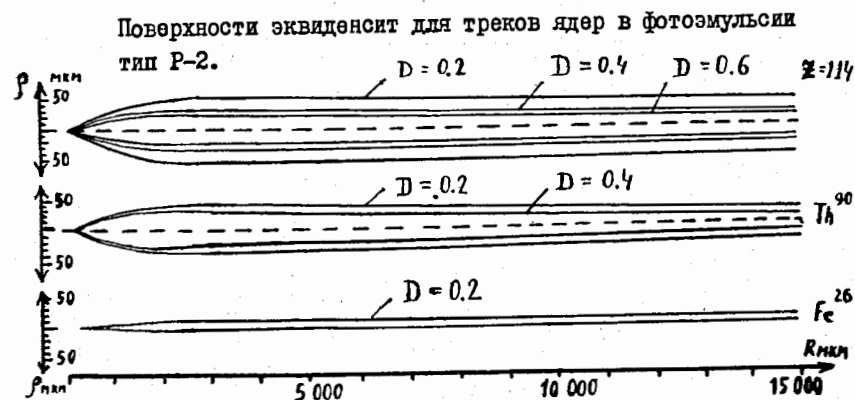


Рис.4.

Для ЯГТД, обрабатываемых с помощью травления, в диссертации дается метод расчета кинетики и формы фронта травления треков для случая, когда необходимо учитывать пространственное распределение активных центров травления (АЦТ). На основе рассмотрения модельных распределений показана чувствительность кинетики и формы травления к виду распределений центров травления. В конце пятой главы приводится метод обработки калибровочного эксперимента по МД треков с целью определения регистрационных параметров материала. Этот метод построен на предположении, что трек будет вытравливаться только в том случае, если его сечение $\sigma = 2\pi \int_0^{\rho} (R^2/\rho) \rho d\rho$, эквивалентное сечению инактивации биотканей, будет меньше некоторой критической величины σ_c . Из калибровочных МД треков пяти ядер группы железа найдены регистрационные параметры метеоритного оливина. В результате расчета длин треков для 1372 наборов параметров a_0, ν, 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 оказалось, что $\sigma_c = 0.27 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$, что дает для критической величины радиуса трека $\sqrt{\sigma_c/\pi} = 92.59 \text{ \AA}$.

На рис.5 приведена рассчитанная с помощью этих параметров зависимость МД от атомного номера регистрируемого ядра $Z / II /$.

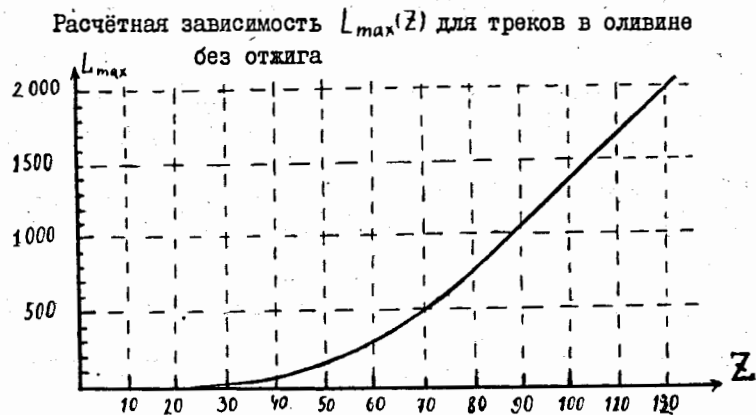


Рис. 5.

ВЫВОДЫ

1. В диссертации на основании единого для всего класса ЯТД теоретического подхода получены вероятности появления локального отклика ЧМ после прохождения через детектор потока ионизирующих частиц, подвергающихся многократному рассеянию. Эти вероятности, являющиеся функциями пространственной координаты чувствительного микрообъема, выведены для модели многоударного отклика и обобщены сначала на многокомпонентные потоки частиц, а затем на случай присутствия собственного фона детектора. Также предлагается метод учёта возможности исчезновения локального отклика ЧМ после экспозиции.

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

3. Полностью решена задача с восстановлением ПРЛО вокруг точечного моноэнергетического источника с аксиальной симметрией для модели произвольной кратности ударов. Разработан цикл алгоритмов и программ для расчёта ПРЛО вокруг такого источника.

4. Разработан банк данных и созданы программы по его обслуживанию. Банк данных позволяет накапливать исходную и расчётную информацию для различных материалов ЯТД. Структура банка данных позволяет производить запись-считывание с минимальными затратами времени. Все созданные в процессе проведения диссертационной работы программы работают с обращением к банку данных.

5. Разработан метод расчёта ПРЛО по объему треков быстрых тяжелых ядер, справедливый для всего класса ЯТД. На основе этого метода разработаны алгоритмы и программы для расчёта различных параметров треков ядер в фотоэмульсии. Программы для расчёта ПРЛО включают подпрограммы для нахождения связи энергия-пробег, а также энергетические потери-пробег ядра. Приведены результаты расчёта различных параметров треков в фотоэмульсиях для ядер во всем диапазоне периодической таблицы элементов.

6. Разработан метод расчёта кинетики и геометрической формы фронта травления треков в материалах ЯТД, подвергаемых процессу травления, для случая, когда есть пространственное распределение активных центров травления. Исследовано влияние этих распределений на кинетику и форму фронта травления.

7. Разработан метод расчёта МД треков. На основе этого метода разработан алгоритм и программа для определения регистрационных параметров ЯТД из МД треков известных ядер. Обработан калибровочный эксперимент для оливина и найдены регистрационные характеристики этого материала. Получена расчётная зависимость МД от атомного номера ядер во всем диапазоне таблицы элементов. Результаты расчёта записаны в банк данных и могут быть использованы для обработки калибровки при разных температурах отжига оливина.

8. Рассчитаны различные параметры треков СТЭ в фотоэмульсиях и оливине. Разработанные алгоритмы и программы применимы для расчёта параметров СТЭ в любом материале ЯТД.

9. Программы для расчёта ПРЛО и параметров треков легко могут быть модифицированы для описания воздействия смешанных потоков частиц с учётом собственного фона и регрессии треков в соответствии с выражениями (7-10).

10. Развитый теоретический подход, а также методы, алгоритмы и программы расчёта, предлагаемые в диссертации, могут быть использованы для исследования механизма чувствительности различных материалов ЯТД.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

I. Bogomolov S.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. Дитлов В.А., Богомолов К.С. Распределение фотографической эффек-

- тивности поглощенной дозы электронов по глубине эмульсионного слоя. - В кн.: III Всесоюзное совещание по микродозиметрии: Тез. докл., М., 1979, с.126.
3. 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. Госнихимфотопроект, М., 1980, с.30-41.
 4. Ditlov V.A. Theory of spatial calculation of primary action of ζ -electrons in track detectors with account of multiple scattering. - In: Solid St. Nucl. Tr. Detectors. Pergamon Press, Ltd., 1980, p.131-141.
 5. Ditlov V.A., Bogomolov C.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.371.
 6. Дитлов В.А., Уварова Н.В., Г.И.Козинец. Исследование фотометрических характеристик различных фотографических эмульсий, предназначенных для регистрации потоков электронов. - В кн.: Фотографические процессы на основе галогенидов серебра: Тез. докл. Черногловка, М., 1983, с. 73.
 7. Спектральная чувствительность фотоэмульсии тип-Р к электронам. - В кн.: XXXIII Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра: тез. докл. Л., с.569. - Авт.: А.А.Адбуразаков, К.Я.Громов, В.А.Дитлов, Т.А.Исламов, А.А.Караходжаев, Г.А.Каноненко, А.Х.Холматов, В.М.Цупко-Ситняков.
 8. Дитлов В.А., Исламов Т.А., Холматов А.Х., Яшин С.Н. Выбор оптимальной толщины фотослоя при исследовании электронов внутренней конверсии. - В кн.: XXXIII Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра: Тез. докл. Л., 1983, с.533.
 9. Ditlov V.A. Response of sensitive solid track detector region as a visualization result of some part of its physical states. - In: Solid. St. Nucl. Tr. Detectors. Abstr. Acapulco, Mexico, 1983, p.3-4.
 10. Ditlov V.A. Theory for detecting fast nuclei by solid state detectors and problem for theory of multiple electrons scattering. - In: Solid St. Nucl. Tr. Detectors. Abstr. Acapulco, Mexico, 1983, p.5-6.
 11. Ditlov V.A., Pereygin V.P., Stetsenko S.G. Track parameters of high charged particles in crystalline detectors. - In: Solid St. Nucl. Tr. Detectors. Abstr. Acapulco, Mexico, 1983, p. 52.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 января 1984 года.