

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Смоленский государственный университет»

Кафедра физики и технических дисциплин

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ CR-39 НА ПУЧКЕ УГЛЕРОДА-12 С ЭНЕРГИЕЙ 350 МэВ/НУКЛОН

Выполнил:

студент 5 курса

физико-математического факультета
направления подготовки

44.03.05 Педагогическое образование
(профиль «Физика, информатика»)

ТВЕРСКОЙ Егор Андреевич

Научный руководитель:

доцент

АРТЕМЕНКОВ Денис Александрович

Смоленск

2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Трековые детекторы и их применение в физических исследованиях.....	6
1.1 Трековые детекторы и их типы.	6
1.2 Применение трековых детекторов.	9
ГЛАВА 2. Твердотельные трековые детекторы.	11
2.1 Метод твердотельных трековых детекторов.....	11
2.2 Основные характеристики ТТД при регистрации заряженных частиц.	12
2.3 Метрологические свойства ядерных твердотельных трековых детекторов.....	16
2.4 Твердотельные трековые детекторы типа CR-39. .Ошибка! Закладка не определена.	
ГЛАВА 3. Облучение ТТД CR-39 ядрами ^{12}C с энергией 350 МэВ/нуклон и распознавание образов треков с использованием ImageJ.....	23
3.1 Процедура облучения ТТД CR-39 ядрами ^{12}C	23
3.2 Ионизационные потери энергии ядра ^{12}C при прохождении вещества ТТД CR-39.	25
3.3 Применение программного комплекса ImageJ для анализа изображений треков частиц в ТТД CR-39.....	28
3.4 Использование ImageJ для анализа фотографий треков частиц в детекторе CR-39.	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	36

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих областях ядерной физики и физики частиц, используются постоянно развивающиеся и совершенствующиеся средства измерений, методы и технологии.

Твердотельные трековые детекторы (ТТД) к которым относится CR-39, обладают значительными достоинствами перед многими ядерными детекторами активного типа, в которых применяется электронное оборудование. К главным плюсам использования ТТД можно причислить:

- Высокая точность определения координат частиц;
- Осуществление сепарации разнообразных типов заряженных частиц, не чувствительных к побочному γ -излучению;
- Наличие собственного незначительного фона;
- Выдерживает долгое экспонирование;
- Неприхотливость в оборудовании во время эксперимента.

Легкость (вес – несколько грамм), экономичность (пленка), негигроскопичность, а также причастность к типу устройств пассивного накопления обуславливает долговечность и стабильность в эксплуатации данных детекторов.

К минусам твердотельных трековых детекторов можно отнести сложность обработки, т.е. травления, и некоторую сложность обработки изображений [4]. Как и любое другое детектирующее средство ТТД требует разумного применения, там, где экспериментальная ситуация к этому располагает.

Все вышеупомянутое подчеркивает **актуальность** выбранной нами темы выпускной квалификационной работы.

Цель данной квалификационной научно-исследовательской работы состоит в изучении свойств ТТД CR-39, облученных на ускорительном комплексе ИФВЭ, г. Протвино, Московская область, Россия. Темой квалификационной работы является «Исследование облучения трековых

детекторов CR-39 на пучке углерода-12 с энергией 350 МэВ/нуклон». В качестве источника частиц использовался пучок ядра изотопа ^{12}C с кинетической энергией 350 МэВ ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ, в качестве трекового детектора и мишени пластинки из полимерного пластика (CR-39). Непосредственная работа велась уже с отсканированными изображениями треков альфа-частиц, полученных после облучения и химического травления.

Среди **задач** данной работы выделим следующие:

- осуществить обзор типов трековых детекторов и возможностей их применения в экспериментальных исследованиях по физике ядра и элементарных частиц;
- изучить возможности программного комплекса ImageJ для анализа изображений, автоматического поиска треков;
- научиться использовать средства распознавания образов ImageJ на примере задачи детектирования треков альфа-частиц – продуктов фрагментации изотопа ^{12}C ;
- дать описание физических характеристик треков альфа-частиц в ТТД CR-39.

Основной задачей исследовательской работы является обобщение результатов анализа изображений и моделирования. Представление результатов в виде обзора, получение опыта работы и взаимодействия с сотрудниками-исследователями из эксперимента Беккерель ЛФВЭ ОИЯИ.

Объект исследования является материал ТТД CR-39 и его характеристики, позволяющие его использовать в экспериментальных исследованиях по физике ядра и элементарных частиц.

Предметом исследования являются изображения результатов облучения пластин ТТД CR-39 на пучке углерода (^{12}C) с энергией 350 МэВ/нуклон в ИФВЭ Протвино, Россия и альфа-частицами от источника с ^{252}Cf .

Обзор темы выпускной квалификационной работы реализован по следующему плану: введение, трековые детекторы и их типы, применение трековых детекторов, твердотельные трековые детекторы, метод твердотельных трековых детекторов, основные характеристики ТТД при регистрации заряженных частиц, метрологические свойства ядерных твердотельных трековых детекторов, твердотельные трековые детекторы типа CR-39, облучение ТТД CR-39 ядрами ^{12}C с энергией 350 МэВ/нуклон и распознавание образов треков с использованием ImageJ, процедура облучения ТТД CR-39 ядрами ^{12}C , ионизационные потери энергии ядра ^{12}C при прохождении вещества ТТД CR-39, применение программного комплекса ImageJ для анализа изображений треков частиц в ТТД CR-39, использование ImageJ для анализа фотографий треков частиц в детекторе CR-39, заключение.

ГЛАВА 1. Трековые детекторы и их применение в физических исследованиях.

1.1 Трековые детекторы и их типы.

«Трековые детекторы частиц – детекторы заряженных частиц и ядерных фрагментов, регистрация которых сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию частицы или фрагмента» [15]. Поэтому трековые детекторы частиц часто называют визуальными.

Толстопленочные ядерные фотоэмульсии являются самыми простыми и дешевыми детекторами заряженных частиц на треке. Их отличие от обычных фотоэмульсий проявляется в большей чувствительности и толщине. На пути ионизированных частиц помещают пластину, покрытую слоем фотоэмульсии, после чего она подвергается воздействию. В результате частица оставляет след, который образуется зернами восстановленного металлического серебра (размер зерна составляет около 0,3 мкм). Но в данном методе есть существенный недостаток. Пластины, увеличенные под специальным микроскопом в 500-1000 раз приходится изучать множество раз, что обуславливает трудоемкость данного процесса.

В 1912 г. был изобретен величайший прибор – первый трековый детектор, позволивший сделать множество открытий в ядерной физике и физике элементарных частиц. Таким прибором оказалась камера Вильсона, названная в честь создателя Ч. Вильсона. С ее помощью были проведены исследования космических лучей, позволившие открыть широкие атмосферные ливни, позитрон, странные частицы, а также обнаружить следы мюонов.

«Принцип работы камеры Вильсона основан на конденсации перенасыщенных паров жидкости на ионах, образующихся вдоль траектории заряженной частицы. Нижняя часть камеры представляет из себя диафрагму, при движении которой образуется перенасыщенное состояние пара. В нужный момент камера освещается импульсным источником света через

боковые стенки, которые чаще всего сделаны из стекла, и фотографируется несколькими фотоаппаратами через верхнюю крышку, которая также выполнена из стекла, для получения стереоскопических изображений треков. Рабочий цикл камеры, который варьируется от нескольких секунд до нескольких минут, включает в себя расширение, включение освещения, съёмку треков и сжатие» [3].

«Плотность капель вдоль треков заряженных частиц пропорциональна плотности ионизации. Довольно часто камеры Вильсона помещают в магнитное поле для измерения кривизны трека в сильном магнитном поле, и тем самым определяют импульс частицы и знак ее заряда. Камера Вильсона сыграла очень важную роль в ядерной физике, она долгое время оставалась одним единственным трековым детектором, но в дальнейшем её практически вытеснила пузырьковая камера, обладающая большим быстродействием в следствии чего, была более пригодной к работе на современных ускорителях заряженных частиц.

В отличие от перенасыщенного пара в камере Вильсона, пузырьковая камера содержит перегретую жидкость, чаще всего используются сжиженные газы: водород, дейтерий, пропан и т.д. Пузырьковой камерой называется устройство для регистрации треков заряженных частиц, её действие основано на вскипании перегретой жидкости вдоль траектории частицы. Проходя через камеру, заряженные частицы образуют центр кипения вдоль трека. В результате чего кинетическая энергия δ -электронов преобразуется в локальное выделение тепла, образуя при этом пузырьки пара. Примерно за 1 миллисекунду пузырьки достигают размера около 100 микрон и могут быть сфотографированы при освещении импульсным источником света.

Эффективность регистрации определяется размером пузырьковой камеры, которая обычно имеет размеры до нескольких метров и представляет собой сложное инженерное сооружение. Основным недостатком пузырьковых камер является то, что они не могут выбирать необходимые

события во время работы, поскольку при исследовании редких событий это приводит к необходимости просмотра большого количества фотографий» [3].

«Сочетание полноты получаемой информации и её немедленной обработки происходит в искровой камере. Искровая камера представляет собой управляемый трековый детектор частиц, его действие основано на появлении искровых разрядов в газе в том месте, где проходят заряженные частицы. Своё применение искровая камера нашла в ядерной физике (исследование ядерных реакций), физике элементарных частиц (эксперименты на ускорителях), астрофизике (космические лучи) и медицине. Она состоит из набора плоскопараллельных электродов, пространство между ними заполнено инертным газом. После того как ионизирующая частица проходит через искровую камеру, на электроды подается короткий импульс напряжения до десятков или сотен киловольт. Образовавшиеся в процессе ионизации свободные электроны вблизи траектории частиц ускоряются с помощью электрического поля и вызывают свечение газа, или искру, в небольшом объеме вблизи трека. Светящийся след прошедшей частицы фотографируется, но помимо этого используются методы регистрации с использованием ЭВМ: координаты искр немедленно записываются в память и подвергаются математической обработке» [3].

«Искровая камера была создана на основе более старого детектора, а именно искрового счетчика. Он по-прежнему сохраняет свою ценность как устройство с довольно малым временем запаздывания сигнала по отношению к времени возникновения ионизации в его чувствительном объеме. Общей особенностью двух детекторов является механизм, с помощью которого происходит возникновение и развитие пробоя в межэлектродном промежутке.

Усовершенствованным вариантом искровой камеры является стримерная камера. Стримерная камера – разновидность искровой камеры. В ней разряд, который был вызван импульсом высокого напряжения, обрывается на стримерной стадии искрового разряда. В результате

прошедшие через эту камеру треки заряженных частиц выглядят как цепочки отдельных, не сливающихся друг с другом светящихся областей небольшого объема, т.е. стримеров. Так как размеры стримеров небольшие, всего несколько миллиметров, они способны воссоздавать треки, идущие не только от одной пластины к другой, но и в любом направлении.

Искровые и стримерные камеры могут работать и в магнитном поле, они обладают высокой эффективностью к одновременной регистрации многих частиц (ливней частиц), и имеют небольшие пространственные и угловые погрешности при определении траекторий» [3].

1.2 Применение трековых детекторов.

Одна из важных ролей в развитии ядерной физики отведена трековым детекторам, которые помогают обеспечить наглядность и возможность получения подробных пространственных картин изучаемого процесса. Открытие ядерных реакций, распадов, кроме этого новых частиц: позитрона, мюона, заряженных пионов, странных и очарованных частиц обязано именно им.

Детектор нейтрино занимает значимую роль среди всех детекторов. Эти частицы не участвуют в сильных или электромагнитных взаимодействиях, потому что обладают огромной проникающей способностью, и их поток может проходить через свинцовый слой в тысячи астрономических единиц. Вероятность того что нейтрино провзаимодействует с веществом гораздо ниже, чем вероятность взаимодействия заряженных частиц, поэтому установки для регистрации нейтрино должны иметь большие размеры и массу, измеряемую тысячами тонн. Для уменьшения фона посторонних заряженных частиц, детекторы нейтрино помещают под большими толщами вещества, например, в подземных и подводных установках. Большую известность получили детекторы солнечных нейтрино – Homestake (хлор-аргонный детектор Дэвиса, США), Kamiokande (Япония), а также российские галлий-

германиевый детектор в Баксане и установка «Байкал» в прозрачных водах одноименного озера.

В настоящее время из-за постоянного развития и совершенствования метода трековых детекторов почти не осталось разделов науки и техники, не использующих его. Практическая направленность позволяет решать такие вопросы как исследование данных об энергетическом спектре нейтронов от реактора, полученных с помощью нейтронных дозиметров, содержащих делящиеся слои и трековые детекторы. «Эти детекторы предоставляют информацию о распространении наиболее важных с радиологической точки зрения α -излучающих природных ядер инертных газов ^{222}Rn и ^{230}Rn , из распадов ^{238}U и ^{232}Th соответственно, которые, диффундируя из горных пород или конструкционных материалов, попадают в атмосферу, и могут создавать опасный уровень радиации. Контроль времени воздействия радона на шахтеров на урановых рудниках осуществляется с помощью полос нитрата целлюлозы, закрепляемых на касках. Метод регистрации α -частиц радона использовался для прогнозирования землетрясений, так как повышение сейсмической активности во время подготовки землетрясений часто сопровождается трещинами и напряжениями с выделением радона от урана и тория, содержащихся в земной коре. Этот метод также используется при изучении процессов обмена в тропосфере, где в качестве индикатора используется радон. Трековые детекторы используются в пучках отрицательных пионов в радиотерапии при изучении событий с высокими линейными потерями энергии» [13;14].

ГЛАВА 2. Твердотельные трековые детекторы.

2.1 Метод твердотельных трековых детекторов.

В начале 60-х годов американскими физиками Р. Л. Флейшером, П. Б. Прайсом, Р. М. Уокером, а также – независимо – сотрудниками ЛЯР ОИЯИ В. П. Перелыгиным и С. П. Третьяковой в практику регистрации тяжелых заряженных частиц был введен метод твердотельных трековых детекторов (ТТД), который стал дальнейшим развитием трекового метода для ядерных исследований. В отличие от фотометода (метода ядерных фотоэмульсий) достаточно хорошо развитого к тому времени в работах Л. В. Мысовского, А. П. Жданова, Н. А. Перфилова, Н. Р. Новиковой, В. И. Захарова, метод ТТД был основан на эффекте образования треков в диэлектрических твердых материалах, что обусловило ряд особенностей, которые обеспечили ему новые применения во многих лабораториях мира и в том числе в Радиовом институте.

В первое время наиболее распространенными типами ТТД были обыкновенные натрий-силикатные стекла. Оказалось, что осколки ядерного деления или другие тяжелые ионы с $\frac{dE}{dx} > 15 \text{ МэВ мг}^{-1} \text{ см}^{-2}$ при облучении стеклянных пластин производят в них радиационные повреждения, которые после травления в плавиковой кислоте (водный раствор фтороводорода, HF) проявляются в виде треков – углублений конической формы с диаметром на поверхности стекла $\sim 10 \text{ мкм}$. Такие треки легко могут быть подсчитаны с помощью микроскопа с небольшим увеличением $\sim \times 100$, и при большом поле зрения, достаточным для быстрого просмотра засвеченной области площадью $\sim 1 \text{ см}^2$. При этом все частицы с меньшими удельными энергетическими потерями: легкие ионы, протоны, α -, β -частицы, не образуют треков вплоть до потоков $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и более. Стеклянный трековый детектор был общедоступен, не требовал никакого дополнительного оборудования, кроме простейшего микроскопа, мог работать при довольно высоких температурах, иметь практически любые размеры, выдерживать

удары, вибрацию и т. п. Благодаря этим свойствам стеклянные трековые детекторы использовались в 60-х – 70-х годах практически во всех лабораториях Радиевого института имени В.Г. Хлопина, занимающихся делением ядер в научных или научно-прикладных целях, в том числе для измерений периодов полураспада спонтанного деления, сечений деления, угловых распределений осколков деления различных радионуклидов с высокой удельной α -активностью при использовании нейтронов, фотонов, ускоренных дейтронов, α -частиц, ионов (лаборатории К. А. Петржака, Ю. А. Немилова, Н. А. Перфилова, А. Н. Протопопова и др).

Кроме стекол в эти годы Ю. А. Селицкий с сотрудниками начал использовать в качестве ТТД естественные и искусственные слюды, разработал эффективные методы устранения фона спонтанного деления в детекторе. Впоследствии в результате интенсивного изучения процесса образования треков в диэлектриках в мировой практике стали использовать различные типы ТТД на основе стекол, минералов, полимерных материалов, обладающих различными порогами регистрации, позволяющими регистрировать не только осколки деления и другие тяжелые ионы, но и легкие ионы (фрагменты, ядра отдачи), α -частицы, на интенсивном фоне более легких частиц, чем регистрируемые. При разработке отечественных α -чувствительных нитратцеллюлозных трековых детекторов для массовых измерений в Переславском филиале института Химфотопроект значительный вклад был внесен сотрудниками Радиевого института (группа В. А. Николаева), а первые образцы отечественных детекторов типа CR-39 были получены О. Е. Шигаевым [7].

2.2 Основные характеристики ТТД при регистрации заряженных частиц.

Рассмотрим основные характеристики твердотельных трековых детекторов.

Пороговая чувствительность. «Основное свойство ТТД – пороговая чувствительность к заряженным частицам. Латентный трек (до травления) образуется в ТТД, если линейные потери энергии (ЛПЭ) частицы достаточны для превышения порога образования трека для данного типа детектора» [6;16].

Эффективность регистрации в геометрии 2π - $\varepsilon_{2\pi}$ осколков деления (в стекле, слюде, ПЭТ-КЭ, Makrofol-KG) и альфа-частиц (в LR-115-II, CR-39) от тонких источников, обычно применяемых в калибровках (на основе ^{252}Cf , ^{239}Pu) зависит при химическом травлении (ХТ) от типа детектора, толщины стравленного слоя и способа счета треков и из меняется от 0,3 до 0,96. Для толстых источников эффект самопоглощения существенно уменьшает величину $\varepsilon_{2\pi}$.

Собственный фон детектора Φ также зависит от типа детектора, типа и условий травления, толщины стравленного слоя и способа счета треков. «Фон – наиболее критически важный фактор для применения ТТД и особенно CR-39 в индивидуальной нейтронной дозиметрии из-за его вариабельности – σ_{Φ} , выбросов и непредсказуемости» [19;28;29]. «Минимально детектируемая доза (МДД) сильно зависит от вариации фона, в основном у ТТД разных типов чем ниже порог регистрации, тем выше фон. Если при химическом травлении у стекол, слюд, полиэтилентерефталата фон составляет десятые единиц – единицы на см^2 , то для нитроцеллюлозных (НЦ) детекторов и CR-39 это десятки и сотни треков на см^2 . При регистрации нейтронов с помощью ТТД и ХТ можно выделить три основных источника фона трекового детектора:

1) повреждения поверхности ТД, которые после травления сосчитываются как треки;

2) внутренние дефекты материала (неоднородности, пузырьки и т.п.), которые также после травления сосчитываются как треки;

3) фон треков от сопутствующего излучения, таких как α -частицы радона и ДПР в воздухе при регистрации заряженных частиц, индуцированных нейтронами в CR-39 и НЦ» [10].

Фон от мелких загрязнений, размеры которых близки к размерам треков, крайне важен при автоматическом подсчёте изображений треков. Специальные автоматизированные программы без особого труда решают вопрос отсеивания подобных загрязнений.

Фон первого рода можно уменьшить путём аккуратного обращения с поверхностью детектора, а также предварительного (до экспозиции) травления детектора. При достаточно коротком времени предварительного травления плотность фоновых (ложных) треков можно оценить с помощью предварительного просмотра детектора. При более длительном травлении фоновые треки имеют значительно большие размеры и меньшую контрастность, чем истинные треки. Исследования образцов CR-39 различных компаний показали, «что фон на поверхности детектора является основным, и он может быть учтён во время предварительного травления» [25]. Фон в CR-39 можно значительно уменьшить, применив «чистящее травление», таким образом, при стравливании поверхности на 100 мкм, можно уменьшить фон в 5 раз с 50 до 10 трек/см².

Фон второго рода подобным способом не устраняется, у CR-39 отмечают, «что фон меняется как от партии к партии, так и в пределах одного листа. Иногда фон на одной стороне листа в 10 раз выше, чем на второй. Уменьшить этот фон можно только технологически при изготовлении детекторного материала. Изменяя состав пластика и технологию изготовления CR-39, в ряде работ удалось получить фон на уровне единиц–десятков треков на см²» [19].

При устранении фона третьего рода важно, чтобы защитное покрытие пластика было достаточно толстым чтобы поглощать α -частицы от дочерних продуктов распада радона в воздухе. Чтобы уменьшить этот фон используется предварительное травление детектора CR-39, а также

используют возможность уменьшить фон с привлечением данных о размерах треков, например, путём вычитания вклада малых треков [22].

При использовании делящихся нуклидов в качестве конверторов, а полиэтилентерефталат и поликарбонат материалов в качестве трековых детекторов необходимо иметь в виду, что α -излучение делящихся нуклидов способно образовывать большое количество треков в этих пластиках при достаточно высоких флюенсах из-за образования ядер отдачи, в основном, углерода. Быстрые нейтроны не только вызывают деления в делящихся конверторах, но и образуют треки от ядер отдачи C, N, O в самих пластиках.

При использовании электрохимического травления (ЭХТ) фон может составлять от десятков до сотен, а в некоторых случаях и тысячи треков на см^2 , в этом случае для уменьшения фона часто используется двухступенчатое травление: ХТ+ЭХТ. Достаточно длительное предварительное ХТ скругляет дефекты поверхности детектора и даже фоновые поверхностные треки от радона, тем самым устраняя их пробой и приводя к значительному снижению фона во время ЭХТ. Но при этом эффективность регистрации протонов низких энергий снижается.

Линейность. Любой ТД имеет нелинейную характеристику в зависимости от плотности треков, если при больших плотностях треков вклад перекрывающихся треков велик. Линейный диапазон зависит от способа подсчета треков, с помощью микроскопа или автомата, от анализирующих возможностей автомата, от размеров треков и характера распределения размеров. При ЭХТ треки, как правило, больше, чем при ХТ и перекрываются при меньших плотностях, от 1000 до 2000 см^2 , что приводит к нелинейной характеристике детектора от плотности треков [19].

Корректировка нелинейности выполняется вручную или программой, что увеличивает диапазон линейности на порядок. Можно использовать два детектора с последовательным травлением, в том случае если первый показал перекрытие треков, то второй может быть протравлен меньше.

Фединг, зависимость от внешних условий и старение пластиков.

Латентные треки перед травлением могут со временем уменьшаться вплоть до полного исчезновения. Этот эффект фединга проявляется сильнее для пластиков, причем у каждого из них по-разному и может зависеть от условий хранения: температуры и влажности воздуха. В основном, чем ниже порог регистрации детектора, тем сильнее проявляется фединг и влияние внешних условий [6;16]. Данные эффекты являются очень важными для практики нейтронной дозиметрии, имея в виду достаточно длительные периоды экспозиций (месяцы).

Для CR-39 в большей степени, чем для других ТТД, старение материала и фединг вместе являются значительными. «Сообщается о 10–30 % снижении отклика из-за задержки между регистрацией нейтронов и обработкой детектора» [29]. При ЭХТ изменения отклика от слоя к слою могут быть более существенными, чем при ХТ, поскольку вариация в толщине детектора обуславливает различную напряженность поля.

«Радиационная стойкость ТТД к гамма-облучению. Облучение ТТД значительными дозами гамма-излучения изменяет скорость травления материала детектора, что сказывается на эффективности регистрации частиц – $\varepsilon_{2\pi}$, фоне детектора, отклике к нейтронам. В среднем, чем выше порог регистрации, тем выше радиационная стойкость детектора» [10].

2.3 Метрологические свойства ядерных твердотельных трековых детекторов.

Тяжелые заряженные частицы, в их числе: протоны, альфа-частицы, легкие и тяжелые ионы, включая осколки деления, фрагменты, ядра отдачи, способны разрушить локальную структуру твердого тела вдоль своей траектории и создать так называемый латентный трек. Этот трек толщиной в несколько десятков (до 100) ангстрем можно визуализировать с помощью ХТ, т.к. поврежденные части материала интенсивнее реагируют с травящим агентом, чем неповрежденные части. В результате в материале детектора

образуются конические ямки и конусы травления. Обычно они имеют микронные размеры и их можно наблюдать с помощью оптического микроскопа (см. рис. 1). В то же время их размеры и форма предоставляют информацию о заряде, энергии и направлении движения налетающей заряженной частицы. При изготовлении подобных ТТД используются различные диэлектрики, такие как: стекла, слюды, природные и синтетические кристаллы, органические полимеры и даже некоторые металлы [6;9;11;16].

С точки зрения метрологии основными характеристиками твердотельных трековых детекторов являются: пороговая чувствительность, эффективность регистрации, фон детектора. Свойства некоторых материалов, которые используются в качестве ТТД, приведены в табл. 1 [11;12].

Таблица 1.

Свойства некоторых материалов, используемых в качестве ядерных твердотельных трековых детекторов.

Категория	Материал	Условия травления	Самые легкие регистрируемые частицы	Критический угол	Эффективность регистрации и в режиме 2π	Фон трек см ⁻²	Обычное использование
Минералы и кристаллы	Оливин	Раствор КОН, 160°C, 6 мин; 10% HF, 23°C, 30с	Fe				Осколки деления
	Циркон	85% H ₃ PO ₄ , 500°C, 1 мин	Ca				Осколки деления
	Кварц	КОН Soln.,	Ar				Осколки

		210°C, 10 мин					деления
	Слюда	48% HF, 23°C, 3 с – 40 мин	Si	4°30'		0.1	Осколки деления
Стекла	Силикатное	48% HF, 23°C; 3.5% HF, 20°C, 15-35 мин	S	-50°	0.4	5	Осколки деления
	Фосфатное	48% HF, 23°C, 3 с; 10 N NaOH, 55°C, 60-120 мин; 48% HF, 20°C, 60-120 мин	F	1-5°			Осколки деления
Пластиков	Поликарбонатные пластики (лексан, макрофол)	6 N NaOH, 60°C, 60 мин; KOH, 1.252 г/см ³ , 60°C, 30-75 мин	Be	-2-3°	0.75	2	Осколки деления, α-частицы
	Полиэтилентералат (мелинекс, майлар, лавсан)	KOH, 1.252 г/см ³ , 60°C, 30-75 мин					Осколки деления
	Нитроцеллюлоза (CN-85, LR-115,	3-6 N NaOH, 50°C, 60-180 мин	He (<4МэВ) H	-4-8°	0.36	10-20	α-частицы, протоны

	ДНЦ, Daicel)						
	Полиал- лилдигли- колькарбо- нат PADC (CR-39, SR-86, CZ)	6 N NaOH, 70°C, 1-4 ч; 6 N NaOH, 85°C, 180 мин	H (<20Mэ В)	-10°	0.7	5-500	α- частицы, протоны

«Пороговую чувствительность следует рассматривать как очень важное свойство диэлектрических детекторов. Физический смысл данного явления заключается в том, что латентные треки формируются только при условии, когда удельные потери энергии частицы $\frac{dE}{dx}$ превышают пороговое значение для данного типа детектора. Так как удельные потери с уменьшением заряда и массы налетающей частицы падают, то для каждого твердотельного трекового детектора можно указать самую легкую частицу, которая будет регистрироваться в некотором энергетическом диапазоне данным детектором, а более легкие при любых значениях их энергии регистрироваться не будут. Данное свойство позволяет в большинстве ситуаций выбрать для детектора наиболее подходящий материал. К примеру, во время исследований тяжелых ионов в космических лучах благодаря выбору материала детектора можно избавиться от высокого фона, который связан с протонами и α-частицами. Так же стоит отметить, что на значение порога для полимерных твердотельных трековых детекторов могут повлиять внешние обстоятельства, такие как наличие ультрафиолетового излучения, а также повышенное содержание кислорода. Так как удельные потери энергии являются функцией не только заряда частицы, но и ее скорости, причем в приближении Бете–Блоха $\frac{dE}{dx} \sim \left(\frac{Z}{\beta}\right)^2$, где $\beta = \frac{v}{c}$ – скорость частицы в единицах скорости света, оказалось удобным ввести чувствительность трекового детектора $\left(\frac{Z}{\beta}\right)_{\min}$, которая определяется так, что частицы со значением $\left(\frac{Z}{\beta}\right) <$

$(\frac{Z}{\beta})_{\min}$ не могут быть зарегистрированы данным детектором. Стоит заметить, что наиболее чувствительным детекторам соответствуют наименьшие значения $(\frac{Z}{\beta})_{\min}$, а чувствительности используемых сейчас в ядерной физике ТТД лежат в диапазоне от 1 до 100, причем наиболее чувствительны пластики» [6;9;11;16;21;23;27].

К метрологическим характеристикам относят в том числе область линейности детектора (при большом сигнале протравленные треки начинают перекрываться), фединг (исчезновение латентных треков в период между экспозицией и проявлением [6;9;16]), зависимость от внешних условий, старение пластиков, их радиационная стойкость. Период между экспозицией детектора и его травлением обычно не превышает нескольких часов, и эффекты фединга на результатах не сказываются, так как при температуре 22°C фединга у CR-39 нет до 14 недель, а даже при 38°C треки начинают исчезать лишь через 25 суток [18].

С помощью плотности и параметрам треков в ТТД определяются потоки заряженных частиц и их характеристики. В настоящее время существует несколько теоретических моделей, которые связывают характеристики протравленного трека со свойствами налетающей частицы, например: модель теплового электронного клина, модель ионно-взрывного клина, теория Каца и Кобетича, теория трека Дитлова [5]. Данные теории достаточно хорошо способны объяснить качественные особенности формирования треков, но для использования чисто теоретических расчетов при проведении измерений потребуются дальнейшее их развитие.

Химическое травление позволяет визуализировать трек быстрой тяжёлой частицы в твердотельном трековом детекторе. Эта визуализация основывается и обуславливается фактом, что скорость травления в области латентного трека V_T больше, чем скорость травления необлученных областей детектора V_B (см. рис. 1). Во время калибровки обычно определяется отношение скоростей $p = \frac{V_T}{V_B}$, или, если быть точнее, величина $p-1$,

стремящаяся к нулю в области малых энергопотерь. Очень часто, так как это наиболее удобно для практического использования, строят зависимость $p-1$ от энергии налетающей частицы. В этом случае калибровочная кривая должна строиться отдельно для каждого типа диагностируемой частицы. Если построить зависимость $p-1$ от величины энергопотерь, то такая кривая будет универсальной, и, следовательно, единой для данного материала детектора, но её будет сложнее использовать, т.к. потребуются привлечь дополнительные данные об энергопотерях конкретной быстрой частицы в рассматриваемом материале. Естественно, что скорости травления зависят от состава травящего вещества, который при калибровке должен оговариваться отдельно, т.е. должна задаваться молярная концентрация едкого натра, который используется для травления CR-39.

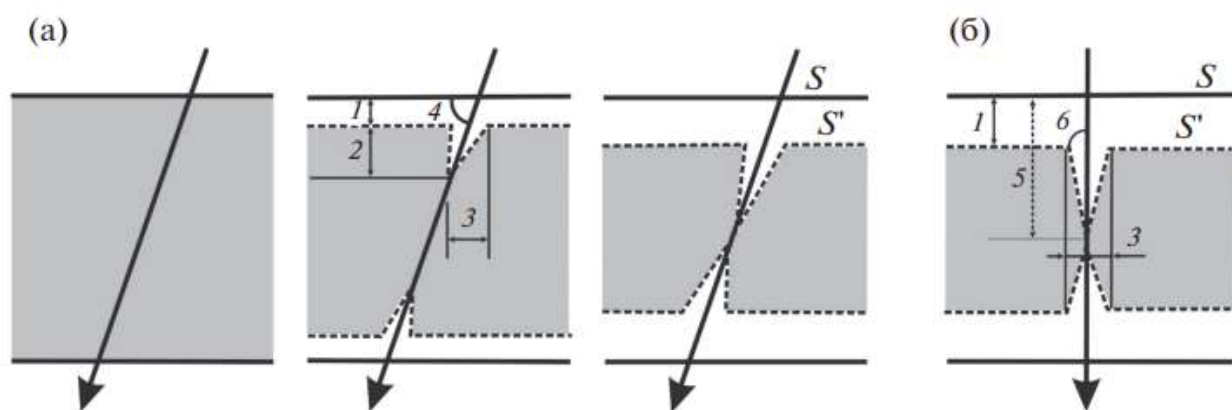


Рисунок 1 – Развитие во времени конусов травления в пластиковой пленке для случаев косого (а) и нормального (б) падения заряженной частицы: 1 – толщина стравленного поверхностного слоя, 2 – глубина трека, 3 – видимый в микроскоп диаметр конуса травления/трека, 4 – угол падения частицы, 5 – общая глубина травления в области трека, 6 – угол раствора конуса; при большом времени травления конусы сливаются.

2.4 Твердотельные трековые детекторы типа CR-39.

В 1978 г. впервые был изготовлен твердотельный трековый детектор типа CR-39 (поликарбонат на основе аллилдигликолькарбоната). С его помощью были идентифицированы треки, которые относятся к нейтронно-индуцируемым ядрам отдачи водорода, входящего в состав этого ТТД.

«Детектор CR-39 в качестве детектора быстрых нейтронов получил в мире очень широкое распространение, благодаря:

- чувствительности к протонам в широком диапазоне энергий 0,1–20 МэВ;

- прекрасным оптическим свойствам, а именно по прозрачности и однородности, которые делают его наиболее удобным для исследования с помощью микроскопа или разного рода анализаторов;

- возможности применить к нему метод электрохимического травления, обеспечивающий дополнительно целый ряд положительных свойств.

Но в то же время он обладает и некоторыми недостатками, основными из которых у пластика типа CR-39 являются:

- как правило, более высокий собственный фон и его вариации, в том числе из-за чувствительности к радону;

- более высокая чувствительность к внешним условиям и к фоновому гамма-излучению;

- большие трудности в производстве пластика со стабильными свойствами, что обуславливает более высокую цену качественного материала;

- отсутствие изготовления в промышленных масштабах тонких слоев пластика, позволяющих применить к нему широко распространенный метод истрогового счета, хотя существуют отдельные лабораторные разработки в этом направлении» [26].

«Несмотря на эти недостатки, на сегодняшний день пластик CR-39 признается зарубежными специалистами самым лучшим трековым детектором для целей нейтронной дозиметрии» [10].

ГЛАВА 3. Облучение ТТД CR-39 ядрами ^{12}C с энергией 350 МэВ/нуклон и распознавание образов треков с использованием ImageJ.

3.1 Процедура облучения ТТД CR-39 ядрами ^{12}C .

Основу данной квалификационной научно-исследовательской работы формирует банк данных фотографий поверхности ТТД CR-39, содержащей изображения треков частиц. Получение указанного материала проходило в несколько этапов.

В декабре 2018 года на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ (институт физики высоких энергий) г. Протвино, Московская область, Россия было проведено облучение пластинок ТТД CR-39 в пучке ядер ^{12}C с энергией 350 МэВ/нуклон. Пластины размещались в различных частях Медико-биологического стенда (рисунок 2) в ИФВЭ так, чтобы обеспечить максимум ионизационных потерь $-dE/dx$ при прохождении вещества ТТД CR-39 (облучение вблизи пика Брэгга). Внешний вид использованных пластинок ТТД CR-39 приведен на рисунке 3. Облучение части пластинок α -частицами от источника ^{252}Cf проводилось перед их травлением (проявкой треков) на Кафедре радиационной дозиметрии Института ядерной физики Чешской академии наук, г. Прага, Чехия [20].

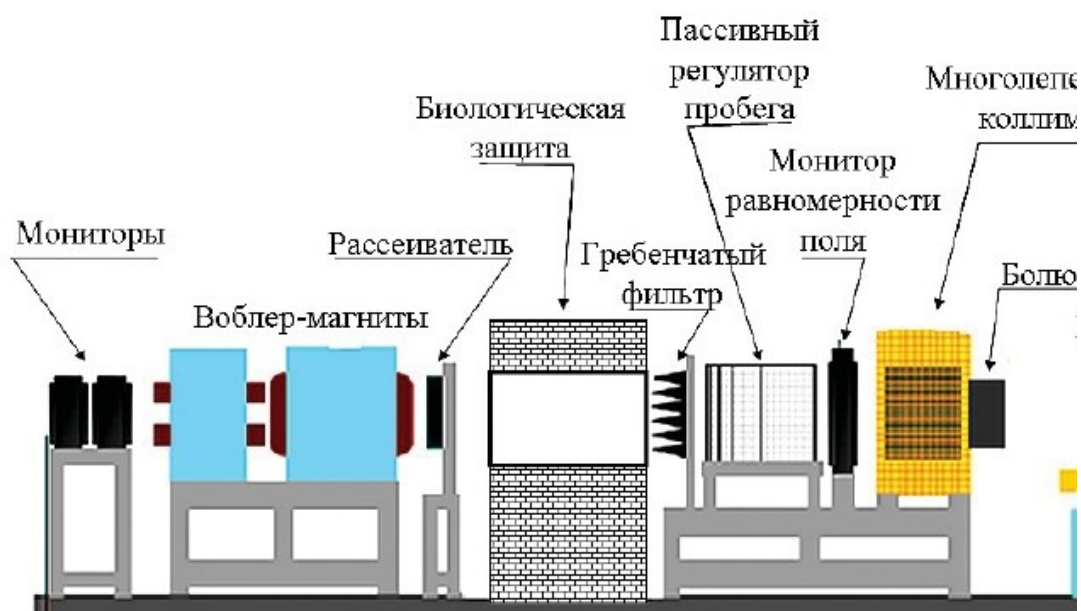


Рисунок 2 – Схема установки Медико-биологического комплекса ИФВЭ, г. Протвино.



Рисунок 3 – Внешний вид пластинки ТТД CR-39, используемой в эксперименте.

Пластинка представляет собой полосу размером $10 \times 1 \times 0.5 \text{ см}^3$.

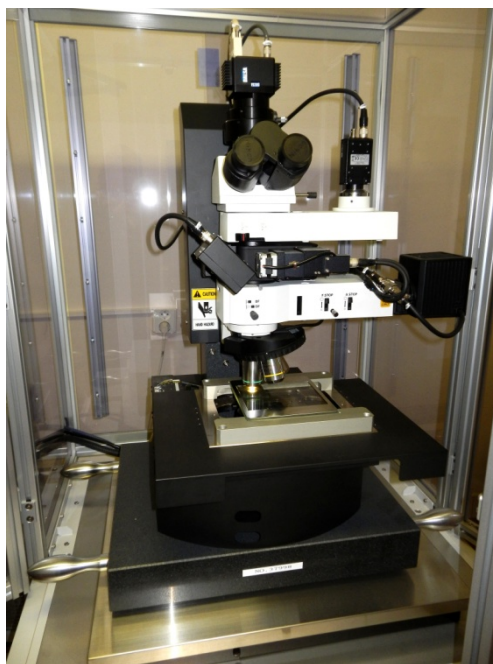


Рисунок 4 – Установка HSP-1000 в Институте дозиметрии г. Прага, Чехия

Постэкспозиционная обработка: травление и сканирование проводились в январе 2019 г. на Кафедре радиационной дозиметрии Института ядерной физики Чешской академии наук, г. Прага сотрудником ЛФВЭ ОИЯИ к.ф.-м.н. Зайцевым А.А. (выпускник ФМФ СмолГУ 2014 г.) при помощи автоматизированного комплекса HSP-1000 (рисунок 4) [24]. Сканирование (формирование банка фотографий поверхности) осуществлялось на данной установке в отраженном свете с 20х объективом.

Полностью было отсканировано 15 образцов площадью 70 см² (использовались пластинки двух размеров длиной 10 и 5 см). Объем сканированных данных составил ≈ 20 Гбайт.

Дальнейшая работа велась с отсканированным материалом в ФМФ СмолГУ г. Смоленск, Россия. Результаты представляются впервые.

3.2 Ионизационные потери энергии ядра ¹²C при прохождении вещества ТТД CR-39.

Заряженная частица, движущаяся в веществе ТТД CR-39 взаимодействует с атомами среды. Потери тяжелой частицы, движущейся со скоростью β в однородной среде с атомным номером Z и массовым числом A , приближенно описываются соотношением Бете-Блоха [2]. Для оценки ионизационных потерь $-dE/dx$ в МэВ·г⁻¹·см⁻² тяжелой частицы (не электрона) в веществе пользуются формулой (1),

$$-\frac{dE}{dx} = K Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (1)$$

где $T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2\gamma m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}$ – максимальная кинетическая энергия, которая может быть передана частицей с массой M свободному электрону в одном соударении; $\frac{K}{A} = \frac{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2}{A} = 0.307 \text{ МэВ} \times \text{г}^{-1} \times \text{см}^2$; I – средний потенциал ионизации для электронов (~300 эВ). Для $A = 1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ (A – атомная масса поглотителя) и $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро; δ – поправки, учитывающие эффект плотности среды. В формулу входят определенные выше следующие величины: N_A – число Авогадро, радиус электрона и его масса r_e и m_e , заряд частицы z , заряд вещества и его атомный вес Z и A , скорость частицы β , Лоренц-фактор частицы γ , ионизационный потенциал I , максимально передаваемая в одном соударении энергия T_{max} , эффект плотности, учитывающий экранировку поля заряженной частицы в результате поляризации атомов вдоль ее пути, δ . Современный уровень развития и использования автоматизированных вычислительных средств

позволяет оценивать величину энергетических потерь заряженных частиц при прохождении их через вещество, учитывая вышеуказанные эффекты. Оценка масштабов ионизационных потерь при прохождении ядра ^{12}C с энергией 350 МэВ/нуклон сквозь вещество ТТД CR-39 может быть осуществлена с использованием программ численного моделирования комплекса SRIM [30].

SRIM (The Stopping Range of Ions in Matter) представляет собой группу программ для расчета торможения и пробегов ионов в веществе в диапазоне энергий от 10 А эВ до 2 А ГэВ. Программы позволяют рассчитывать события сопровождающие процесс потери энергии ионом для различных сред-мишеней [1;30]. Рассчитанные удельные ионизационные потери для ядра ^{12}C при энергии 350 МэВ/нуклон составляют 108 МэВ/мм (пробег ≈ 235 мм) для ТТД CR-39 при плотности детектора 1.0 г/см^3 . На рисунке 5 представлены рассчитанные при помощи SRIM зависимость ионизационных потерь $-dE/dx$ для ядра ^{12}C при прохождении вещества ТТД CR-39. Синим показан вклад в ионизационные потери за счет взаимодействия с электронами среды, красным за счет ядерной компоненты. С уменьшением энергии движение по оси Ох справа налево, наблюдается рост ионизационных потерь.

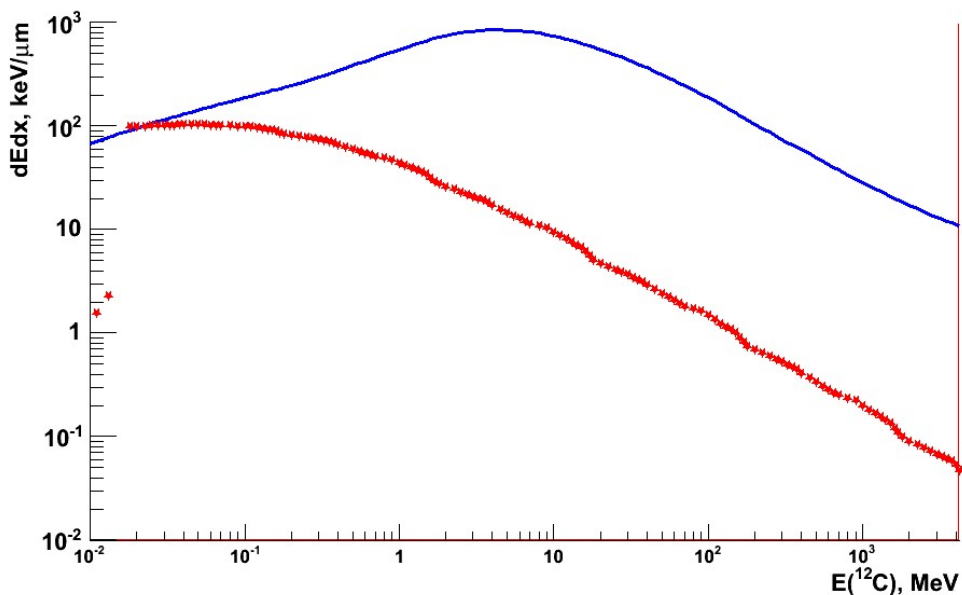


Рисунок 5 – Ионизационные потери dE/dx для ядра ^{12}C в веществе ТТД CR-39 в диапазоне энергий от кэВ до ГэВ, dE/dx_{elect} – синий, dE/dx_{nucl} – красный.

Для протонов, α -частиц и ионов (в том числе ядер ^{12}C) характерен рост ионизационных потерь ближе к концу пробега. Это явление получило название пик Брэгга. Данное явление используется в лучевой терапии. Энергия иона подбирается исходя из глубины расположения опухоли, после прохождения пика доза практически сразу падает до нуля (ион останавливается). В случае ТТД CR-39 облучение материала вблизи пика Брэгга приводит к большему разрушению вещества ТТД и лучшему проявлению треков после протравливания (проявки).

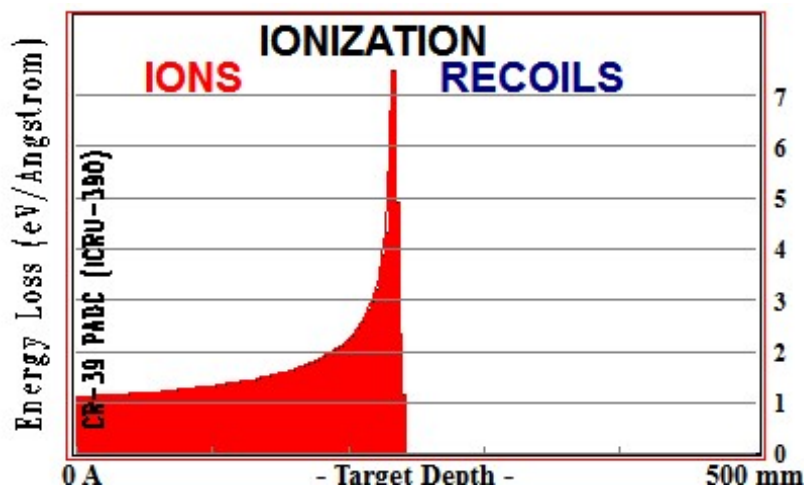


Рисунок 6 – Зависимость ионизационных потерь ядра (иона) ^{12}C от глубины проникновения в вещество ТТД CR-39.

На рисунке 6 приведен график зависимости ионизационных потерь ядра ^{12}C от глубины проникновения в вещество ТТД CR-39. При глубине близкой к длине пробега 235 мм для кинетической энергии 350 МэВ/нуклон будет наблюдаться рост ионизационных потерь в веществе ТТД CR-39, что сделает треки более различимыми после проявки (травления). График построен в среде численного моделирования SRIM [1].

3.3 Применение программного комплекса ImageJ для анализа изображений треков частиц в ТТД CR-39.

Описание возможностей программного комплекса ImageJ.

Для анализа экспериментальных данных – треков в пластинках CR-39, полученных после облучения на ускорителе, использовался программный комплекс ImageJ. ImageJ — общедоступный (свободно распространяемый) программный комплекс обработки изображений, созданный на языке Java, разработчики создавали данный продукт, будучи вдохновленными NIH Image для Macintosh. В нем могут быть обработаны, отредактированы, преобразованы, проанализированы и сохранены результаты для 8-, 16-, 32-битные изображения в таких общепринятых форматах как TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS и др. (см. документацию). Доступность продукта, делает его доступным для работы студентов, исследователей и т.п. Дистрибутив доступен на официальном сайте <https://imagej.nih.gov>, там же доступна документация. Для начала использования не требуется специальных знаний в области программирования и языка Java, что удобно для исследователей из разных областей науки. Альтернативой использования ImageJ, например, является использование библиотек компьютерного зрения OpenCV, но здесь от пользователя необходимы навыки программирования или знание специальных программных комплексов, поставляемых вместе с оптическими микроскопами и сопровождаемые платной лицензией. Графический интерфейс ImageJ внешне схож с интерфейсом (см. рисунок 7) распространенных графических редакторов Paint, Gimp и т.п., снабженный дополнительным функционалом. В отличие от NIH Image, программный комплекс ImageJ может успешно функционировать как на Linux, так и на Windows платформе.

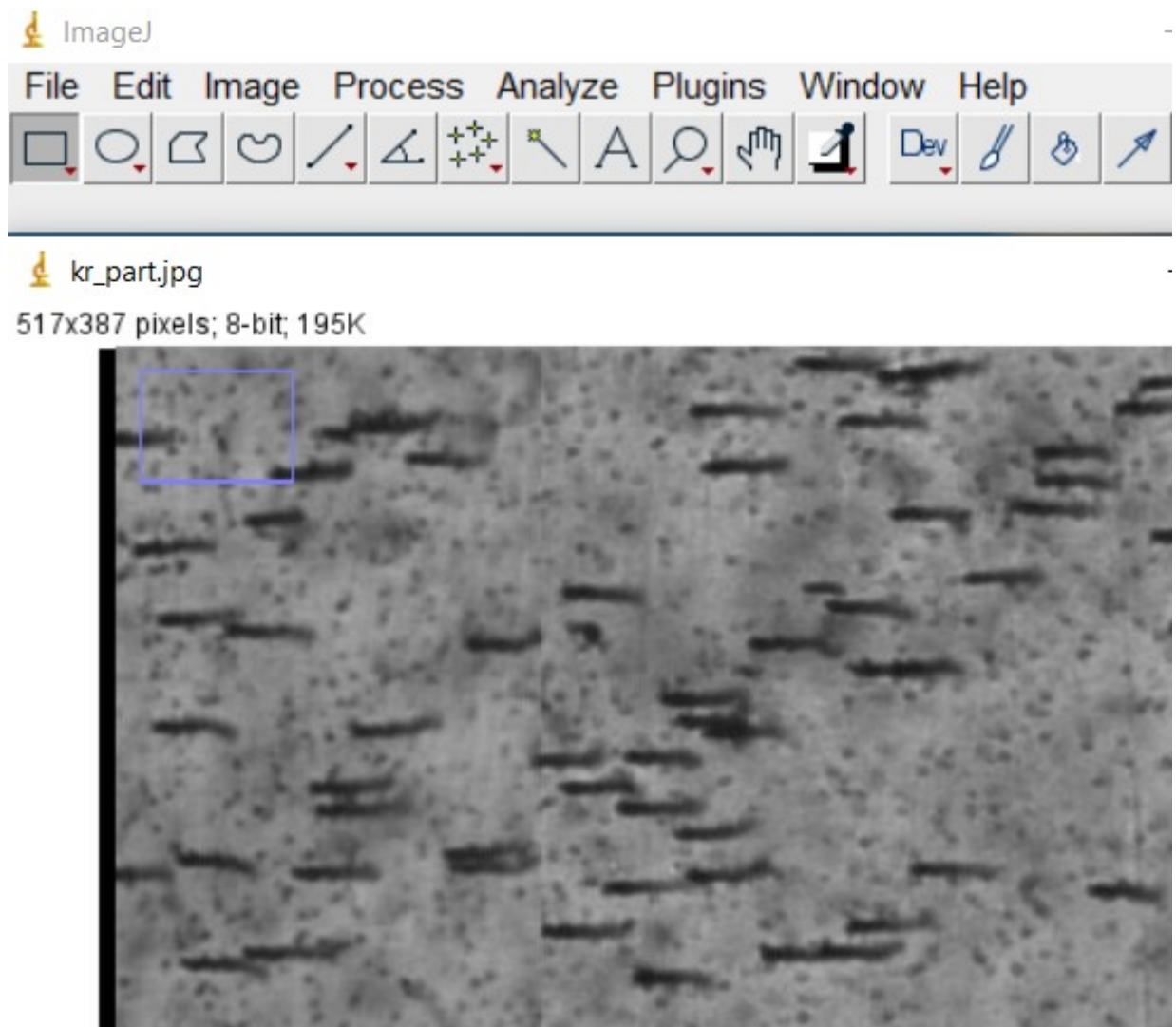


Рисунок 7 – Графический интерфейс ImageJ. В качестве примера используется фрагмент отсканированного изображения треков 84Kr в слое фотоэмульсии. Функциональные возможности ImageJ позволяют осуществить распознавание, измерение и подсчет числа треков.

Программный комплекс ImageJ позволяет собирать статистику значений распознаваемых образов: площади и число пикселей для пользовательских выборок. Функциональные возможности ImageJ позволяют измерять расстояния (диаметр Ферета) и углы, позволяет создавать гистограммы плотности и графики профиля линий, поддерживает стандартные функции обработки изображений, такие как управление контрастом, повышение резкости, сглаживание, обнаружение краев и фильтрации изображений.

3.4 Использование ImageJ для анализа фотографий треков частиц в детекторе CR-39.

Программные комплексы для распознавания простейших графических образов могут быть полезны для ускорения измерений треков в отсканированном материале. На рисунке 8 приведен пример фотографии области пластинки CR-39, содержащей трек (протравленное отверстие) в результате прохождения ядра ^{12}C . Облучение пластинок происходило при различных энергиях данного ядра, полученного на ускорительном комплексе У-70 с энергией 350 МэВ/нуклон. Изменение энергии проводилось посредством установки перед облученным материалом объема воды, проходя который, углерод терял часть своей кинетической энергии. Рядом расположен трек альфа-частицы, точнее его проекция в плоскости Оху совпадающей с поверхностью пластинки ТТД CR-39. Для измерения линейных размеров ImageJ позволяет провести калибровку, сопоставив количеству пикселей действительное расстояние в мкм. В данной случае ≈ 3 пикселя соответствуют расстоянию в 1 мкм (при помощи объект-микрометра установлено, что 32 пикселям соответствует 10 мкм шкалы объект-микрометра).

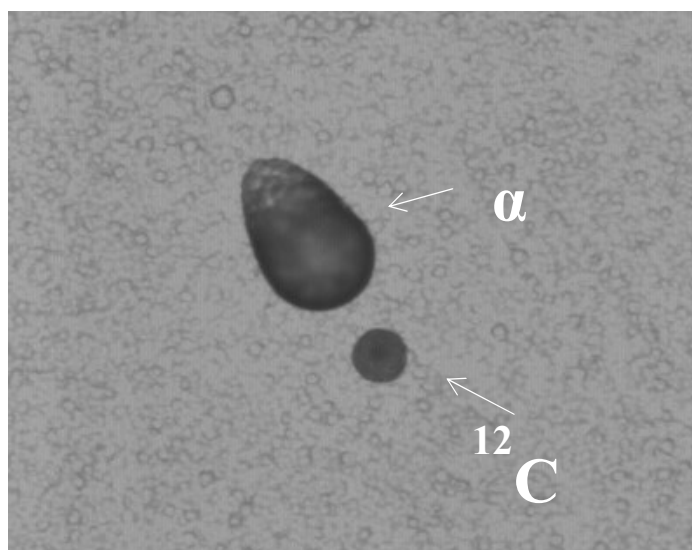


Рисунок 8 – Микрофотография треков, оставленных в ТТД CR-39 ядром ^{12}C и α -частицей.

В рамках данной работы было проанализировано 100 (сто) фотографий, облученных на пучке углерода с энергией 350 МэВ/нуклон. Результаты измерения приведены на рисунке 9 в виде гистограммы, содержащей диаметры отверстий и проекций треков (в случае α -частиц) оставленных заряженными частицами в материале ТТД CR-39. Для следов от прохождения ядра углерода (^{12}C) характерны узкие круглые отверстия со средним диаметром $\langle d \rangle = 11 \pm 1.2$ мкм и дисперсией $\sigma = 0.9 \pm 0.1$ мкм. Углерод проходит сквозь материал и после травления треки могут быть наблюдаемы в оптический микроскоп.

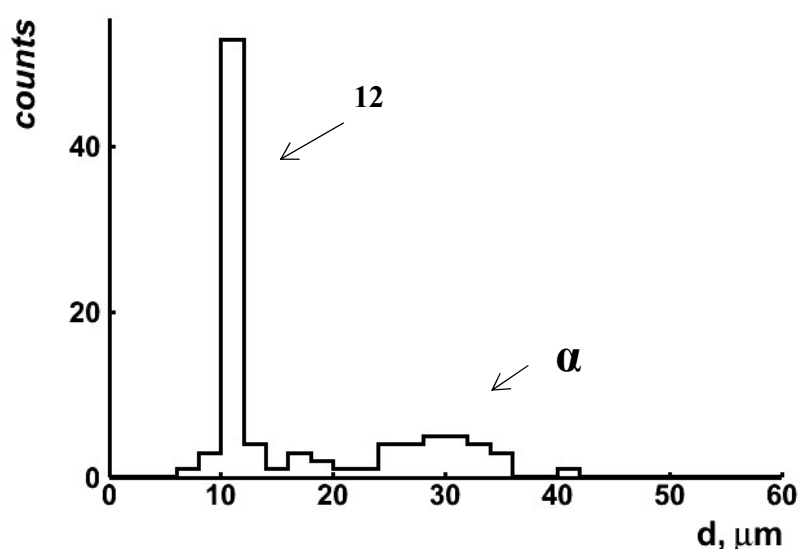


Рисунок 9 – Распределение диаметров отверстий и проекций треков (в случае α -частиц), оставленных заряженными частицами в материале ТТД CR-39.

Сложнее дело обстоит с треками α -частиц. Изображения α -треков представляют собой плоскую проекцию конусообразного протравленного отверстия, расположенного под углом к поверхности ТТД CR-39 и для определения длины свободного пробега необходимо выполнить дополнительные измерения глубины конуса, оценить угол погружения, что по фотографии сделать невозможно. Данной проблеме посвящен ряд работ,

например, Иноземцев К.О. Развитие метода отдельного измерения характеристик длиннопробежных и короткопробежных частиц космического излучения твердотельными трековыми детекторами [8]. Но, допустив, что распределения характера расположения треков должно подчиняться нормальному закону (т.к. не было зафиксировано направление вылета α -частиц), а наивероятнейшее значение фиксируемой проекции трека должно соответствовать углу $\pi/4$, можем оценить средний пробег α -частиц в веществе CR-39. Второй пик распределения на рисунке 2 соответствует измерению диаметра Ферета проекции трека α -частицы со средним значением $\langle d \rangle = 30.0 \pm 1.3$ мкм и дисперсией $\sigma = 4.5 \pm 1.3$ мкм. Воспользовавшись зависимостью пробег/энергия для α -частиц для ТТД CR-39, получим среднее значение $E_{kin}(\alpha) = 5.2 \pm 0.2$ МэВ для величины ($L = \sqrt{2} \langle d \rangle$). Зависимость пробег/энергия для α -частиц в детекторе CR-39 рисунке 10.

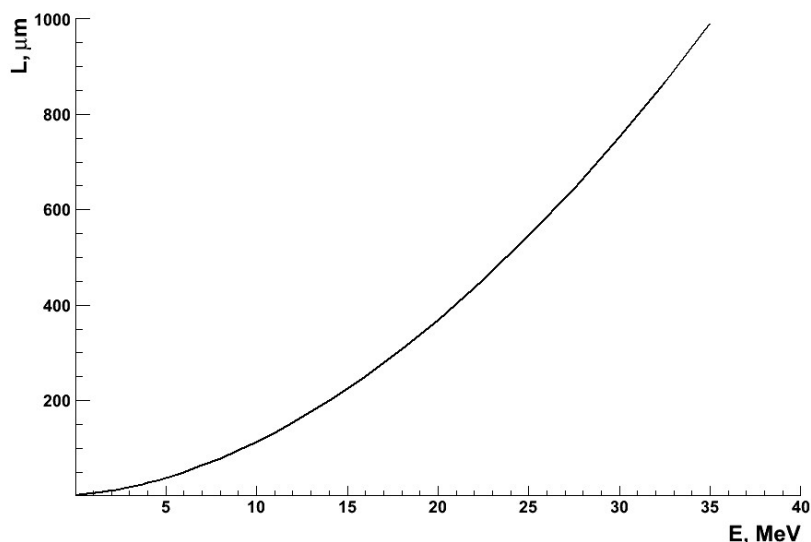


Рисунок 10 – Зависимость пробег/энергия для α -частиц в детекторе CR-39.

Кривая получена на основании моделирования в SRIM пробега α -частиц в ТТД CR-39. Через модельные точки (энергия, пробег) может быть проведена сглаживающая кривая, по точкам которой, можно определить какая энергия α -частицы соответствует оцененному среднему пробегу.

Определение среднего пробега α -частиц из тестового облучения CR-39 радиоисточником с ^{252}Cf .

Перед облучением пластинок ТТД CR-39 на ускорительном комплексе У-70 в ИФВЭ Протвино, часть пластинок этого материала был облучена α -частицами от радиоактивного источника, в котором излучающим изотопом являлось ядро калифорния ^{252}Cf . На рисунке 11 приведен пример фотографии, содержащей треки α -частиц – продуктов излучения ^{252}Cf .

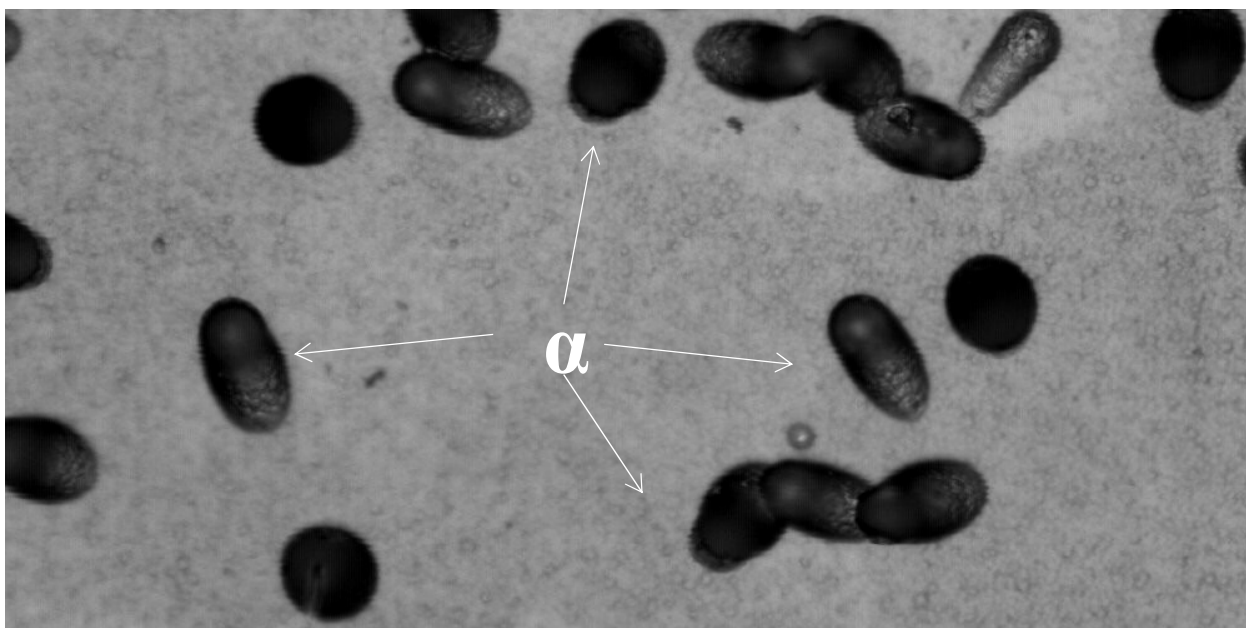


Рисунок 11 – Фотография треков α -частиц в ТТД CR-39, излучаемых источников с ^{252}Cf .

В данной части работы было проанализировано 20 (двадцать) подобных фотографий (см. рисунок 11). По аналогии с треками α -частиц в облучении CR-39 ядрами углерода (^{12}C) были проведены операции распознавания и измерения α -треков средствами ImageJ. На двадцати фотографиях распознано и измерено 110 треков α -частиц. Результаты измерения приведены на рисунке 12 в виде гистограммы, содержащей длины проекций треков α -частиц от источника ^{252}Cf оставленных в материале ТТД CR-39.

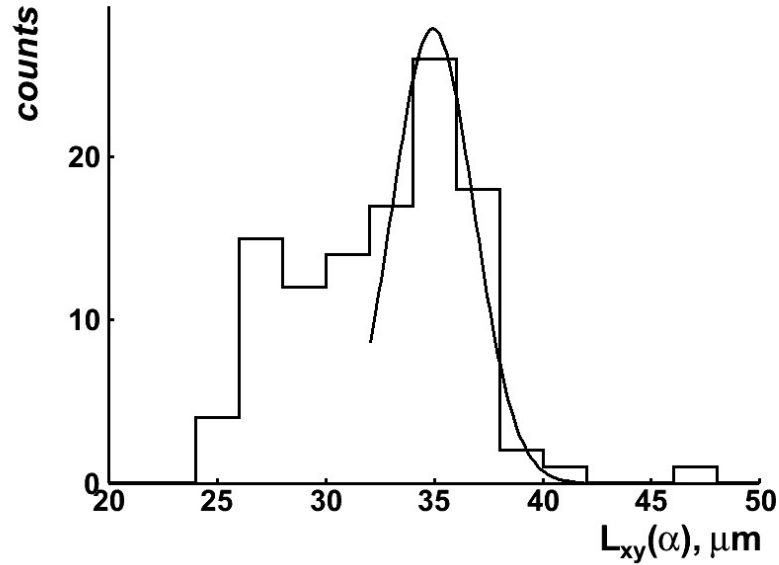


Рисунок 12 – Распределение длин проекций треков α -частиц, оставленных в материале ТТД CR-39 после облучения источником с ^{252}Cf .

Так же допуская, что характер распределения расположения треков должен подчиняться нормальному закону (т.к. не было зафиксировано направление вылета α -частиц), а наиболее вероятное значение фиксируемой проекции трека должно соответствовать углу $\pi/4$, можем оценить средний пробег α -частиц от источника ^{252}Cf в веществе CR-39. Среднее значение $L_{xy}(\alpha) = 34.2 \pm 0.3$ мкм с $\sigma = 2.4 \pm 0.3$ мкм, что соответствует (см. предыдущий параграф) кинетической энергии α -частицы $E_{\text{kin}}(\alpha) = 5.5 \pm 0.5$ МэВ для величины $L = \sqrt{2} L_{xy}(\alpha)$ (48.4 ± 0.4 мкм). Полученное значение близко к табличному значению энергии α -частиц, испускаемых изотопом ^{252}Cf - 6.0 – 6.1 МэВ [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении перечислим основные результаты данной научно-исследовательской выпускной квалификационной работы:

1. Впервые в данной работе проведено обобщение результатов анализа изображений и моделирования облучения ТТД CR-39 на пучке углерода (^{12}C) с энергией 350 МэВ/нуклон и тестового облучения данных ТТД альфа-частицами от ^{252}Cf . Полученные значения средних длин треков альфа-частиц и соответствующие значения энергий находятся в разумном согласии с табличными значениями.

2. Описание представленных результатов приведено в виде обзора.

3. Получен опыт работы в рамках действующего физического проекта и взаимодействия с сотрудниками-исследователями из эксперимента Беккерель ЛФВЭ ОИЯИ.

4. В работе решены следующие задачи:

- Осуществлен обзор типов трековых детекторов и возможностей их применения в экспериментальных исследованиях по физике ядра и элементарных частиц;

- Дано описание физических характеристик треков альфа-частиц в ТТД CR-39;

- Изучены возможности программного комплекса ImageJ для анализа изображений, автоматического поиска треков;

- Получены навыки использования средства распознавания образов ImageJ на примере задачи детектирования треков альфа-частиц – продуктов фрагментации изотопа ^{12}C и испускаемых ^{252}Cf .

5. Все цели данной работы была достигнуты, а поставленные задачи решены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаенко П.Ю. Угловые распределения ионов легких элементов после прохождения тонкой углеродной пленки // *Physical sciences and astronomy* / Бабаенко П.Ю и др. – 2001. – Письма в ЖТФ, Т. 27 №19. – С. 44-48.
2. Взаимодействие частиц с веществом – потери энергии [Электронный ресурс] – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/astro/astro05.htm> (дата обращения 27.04.2022)
3. Глоссарий по физике / Трековые детекторы частиц [Электронный ресурс] – URL: <http://www.bourabai.ru/physics/4144.html> (дата обращения 07.02.2022)
4. Горбачёв С.Г. Применение твердотельных трековых детекторов для измерения содержания сверхмалых количеств альфа-излучателей // *Health sciences* – 2009. – Радиационная гигиена Т.2, №2 – С. 59-62.
5. Дитлов В.А. Развитие и применение теории твердотельных трековых детекторов: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук – М.: ИТЭФ, 2010. – 383 с.
6. Дюрани С. Твердотельные ядерные детекторы. Пер. с англ. / Дюрани С., Балл Р. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
7. Ильенко Е.И. Радиевый институт имени В. Г. Хлопина: К 75-летию со дня основания: [Сборник / Под общ. ред. Е. И. Ильенко]. – СПб.: НПО "Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина", 1997. – 335 с.
8. Иноземцев К.О. Развитие метода отдельного измерения характеристик длиннопробежных и короткопробежных частиц космического излучения твердотельными трековыми детекторами: автореф. дисс ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2019. – 28 с.
9. Маренный А.М. Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радиобиологическом эксперименте. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 174 с.

10. Николаев В.А. Регистрация, дозиметрия и спектрометрия нейтронов с помощью твердотельных трековых детекторов (обзор) // *Physical sciences and astronomy* – 2009. – АНРИ №1 (56) – С. 2-28.
11. Николаев В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях – СПб.: изд. Политехн. ун-та, 2012. – 283 с
12. Пикуз С.А. мл. Твердотельные трековые детекторы в исследованиях лазерной плазмы // *Physical sciences and astronomy* / Пикуз С.А. мл., Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я., Лавриненко Я.С., В. С. Беляев, Ключников В.Ю., Матафонов А.П., Русецкий А.С., Рязанцев С.Н., Бахмутова А.В. – 2016 – ТВТ, Т 54, №3 – С. 453–474.
13. Сазонов А.Б. Ядерная физика: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2019 – 320 с.
14. Сорокин В.Г. Методика ядерно-физических исследований на основе автоматизированной обработки данных трековых детекторов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Москва, 2009. – 102 с.
15. Трековые детекторы частиц [Электронный ресурс] – URL: https://online.mephi.ru/courses/physics/atomic_physics/data/glossary/descriptions/e/22.html (дата обращения 07.02.2022)
16. Флейшер Р.Л. Треки заряженных частиц в твердых телах: принципы и приложения / Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М. – Т. 1–3. – М.: Энергоиздат, 1981. – 152 с.
17. Alpha-spectroscopy of ^{252}Cf decays: a new approach to searching for the octoneutron [Электронный ресурс] – URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1409/1409.1772.pdf> (дата обращения 03.05.2022)
18. Benton E.V. ProtonRecoil Neutron Dosimeter for Personnel Monitoring / Benton E.V., Osvald R.A., Frank A.L., Wheeler R.V. // *Health Physics*. – 1981. – V. 40. – P. 801.
19. Cross W.G. Characteristics of Track Detectors for Personnel Neutron Dosimetry // *Nucl. Tracks*. – 1986. – V. 12. – P. 533.

20. Department of Radiation Dosimetry [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ujf.cas.cz/en/departments/department-of-radiation-dosimetry/> (дата обращения 20.04.2022)
21. Durrani S.A. Radon Measurements by Etched Track Detectors. / Durrani S.A., Ilic R. – London: World Sci. Publ., 1997. – 416 p.
22. Hulber E. Counting recoil proton tracks on padc without a pre-etching step. A novel approach for neutron dosimeter application // Physical sciences and astronomy / Hulber E., Selmeczi D. – Radiation Measurements, 2005 – V. 40 – P. 616-619.
23. Kalsi P.C. Solid State Nuclear Track Detectors and their Applications // Bhabha Atomic Research Center Newsletter / Kalsi P.C., Ramaswami A., Manchanda V.K. – 2005 – V. 257 – P. 6.
24. Microscope HSP-1000 [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ujf.cas.cz/en/departments/department-of-radiation-dosimetry/equipment/microscope-hsp-1000.html> (дата обращения 29.04.2022)
25. Mishra R. A better understanding of the background of CR-39 detectors // Physical sciences and astronomy / Mishra R., Orlando C., Tommasino L., Tonnarini S., Trevisi R. – Radiation Measurements, 2005 – V. 40 – P. 325-328.
26. Nikolaev V.A. Track Methods of Measurement in the Environment Developed in the Khlopin Radium Institute. In M.V. Frontasyeva et al (eds.) Radionuclides and Heavy Metals in Environment, – Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 349-360
27. Sidorov M. Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications / Sidorov M., Ivanov O. – N.Y.: Nova Sci. Publ., 2009. – 275 p.
28. Spurny F. Dosimetry of Neutrons and High Energy Particles with Nuclear Track Detectors // Physical sciences and astronomy – Radiation Measurements, 1995 – V. 25 – P. 429.
29. Tanner R.J. Operational and Dosimetric Characteristics of Etched-Track Neutron Detectors in Routine Neutron Radiation Protection Dosimetry //

Physical sciences and astronomy / Tanner R.J., Bartlett D.T., Hager E.G. –
Radiation Measurements, 2005. – V. 40. – P. 549

30. Ziegler J.F. SRIM-2003 // Physical sciences and astronomy – Nuclear
Instruments and Methods in Physics Research, 2004 – V. 219-220 – P. 1027-1036.