

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра Физико - технической информатики

Направление подготовки **03.04.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **МАГИСТРАТУРА**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

Быкова Тимофея Александровича

Тема работы **Автоматизация гамма-спектрометрических диагностик для БНЗТ**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

канд. физ.-мат. наук

с.н.с. ИЯФ СО РАН

Кроковный П. П./.....

«.....».....20...г.

Научный руководитель

д-р. физ.-мат. наук

в.н.с. ИЯФ СО РАН

Таскаев С. Ю./.....

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Описание предметной области	5
1.1 Метод активационных фольг.....	5
1.2 Устройство гамма-спектрометра с высокочистым германием ..	5
1.3 Описание подвижного стола.....	7
2 Постановка задачи	9
2.1 Цели.....	9
2.2 Требования к программному обеспечению.....	9
2.2.1 Нефункциональные требования	9
2.2.2 Функциональные требования	9
2.2.3 Ограничения	10
2.3 Задачи	10
3 Гамма-спетрометрическая установка	11
3.1 Описание установки	11
3.2 Устройство коллиматора.....	12
3.3 Описание разработанного программного обеспечения	13
3.3.1 Выбор программных инструментов.....	13
3.3.2 Модуль управления гамма-спектрометром.....	13
3.3.3 Модуль управления подвижным столом.....	15
3.3.4 Приложение сканирования	17
3.3.5 Приложение для автоматического измерения фольг	20
4 Результаты	22
Заключение	25
Библиографический список (Литература).....	26

ВВЕДЕНИЕ

В новосибирском Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН предложен и работает ускорительный источник нейтронов [1]. Этот источник нейтронов стал прототипом медицинской установки для проведения бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [2]. Также источник нейтронов используют не только для проведения биологических [3] и физических [4, 5, 6, 7] научных исследований для развития методики БНЗТ, но и для других приложений [8].

Одной из задач, стоящих перед сообществом БНЗТ является определение дозы, полученной пациентом при проведении терапии. Это сложная задача, потому что эта доза состоит из нескольких компонент, каждая из которых зависит от множества параметров [9]. Одной из наших исследовательских задач, является измерение параметров нейтронного излучения и, как следствие, контроль дозы, вызванной нейтронами.

Одним из методов определения параметров нейтронного излучения является метод активационных фольг [10]. Этот метод позволяет определить основные параметры нейтронного излучения: поток нейтронов, его пространственное распределение и энергетический спектр. Этот метод применяется на данном ускорительном источнике нейтронов [11]. Суть метода заключается в том, чтобы разместить около источника нейтронов фольги из различных материалов, которые активируются нейтронами. Образовавшиеся изотопы начинают излучать гамма-кванты с энергией, известной для данного материала. По интенсивности излучаемых гамма-квантов можно судить о потоке и спектре нейтронов в точке, в которой находилась фольга.

Немаловажным для удачной терапии является энергетический спектр нейтронов. Для наибольшей эффективности метода БНЗТ необходим определённый энергетический спектр нейтронов, имеющий максимум в районе 10 кэВ [1]. Слишком быстрые нейтроны (более 100 кэВ) будут давать нежелательную дозу в результате упругого рассеяния на атомных ядрах веществ, преимущественно на водороде, которого много в человеческом теле.

Слишком медленные нейтроны (менее 0.5 эВ) не будут проникать в опухоль и будут давать нежелательную дозу в результате их захвата на атомных ядрах азота. Поэтому важно знать энергетический спектр нейтронов. Для того чтобы точнее определить энергетический спектр нейтронов, необходим большой набор фольг из различных материалов. Одна из проблем активационного метода состоит в том, что измерение активности каждой фольги вручную влечёт для экспериментатора необходимость многократно подвергаться воздействию ионизирующего излучения. Также ручное измерение требует повышенного внимания, недостаток которого ведёт к ошибкам и неточностям. Поэтому требуется автоматизировать процесс измерения спектра излучения облученных фольг.

На установке нейтроны генерируют в результате пороговой реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$. В результате каждого акта рождения нейтрона в литиевой мишени образуется радиоактивный изотоп бериллия с периодом полураспада 53 дня. Изучение распространения бериллия тоже входит в сферу наших научных интересов. Так, например, было исследовано распределение бериллия мишени [12]. Активность мишени была вручную измерена в зависимости от координаты. Это позволило восстановить профиль пучка протонов, который попадал на мишень в процессе генерации нейтронов.

В процессе экспериментов с нейтронами образуется множество источников гамма-излучения, которые требуют исследования и контроля. Такими источниками могут быть не только нейтроногенерирующая мишень и облучаемые нейтронами образцы, но даже и лабораторные животные. Автоматизация подобных измерений по координатам позволила бы регулярно и быстро измерять любой образец без угрозы для исследователя.

1 ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Метод активационных фольг

Активационная фольга – это тонкая круглая пластинка толщиной менее 1 мм и диаметром 10 мм, состоящая из чистого вещества с известной массой. Можно расположить фольги из одного материала на различном удалении от нейтроногенерирующей мишени: например, около опухоли и около здоровых тканей. После облучения нейтронами в фольге образуется радиоактивный изотоп, масса которого пропорциональна потоку нейтронов определенного энергетического диапазона в том месте, где находилась фольга. Сравнив активность фольг можно определить, как был распределён поток нейтронов в пространстве.

При помощи активационных фольг можно определить энергию нейтронов. Для этого используется набор фольг из различных материалов. Каждый материал имеет резонанс в сечении захвата нейтрона с определенной энергией. По уровню активации разных фольг можно восстановить энергетический спектр нейтронов. Эта задача осложнена тем, что каждый материал имеет не один резонанс, а непрерывное сечение взаимодействия с множеством резонансов разной величины. И поэтому необходимо применять сложный математический метод, в котором итеративно из сечений строится спектр нейтронов, при этом решение не является единственным [7].

Для реализации метода активационных фольг применяется специальный набор фольг производства компании Shieldwerx (U.S.A.). Набор содержит различные материалы: Au, Cu, Fe, In, Mg, NaCl, Ni, S, Ti, V, Zn, Zr. Для отсека тепловых нейтронов с энергией меньше 0.5 эВ в наборе контейнеры из кадмия.

1.2 Устройство гамма-спектрометра с высокочистым германием

Для измерения спектра гамма излучения используется гамма-спектрометр с высокочистым германием, изображенный на рисунке 1. Данный

спектрометр был разработан в Институте физико-технических проблем г. Дубна. В качестве детектирующего элемента выступает кристалл из высокочистого германия, на который подан потенциал 1450 В и который охлаждается жидким азотом. При низких температурах энергия свободных электронов в кристалле снижается, и ток почти отсутствует. Гамма-квант, попавший в кристалл, отдаёт свою энергию электронам. Электрическое поле стягивает образовавшиеся электроны на положительный электрод. Ток, возникший в результате пролёта гамма-кванта, измеряется амперметром. Суммарный заряд, образовавшийся в германии в момент пролёта гамма-кванта, пропорционален энергии гамма-кванта.

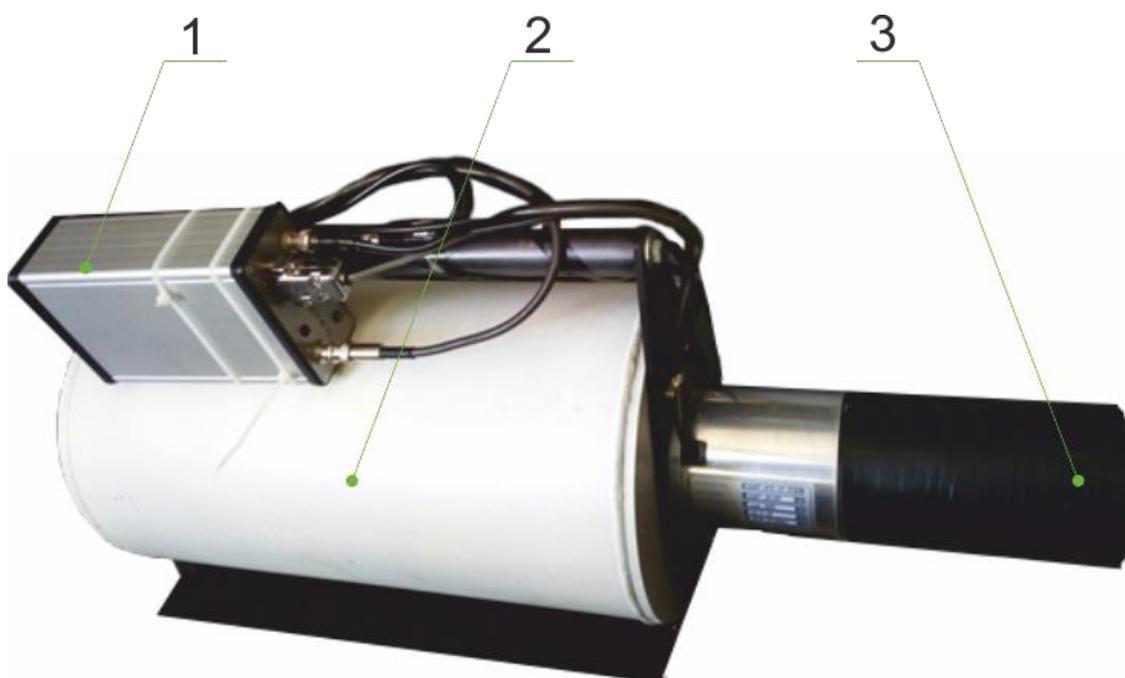


Рисунок 1 – Гамма-спектрометр с высокочистым германием: 1 – Блок Цифрового Спектрометрического Устройства (ЦСУ), 2 – Сосуд с жидким азотом, 3 – Кристалл с высокочистым германием.

Данный гамма-спектрометр позволяет с хорошей точностью различать энергии гамма-квантов. Типичная ширина линии на полувысоте составляет 5 кэВ. Максимальное значение измеряемой энергии составляет 2 МэВ.

В оригинальном программном обеспечении управления гамма-спектрометром реализовано множество полезных функций для анализа спектра, включая автоматический поиск пиков и калибровку по энергии. Но в

нѐм нет возможности автоматизировать сбор спектра по команде от другой программы.

Блок ЦСУ подключается к персональному компьютеру по USB COM порту. Управление гамма-спектрометром осуществляется посредством библиотеки функций RCOM4_CTRL.dll в которой выполняется установка соединения и опросы состояния устройства в отдельном потоке. Функции этой библиотеки используют соглашения о вызовах stdcall, их можно использовать при написании программ на любом языке, работающих в среде Microsoft Windows.

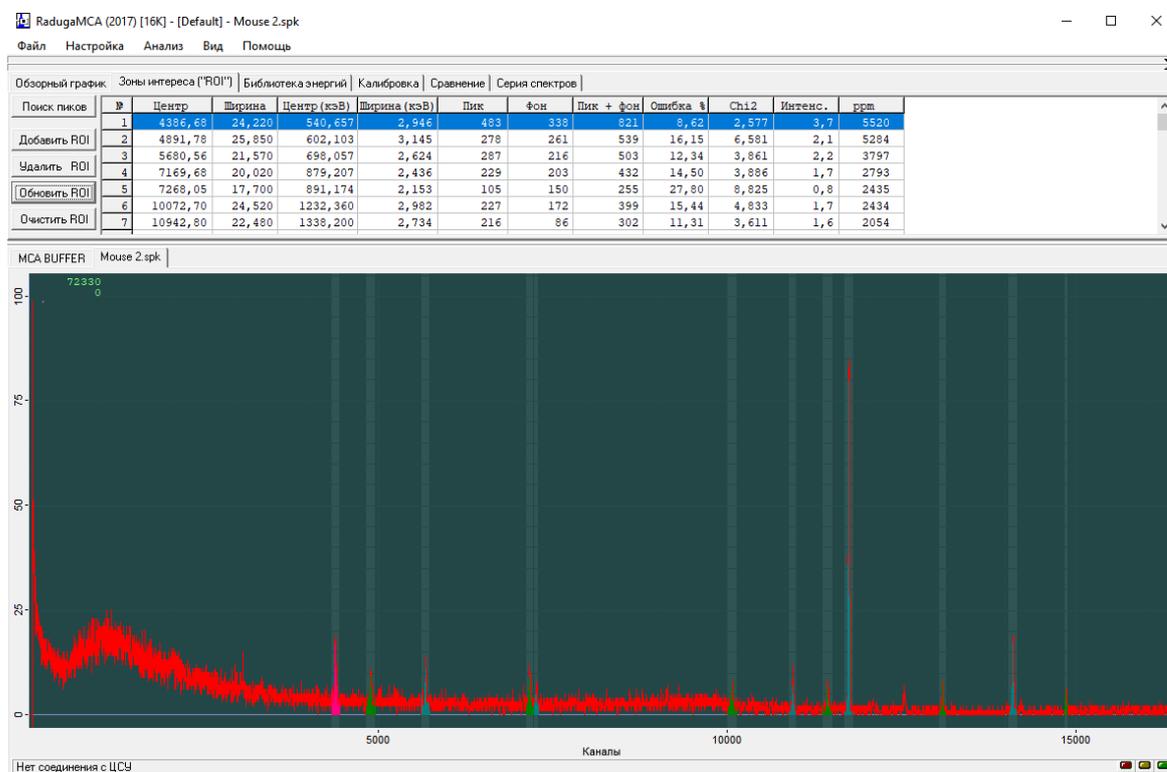


Рисунок 2 – Изображение пользовательского интерфейса оригинальной программы управления гамма-спектрометром.

1.3 Описание подвижного стола

Для того чтобы автоматически перемещать образцы или фольги, был приобретѐн подвижный координатный стол TS-01-120x120 (ООО “Топливные системы”, Россия, Новосибирск). Внешний вид стола изображен на рисунке 3.

Этот стол может перемещаться по координатной плоскости площадью 116 мм² с точностью 0,2 мм.

Управление столом осуществляется по стандартному протоколу управления ЧПУ станками GRBL через USB COM порт посредством отправки и получения текстовых сообщений. Текстовые сообщения содержат символьные команды и данные в формате ASCII. Набор команд содержит команды для опроса состояния стола, его положения, команды для перемещения с заданной скоростью в относительной или абсолютной системе координат, а также команду для автоматической калибровки. Также есть возможность регулировки высоты стола, но только в ручном режиме.

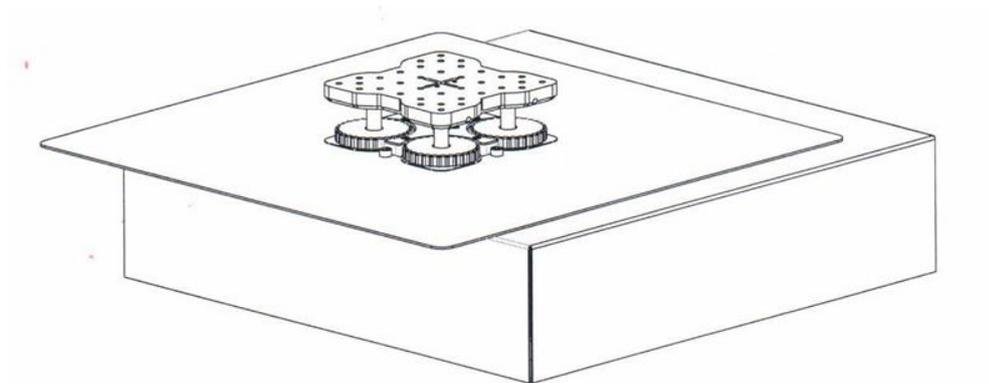


Рисунок 3 – Внешний вид подвижного стола.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1 Цели

Для того чтобы экспериментатор не подвергал себя дополнительному облучению во время работы с радиоактивными образцами, необходимо автоматизировать процесс измерения. Необходимо разработать программное обеспечение с пользовательским интерфейсом, которое будет управлять подвижным столом и собирать данные с гамма-спектрометра. Пользователь должен разместить образцы на подвижном столе и запустить автоматические измерения.

2.2 Требования к программному обеспечению

2.2.1 Нефункциональные требования

- Наличие пользовательского интерфейса, с отображением результатов измерений в реальном времени.
- Возможность работать с результатами измерений без подключения к гамма-спектрометру и подвижному столу.

2.2.2 Функциональные требования

- Приложение должно производить автоматические измерения образцов или фольг. Т.е. передвигать образец к спектрометру и запускать набор спектра.
- Приложение должно позволять управлять высоким напряжением на гамма-спектрометре, а также автоматически убирать его после окончания измерений.
- Приложение должно позволять управлять положением подвижного стола из пользовательского интерфейса, производить автоматическую или ручную калибровку по положению.
- Приложение должно позволять сохранять и загружать результаты измерений и содержать функции для анализа результатов.

2.2.3 Ограничения

Приложение должно корректно исполняться в операционной системе Windows 7, 8, 10.

2.3 Задачи

В этой работе выделяются две задачи, которые необходимо выполнить:

- 1) Необходимо реализовать автоматическое покоординатное сканирование образцов, с отображением и сохранением результата.
- 2) Необходимо реализовать автоматическое измерение набора фольг с возможностью последующего анализа результатов.

Выделяются следующие подзадачи:

- Реализовать программный модуль управления и сбора данных с гамма-спектрометра.
- Реализовать программный модуль управления подвижным столом.
- Разработать приложение с пользовательским интерфейсом, позволяющее запустить программу сканирования образца по координатам с отображением результатов измерений в реальном времени.
- Разработать приложение с пользовательским интерфейсом, позволяющее автоматически измерять спектр излучения набора облученных фольг.
- Реализовать итеративный метод расчета спектра нейтронов по известным сечениям и активности фольг.

3 ГАММА-СПЕТРОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

3.1 Описание установки

Для того чтобы автоматизировать процесс измерений, была собрана гамма-спектрометрическая установка, которая изображена на рисунке 4.

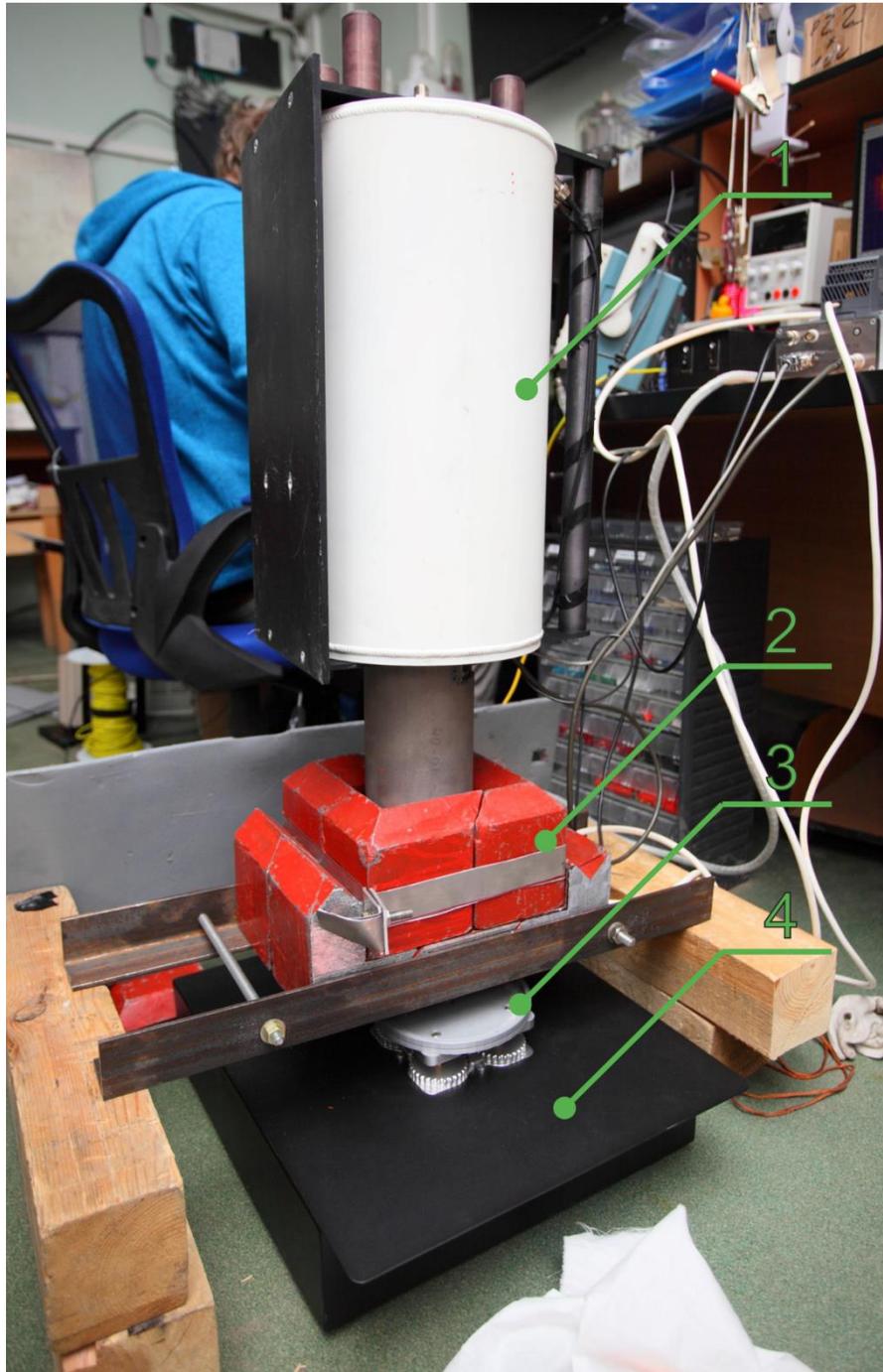


Рисунок 4 – Фото гамма-спектрометрической установки. 1 – Гамма-спектрометр, 2 – свинцовый коллиматор, 3 – подставка под образцы мишеней, 4 – подвижный стол.

Измеряемый образец помещается на подставку 3, которая закреплена на подвижном столе 4. Над образцом расположен гамма-спектрометр 1, который окружен свинцовым коллиматором 2. В коллиматоре сделано отверстие диаметром 2 мм.

3.2 Устройство коллиматора

Коллиматор нужен для ограничения области наблюдения и снижения потока рассеянных гамма-квантов. Данный коллиматор собран из свинцовых кирпичей, имеющих форму “ласточкин хвост” и толщину 50 мм (рисунок 5). В нижнем кирпиче есть отверстие конической формы с проходным диаметром 2 мм, которое пропускает регистрируемые гамма-кванты.

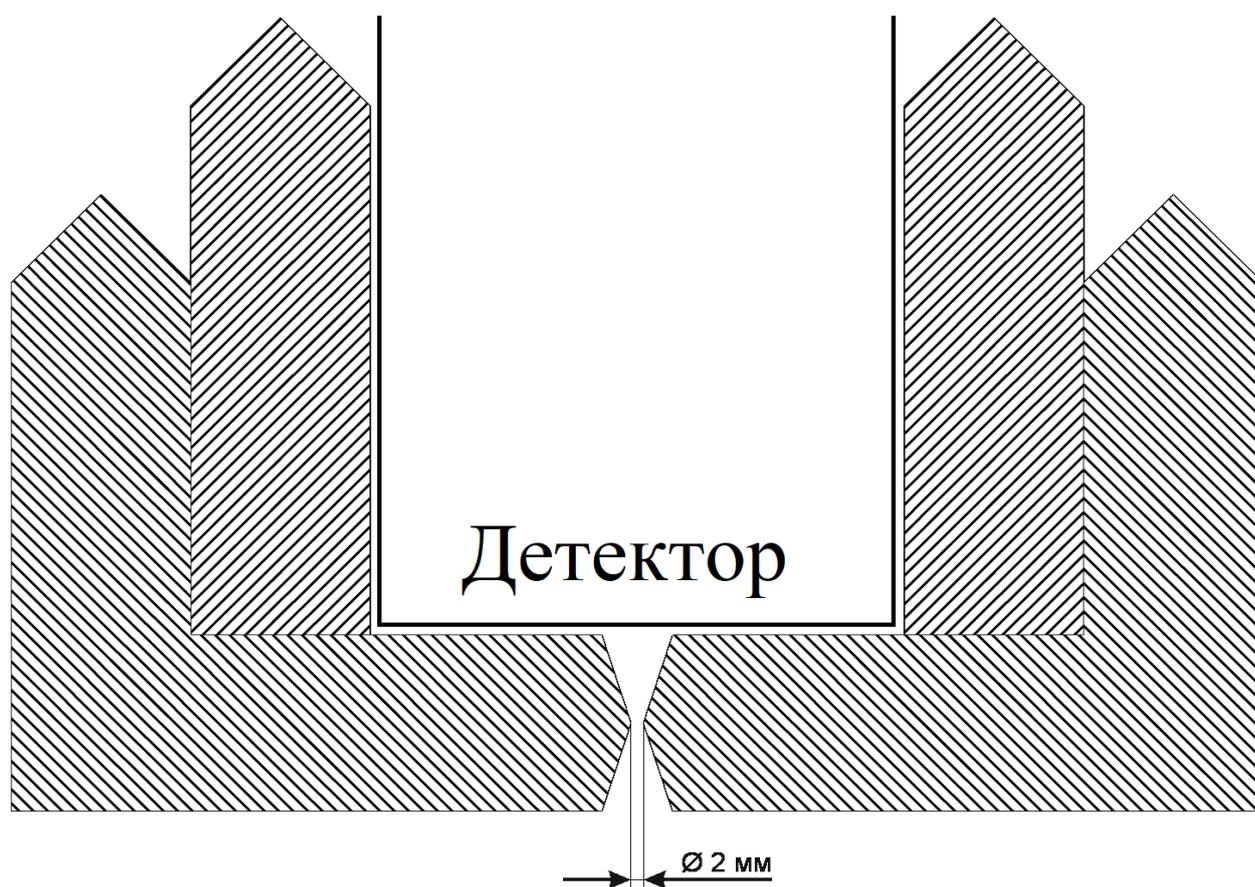


Рисунок 5 – Устройство свинцового коллиматора в сечении.

3.3 Описание разработанного программного обеспечения

3.3.1 Выбор программных инструментов

Для разработки ПО был выбран язык программирования C++ и фреймворк для разработки пользовательского интерфейса Qt 5.13, а также для сборки использовался компилятор MinGW.

Библиотека Qt предоставляет инструментарий для разработки графических интерфейсов пользователя. Основным классом, реализующим визуальные элементы, является QWidget. Каждый объект класса QWidget наследуется от класса QObject. Класс QObject в свою очередь отвечает за реализацию механизма сигналов и слотов. Этот механизм используется для коммуникации объектов. Механизм сигналов и слотов применяется в создании пользовательских интерфейсов, т.к. позволяет создать событийно ориентированную систему. Каждый QObject во время своей жизни генерирует сигналы. Другие объекты этого же класса могут исполнять свои методы по наступлению сигнала от другого объекта, такие методы называются слотами.

3.3.2 Модуль управления гамма-спектрометром

Управление осуществляется через вызовы функций библиотеки RCOM4_CTRL.dll. Описание параметров и имён функций было предоставлено разработчиками оригинального программного обеспечения.

Библиотека функций предоставляет интерфейс для связи с устройством. При этом сложный слой обмена данными между устройством и компьютером по СОМ-порту остается скрытым. При связи с устройством создается новый программный объект – драйвер. Если драйверу при инициализации был передан идентификатор окна программы пользователя (Windows handle id), то после прихода сообщений от устройства драйвер высылает сообщение, которое программа пользователя может обработать. Таким образом, задачей программы пользователя является обработка сообщений от драйвера устройства.

Последовательность инициализации драйвера и работы с устройством следующая:

1. Поиск, в результате которого создается список подключенных устройств.
2. Присоединение к выбранному устройству по индексу в списке или по дескриптору. При этом создается уникальная копия драйвера устройства и создается поток обработки сообщений, приходящих от устройства по СОМ-порту.
3. Передача драйверу идентификатора окна программы пользователя, которому драйвер будет высылать сообщения.
4. Настройка режима простоя драйвера. Во время отсутствия активности со стороны пользователя драйвер может производить периодический опрос устройства для получения статусной информации или для считывания спектра в процессе его набора.
5. Подъём высокого напряжения.
6. Запуск или остановка набора спектра.
7. Обработка сообщений от драйвера.

Обмен данными между драйвером и устройством производится в режиме ведущий – ведомый, суть которого заключается в том, что устройство отвечает только на запросы от драйвера. То есть обмен данными всегда производится по схеме запрос – ответ.

Основные функции библиотеки управления гамма-спектрометром:

- `g4com_search_devices` – функция предназначена для поиска устройств, подключенных к СОМ-портам компьютера.
- `g4com_connect_by_index` – функция предназначена для установления канала связи с устройством и создания программного коммуникационного объекта (драйвера), обрабатывающего поток данных от устройства. При подключении к устройству создается отдельный поток для обслуживания соответствующего СОМ-порта.
- `g4com_disconnect` – функция предназначена отключения устройства, освобождения порта и удаления потока обработки.

- `g4com_set_owner_whoandle` – функция устанавливает идентификатор окна приложения пользователя. После этого на данное приложение начинают поступать сообщения от устройства через механизм операционной системы Windows PostMessage.
- `g4com_set_hv` – функция устанавливает высокое напряжение на кристалле. При этом устройство автоматически и плавно поднимает или опускает напряжение до заданного.
- `g4com_start_spk_ext` – функция запускает набор спектра. Данные сохраняются в памяти ЦСУ и с периодом раз в секунду отсылаются по идентификатору окна.
- `g4com_stop_spk` – Функция передает на ЦСУ команду остановки набора спектра. Работает для всех режимов набора – принудительно останавливает текущий набор спектра.

С использованием библиотеки Qt был написан программный модуль, который использует эти функции и обрабатывает сообщения от устройства. Модуль представляет собой программный объект класса QObject. Данный модуль необходим для встраивания в инфраструктуру приложений Qt.

3.3.3 Модуль управления подвижным столом

Управление подвижным столом осуществляется посредством отправки и получения текстовых сообщений через COM-порт контроллеру. Контроллер в свою очередь осуществляет управление двигателями и коммуникацией с ПК. Сообщения должны соответствовать протоколу GRBl 1.1. Протоколом не предусмотрено постоянное соединение с устройством, поэтому приложению необходимо периодически опрашивать состояние устройства.

Порядок работы с устройством подвижного стола:

1. Опрос состояния устройства подвижного стола. Если стол был недавно включен, то он находится в режиме Alarm. Это состояние, при котором контроллер не знает текущего положения стола и не может управлять столом.

2. Для того чтобы перевести стол в управляемый режим необходимо произвести калибровку стола.
3. Отправка команд на перемещение.
4. Периодический опрос состояния и положения.

Существует два способа калибровки стола: автоматический и ручной. Ручной осуществляется путём физического перемещения стола в положение нуля (центра). Затем принудительным обнулением текущих координат. Такой способ не желателен т.к. есть вероятность повредить двигатели подвижного стола. Автоматический способ калибровки осуществляется контроллером с использованием концевых выключателей. Стол производит автоматический поиск нуля перемещением в крайнее положение до тех пор, пока не активируется концевой выключатель. Калибровка выполняется по команде контроллеру “\$H”. Такой способ предпочтительнее, но при эксплуатации стола наблюдалась проблема, при которой концевой выключатель был ложно активирован по неизвестным причинам. Из-за этого автоматическая калибровка завершалась неправильно.

Опрос состояния производится отправкой сообщения “?” – знак вопроса. В ответ на этот запрос контроллер отправляет сообщение вида “idle|WPos:0.000,0.000,20.000|FS:0,0|Pn:XYZ”. Сообщение делится на блоки символом “|” (Вертикальная черта). Первый блок содержит текущее состояние системы перемещения:

- idle – состояния ожидания команд на перемещение,
- run – каретка находится в движении,
- hold – движение каретки приостановлено,
- alarm – состояние критической ошибки в работе.

Второй блок WPos содержит текущие координаты в рабочей системе координат. Первое значение – координата X, второе – координата Y, третье – координата Z – которая фактически не используется, но присутствует. Блок FS текущая скорость перемещения. Блок Pn показывает состояние концевых

выключателей. Если ни один из них не замкнут, то этот блок не появится в сообщении.

Для перемещения стола необходимо задать режим абсолютных или относительных координат командой “G90” или “G91” соответственно. Команда “G0 X20 Y30 F500” выполняет перемещение стола в точку (20,30) со скоростью 500 мм/мин.

Был разработан программный модуль управления подвижным столом в виде программного объекта QObject. Этот объект инкапсулирует управление и обработку сообщений стола, и позволяет интегрироваться в инфраструктуру приложений Qt.

3.3.4 Приложение сканирования

Было разработано приложение для сканирования образцов по координатам. Это приложение позволяет пользователю подключиться к гамма-спектрометру, поднять высокое напряжение, откалибровать подвижный стол и запустить сканирование по координатам. При этом выполняется построчное сканирование с чередованием направления по горизонтали, и в каждой точке измеряется спектр. Приложение отображает данные сканирования в реальном времени, а также позволяет сохранить или загрузить результаты сканирования. Также реализован небольшой функционал для анализа и экспорта данных.

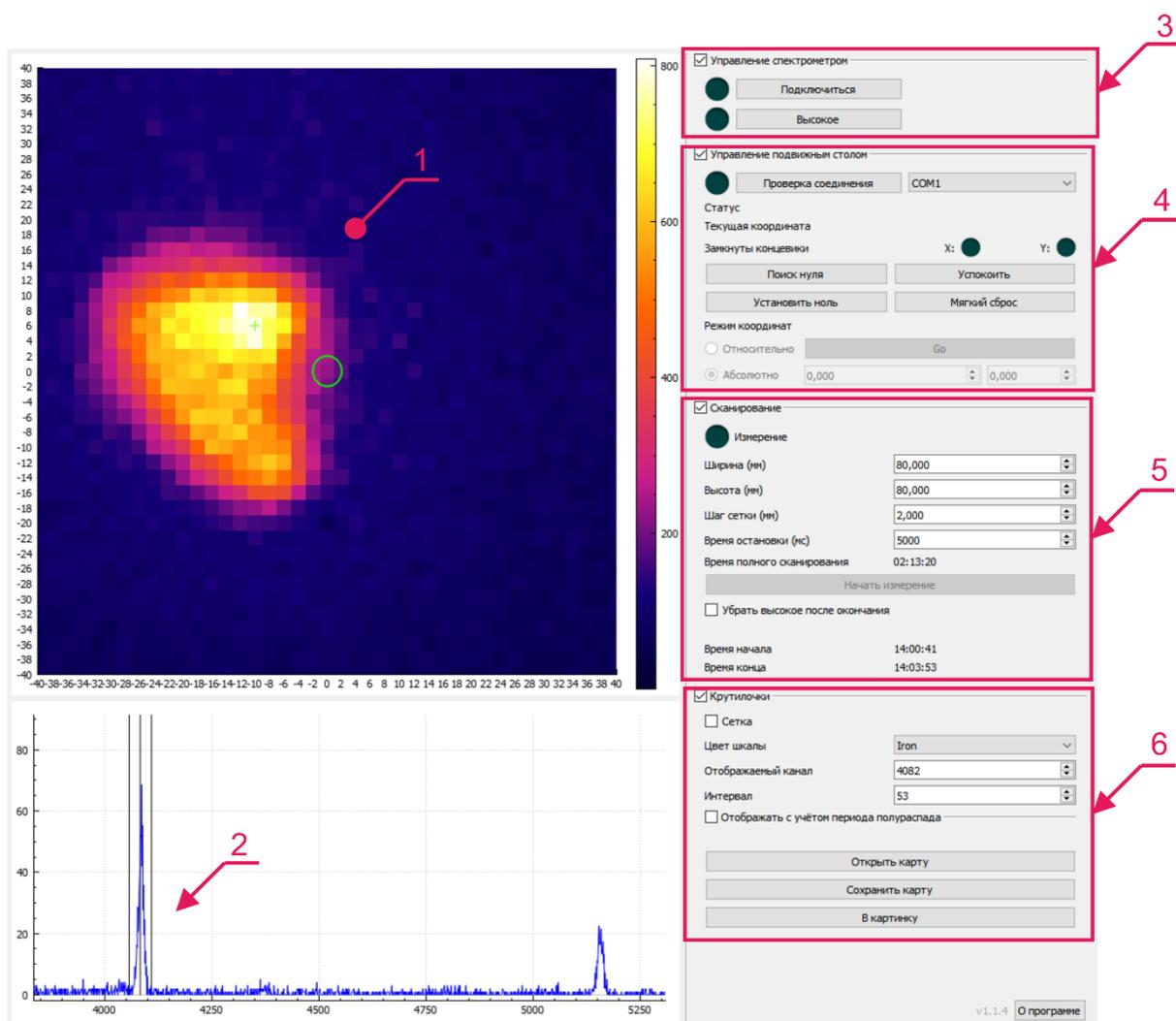


Рисунок 6 – Пользовательский интерфейс программы сканирования.

На рисунке 6 представлен пользовательский интерфейс программы сканирования. В основной области под номером 1 на рисунке отображается координатная плоскость, на плоскости отображается цветовая карта, где цвет соответствует сумме событий в спектре в заданной точке. Интервалы суммирования задаются из блока пользовательского интерфейса 6. Каждый пиксель цветовой карты представляет собой спектр, набранный из данной координаты. Поэтому изменяя интервалы суммирования можно увидеть, как изменяется характер излучения образца в зависимости от отображаемой энергии. Иными словами, можно наглядно увидеть – что и где светится.

Есть возможность отобразить график спектра в любой координате, кликнув на соответствующий пиксель два раза. График спектра выбранной

или измеряемой в данный момент точки отображается в области 2 на рисунке 6. Также на этом графике отображаются интервалы суммирования.

В области 3 расположены кнопки управления гамма-спектрометром: подключение и управление высоким напряжением.

В область 4 предназначена для управления подвижным столом. В ней можно выполнить подключение к столу, при котором будет происходить периодический опрос состояния стола. Можно выполнить автоматическую или ручную калибровку. А также перемещать стол к заданной координате.

Область 5 на рисунке 6 предназначена для установки параметров сканирования: ширина и высота образца (область сканирования), шаг сканирования и время сканирования каждой точки. Время, которое будет затрачено на полное сканирование, рассчитывается и отображается для удобства.

В области 6 на рисунке 6 расположены элементы для управления отображением результата: отображаемые интервалы в спектре, цветовая шкала. Также есть возможность компенсировать ослабление сигнала, вызванное быстрым спадом активности образца или долгим сканированием. Для этого необходимо задать время полураспада, и тогда отображаемые данные на цветовой карте будут компенсированы в соответствии с законом полураспада. Есть функции для сохранения и загрузки данных сканирования, а также экспорт в изображение для последующего анализа.

Данные, изображенные на рисунке 6, были получены во время первого запуска системы сканирования. Была просканирована мишень с тонким литиевым слоем после генерации нейтронов. Была выбрана область 80 мм², шаг сетки 2 мм, время сканирования каждой точки 40 секунд. Сканирование длилось примерно сутки, после этого было получено детальное изображение. В канале 4100 отчетливо выделяется пятно активности диаметром примерно 30 мм. Канал 4100 соответствует энергии гамма-квантов 478 кэВ – линия распада бериллия-7.

3.3.5 Приложение для автоматического измерения фольг

Также ведётся разработка приложения для автоматического измерения фольг. Так как основные модули управления устройствами уже разработаны и готовы для встраивания, остается разработать функционал пользовательского интерфейса и модуль анализа спектра.

Был изготовлен планшет для фольг с 12 лунками. Каждая фольга помещается в свою лунку перед облучением. Затем планшет целиком помещается под источник нейтронов. После облучения планшет помещается на подвижный стол. В программе сканирования предварительно задана геометрия, тип планшета и положения лунок. Программа автоматически перемещает стол так, чтобы каждая лунка поочередно оказывалась напротив коллиматора, и собирает спектр. Информация о геометрии планшета и об измеряемых изотопах предварительно вводится в xml файл. В этом файле вводятся все необходимые данные об измеряемой фольге, такие как: название элемента, положение пика в спектре, ширина пика и количество событий в пике, которое необходимо набрать. Далее составляется таблица, в которой представлены все фольги и соответствующее им количество образовавшихся изотопов. Количество атомов образовавшихся изотопов можно вычислить по известному закону полураспада для этого вещества.

На рисунке 7 изображен прототип пользовательского интерфейса программы измерения фольг. В главном окне программы отображается измеряемый планшет и названия измеряемых элементов. Есть возможность посмотреть спектр каждого элемента.

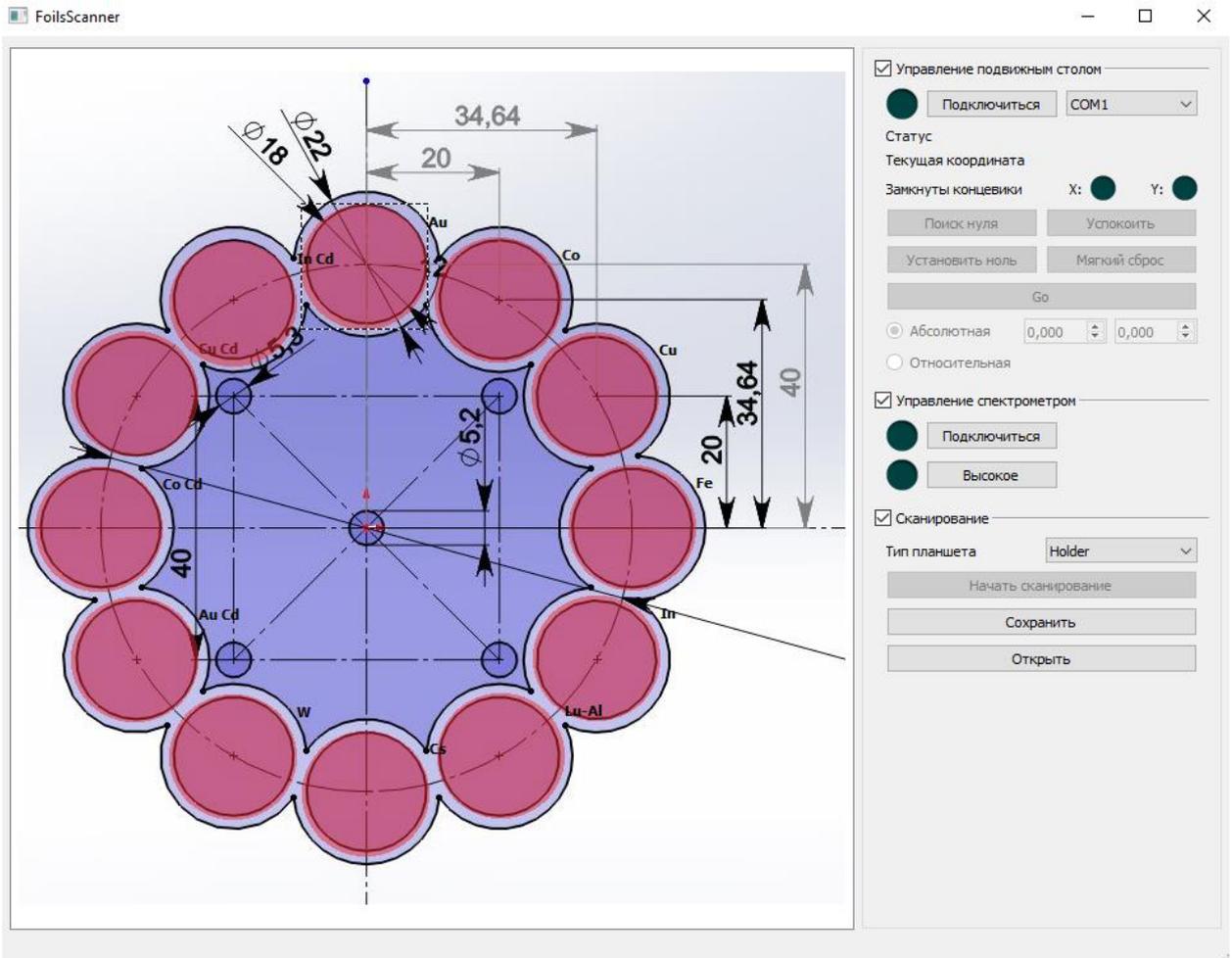


Рисунок 7 – Прототип пользовательского интерфейса программы измерения фольг.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Гамма-спектрометрическая установка и разработанное программное обеспечение были внедрены и применяются для сканирования образцов по координатам. Автоматизация процесса сканирования позволила значительно увеличить точность и скорость проведения измерений. Теперь сканирование мишеней производится после каждой работы с мишенями после генерации нейтронов. На рисунке 8 изображены некоторые результаты сканирований мишеней. Все данные отображаются в канале 4100, который соответствует энергии гамма-квантов 478 кэВ.

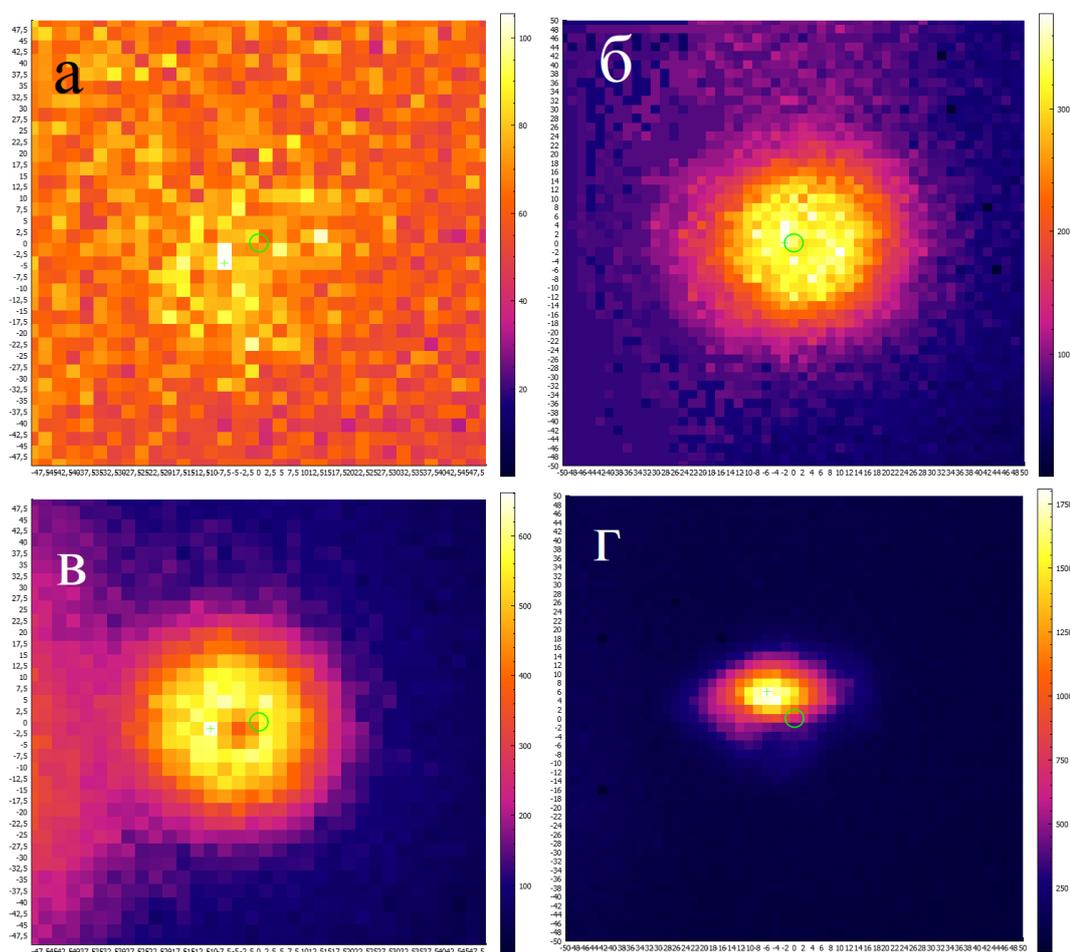


Рисунок 8 – Результаты сканирования мишеней после генерации нейтронов: *а* – медная подложка после удаления лития, *б* – литиевая мишень толщиной 20 $\mu\text{м}$, *в* – литиевая мишень толщиной 175 $\mu\text{м}$ с разрушением литиевого слоя в центре, *г* – литиевая мишень без использования развертки протонного пучка.

Была просканирована медная подложка после очистки от облученного лития. На рисунке 8а видно, что есть небольшая остаточная активность в месте, где происходила генерация нейтронов. Это означает, что часть радиоактивного изотопа бериллия-7 диффундировала в медную подложку. Диаметр пятна соответствует диаметру пучка протонов и составляет 35 мм.

Была просканирована литиевая мишень с толщиной литиевого слоя 20 мкм (рисунок 8б). Изображение было получено сканированием с шагом 2 мм. Делать шаг менее чем 2 мм не имеет смысла, так как диаметр отверстия коллиматора составляет 2 мм. Таким образом было получено детальное изображение активности бериллия-7 в мишени. Диаметр пятна составил 35 мм.

Была просканирована мишень с толщиной литиевого слоя 175 мкм (рисунок 8в). При работе с генерацией нейтронов проводились тепловые испытания мишени, в том числе с экстремально высокой плотностью мощности нагрева. Литиевый слой в центре мишени расплавился и истончился, оголив медную подложку. На результатах сканирования видно тёмное пятно диаметром 5 мм в области активности диаметром 35 мм.

Была просканирована литиевая мишень после генерации нейтронов без водяного охлаждения и без использования развёртки пучка в горизонтальном тракте ускорителя. Т.к. мишень стояла вертикально, расплавленный литий стёк в нижнюю часть мишени, образовав каплю лития. Сканирование этой мишени показало, что никакой активности в нижней части мишени нет. По неизвестным причинам пятно активности осталось в центральной части мишени. Возможное объяснение следующее: генерация нейтронов и образование бериллия происходит на верхних слоях лития, вниз стёк литий из нижних слоёв, не сместив пятно активности.

Также на сканирующем столике были просканированы несколько лабораторных мышек после облучения нейтронами. Предварительно их активность была измерена без коллиматора. Спектр представлен на рисунке 2, результат сканирования на рисунке 9. Несмотря на то, что после облучения

было обнаружено много линий, их светимость была мала, поэтому сканирование через отверстие в коллиматоре не дало контрастного изображения.

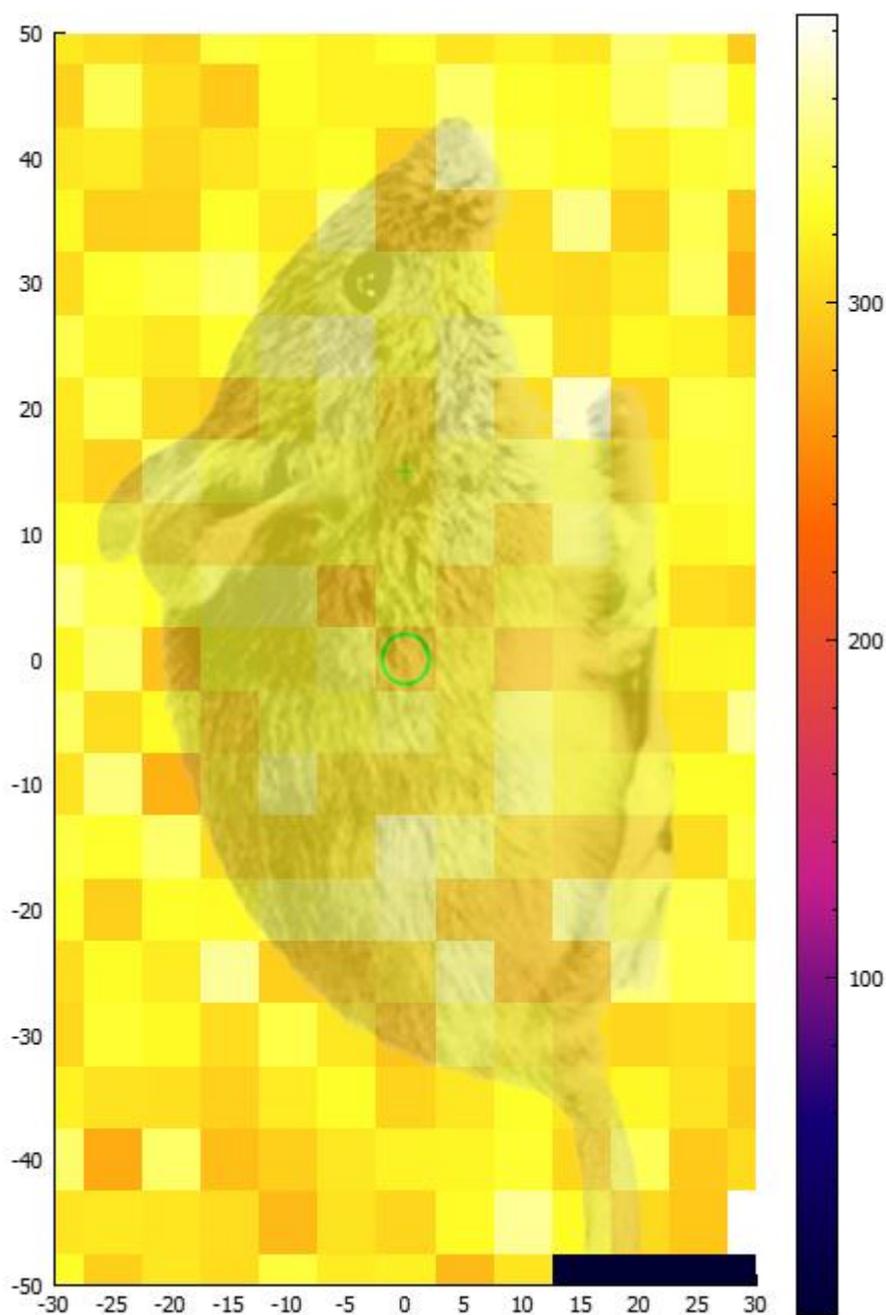


Рисунок 9 – Результат сканирования лабораторной мыши. Полупрозрачным нарисована область, где находилась мышь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для автоматизации гамма-спектрометрических измерений разработана и собрана измерительная установка, включающая в себя подвижный стол, коллиматор и гамма-спектрометр. Разработано программное обеспечение, позволяющее управлять данными устройствами. Приложение для сканирования образцов по координатам активно применяется при проведении научных исследований на ускорительном источнике нейтронов ИЯФ СО РАН. Разрабатывается приложение сканирования набора активационных фольг и метод расчета спектра нейтронов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (ЛИТЕРАТУРА)

[1] Таскаев С. Ю. Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии / С. Ю. Таскаев // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2019. – Т. 50, № 5. – С. 657-669.

[2] Neutron Capture Therapy. Principles and Applications / Eds. W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa; – Heidelberg, Germany: Springer, 2012. – 553 p

[3] Radiobiological response of U251MG, CHO-K1 and V79 cell lines to accelerator-based boron neutron capture therapy. / E. Sato, A. Zaboronok, T. Yamamoto [et al.] // Journal of Radiation Research. – 2018. – Vol. 59, № 2. – P. 101-107.

[4] In Situ Observations of Blistering of a Metal Irradiated with 2-MeV Protons. Metals / A. Badrutdinov, T. Bykov, S. Gromilov [et al.] // Metals. – 2017. – Vol. 7, № 12. – 26 p.

[5] Измерение проволочным сканером пучка отрицательных ионов водорода, инжестируемого в ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией / Т. А. Быков, Д. А. Касатов, Я. А. Колесников [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 5. – С. 90-95.

[6] A multichannel neutron flux monitoring system for a boron neutron capture therapy facility / Т. Bykov, D. Kasatov, A. Koshkarev [et al.] // Journal of Instrumentation JINST. – 2019. – Vol 14 № P12002. – 12 p.

[7] Sokolova E. Observation of the luminescence on the lithium neutron generating target under proton beam irradiation. / E. Sokolova, T. Bykov, D. Kasatov [et al.] // Book of abstracts of the 10 Young Researchers BNCT Meeting, September 26-29 2019. – Helsinki, Finland.

[8] Qualification of Boron Carbide Ceramics for Use in ITER Ports / Shoshin, A., Burdakov, A., Ivantsivskiy [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – pp 1-5.

[9] Current Status of Neutron Capture Therapy. // International Atomic Energy Agency. – 2001. – № IAEA-TECDOC-1223. – Vienna, Austria.

[10] Стогов Ю.В. Основы нейтронной физики // МИФИ: Учебное пособие. – М.: 2008. – 204 с.

[11] Kasatov D. Activation foil measuring on accelerator based neutron source. / D. Kasatov, S. Taskaev, T. Sycheva, L. Zaidi. // Programme and Abstracts of the 9th Young Researchers' BNCT Meeting, November 13-15 2017. – Kyoto, Japan.

[12] Sokolova E. Measurement of the proton beam profile via an activation method of diagnostics / E. Sokolova, D. Kasatov, Ya. Kolesnikov [et al.] // Proceedings of RuPAC2016. November 21-25 2016. – St. Petersburg, Russia.