

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

Сафронова 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 РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ. ПРИНЦИП МЕЧЕННЫХ 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 получают 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 короткоживущими дочерними ядрами в результате распада долгоживущих родительских ядер;
- 3) циклотрон - ускоритель заряженных частиц, с помощью которых бомбардируют образцы-мишени протонами, дейтронами, в следствие чего происходит ядерная реакция, порождающая нестабильные изотопы.

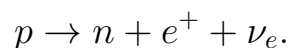
После получения изотопа его связывают с биологической молекулой-переносчиком, которая будет доставлять его к нужной ткани.

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 гипер-активным 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, световыходом 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

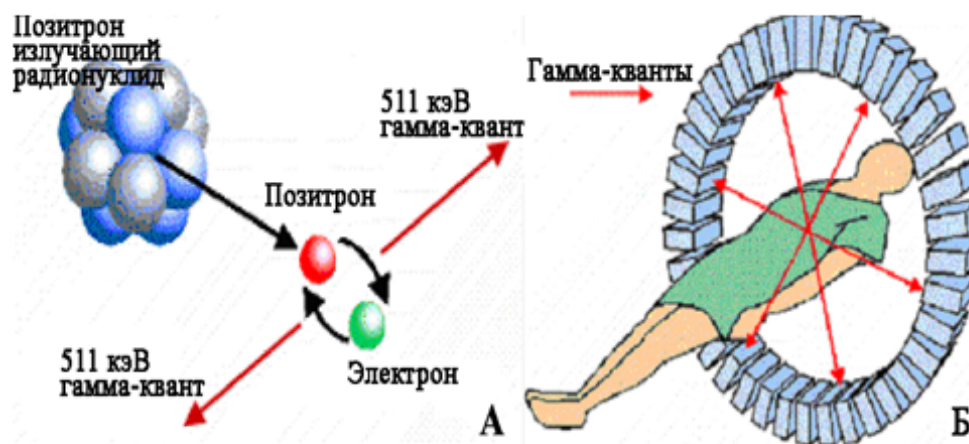


Рисунок 2.1 — Схематичное изображение позитронно-эмиссионной томографии. [2]

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 объёмы 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

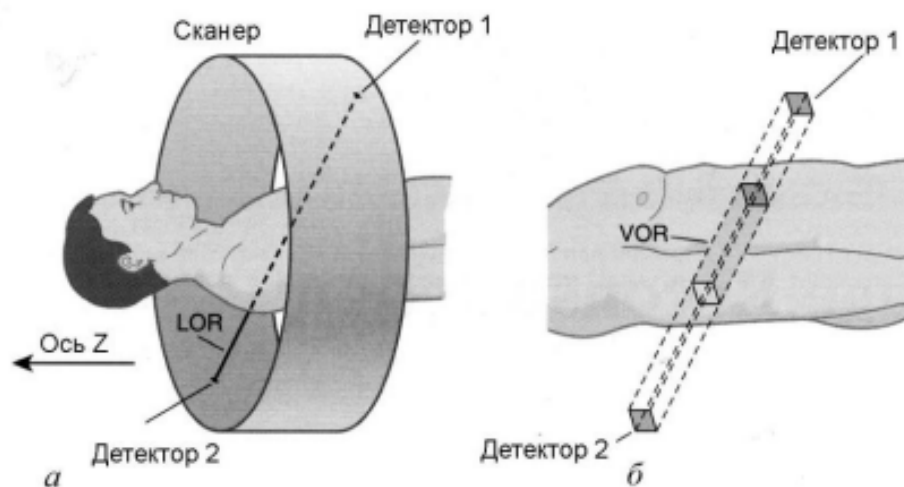


Рисунок 2.2 — Объем ответа, соответствующий чувствительной области, сканируемой двумя детекторными элементами: а – полное изображение с объемом ответа; б – увеличенное изображение объема ответа [3]

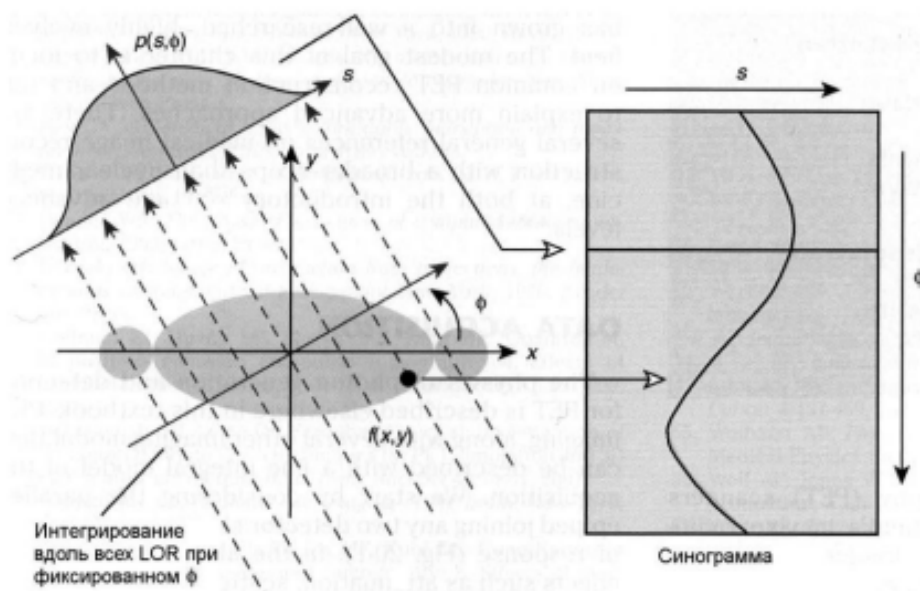


Рисунок 2.3 — Проекция $p(s, \phi)$ образуется в результате интегрирования вдоль всех параллельных линий LOR под углом ϕ . В данном формате точка трассируется в синограмме в виде синусоиды [3]

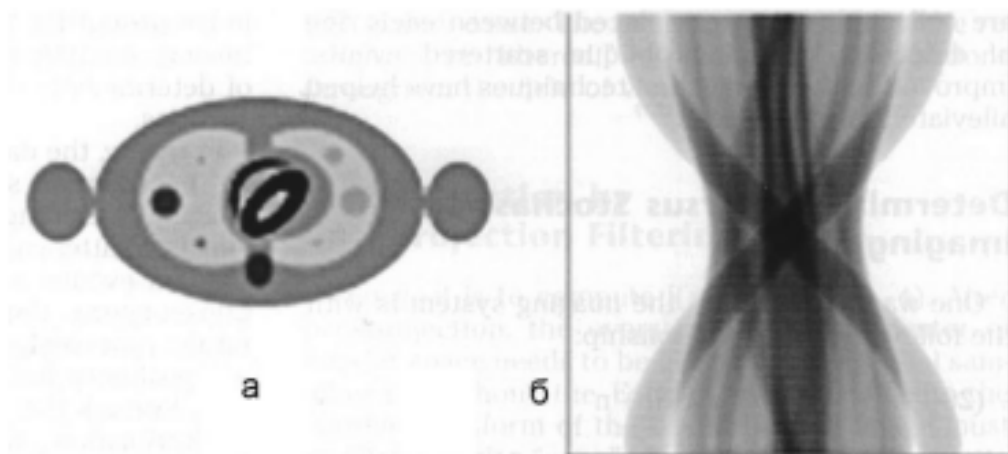


Рисунок 2.4 — Образование синограммы (б) в результате регистрации эмиссии позитронов в объекте (а) [3]

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.

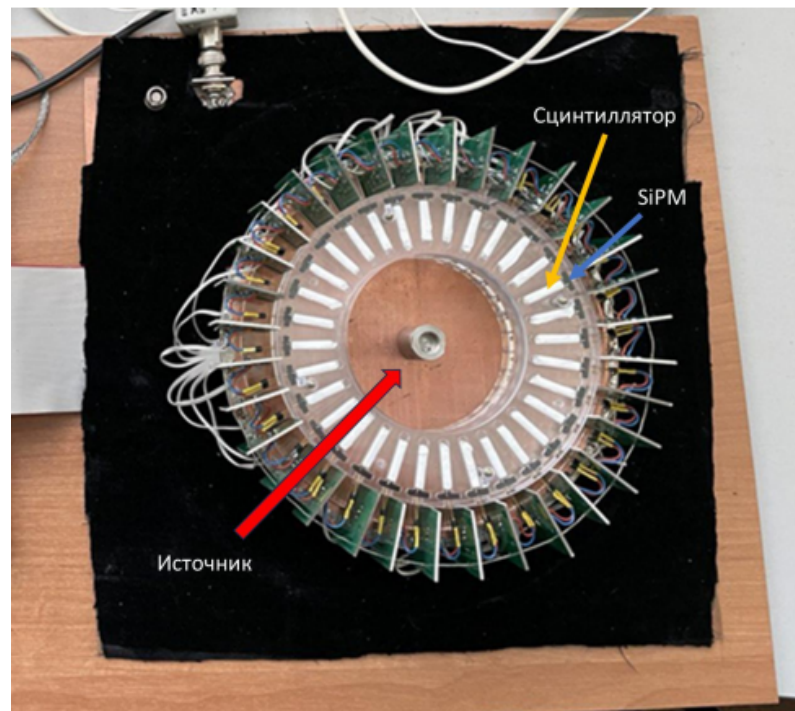


Рисунок 4.1 — Снимок экспериментальной установки

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 световыход ($\sim 50\,000$ фотонов/МэВ)
- 2) отсутствие гигроскопичности
- 3) умеренное время сцинтилляции (~ 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.

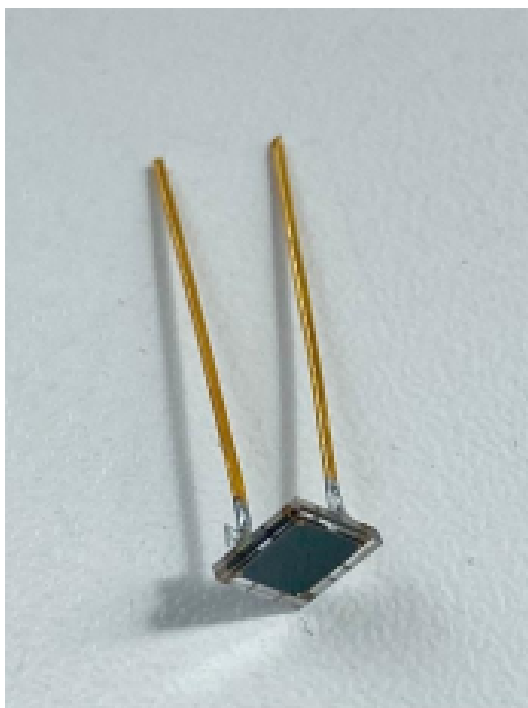


Рисунок 4.2 — SiPM, имеющий размеры 3×3 мм

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.

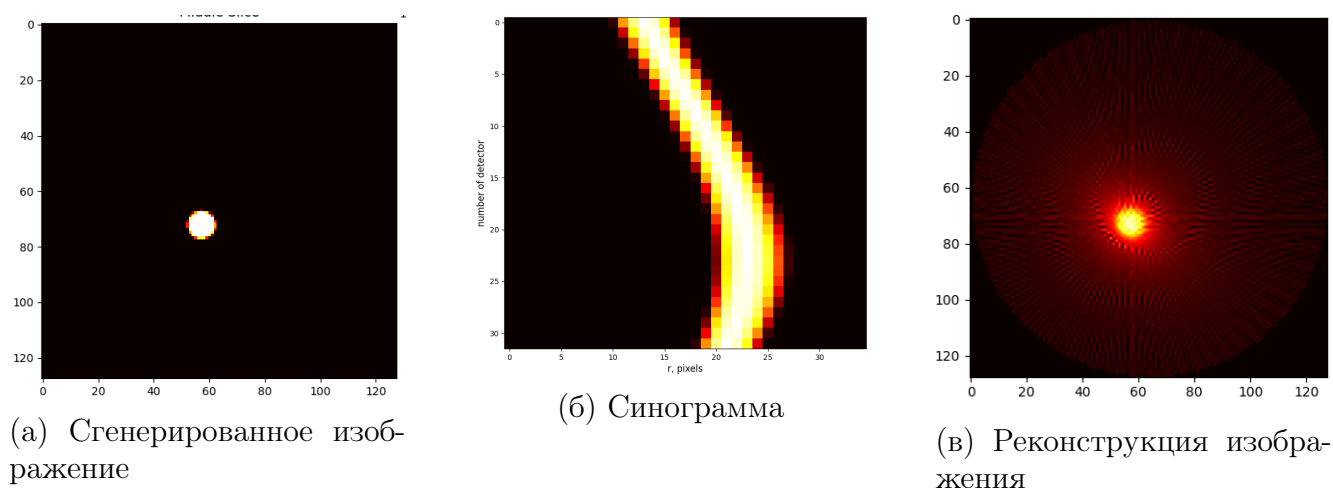


Рисунок 5.1 — Реконструкция сгенерированного источника в форме круга.

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

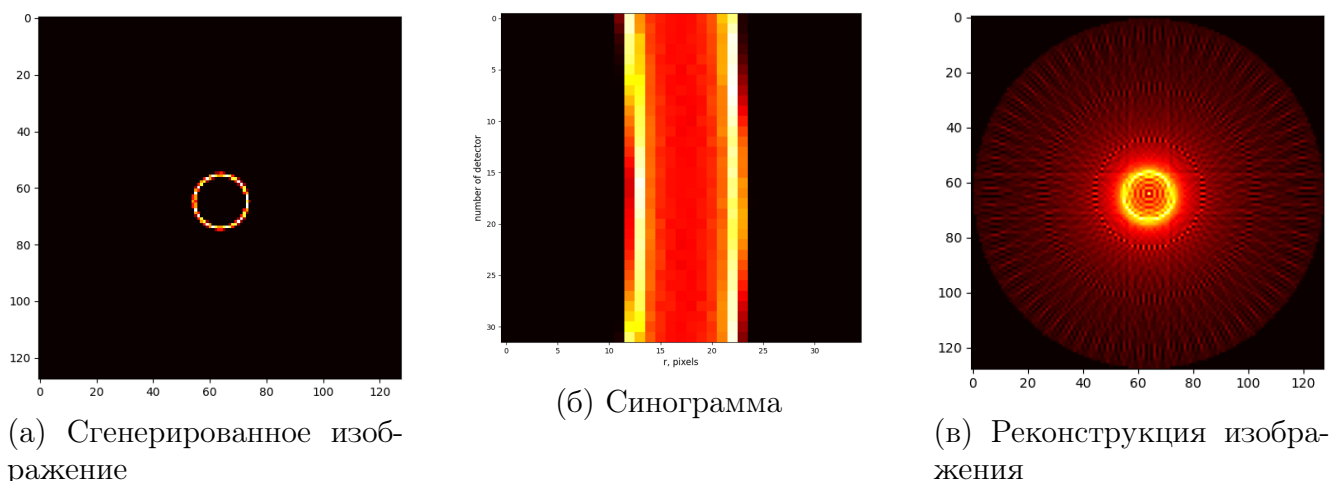


Рисунок 5.2 — Реконструкция сгенерированного источника в форме кольца.
полученных синограмм.

5.2 РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МИНИПЭТ

Для реконструкции использованно изображение 5.3.

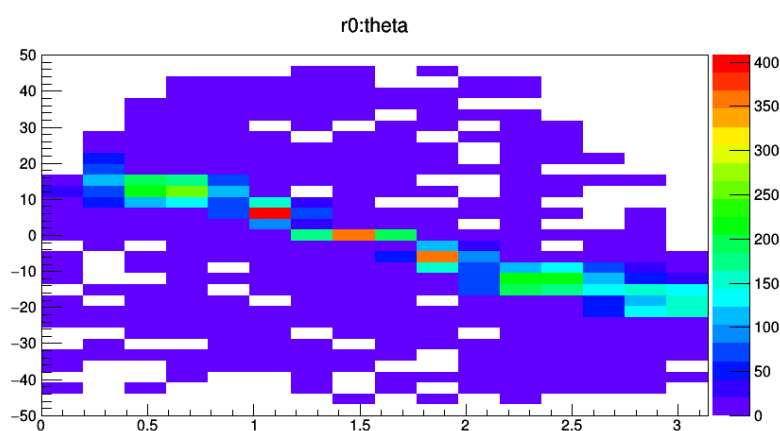


Рисунок 5.3 — Синограмма, полученная с помощью миниПЭТ

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.

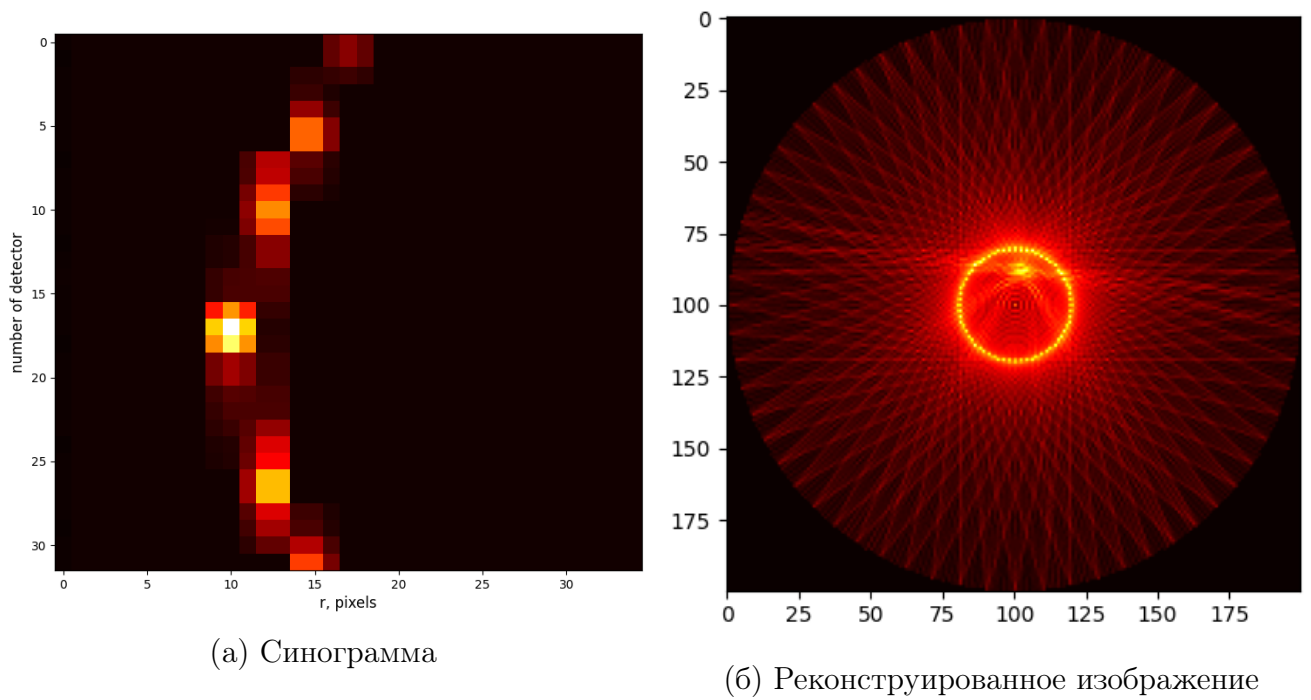
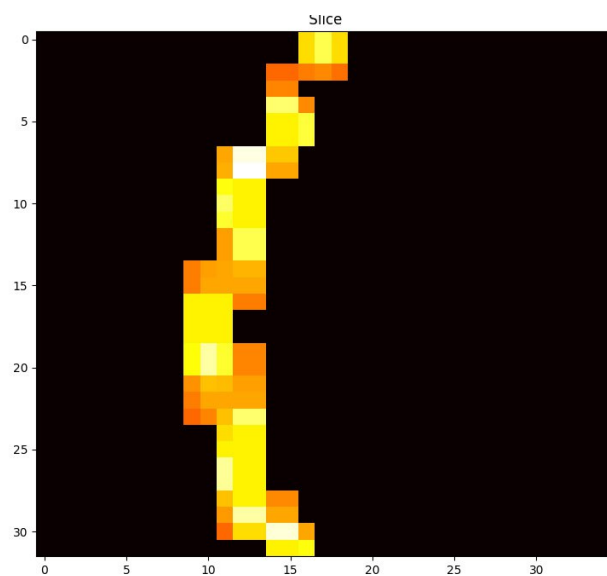


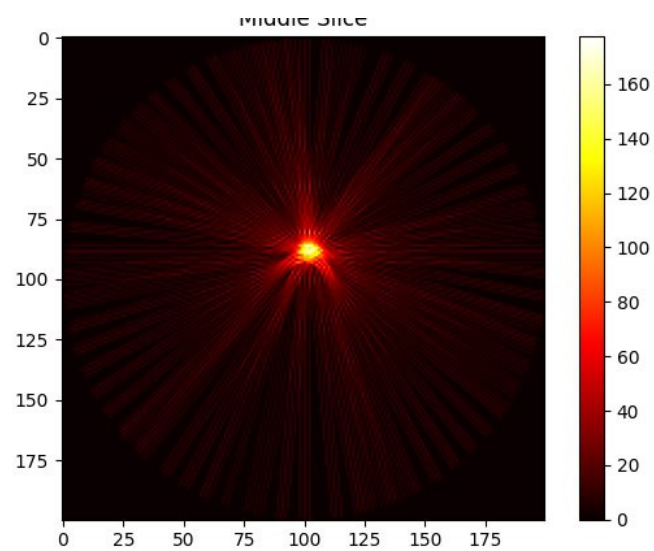
Рисунок 5.4 — Реконструкция данных миниПЭТ.

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.