

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий
Кафедра №40 "Физика элементарных частиц"

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Реконструкция изображений с использованием
данных макета миниПЭТ**

Студент группы М24-112

Сафонова М.А.

Научный руководитель

Дубинин Ф.А.

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Введение	3
2 Позитронно-эмиссионная томография	5
2.1 Получение радиофармпрепаратов. Принцип меченых атомов	5
2.2 Физика ПЭТ	6
2.3 Реконструкция изображений	9
3 Используемое программное обеспечение	10
3.1 Язык программирования Python	10
3.2 Software for Tomographic Image Reconstruction (STIR)	10
3.3 Библиотека Matplotlib	11
3.4 Библиотека NumPy	11
4 Экспериментальная установка	12
5 Результаты	14
5.1 Генерация изображений и получение их реконструкции с помощью встроенных методов STIR	14
5.2 Реконструкция изображений из данных, полученных с помощью миниПЭТ	15
6 Заключение	18
Список использованных источников	19

1 ВВЕДЕНИЕ

Позитронно-эмиссионная томография (далее ПЭТ) ключевая технология медицины, позволяющая "увидеть" процессы, происходящие в живом организме. Данная разработка имеет много возможностей использования:

- диагностика онкологических заболеваний на ранней стадии;
- оценка жизнеспособности миокарда перед операцией;
- обнаружение нейродегенеративных расстройств до появления явных клинических симптомов;
- наблюдение за зонами головного мозга в процессе медикаментозного лечения.

ПЭТ дает возможность получать функциональные изображения, то есть визуализацию не структуры органов, а их биохимической и физиологической активности (метаболизм глюкозы, поток крови, плотность распределения рецепторов в тканях организма). Подобные исследования возможны не только для людей, но и для животных. Исследования на мелких животных являются важной частью изучения работы лекарственных препаратов, а также наблюдением развития заболеваний с течением времени. [1]

Размеры тела мелких лабораторных животных (мыши, крысы) на порядки меньше человеческих. Клинический ПЭТ-сканер не способен визуализировать анатомические структуры или небольшие опухоли у грызунов, что делает невозможным прямое перенесение методов с пациента на животную модель, поэтому важно разрабатывать такие сканеры, которые имеют подходящие параметры, например, миниПЭТ. МиниПЭТ позволяет детектировать и точно локализовать патологические очаги размером в несколько миллиметров, отслеживать метастазирование.

Цель: проанализировать возможность применения пакета STIR для реконструкции изображений на основе данных миниПЭТ.

Задачи исследования:

- 1 Рассмотрение принципов реконструкции изображений ПЭТ.
- 2 Ознакомление с функционалом пакета Software for Tomographic Image

Reconstruction (STIR).

- 3 Построение полной цепочки шагов для получения изображений, начиная от генерации начального изображения (с помощью встроенных методов), заканчивая его восстановлением.
- 4 Реконструировать изображения из данных миниПЭТ.

2 ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ

Создание эмиссионных томографических изображений можно разделить на следующие этапы:

- 1) производство и введение радиофармпрепарата (радиофармацевтический препарат (РФП) является лекарственным препаратом, который содержит в себе один или несколько радионуклидов);
- 2) получение данных - регистрация гамма-квантов;
- 3) реконструкция изображений;
- 4) анализ изображений.

2.1 ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОФАРМПРЕПАРОВ. ПРИНЦИП МЕЧЕНЫХ АТОМОВ

Принцип меченых атомов заключается в том, что радиоактивные компоненты участвуют в физиологических процессах так же, как и нерадиоактивные вещества, то есть препараты, содержащие в себе радионуклиды, могут служить маркерами для самых разнообразных веществ, участвующих в физиологических процессах в организме.

Для получения радиоактивных изотопов используются:

- 1) ядерный реактор - вследствие работы реактора получаются радиоактивные фрагменты от реакции расщепления $X(a, b)Y$ (b и Y имеют сопоставимые массы), которые могут использоваться в маркерах;
- 2) ядерный генератор - система, которая производит и пополняет образец коротковивущими дочерними ядрами в результате распада долгоживущих родительских ядер;
- 3) циклотрон - ускоритель заряженных частиц, с помощью которых бомбардируют образцы-мишени протонами, дейtronами, в следствие чего происходит ядерная реакция, порождающая нестабильные изотопы.

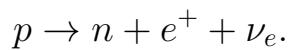
После получения изотопа его связывают с биологической молекулой-переносчиком, которая будет доставлять его к нужной ткани.

Препарат вводят пациенту внутривенно через катетер, после этого РФП распределяется по организму, захватываясь клетками пропорционально интенсивности специфического метаболического процесса.

Патологические очаги (злокачественные опухоли, воспаления) с гиперактивным метаболизмом накапливают РФП в значительно большей степени, создавая необходимую для детектирования концентрацию.

2.2 ФИЗИКА ПЭТ

Радионуклид в составе РФП претерпевает β^+ -распад: протон в ядре превращается в нейтрон, испуская позитрон (e^+) и нейтрино (ν_e):



Испущенный позитрон обладает кинетической энергией (до нескольких сотен кэВ) и проходит в ткани путь 1–2 мм, теряя энергию. После замедления до тепловых скоростей (энергия порядка 1 эВ) позитрон взаимодействует с электроном (e^-) среды, и происходит процесс аннигиляции. В соответствии с законами сохранения энергии и импульса, масса покоя обеих частиц ($2m_e c^2 = 1022$ кэВ) преобразуется в энергию двух γ -квантов с энергией 511 кэВ каждый, разлетающихся в строго противоположных направлениях (под углом $\sim 180^\circ$).

Детекторная система представляет собой кольцо, состоящее из множества модулей. Каждый модуль включает следующие компоненты:

- 1) Сцинтилляционный кристалл - выполняет функцию преобразователя γ -излучения в видимый свет. Современные системы используют кристаллы с высокой плотностью, световым выходом и малым временем сцинтилляции. Фотон с энергией 511 кэВ порождает в сцинтилляторе вспышку света.
- 2) Фотодетектор - преобразует световую вспышку в электрический сигнал. Традиционно использовались фотоэлектронные умножители, в современных системах их заменяют твердотельные кремниевые фотоумножители (SiPM), которые обладают большей компактностью и высокой квантовой

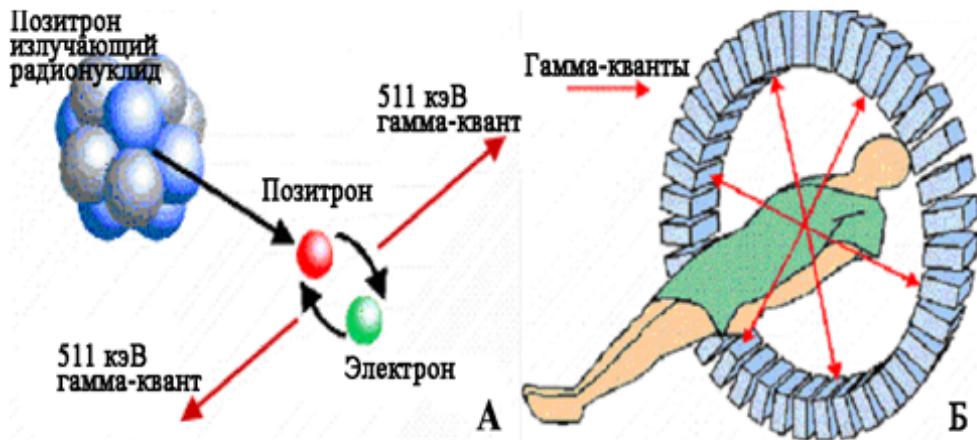


Рисунок 2.1 — Схематичное изображение позитронно-эмиссионной томографии. [2]

эффективностью.

Ключевая особенность ПЭТ — регистрация не одиночных, а парных гамма-квантов. Преимущество этого заключается в том, что можно выделить линию между двумя детекторами, которая локализует расположение источника сигнала. Аналоговая электроника преобразует сигнал с фотодетектора в цифровую форму, измеряя его амплитуду и время прихода. Для сигналов устанавливаются энергетические границы, это необходимо для выделения событий, вызванных аннигиляцией позитрона и электрона.

Если два детектора, расположенные приблизительно напротив друг друга, зарегистрировали события и разница во времени их регистрации меньше заданного временного окна совпадений, то эта пара событий считается совпадением (2.2). Такое совпадение образует линию отклика.

В ПЭТ учитываются линии ответа LOR при двухмерной визуализации и объемы ответа VOR в трехмерном случае.

Линии отклика LOR организуются в проекционные данные. Для каждого фиксированного угла φ рассматриваются линейные интегралы по всем значениям s .

Совокупность всех проекций для углов в диапазоне $0 \leq \varphi < 2\pi$ образует двумерную функцию $p(s, \varphi)$, называемую **синограммой**. Термин «синограмма» происходит от того, что фиксированная точка в объекте описывает синусоидальную траекторию в пространстве проекций (2.3). Таким образом, синограмма всего объекта представляет собой суперпозицию синусоид, соответствующих

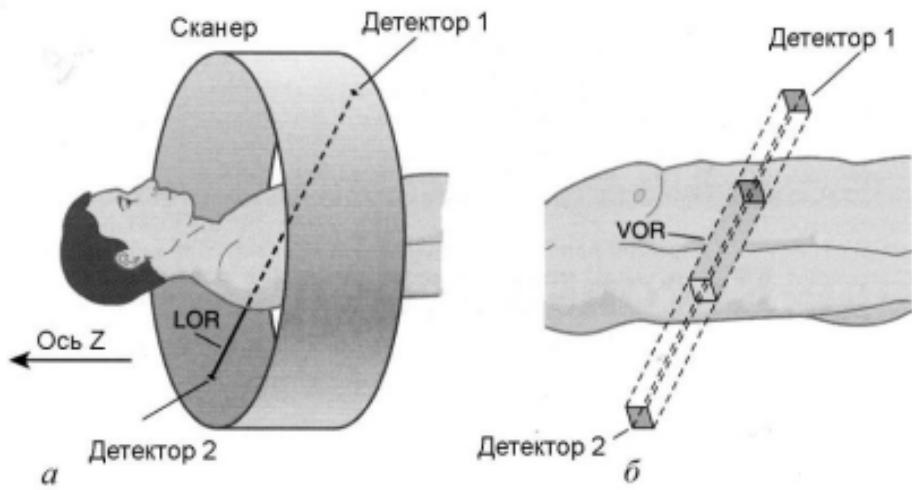


Рисунок 2.2 — Объем ответа, соответствующий чувствительной области, сканируемой двумя детекторными элементами: а — полное изображение с объемом ответа; б — увеличенное изображение объема ответа [3]

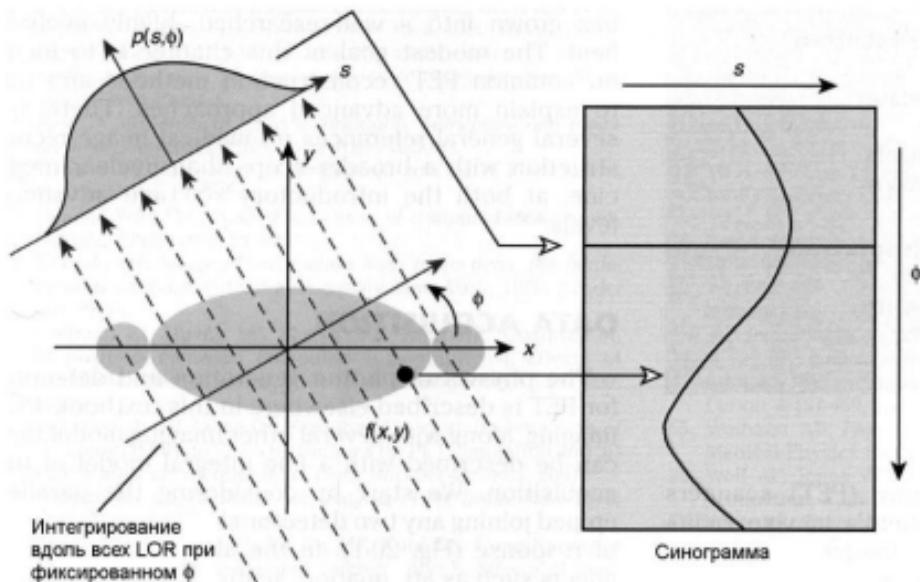


Рисунок 2.3 — Проекция $p(s,\phi)$ образуется в результате интегрирования вдоль всех параллельных линий LOR под углом ϕ . В данном формате точка трассируется в синограмме в виде синусоиды [3]

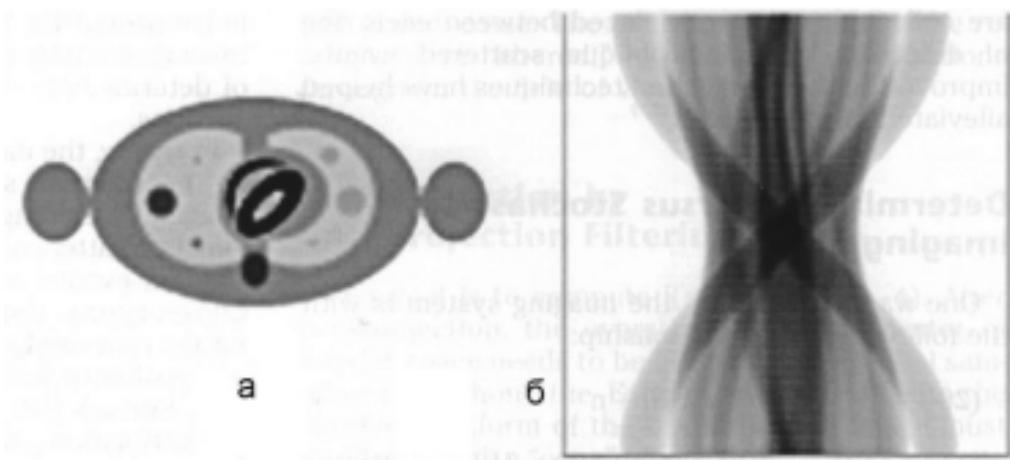


Рисунок 2.4 — Образование синограммы (б) в результате регистрации эмиссии позитронов в объекте (а) [3]

каждой точке исследуемого объекта (2.4).

2.3 РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Реконструкция изображений — это математический процесс преобразования сырых проекционных данных (зарегистрированных линий ответа — LOR) в трехмерное распределение радиоактивности (концентрации РФП) в организме пациента. Это ключевой этап, определяющий качество, точность и количественную достоверность конечного результата ПЭТ-исследования.

Один из основных методов реконструкции - метод фильтрованной обратной проекции (ФОП). ФОП - математический метод, основанный на идеализированной модели данных ПЭТ. Для создания полного набора данных ПЭТ для изучаемого объекта измеряются проекции для разных значений угла φ , эти данные образуют синограмму.

Для получения изображения из синограммы ФОП использует следующую процедуру - обратную проекцию, которая заключается в переводе каждой проекции обратно в участок объекта в направлении φ , вдоль которого она была измерена. Таким образом множество наложенных друг на друга проекций под определенным углом формируют восстановленное изображение. У этого метода есть минусы, например, размытие изображения исходного изображения.

3 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

3.1 ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Python в данной работе используется для работы с изображениями, текстовыми файлами и бинарными файлами библиотеки для реконструкции.

Python — это интерпретируемый, высокоуровневый язык общего назначения с динамической типизацией и автоматическим управлением памятью. Его философия ориентирована на читаемость кода и продуктивность разработчика.

3.2 SOFTWARE FOR TOMOGRAPHIC IMAGE RECONSTRUCTION (STIR)

STIR — это открытая, объектно-ориентированная библиотека на C++, предназначенная для исследования и разработки алгоритмов реконструкции изображений в ядерной медицине (ПЭТ и ОФЭКТ).

Выбор STIR в качестве основного инструмента обусловлен несколькими причинами:

- 1 STIR предоставляет готовые решения для реконструкции;
- 2 В отличие от коммерческих пакетов, где алгоритмы фиксированы и их параметры ограничены, STIR предоставляет полный доступ к каждому этапу цепочки реконструкции. Это позволяет модифицировать и сравнивать различные математические модели;
- 3 STIR подходит для генерации пар "сырые данные — эталонное изображение" при симуляции. Это позволяет создавать качественные датасеты для машинного обучения.

3.3 БИБЛИОТЕКА MATPLOTLIB

Matplotlib - библиотека для создания визуализации в Python, предоставляющая широкий спектр типов графиков (линейные, точечные, столбчатые и другие), для которых доступна тонкая настройка и стилизация.

3.4 БИБЛИОТЕКА NUMPY

NumPy фундаментальная библиотека для научных вычислений в Python, предоставляющая поддержку многомерных массивов и матриц с широким набором математических функций для их операций.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рисунке 4.1 представлен снимок экспериментальной установки - мини-ПЭТ.

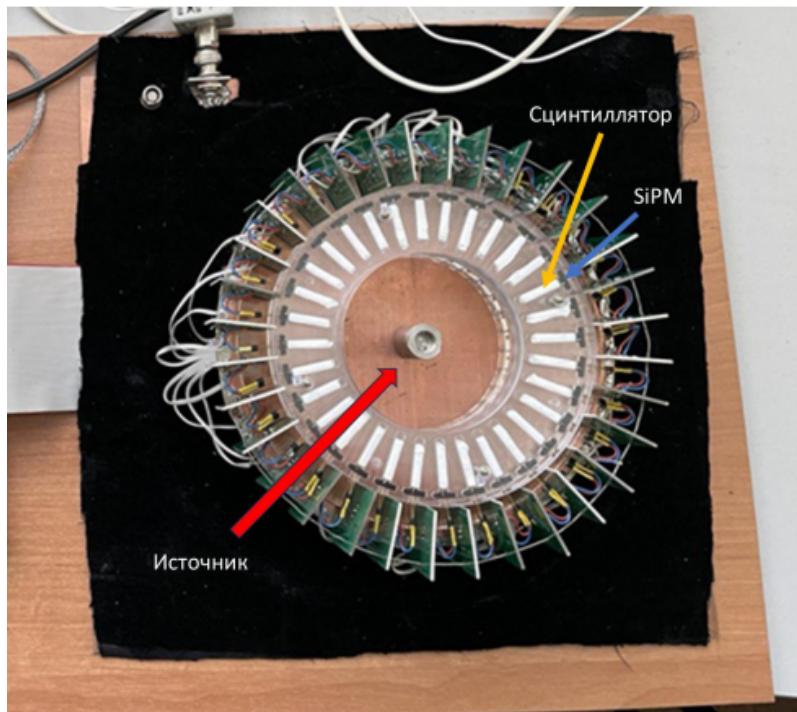


Рисунок 4.1 — Снимок экспериментальной установки

Кольцо, на котором располагаются детекторы, состоит из 32 независимых каналов, расположенных с шагом 11.25° . В качестве сцинтиллятора выбран GAGG ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$), характеристики которого:

- 1) высокий световой выход ($\sim 50\,000$ фотонов/МэВ)
- 2) отсутствие гигроскопичности
- 3) умеренное время сцинтиляции (~ 90 нс)
- 4) хорошая энергетическая разрешающая способность

В качестве фотодетекторов использованы кремниевые фотоумножители - SiPM, их удобство состоит в том, что они имеют компактные размеры, высокую чувствительность и устойчивость к магнитным полям.

Снимок детектора SiPM представлен на 4.2.

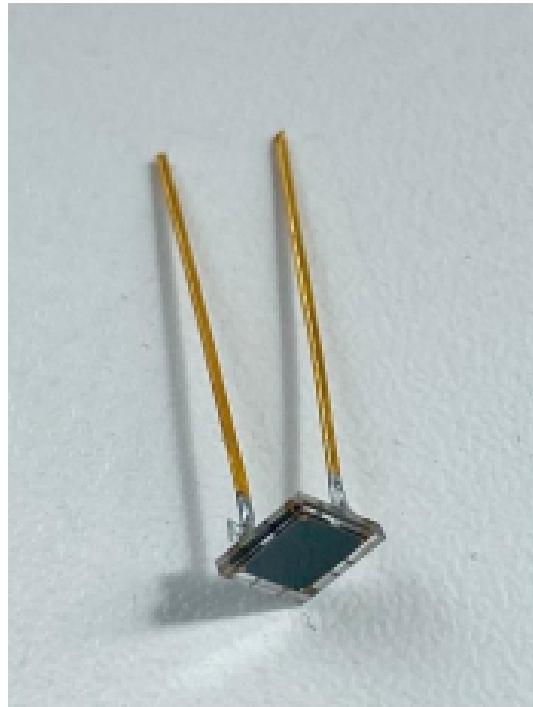


Рисунок 4.2 — SiPM, имеющий размеры 3×3 мм

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1 ГЕНЕРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПОЛУЧЕНИЕ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ВСТРОЕННЫХ МЕТОДОВ STIR

Для освоения функционала восстановления изображений в двухмерной плоскости с помощью библиотеки STIR и оценки возможности её использования в работе с экспериментальными данными был проведен ряд генераций изображений с различными геометрическими формами (5.1 - 5.2). При создании изображений учитывались размеры экспериментального макета.

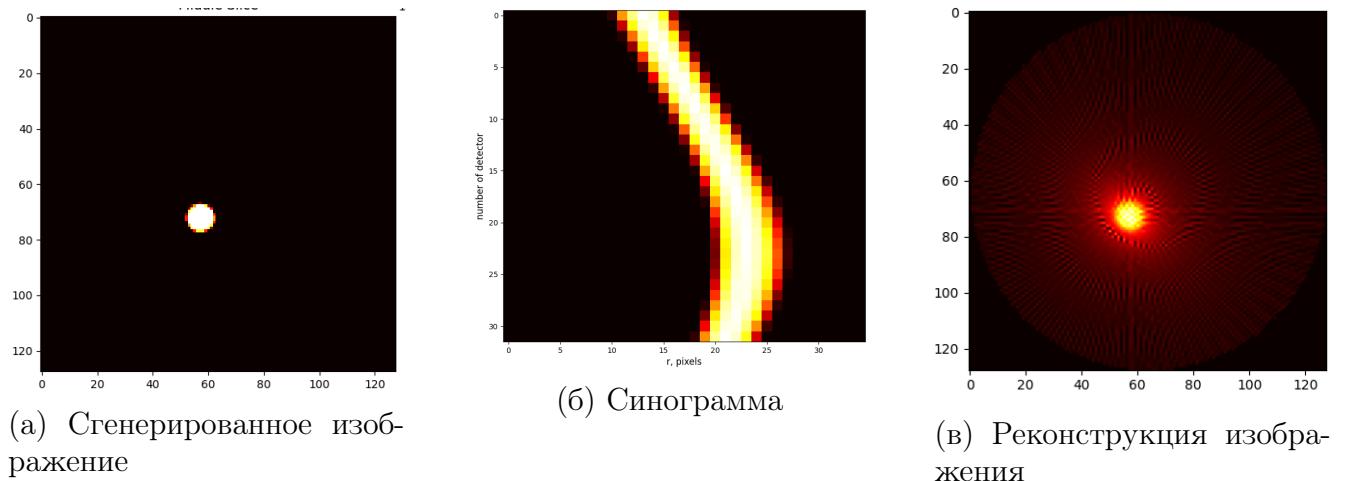
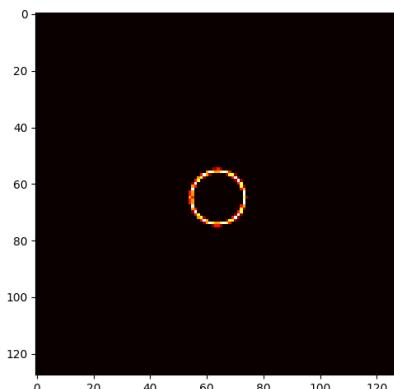


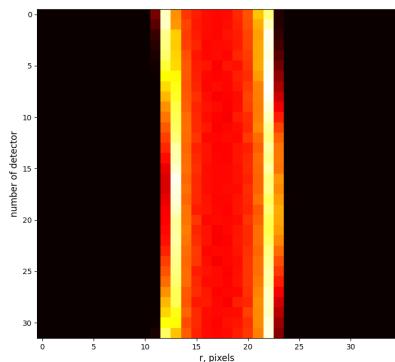
Рисунок 5.1 — Реконструкция сгенерированного источника в форме круга.

На данном этапе работы использовалась визуальная оценка качества реконструкции. Оценивалось сходство исходного изображения с восстановленным, сохранение геометрических форм, наличие или отсутствие артефактов. На приведенных изображениях (5.1 - 5.2) видно, что качество реконструкции удовлетворительное, объект начальный не отличается от конечного, но присутствует небольшое размытие, которое не влияет существенно на определение контуров и размеров фигур.

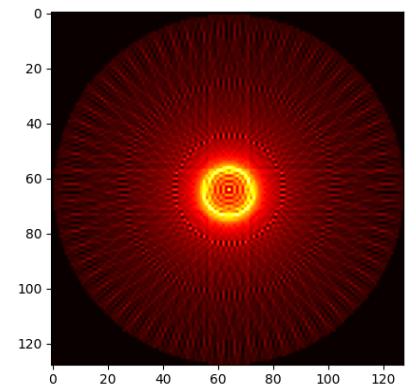
Приведенные результаты показывают, что восстановленные изображения соответствуют изначально сгенерированным, из чего можно сделать вывод, что библиотека STIR подходит для реконструкции из данных экспериментально



(а) Сгенерированное изображение



(б) Синограмма



(в) Реконструкция изображения

Рисунок 5.2 — Реконструкция сгенерированного источника в форме кольца.

полученных синограмм.

5.2 РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МИНИПЭТ

Для реконструкции использовано изображение 5.3.

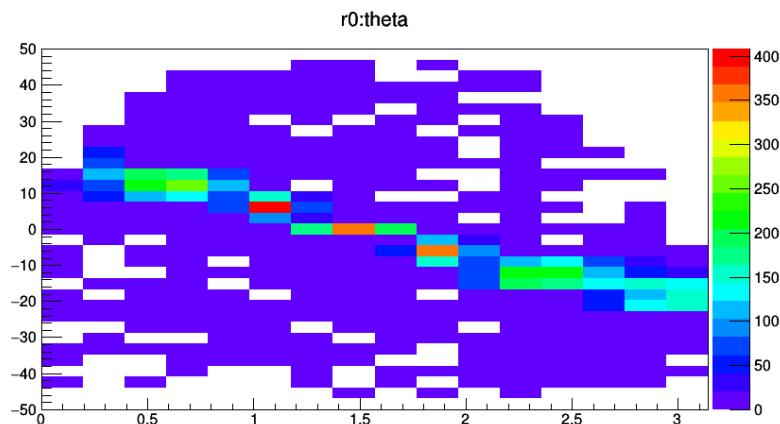


Рисунок 5.3 — Синограмма, полученная с помощью миниПЭТ

С помощью инструментов Python изображение 5.3 переведено в черно-белый формат и записано в текстовый файл в виде матрицы 32×35 . Далее файл преобразован в бинарный формат (используемый библиотекой STIR).

Приведение к определенному формату позволило реконструировать местоположение источника, полученные синограмма и изображение приведены на 5.4 - 5.5.

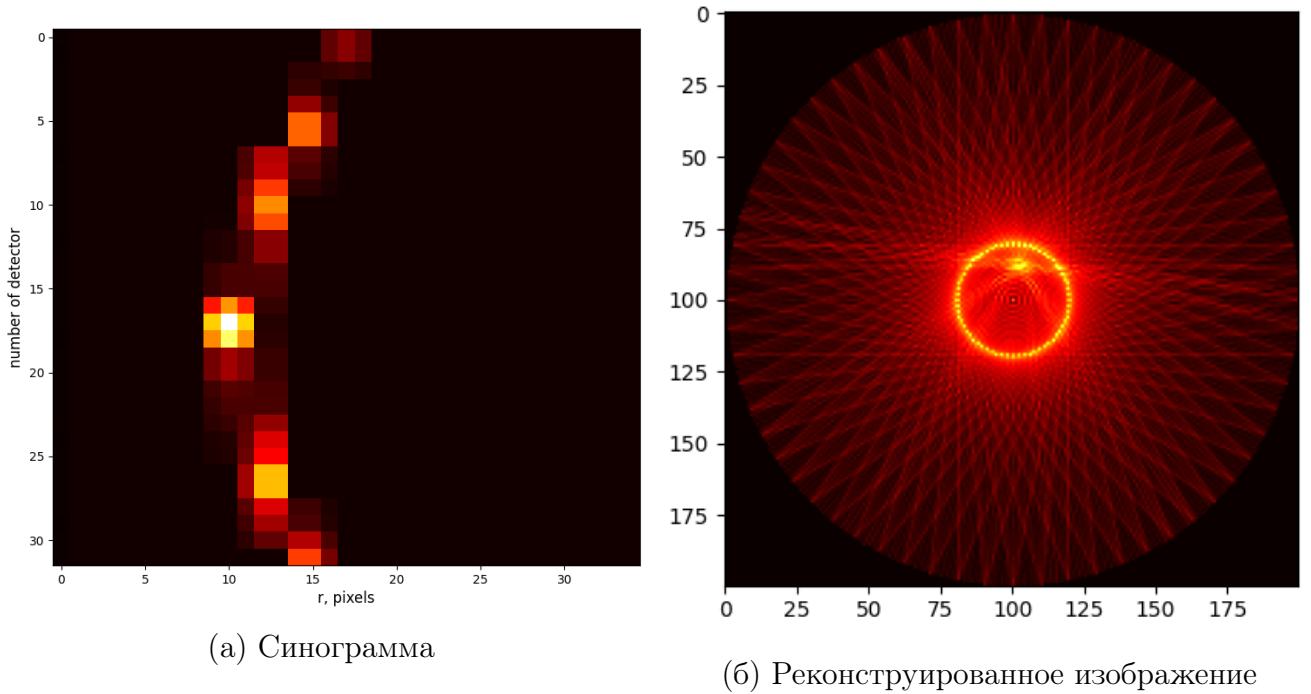
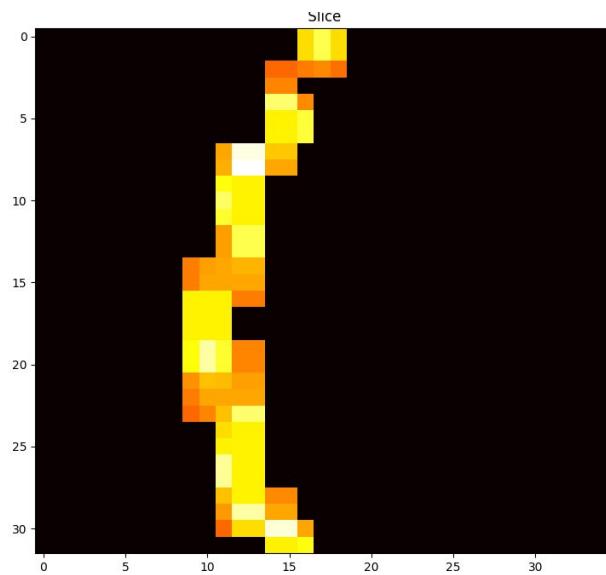


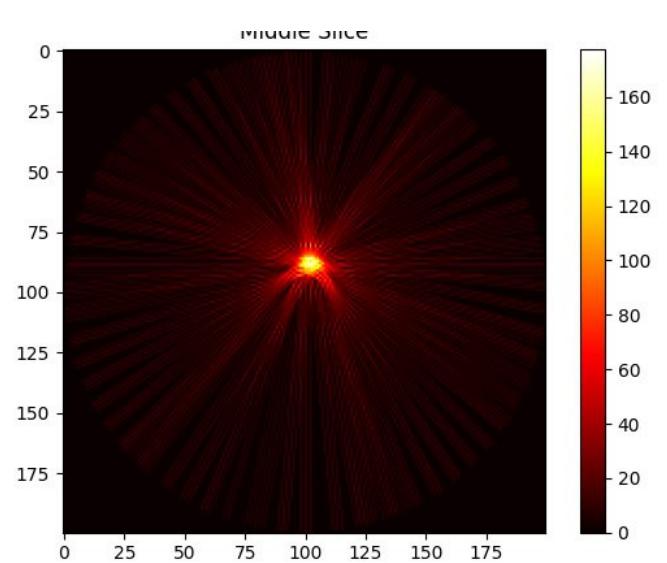
Рисунок 5.4 — Реконструкция данных миниПЭТ.

На восстановленном изображении 5.4б отчетливо видно маленькое яркое пятно, которое и является реконструкцией источника. Качество реконструкции можно считать удовлетворительным, поскольку границы фигуры определяются достаточно четко с небольшим размытием, которое не вносит существенных ограничений на оценку геометрических размеров и местоположения источника. Как следствие, целесообразность использования библиотеки STIR экспериментально подтверждена.

На 5.4б помимо небольшого пятна видно кольцо, которое может быть связано с неоднородностью яркости синограммы. В связи с чем проведена обработка синограммы и улучшено распределение яркости на ней, что можно увидеть на 5.5а. Результат реконструкции приведен на 5.5б, на изображении видно, что кольцо исчезло, и осталась только реконструкция источника.



(а) Синограмма



(б) Реконструированное изображение

Рисунок 5.5 — Реконструкция данных миниПЭТ.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведено ознакомление с функционалом пакета Software for Tomographic Image Reconstruction (STIR). Вследствие рассмотрения возможностей пакета сделан вывод о целесообразности его использования на экспериментальных данных. Далее реконструировано изображение из данных, полученных с макета миниПЭТ. Качество восстановления оценено как удовлетворительное, поскольку границы фигуры определялись достаточно четко с небольшим размытием, которое не вносило существенных ограничений на оценку геометрических размеров и местоположения источника. Как следствие, целесообразность использования библиотеки STIR экспериментально подтверждена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Miyaoka R. S., Lehnert A. L.* Small animal PET: a review of what we have done and where we are going // Phys. Med. Biol. 65. — 2020. — P. 33.
2. Schematic representation of e-e+ annihilation in PET. — URL: <http://old.kkco.khv.ru/pozitronno-emissionnaya-tomografiya-pet>.
3. *Беляев В. Н., Климанов В. А.* ФИЗИКА ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ. Часть 2. Позитронно-эмиссионные сканеры, реконструкция изображений в позитронно-эмиссионной томографии, комбинированные системы ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/ПЭТ, кинетика радиофармпрепаратов, радионуклидная терапия, внутренняя дозиметрия, радиационная безопасность. — Учебное пособие. — М. : НИЯУ МИФИ, 2012. — С. 248.