

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

На правах рукописи

Самойлова Мария Андреевна

**Формирование гамма-изображений радиоактивных
объектов с помощью сканера с антиколлиматором**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, доцент
Потапов Виктор Николаевич

Москва, 2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Визуализация излучений. Приборы и методы. Литературный обзор	10
1.1 Визуализация излучений	10
1.2 Методы визуализации гамма-излучения	16
1.3 Примеры систем визуализации гамма-излучения	27
1.4 Опыт применения антиколлимационного метода	32
1.5 Выводы	36
Глава 2. Разработка сканера с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения.....	37
2.1 Требования, предъявляемые к разрабатываемой системе	40
2.2 Разработка спектрометрического детектора	45
2.3 Моделирование и оптимизация геометрических параметров	58
2.4 Аппаратная функция.....	67
2.5 Поворотное устройство	72
2.6 Спектроанализатор.....	76
2.7 Видеокамера	77
2.8 Программа управления.....	78
2.9 Обработка результатов измерения	83
2.10 Выводы.....	95
Глава 3. Оценка технических и метрологических параметров системы	97
3.1 Визуализация точечного источника.....	97
3.2 Модельный эксперимент	99
3.3 Контрольный эксперимент.....	103
3.4 Определение точности и воспроизводимости позиционирования	105
3.5 Определение зависимости счетной характеристики от МЭД	107
3.6 Влияние фоновой боковой подсветки.....	110
3.7 Мультиноклидное загрязнение	116
3.8 Оценка углового разрешения.....	119
3.9 Полевые измерения.....	125
3.10 Выводы.....	129
Заключение	131
Список сокращений	134
Список литературы	135

Введение

Актуальность работы

Возможность оперативной локализации источников ионизирующего излучения играет важную роль в сфере обеспечения экологической безопасности, контроле за нераспространением радионуклидных источников, мониторинге радиоактивных загрязнений на всех этапах жизненного цикла объектов использования ядерной энергии, а также реабилитации объектов ядерного наследия [1 – 5].

Простейшим прибором для обнаружения гамма-излучающих источников является поисковый дозиметр. Однако для поиска радиационного загрязнения даже в небольшом помещении с помощью такого прибора потребуется значительное время, а выполняющий работы по обследованию объекта персонал подвергнется облучению от загрязнения.

Задача обнаружения и локализации источников гамма-излучения значительно упростилась с появлением методов визуализации источников ионизирующего излучения. Для выполнения реабилитационных работ на территории НИЦ «Курчатовский институт» был разработан комплекс инструментов для оценки радиационной обстановки: гамма-визор [6], позволяющий визуализировать источники ионизирующего излучения в режиме реального времени, гамма-сканер (гамма-локатор) [7], формирующий гамма-изображение объекта методом покоординатного сканирования из точки размещения прибора, и гамма-пионер [8] на роботизированной платформе для выполнения работ в условиях высоких активностей. Опыт эксплуатации оборудования для визуализации гамма-источников показал необходимость уменьшения массогабаритных параметров приборов и сокращения времени измерения с сохранением точности локализации.

Применение антиколлиматора для получения гамма-изображений представляется перспективным решением с точки зрения сокращения массы и времени измерения. Такой метод предполагает модуляцию потока гамма-квантов с помощью эффективно поглощающего гамма-излучение объекта. В литературе подобная техника описывается начиная с 1969 года, однако авторы используют

различную терминологию – встречаются такие понятия как «lead plug» (*свинцовая пробка*) [9], «collimator» (*коллиматор*) [10], «occluding disk» (*затмевающий диск*) и «anticollimation telescope» [11], «shutter» (*затвор*) [12], «anticollimator» / «anticollimator» (*антиколлиматор*) [13 – 17]. Наиболее часто употребляемым и полно отражающим суть метода является термин «anticollimator».

Принцип действия антиколлиматора противоположен концепции классического коллиматора (см. рис. 26), когда для модуляции излучения детектор помещают в массивную защиту коллиматора с небольшой апертурой. В случае антиколлиматора все наоборот – открытый (неэкранированный) детектор регистрирует излучение от всех источников в обследуемом помещении, кроме тех, что расположены в пределах телесного угла антиколлиматора. В результате на гамма-изображении, сформированном с помощью антиколлиматора, наблюдаются теневые области, соответствующие расположению источников излучения.

В отличие от методов, описанных в [9 – 17], в настоящей работе предложено применение антиколлиматора в составе сканирующей системы, предназначенной для обследования объектов атомной энергетики. В данном случае предлагается перемещать антиколлиматор относительно детектора для получения информации об источниках, расположенных в пределах телесного угла антиколлиматора в каждой точке сканирования, с последующим формированием гамма-изображения.

Цель и задачи работы

Целью данной работы являлась разработка и реализация метода формирования гамма-изображений, основанного на применении техники сканирования с антиколлиматором. Такой метод должен обеспечивать эффективное и безопасное проведение работ по обнаружению радиационных загрязнений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– выполнен анализ функциональных и специальных требований к разрабатываемой системе сканирования с учетом опыта разработки и применения устройств формирования гамма-изображений;

- разработан и реализован спектрометрический детектор, экспериментально определены его характеристики;
- осуществлено компьютерное моделирование системы сканирования с антиколлиматором, проведена предварительная оптимизация геометрических параметров;
- спроектированы и реализованы поворотный механизм и узел видеокамеры, создан и протестирован макет сканирующего устройства;
- создано программное обеспечение для управления гамма-сканером с антиколлиматором;
- разработана методика обработки результатов измерений, а также алгоритм выполнения обследования гамма-сканером с антиколлиматором;
- проведены испытания прототипа гамма-сканером с антиколлиматором, определены основные технические и метрологические параметры устройства;
- гамма-сканер с антиколлиматором успешно применен в условиях реальной эксплуатации для обследования радиационно-загрязненного помещения.

Научная новизна

В работе предложен новый метод визуализации гамма-излучения с использованием сканера с антиколлиматором.

Впервые показана возможность формирования картины распределения гамма-излучения посредством сканирования с использованием антиколлиматора. Наложение изображения распределения источников гамма-излучения, полученного по результатам сканирования с антиколлиматором, на панорамное фото обследуемого объекта позволяет локализовать источники радиации.

Впервые метод восстановления гамма-изображения был применен при обработке результатов сканирования с антиколлиматором. Результаты экспериментов показывают эффективность применения итерационного метода для реконструкции картины расположения источников гамма-излучения.

Практическая значимость работы

Применение антиколлиматора для формирования гамма-изображений при сканировании радиационно-загрязненных помещений дает возможность

оперативной оценки радиационной обстановки объекта и позволяет сократить дозовую нагрузку на персонал.

Применение метода покоординатного сканирования с применением антиколлиматора для визуализации гамма-излучения позволяет значительно сократить массу прибора в сравнении с коллимационной техникой.

Разработанный и апробированный прототип гамма-сканера с антиколлиматором может применяться при обследовании радиационно-загрязненных помещений, а также для контроля эффективности выполнения реабилитационных работ при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, реабилитации объектов ядерного наследия и других задачах радиационных измерений в области экологии и безопасности.

Экспериментально продемонстрированы преимущества применения метода сканирования с антиколлиматором. Показаны возможности разработанной системы для локализации точечных и протяженных гамма-источников различного радионуклидного состава. Проведена оценка условий применения устройства.

Продемонстрирована возможность применения итерационного метода восстановления распределения гамма-источников для сканера с антиколлиматором.

Положения, выносимые на защиту

Предложен и разработан метод локализации источников ионизирующего излучения с применением сканера с антиколлиматором, который позволяет определять местоположение радиационного загрязнения с угловым разрешением на уровне 5° .

Методика сканирования с антиколлиматором позволяет значительно (в 3-10 раз в сравнении с аналогичными устройствами в зависимости от решаемой задачи) сократить массу сканера.

Применение антиколлиматора (в сравнении с коллимационной техникой) позволяет почти вдвое сократить время, необходимое для сканирования, поскольку фоновое измерение выполняется однократно, а не в каждой точке.

Предложен и разработан алгоритм восстановления гамма-изображения и совмещения с фотоснимком для визуализации распределения радиоактивных источников на местности, а также для идентификации радионуклидного состава загрязнения.

Методология и методы диссертационного исследования

В процессе получения результатов исследования по теме диссертации создавались математические модели разрабатываемой системы визуализации источников гамма-излучения для моделирования методом Монте-Карло, что позволяло находить и оптимизировать основные технические параметры гамма-сканера.

Для улучшения характеристик визуализации использовались методы математической обработки, основанные на итерационном методе максимального правдоподобия.

В процессе определения характеристик устройства применялись методы гамма-спектрометрии. Экспериментально полученные результаты сопоставлялись с теоретическими данными.

Степень достоверности результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждена представительным объемом практических результатов, применением современных методов обработки и интерпретации результатов, сопоставимостью экспериментальных результатов с расчетными данными, воспроизводимостью экспериментов, отсутствием противоречий в интерпретации результатов, а также позитивным опытом их практического внедрения.

Для верификации используемых программ моделирования применялись стандартные программные средства.

Оценка и контроль технических и метрологических параметров системы визуализации проводились на каждом этапе разработки с использованием поверенных источников ионизирующего излучения и современного лабораторного оборудования.

Личный вклад автора

Автор принимала непосредственное участие в создании прототипа гамма-сканера с антиколлиматором. Изложенные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при ее непосредственном активном участии.

Автором создано программное обеспечение: программа управления «РТСКАpp» с дополнительным консольным приложением «GSAC_Win» и прошивка контроллера поворотного механизма.

Автором разработан поворотный механизм, оптимизирован алгоритм сканирования и реализовано поворотно-наклонное устройство гамма-сканера с антиколлиматором. Разработан и реализован узел управления видеокамерой.

Автор принимала активное участие в оптимизации геометрических параметров системы, определении характеристик спектрометрического детектора и отработке метода получения гамма-изображения с помощью гамма-сканера с антиколлиматором.

Автор принимала активное участие в проведении испытаний гамма-сканера с антиколлиматором для определения углового разрешения, точности позиционирования, влияния фоновой боковой подсветки, предельного рабочего значения МЭД, чувствительности детектора, аппаратной функции и пр.

При непосредственном участии автора выполнена обработка массива экспериментальных данных, проведен их анализ, а также показана возможность применения прототипа устройства для обследования радиационно-загрязненных помещений методом сканирования с антиколлиматором.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались автором и обсуждались на шести научных конференциях:

- X школа-конференция молодых атомщиков Сибири в онлайн-формате, Томск, Россия, 9 – 13 ноября 2020 г.;
- 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, ИБРАЭ РАН, Москва, Россия, 18 – 24 ноября 2019 г.;

- Всероссийский Молодежный научный форум «Open Science», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия, 21 – 23 ноября 2018 г.;
- V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала, Москва, Россия, 2 – 5 октября 2018 г.;
- VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия, 16 – 21 апреля 2018 г.;
- XV Курчатова междисциплинарная молодежная научная школа, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, 14 – 17 ноября 2017 г.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе три статьи в рецензируемых отечественных научных журналах [18 – 20], 6 тезисов докладов на российских и международных конференциях [21 – 26].

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 145 страницах, содержит 99 рисунков, 9 таблиц и состоит из следующих разделов: «Введение», «Визуализация излучений. Приборы и методы. Литературный обзор», «Разработка сканера с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения», «Оценка технических и метрологических параметров системы», «Заключение» и библиографический список, включающий 129 ссылок.

Глава 1. Визуализация излучений. Приборы и методы. Литературный обзор

1.1 Визуализация излучений

Визуализация невидимых глазом излучений играет важную роль в современной науке и технике. Спектр излучения, доступный для зрительного восприятия, ограничен длинами волн порядка 380 – 740 нм, но возможность представить инфракрасное, рентгеновское, ультрафиолетовое и гамма-излучение в удобном для восприятия человека формате позволяет расширить границы измерительных возможностей. Значительную роль визуализация играет в обнаружении радиоактивных загрязнений, возникших в результате деятельности человека.

История визуализации гамма-излучений берет свое начало в астрофизике. Рентгеновская и гамма-астрономия, а именно изучение астрофизических объектов в диапазонах рентгеновских и гамма-лучей, ведет свою историю с начала 1960-х годов [27] и открыла окно для изучения мощных источников излучений во Вселенной [28].

Для идентификации первого космического источника рентгеновского излучения [29] использовался разработанный Минору Ода коллиматор [30, 31], ограничивающий поле зрения детекторов на основе счетчиков Гейгера и пропорциональных счетчиков.

В 1969 году в космосе были зарегистрированы первые гамма-вспышки [32], а уже в начале 70-х были разработаны методы обнаружения источников гамма-излучения в диапазоне энергий от 1 до 10 МэВ [15].

Первая карта звездного неба получена благодаря запуску спутника Uhuru — первой орбитальной рентгеновской обсерватории [33], на борту которой размещались коллимированные счетчики Гейгера, регистрировавшие рентгеновское излучение с энергиями от 2 до 20 кэВ.

В [34] предложен переход от камеры-обскуры с единичным отверстием к массиву случайным образом расположенных коллиматоров. Данный метод заложил основы для применения кодирующих апертур.

Применение кодирующих апертур в астрономии высоких энергий стало важным достижением в приборостроении. Теория, лежащая в основе этого метода косвенной визуализации, имеет большое значение как для оптимизации конструкции новых инструментов, так и для процесса анализа данных [35].

В России применение методов визуализации гамма-излучения в области использования ядерной энергии впервые было реализовано при ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. В конце лета 1986 г. была поставлена задача определить в развале реактора (в центральном зале) области наиболее сильного гамма-излучения на фоне меньшей активности окружающих материалов. В Курчатовском институте для решения поставленной задачи были разработаны три модификации гамма-визора – вертолетный, переносной и автомобильный – с помощью которых были проведены поисковые работы. Осенью 1986 года получено гамма-изображение разрушенного реактора (рис. 1).

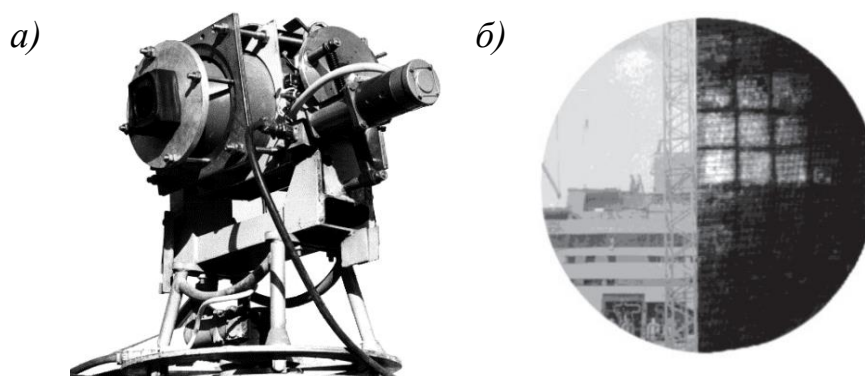


Рисунок 1 – Фото общего вида «автомобильной» версии гамма-визора (а). Разрушенный реактор с западной стороны (б): оптическое изображение на левой половине круга, гамма-изображение на правой половине круга

В 1992 году с помощью первого компьютерно-управляемого гамма-локатора было проведено обследование в машинном зале 4-го блока ЧАЭС. Для этого был изготовлен детектор на основе сцинтиллятора CsI(Tl) объемом 1 см³. Коллимированный детектор гамма-локатора был установлен на корпусе 8-го генератора ЧАЭС, а система управления была вынесена вне машинного зала, на расстоянии 200 м от точки размещения блока детектирования. На рис. 2 приведены результаты обследования в машинном зале 4-го блока ЧАЭС [36].

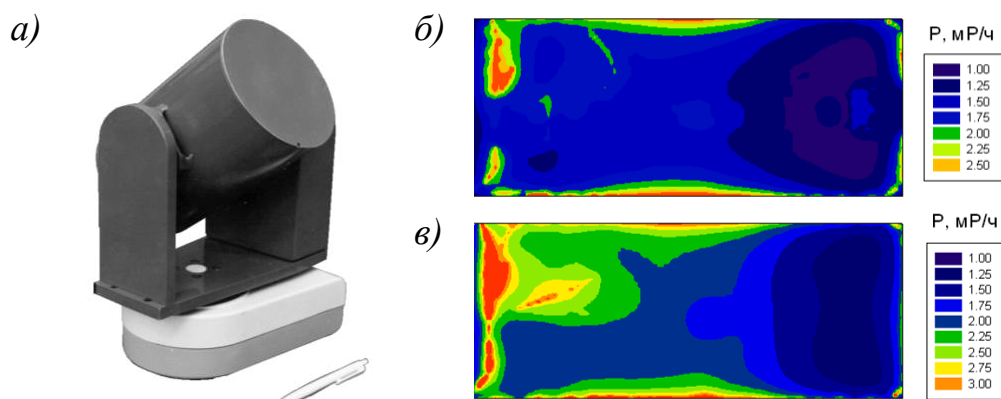


Рисунок 2 – Фото общего вида гамма-локатора (а). Распределение мощности экспозиционной дозы на уровне 1 м от пола (б) и вблизи потолка (в)

Позднее был разработан гамма-локатор на основе сцинтиллятора CsI(Tl), оснащенный цветной видеокамерой и лазерным дальномером (рис. 3). С помощью данного прибора в ноябре 1996 года были проведены измерения распределения мощности эквивалентной дозы в центральном реакторном зале 4-го блока ЧАЭС [37]. Позиция гамма-локатора при измерениях в реакторном зале отмечена красным кругом (рис. 3в, г).

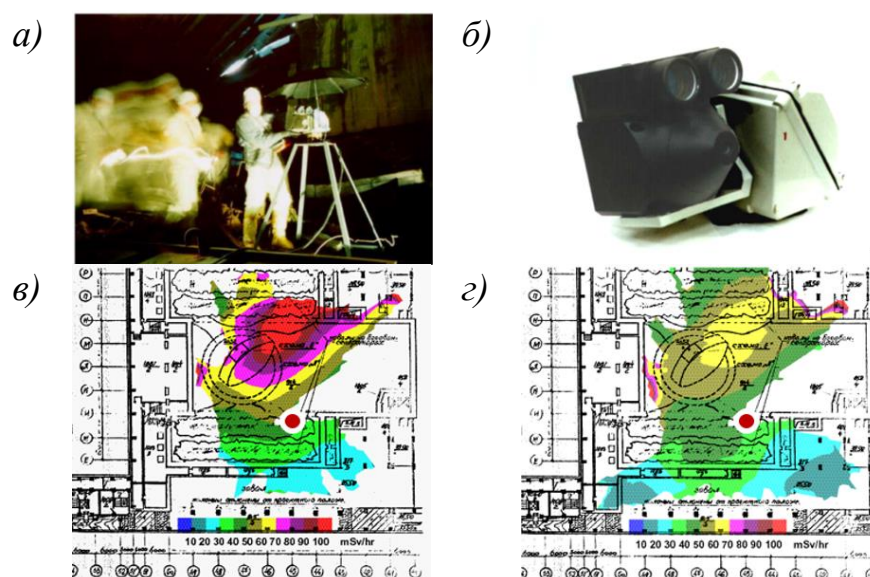


Рисунок 3 – Фото процесса установки гамма-локатора (а) и внешнего вида детектирующей головки гамма-локатора (б). Распределение мощности эквивалентной дозы в плоскости на уровне расположения гамма-локатора (в) и на высоте 7 м (г)

Как и в астрономии, на смену сканирующим системам пришли портативные гамма-камеры, позволяющие выполнять измерения практически в режиме реального времени (рис. 4). Современные технологии позволяют делать детекторы

меньше, легче, доступнее, а вычислительная техника позволяет быстрее обрабатывать полученные результаты, благодаря чему стало возможно создание компактных систем визуализации.



Рисунок 4 – Примеры гамма-камер [38]: SMGVC (КИ – SAIC) (а), RayMos (КИ – NUKEM) (б), Cartogam (КИ – CEA) (в)

Гамма-камера SMGVC (КИ–SAIC) представляет собой измерительный блок, состоящий из детектирующей головки, блока электроники, заслонки и малогабаритной цветной видеокамеры, общей массой 67 кг [39]. Гамма-камера RayMos (КИ–NUKEM) разработана для картирования γ -загрязнения в условиях высокого и низкого радиационного фона. Вес измерительного блока составляет примерно 30 кг [40]. Гамма-камера Cartogam (КИ–CEA) состоит из сцинтиллятора CsI(Tl), усилителя изображения и оптической камеры, общая масса составляет примерно 17 кг [41].

В 1962 году был остановлен и частично демонтирован водо-графитовый каналный реактор для физических и технических исследований РФТ. Взамен РФТ в том же зале рядом с ним сооружен более мощный многоцелевой петлевой материаловедческий реактор МР, который в конструктивном отношении был первым реактором каналного типа, погруженным в бассейн с водой [42]. В 1993 г. после 30–летнего периода эксплуатации петлевой реактор МР был окончательно остановлен. В Курчатовском институте был разработан комплекс средств дистанционной диагностики и контроля радиационной обстановки, предназначенный для обеспечения безопасности демонтажных работ и контроля радиационной обстановки в зонах проведения реабилитационных работ [5]. Для проведения радиационной разведки в зонах проведения работ в условиях высокого

радиационного фона была разработана и изготовлена радиометрическая система «Гамма-пионер», установленная на роботе [8]. Для определения радионуклидного состава загрязнения применялась коллимированная спектрометрическая система «Гамма-локатор» [7]. Для получения подробной информации о распределении радиоактивных загрязнений использовали гамма-камеру с дистанционным управлением «Гамма-визор» [6]. Для обследования территории ВХРАО на большом расстоянии был разработан «Гамма-сканер» [43].

Гамма-локатор (рис. 5) – спектрометрическая система, состоящая из коллимированного детектора γ -излучения, блока управления системой и цветной видеокамеры, смонтированных на поворотном устройстве на треноге, и управляющего компьютера. Для унификации устройства предусмотрено три варианта чувствительного элемента – два на основе сцинтиллятора CsI(Tl) различного объема, один – на основе полупроводникового материала CdZnTe.

Гамма-локатор использовался для локализации радиоактивных загрязнений во время подготовительных работ по демонтажу арматуры и оборудования при обследовании помещений выводимого из эксплуатации исследовательского реактора.

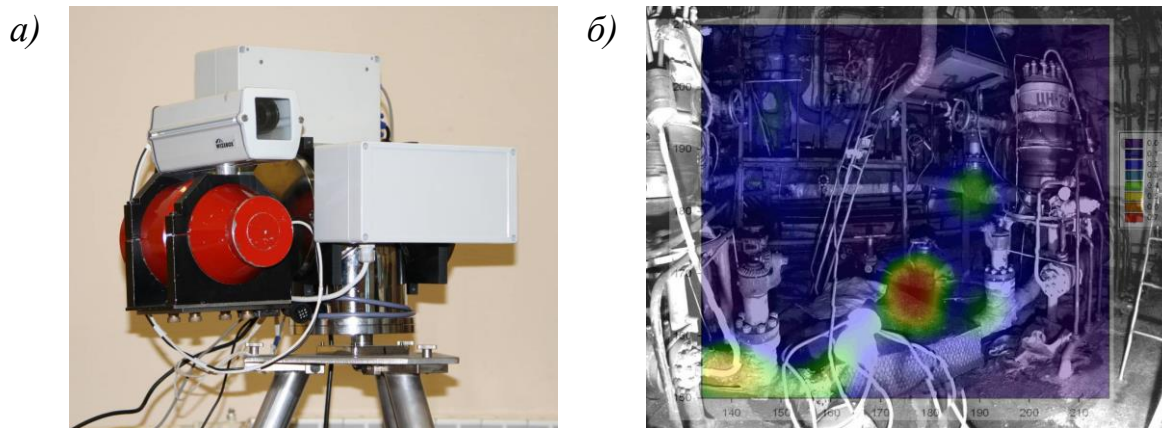


Рисунок 5 – Гамма-локатор [7]: фото общего вида (а) и пример результатов обследования (б)

Гамма-камера с дистанционным управлением (рис. 6) применялась для получения детального распределения загрязнения. Для работы в сильно загрязненных помещениях с неоднородным фоновым излучением в гамма-визоре применена вращающаяся кодирующая апертура.

Применение процедуры «маска-антимаска» позволило снизить влияние шумов и фона при восстановлении изображения. Излучение регистрировалось сцинтиллятором CsI(Tl) с электронно-оптическим усилителем. Детектор был размещен в свинцовой защите и установлен на поворотном столике.

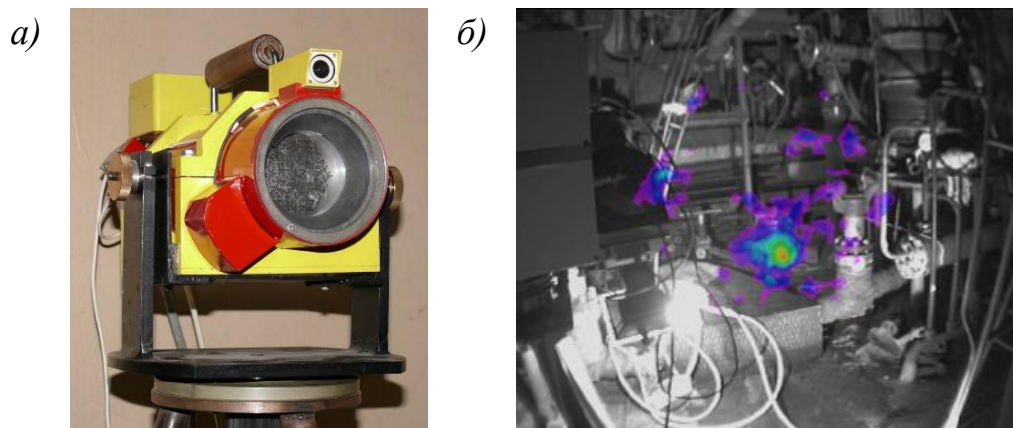


Рисунок 6 – Гамма-визор [6]: фото общего вида (а) и пример результатов обследования (б)

Для проведения работ по ликвидации ВХРАО была разработана система дистанционного обследования радиационной обстановки. Уникальность системы заключается в том, что гамма-сканер располагался на высоте 25 м, а расстояние до дальних участков обследуемой территории составляло порядка 150 м. Для регистрации излучения с такого большого расстояния потребовалось разработать детектор с высокой чувствительностью. На рис. 7 показано графическое представление результатов измерения гамма-сканером распределения мощности эквивалентной дозы на территории ВХРАО в горизонтальной плоскости на высоте 1 м, полученные в разные дни.

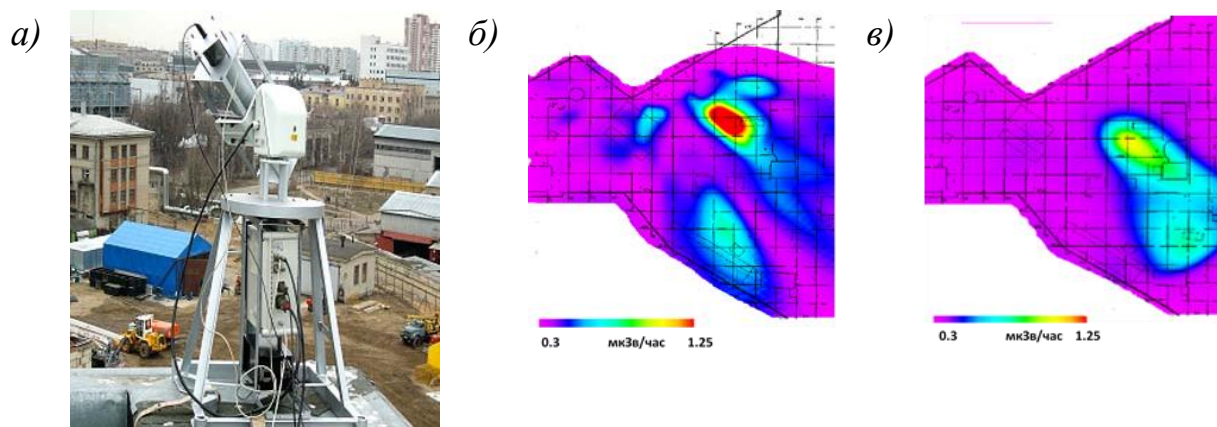


Рисунок 7 – Гамма-сканер [43]: фото общего вида (а) и примеры результатов обследования (б, в)

1.2 Методы визуализации гамма-излучения

В данном подразделе рассматривается ряд методов формирования изображений и регистрации гамма-излучения, применяемых в разработке устройств визуализации для дистанционного обследования и картирования радиационной обстановки.

Применение методов формирования изображений распределения источников гамма-излучения в атомной промышленности в настоящее время становится все более распространенным в связи с расширением влияния области использования ядерной энергии и разработкой доступных, высокопроизводительных детектирующих систем.

Область применения визуализации гамма-излучения весьма разнообразна: паспортизация отходов, мониторинг радиационной обстановки АЭС, оценка последствий радиационных аварий и утечек, планирование вывода из эксплуатации объектов атомной промышленности и многое другое. В силу столь широкой сферы использования, применение универсального решения для всех поставленных задач невозможно.

Факторы, влияющие на выбор метода визуализации, включают в себя:

- оценку необходимого «поля зрения»;
- размер и структуру источника;
- время, доступное для проведения обследования;
- активность источника (как в абсолютных значениях, так и относительно фоновой активности).

Кроме того, важными факторами при выборе метода, реализуемого в разрабатываемой системе визуализации, будут такие практические требования, как мобильность и стоимость прибора.

Каждый из описанных ниже методов имеет свои характерные преимущества и недостатки, так что выбор метода в значительной степени определяется конкретными требованиями прикладной задачи.

1.2.1 Формирование гамма-изображения

По принципу получения изображения методы визуализации гамма-излучения можно разделить на две категории: методы, применяющие пространственную модуляцию, и методы, применяющие временную модуляцию исходного потока фотонов. Для временной модуляции применяются в основном простые детекторы, в то время как для пространственной модуляции применяются позиционно-чувствительные панели. В обеих группах методов для эффективной модуляции потока фотонов применяются материалы с высокой плотностью. Наиболее распространенной задачей визуализации гамма-излучения является картирование распределения изотопов, испускающих фотоны с энергиями от 600 кэВ до 1,2 МэВ. В таком диапазоне энергий длина свободного пробега в свинце и в вольфраме составляет примерно 1,5 и 0,9 см соответственно [44], т. е. для эффективной защиты от гамма-излучения с энергией 1,2 МэВ потребуется экран толщиной порядка 4-5 см свинца или 2,5-3 см вольфрама. В ряде методов, описанных ниже, сигнал, регистрируемый от коллимированного потока должен быть интенсивнее, чем сигнал от источников, расположенных вне поля зрения детектора, для чего потребуется применение массивной защиты. Для решения задач в условиях ограниченной максимальной массы защиты, таких как использование механического манипулятора, подвижной платформы или беспилотного летательного аппарата, потребуется найти компромисс в толщине применяемой защиты. В таких случаях лучшим решением будет сочетание различных методов визуализации, что позволит максимизировать чувствительность.

1.2.2 Сканирующие системы

Простейшим методом формирования гамма-изображения является применение одиночного детектора, размещенного внутри коллиматора – массивной защиты с одиночным отверстием для сокращения поля зрения. На рис. 8 приведено схематическое изображение сканирующей системы. Ограничение этого метода заключается в том, что одновременно может быть измерена только

небольшая часть области интереса. Последовательно перемещая ось коллиматора детектора и проводя измерения в каждой точке, можно сформировать массив данных о распределении источников гамма-излучения в области интереса. Применение коллиматора не обеспечивает высокую эффективность регистрации, поэтому процесс сканирования всей области интереса может занимать длительное время. Для восстановления из массива точечных измерений распределения источников гамма-излучения в обследуемой области требуется дополнительная обработка результатов.



Рисунок 8 – Схема сканирующего устройства с коллиматором

Для формирования качественного изображения при использовании таких систем требуется эффективная равномерная защита. Сложность состоит в том, что фоновое излучение от источников, расположенных вне поля зрения детектора, также влияет на показания детектора при сканировании. В случаях низких активностей источников относительно фонового излучения (проще говоря, в условиях высокого внешнего фона) такой системе потребуются повторное сканирование с закрытым коллимационным отверстием для измерения значений уровня фона в каждой точке, при этом вклад источников, расположенных в поле зрения детектора, в каждой точке сканирования будет определяться как разность показаний детектора «с открытым коллимационным отверстием» и «с заглушкой».

На основе такого метода было разработано несколько систем визуализации. Например, описанная выше спектрометрическая система «гамма-локатор» с дистанционным управлением, была разработана в НИЦ «Курчатовский институт» [45]. Применение такой системы для обследования загрязненных помещений

исследовательского реактора позволило оптимизировать работы по выводу его из эксплуатации в условиях высоких мощностей доз.

Время измерения может быть значительно сокращено, если поместить в одну защиту несколько детекторов с индивидуальными коллимационными отверстиями так. Такая мультиапертурная сканирующая система была предложена в [46].

1.2.3 Камера-обскура

Логичным развитием простого коллиматора стала камера-обскура («пинхольная» камера, от англ. *pinhole*) с позиционно-чувствительным детектирующим элементом. Такая система обладает рядом преимуществ перед сканирующей системой, поскольку в течение одной экспозиции измерения проводятся множеством пикселей. Такое преимущество достигается применением большого количества детектирующих элементов и массивной защиты. Схематично суть метода представлена на рис. 9.

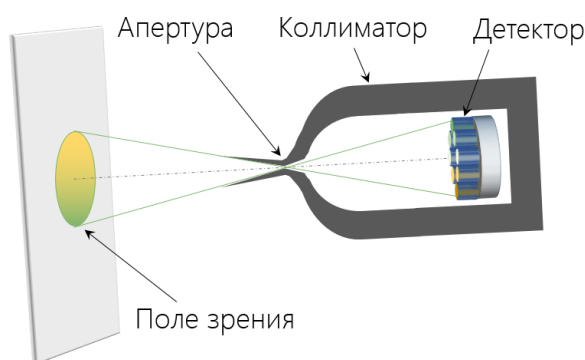


Рисунок 9 – Схема формирования изображения с помощью камеры-обскуры

Конструкция такой камеры также предполагает единственное отверстие, однако поворотный механизм не требуется благодаря применению детектирующей матрицы чувствительных элементов. Угловое распределение источников восстанавливается в соответствии с расположением элемента, зарегистрировавшего гамма-квант, относительно апертуры обскуры (рис. 10).

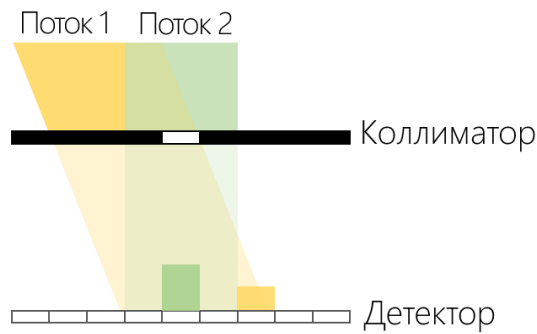


Рисунок 10 – Схема регистрации излучения детектором с камерой-обскурой

На практике, поскольку площадь детектора ограничена допустимой массой защиты, размер отверстия обскуры уменьшают для улучшения пространственного разрешения и, как следствие, количества пикселей в изображении. Для достижения оптимального качества изображения, размер отверстия обскуры должен примерно вдвое превышать предел разрешающей способности детектора. Впрочем, в некоторых случаях размер отверстия может быть увеличен для улучшения статистики в ущерб углового разрешения.

Очевидно, конструкция точечной апертуры обскуры для модуляции гамма-излучения значительно отличается от классического отверстия обскуры, применяемой в оптике, в силу проникающей способности гамма-излучения. Конструкция коллиматора определяется необходимой толщиной защиты. На рис. 11 показано, как проникновение высокоэнергичного гамма-излучения через область вокруг отверстия обскуры приводит к уширению аппаратной функции прибора.

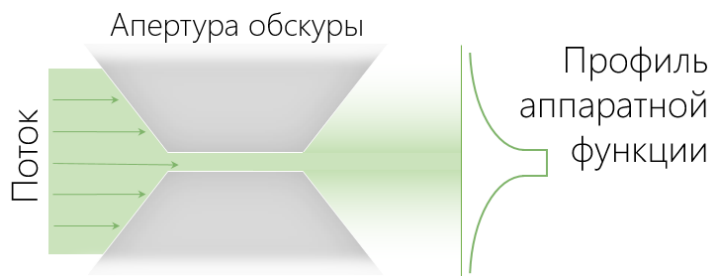


Рисунок 11 – Схема формирования профиля аппаратной функции камерой-обскурой

Основным недостатком точечного отверстия обскуры в сравнении с другими методами коллимации является сравнительно низкая эффективность. Впрочем, в большинстве задач обследования и вывода из эксплуатации объектов

использования атомной энергии рассматриваются высокоактивные источники, так что для широкого ряда задач это ограничение не имеет большого значения.

1.2.4 Камера Ангера

В 1957 году Хэлом Ангером была создана позиционно-чувствительная сцинтилляционная камера, получившая в дальнейшем название по фамилии изобретателя [47]. В камере Ангера, как и в камере-обскуре, применяется ПЧД, но на смену одному коллимационному отверстию приходит коллиматор со множественными отверстиями (рис. 12), что позволяет повысить чувствительность с сохранением разрешения. На сегодняшний день такие системы широко применяются в области томографии.

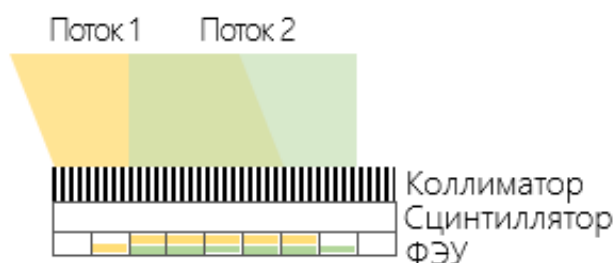


Рисунок 12 – Схема камеры Ангера

При разработке систем визуализации гамма-излучения камера Ангера применяется в качестве ПЧД в комбинации с другими методами визуализации гамма-излучения.

1.2.5 Позиционно-чувствительные детекторы

Существует множество вариантов ПЧД, выбор между которыми зависит от необходимого количества пикселей в изображении, энергетического разрешения и чувствительности.

Массив сцинтилляторов с фотодиодами. Развитие технологий производства PIN-фотодиодов и сцинтилляторов, а также совершенствование базы электронных компонентов способствовали появлению небольших, эффективных сцинтилляционных счетчиков, на основе которых возможно создание массивов компактных сцинтилляционных матриц, которым не требуется источник высокого напряжения. На рынке представлены пиксельные массивы сцинтилляторов на основе различных материалов [48].

Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) и прибор с зарядовой связью (ПЗС). Системы ЭОП+ПЗС удобны для реализации требований высокого пространственного разрешения и чувствительности. ЭОП обеспечивает превосходное собственное пространственное разрешение, хороший квантовый выход, высокий коэффициент усиления и относительно большую полезную площадь. ПЗС также обладают высоким пространственным разрешением и системой сбора данных на высоком техническом уровне. Вместе они образуют хорошую базу для системы визуализации гамма-излучения на основе сцинтиллятора. Сложность проектирования такой системы заключается в необходимости компромисса между различными критериями эффективности. Пример реализации такой системы описан в [49].

Позиционно-чувствительные фотоумножители. Позиционно-чувствительный фотоумножитель (position-sensitive photomultiplier tube PSPMT) первоначально разработанный Hamamatsu был основан на технологии анодной сетки, обеспечивающей сфокусированное распределение заряда [50]. Сигнал с фотокатода усиливается системой динодов с последовательно возрастающим потенциалом, а затем дискретизируется анодной сеткой, на основании результатов определяется положение взаимодействия в материале сцинтиллятора.

1.2.6 Кодированная апертура

В системах визуализации гамма-излучения с кодированными апертурами может применяться маска, состоящая из массива прозрачных и непрозрачных для гамма-излучения элементов, которая размещается между источником ионизирующего излучения и панелью ПЧД так, что активность в поле зрения формирует «тень» маски на плоскости обнаружения (рис. 13). Апертура спроектирована таким образом, что «тень», проецируемая на плоскость обнаружения, от источника, расположенного в любой точке поля зрения, является уникальной, и, следовательно, может использоваться для восстановления положения источника [51]. Чтобы добиться этого без потери качества изображения, позиционное разрешение детектора должно быть не меньше размера элемента маски.

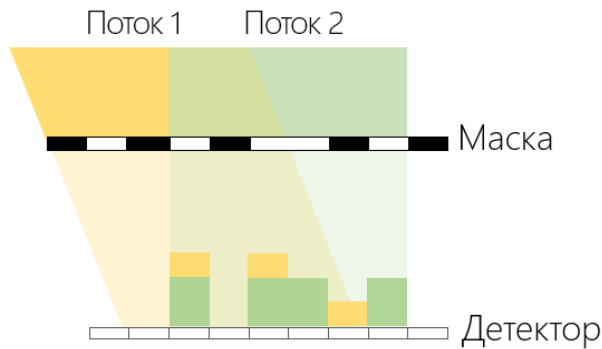


Рисунок 13 – Схема регистрации излучения позиционно-чувствительным детектором с кодирующей апертурой

На рис. 14 показан процесс формирования изображения с применением кодирующей апертуры. Проходя через прозрачные для гамма-излучения области кодирующей апертуры, гамма-излучение регистрируется ПЧД, формируя «теневые области» по заранее известному алгоритму. Дальнейшая обработка позволяет определить истинное расположение источников.



Рисунок 14 – Последовательность процедур при восстановлении изображения, полученного с помощью кодирующей апертуры

Выбор конструкции отверстий апертуры во многом зависит от характера распределения источников в обследуемой области, а также от размера и разрешения детектора. В настоящее время существует множество вариантов исполнения конструкций для решения практически любой задачи. Многие из описанных в литературе шаблонов масок основаны на использовании прямоугольной геометрии. Однако конфигурации, основанные на гексагональной геометрии, обеспечивают особое преимущество, позволяя минимизировать артефакты изображения, возникающие вследствие флуктуаций фона и собственных шумов детектора. Широкое распространение получили маски типа

MURA (Modified Uniformly Redundant Array) [52]. Применение кодирующей апертуры оптимально для визуализации точечных источников в умеренно большом поле зрения.

В [53] описан прототип портативной гамма-камеры для поиска источников при проведении штатных и аварийных работ, в основе которой лежит метод применения кодирующей апертуры.

1.2.7 Антикollимационная визуализация

Устройства для визуализации гамма-излучения с энергиями от 0,6 до 1,2 МэВ на основе коллиматора требуют применения массивной защиты. Более того, в ряде задач, для повышения эффективности регистрации, требуется увеличение чувствительного объема детектора, а в случае применения коллиматора это неизбежно приводит к значительному увеличению объема и массы защиты от гамма-излучения. В некоторых случаях целесообразно рассмотреть возможность применения метода антиколлимации для визуализации гамма-излучения.

Задачу визуализации гамма-излучения, поставленную для случая, когда излучение направлено преимущественно в одном направлении, как показано на рис. 15, можно решить с помощью стационарного ПЧД и антиколлиматора. Для получения изображения объекта необходимо вычесть изображения с антиколлиматором и без антиколлиматора одно из другого с последующей обработкой.

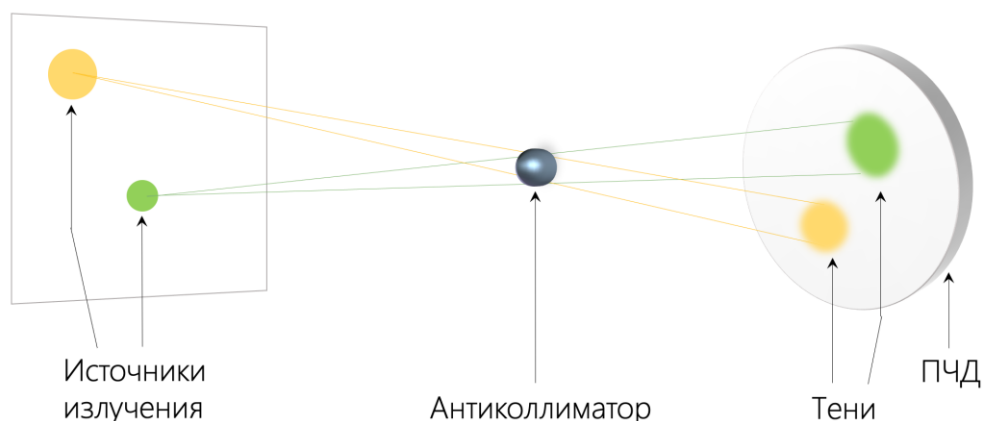


Рисунок 15 – Принцип формирования гамма-изображения с помощью антиколлиматора

Патент [17] описывает устройство, обеспечивающее визуализацию гамма-излучения в условиях промышленной эксплуатации. В состав такого устройства входит ПЧД и антиколлиматор – объект, блокирующий гамма-излучение, с возможностью удаления его из поля зрения для формирования разностного гамма-изображения.

1.2.8 Камера Комптона

Системы формирования гамма-изображений на основе камеры Комптона основаны на возможности восстановления информации о положении события и энергии каждого взаимодействия в процессе комптоновского рассеяния [54].

Рассмотрим гамма-квант γ с энергией E_0 , падающий на детектор рассеяния (*Low Z*). Он будет рассеиваться через детектор рассеяния, оставляя некоторую энергию E_1 , и поглощаться детектором поглощения (*High Z*), оставляя оставшуюся часть его энергии E_2 ($E_0 = E_1 + E_2$). Применяя формулу комптоновского рассеяния (1) к энергиям вместе с точками взаимодействия, можно построить конус с углом раствора θ (рис. 16).

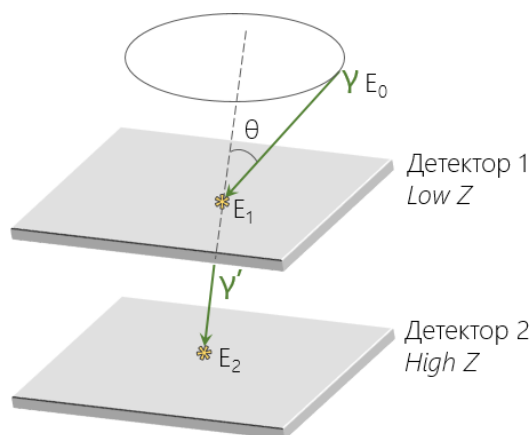


Рисунок 16 – Схема взаимодействий в камере Комптона

Возможные положения источника гамма-излучения лежат по периметру основания конуса. Изображение восстанавливается наложением конусов от многих взаимодействий.

Формула Комптоновского рассеяния:

$$E_2 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

где E_2 – энергия, оставленная гамма-квантом в детекторе поглощения, эВ;
 E_0 – начальная энергия гамма-кванта, эВ;
 $m_0 c^2$ – энергия покоя электрона, эВ;
 θ – угол рассеяния (угол между направлениями распространения фотона до и после рассеяния), град.

Как правило, такая система состоит из двух позиционно-чувствительных детектирующих панелей, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Направление падающего фотона определяется путем построения кругового распределения вероятностей вокруг линии, соединяющей точки взаимодействия в каждой из двух плоскостей обнаружения.

В [55] описана компактная система визуализации гамма-излучения на основе камеры Комптона, разработанная для ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» в 2011 году. Детектор состоит из двух массивов неорганических сцинтилляционных детекторов, которые действуют как рассеиватель и поглотитель. Каждый массив состоит из восьми сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов сцинтиллятора CsI(Tl) в форме куба со стороной 3,5 см.

Главным преимуществом комптоновской камеры является хорошее угловое разрешение, однако следует отметить сложность реализации такой системы и ограничение по диапазону энергий.

1.2.9 Гибридные системы

Для расширения энергетического диапазона комбинируют кодирующие апертуры с камерой Комптона. Пример конструкции комбинированной системы визуализации приведен в [56]. Авторы описывают решение, обеспечивающее высокую эффективность регистрации и хорошее угловое разрешение в широком диапазоне энергий (от 50 кэВ до 3 МэВ) благодаря комбинированию кодирующей апертуры с камерой Комптона.

На рис. 17 схематически показан пример структуры гибридной (комбинированной) системы, описанной в [56]. Модуль первого детектора представляет собой камеру Ангера на основе кристалла NaI(Tl) размерами $10 \times 10 \times 1$ см³. Модуль второго детектора состоит из матрицы 7×7 кристаллов CsI(Na) размером $7 \times 7 \times 3$ см³ с позиционно-чувствительным фотоумножителем. Модули детекторов удалены друг от друга на расстояние $d \sim 35$ см и расположены под углом $\theta \sim 30^\circ$. Свинцовая кодирующая маска на основе базовой конструкции MURA толщиной 5 мм расположена на расстоянии $f \sim 20$ см от детектора 1.

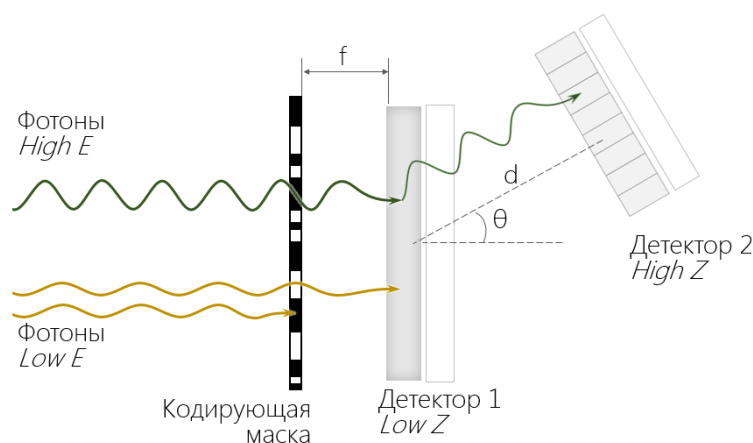


Рисунок 17 – Схема гибридного устройства визуализации

Низкоэнергетичные фотоны (*Low E*) с энергиями менее 400 кэВ, пройдя через элементы кодирующей маски, будут поглощены первым детектором (*Low Z*). Высокоэнергетичные фотоны (*High E*) с энергиями выше 800 кэВ с высокой вероятностью проникают через вещество кодирующей апертуры и испытывают комптоновское рассеяние в материале первого детектора (*Low Z*) с последующим поглощением во втором детекторе (*High Z*). Траектории фотонов с промежуточными энергиями (400 – 800 кэВ) восстанавливаются по результатам измерений обоих детекторов.

1.3 Примеры систем визуализации гамма-излучения

1.3.1 Сканирующая система

Одним из примеров коммерческой сканирующей системы для картирования радиационной обстановки является RadScan600 [57], а также его модифицированная версия RadScan™ 800 [58], разработанные BNFL Instruments

(Великобритания). На рис. 18 приведены внешний вид устройства RadScan™ 800 и схематическое изображение компонентов сканирующей головки. В этой системе используется сцинтилляционный детектор (*NaI detector*), размещенный в вольфрамовом коллиматоре (*Tungsten collimator*) с апертурой в 4 градуса. Стандартная апертура составляет 4 градуса, однако применение дополнительных вставок позволяет уменьшить это значение для увеличения пространственного разрешения. Детектирующая головка с видеокамерой (*CCD Camera*) и дальномером (*Rangefinder*) расположена на поворотном столике, управляемом компьютером. Для снижения дозовой нагрузки на оператора блок управления расположен удаленно от детектирующей головки. Формирование дозовых карт может выполняться как путем автоматического сканирования большой площади, так и сканированием области интереса вручную. При подключении к видеокамере удастся довольно точно определить область интереса. Последующая обработка позволяет получить дозовые карты обследуемой области.

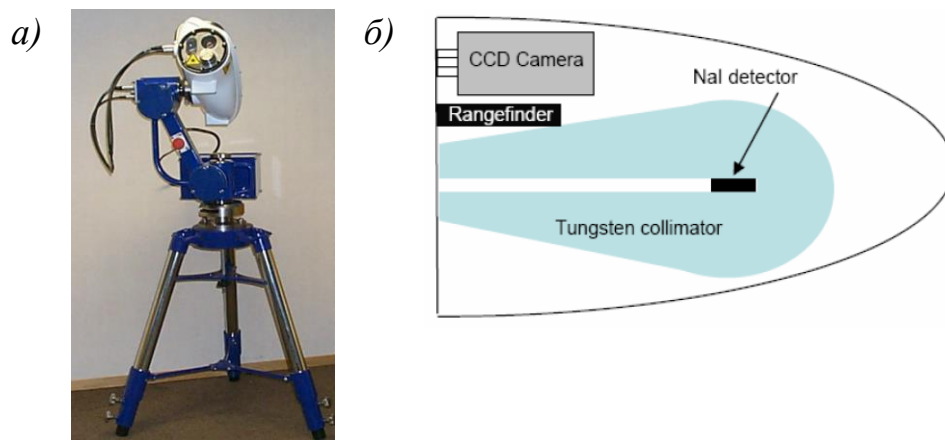


Рисунок 18 – Фото общего вида (а) и схематичное изображение детектирующей головки (б) устройства RadScan™ 800 [59]

В 2006 году 4π-система для гамма-визуализации RadScan™ 800 применялась на реакторе ВВЭР АЭС Терки-Пойнт [59]. С помощью RadScan™ 800 было проведено три геологических обследования на четвертом блоке в канале для транспортировки отработавшего ядерного топлива на АЭС Терки-Пойнт.

Другим примером сканирующей системы является прибор RadSearch от ANTECH – это устройство для обнаружения гамма-излучения [60]. Детектирующая головка состоит из детектора гамма-излучения на основе сцинтиллятора LaBr_3 ,

видеокамеры и лазерного дальномера. С помощью RadSearch была проведена серия измерений на установке альфа-гамма горячих камер (AGHCF) в Аргоннской национальной лаборатории (ANL) [61]. Измерения проводились на среднем расстоянии 11 м и идентифицировали источник ^{137}Cs активностью 68,8 ГБк, распределенный в области сканирования.

1.3.2 Камера-обскура

В [62] описан опыт эксплуатации системы гамма-визуализации CARTOGAM. Система CARTOGAM (рис. 19) состоит из компактной детектирующей головки, блока управления измерениями, камеры и компьютера, выполняющего сбор и обработку изображений. Детектирующая головка устанавливается на конструкции с автоматизированным поворотным столиком. Детектор содержит сцинтиллятор CsI(Tl), ЭОП и ПЗС. Оптические связи выполняются с помощью волоконно-оптических конусов (рис. 19). Детектор размещен в вольфрамовой защите толщиной до 20 мм. Внешний цилиндр из нержавеющей стали позволяет легко дезактивировать детектирующую головку. Коллиматор с апертурой обскуры обеспечивает формирование гамма-изображения на плоскости ПЧД. Нижний предел измерений мощности дозы составляет 1 мГр/ч [63].

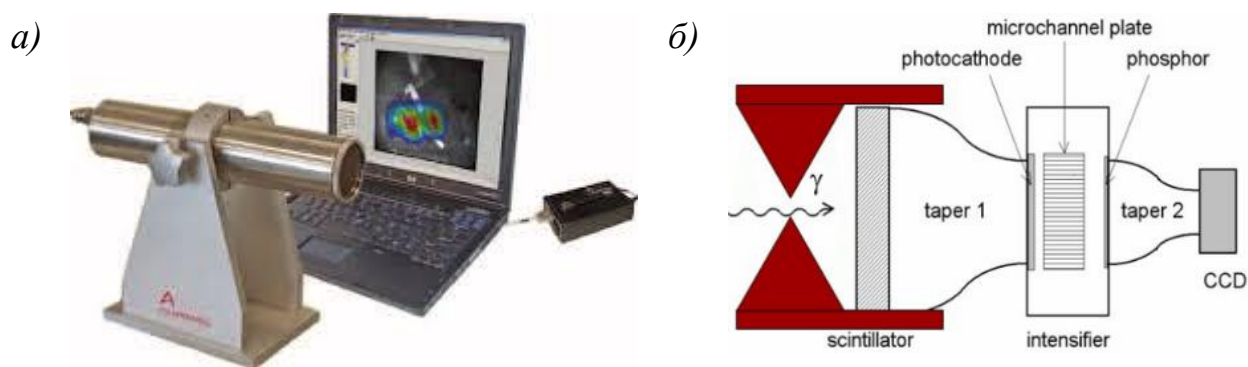


Рисунок 19 – Фото общего вида (а) и схематичное изображение детектирующей головки (б) устройства CARTOGAM [64]

1.3.3 Кодированная апертура

Для решения задач дезактивации и вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии разработано устройство визуализации iPix [65]. В устройстве на смену единичному отверстию апертуры обскуры приходит кодированная апертура. В состав iPix входит детектор фотонов на основе теллурида

кадмия CdTe толщиной 1 мм с КМОП-матрицей, кодирующая вольфрамовая апертура и мини-камера. Основными преимуществами такой системы являются легкость (2,35 кг), компактность (9×9×18,8 см), удобство использования и хорошее пространственное разрешение. С помощью такой системы источник ^{241}Am с мощностью дозы всего несколько нЗв/ч может быть локализован менее чем за одну минуту [66]. Три маски кодирующих апертур (рис. 20) разного ранга и толщины позволяют применять одно устройство для решения различных задач.

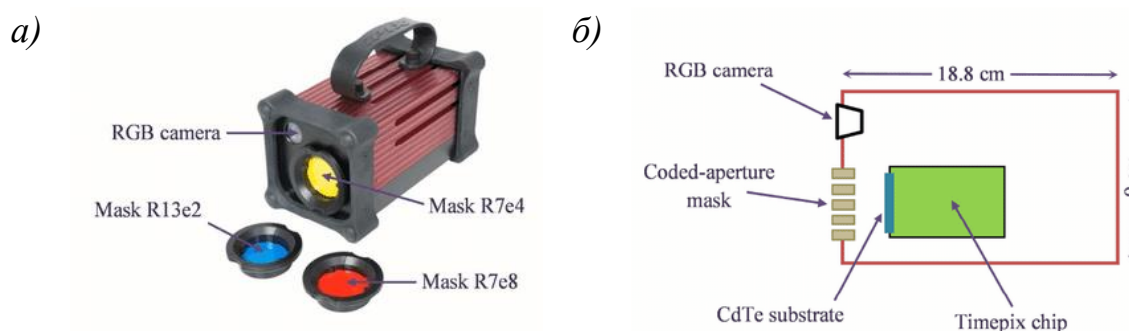


Рисунок 20 – Фото общего вида (а) и схематичное изображение детектирующей головки (б) устройства iPix [66]

В НИЦ «Курчатовский институт» были проведены испытания системы [67], показавшие возможность применения устройства в широком диапазоне задач.

1.3.4 Камера Комптона

Примером коммерческой реализации устройства визуализации гамма-излучения на основе камеры Комптона является ASTROCAM 7000HS [68]. Устройство (рис. 21) состоит из блока детектирования (*Camera unit*), блока управления (*Control unit*) и блока обработки (*Operation/image processing unit*).

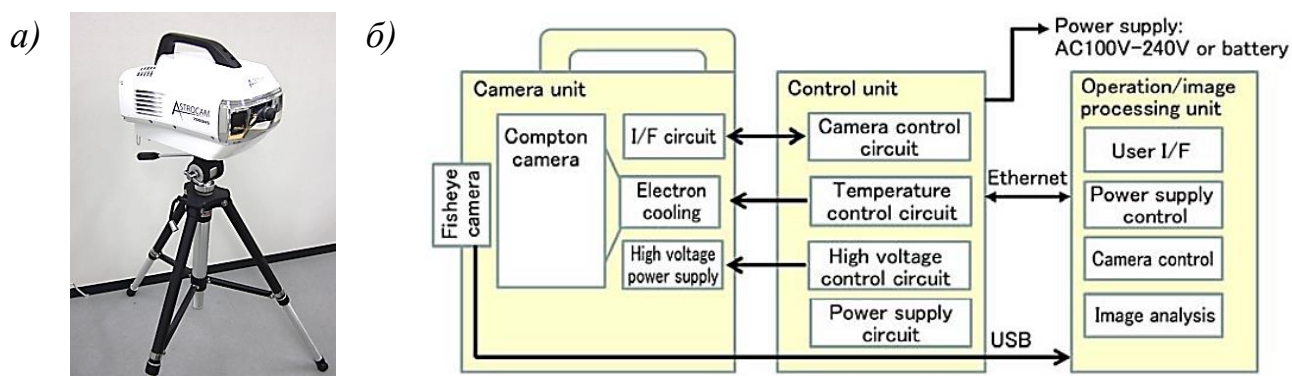


Рисунок 21 – Фото общего вида (а) и схема функционирования (б) устройства ASTROCAM 7000HS [68]

Блок детектирования состоит из комптоновской камеры с детекторами на основе кремния Si и теллурида кадмия CdTe, высоковольтного источника питания, интерфейсной схемы, термоэлектрического охладителя, широкоугольной камеры «Fisheye». Размеры детектирующей головки 445×340×235 мм, а вес варьируется в интервале от 8 до 13 кг в зависимости от количества применяемых детектирующих плоскостей. Камера Комптона имеет в общей сложности 12 слоев: 8 слоев рассеяния на основе полупроводника Si и 4 слоя поглощения на основе полупроводника CdTe. В зависимости от специфики решаемой задачи, количество слоев детектирования может меняться. Энергетическое разрешение составило 2,2 % (ПШПВ) для энергии 662 кэВ [69].

В [70] описаны результаты испытаний ASTROCAM 7000HS на Main Ring J-PARC в Японии.

1.3.5 Гибридные системы

Polaris – это портативная система для визуализации гамма-излучения в 4π-геометрии в широком диапазоне энергий (от 30 кэВ до 3 МэВ) с энергетическим разрешением <1% (ПШПВ) для энергии 662 кэВ [71, 72]. Для определения траектории фотонов с энергиями выше 300 кэВ в конструкции системы используется методика камеры Комптона (рис. 22). В силу низкой вероятности комптоновского взаимодействия в CdZnTe при более низких энергиях, применена технология визуализации с применением кодирующих апертур.

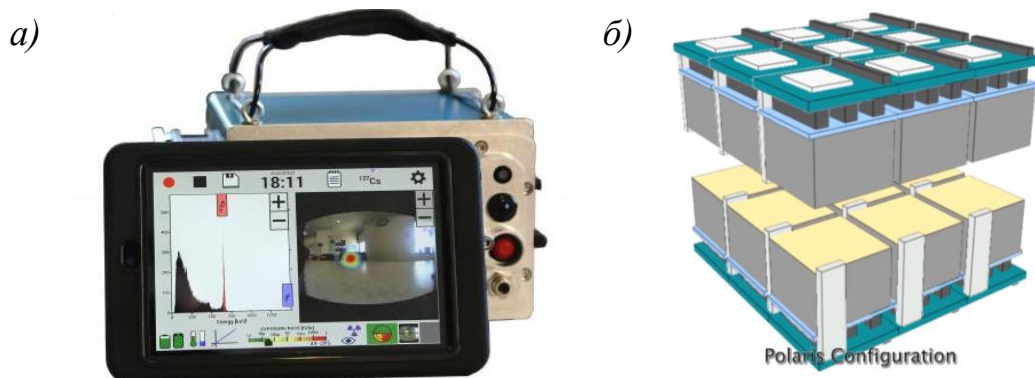


Рисунок 22 – Фото общего вида (а) и схематичное изображение детектирующей головки (б) устройства Polaris [73]

Система состоит из 18 детекторов CdZnTe: две плоскости, состоящие из массивов 3×3 кубических детекторов [74]. На пять из шести сторон каждого кристалла CdZnTe накладываются маски. Далее на каждую из двух плоскостей массивов детекторов накладываются дополнительные маски, что обеспечивает лучшее качество изображения при объединении изображений с нескольких детекторов. Наконец, результаты визуализации с помощью кодирующих апертур сопоставляются с результатами визуализации, полученной в результате Комптоновского рассеяния. Итоговое изображение накладывается на видео в режиме реального времени.

Результаты применения гамма-камеры Polaris в работах по выводу из эксплуатации и реабилитации объектов в НИЦ «Курчатовский институт» представлены в [75]. В [76] показана возможность улучшения пространственного разрешения данного устройства с помощью дополнительной обработки.

1.4 Опыт применения антиколлимационного метода

Поскольку в астрофизике вопрос сокращения массы полезной нагрузки является критичным, инженеры-астрономы всегда боролись за сокращение веса установок для изучения небесных объектов. Так, в конце 1960-х — начале 1970-х гг. была предложена идея применения антиколлиматора. Ниже приведен краткий обзор основных экспериментов с применением антиколлиматора.

В [9] представлены результаты двух полетов (Англия, 1966 и 1967 гг.) на воздушном шаре, полученные с гамма-телескопа. В качестве детектора применялся кристалл CsI диаметром 10 см и высотой 10 см. Направленность детектора обеспечивалась с помощью свинцовой пробки толщиной 2,5 см, которая заслоняла определенную область неба.

В 1968 г. для исследования излучения Крабовидной туманности было выполнено два полета с двумя гамма-телескопами [10], один из которых был предназначен для работы в диапазоне энергий 20-200 кэВ (рис. 23, детектор А), а второй – от 300 кэВ до 3 МэВ (рис. 23, детектор В).

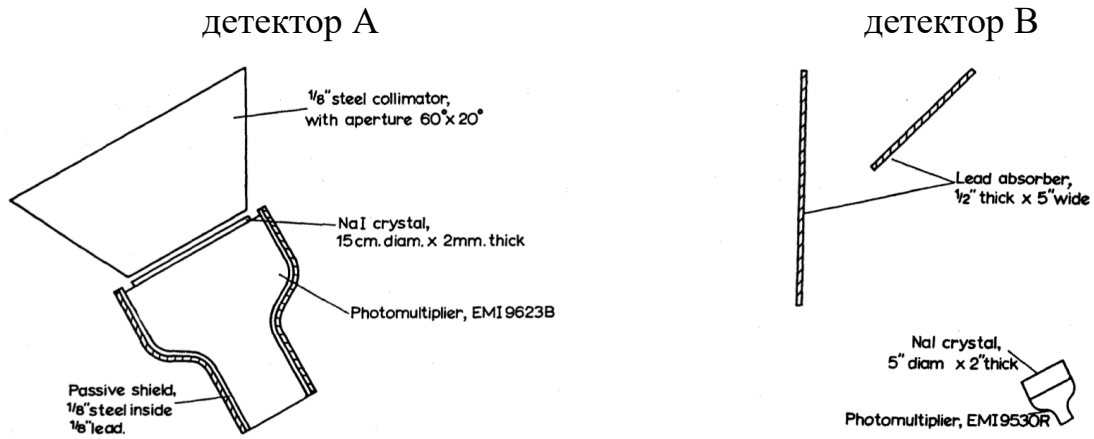


Рисунок 23 – Схемы гамма-телескопов, применявшихся в эксперименте [10]

В рамках изучения методов γ -астрономии группой ученых Саутгемптонского университета были запущены несколько шаров с полезной нагрузкой. В работе [11] представлены результаты эксперимента 1972 года по обнаружению гамма-излучения, испускаемого остатками сверхновых и активных галактик. В качестве детектора использовался размещенный на высоте полета воздушного шара антиколлимационный телескоп с двумя детекторами на основе сцинтиллятора NaI(Tl) диаметром 12 см и высотой 5 см с ФЭУ. Модуляция потока γ -квантов обеспечивалась свинцовым диском диаметром 18 см и толщиной 10 см, размещенным на высоте 50 см над кристаллами детекторов, ось всей сборки была направлена таким образом, чтобы непрерывно отслеживать небесный источник. Положение диска чередовалось с интервалом 5 мин, закрывая поочередно каждый детектор. Большое количество измерений позволило определить значение активности источника, несмотря на то что она была значительно ниже фоновой. В таких измерениях крайне важно исключить любые отклонения положения, которые могут повлиять на фоновую активность во время обследования. В данном случае, когда задача была сведена к измерению активности точечного источника в известном направлении, масса детектора составила около 50 % от общей массы, что говорит об эффективности конструкции. В таких условиях применение классического коллимационного отверстия привело бы к возрастанию скорости счета фона вследствие образования в защите вторичных фотонов под воздействием космической радиации.

Описанная в [11] система получила развитие как LEG4 [77]. Схематическое представление эксперимента показано на рис. 24. Ориентация оси детектора изменялась с помощью альт-азимутального крепления. Четыре кристалла NaI диаметром 12 см и высотой 5 см были смонтированы с фотоумножителями в герметичных алюминиевых боксах и помещены в пластиковый кожух. Над детектирующей сборкой были размещены два свинцовых диска толщиной 10 см каждый. Диски поворачивались таким образом, чтобы сначала одна пара кристаллов была закрыта от источника вдоль вертикальной оси детектора (в то время как другая пара кристаллов была не закрыта), а затем другая пара кристаллов была закрыта.

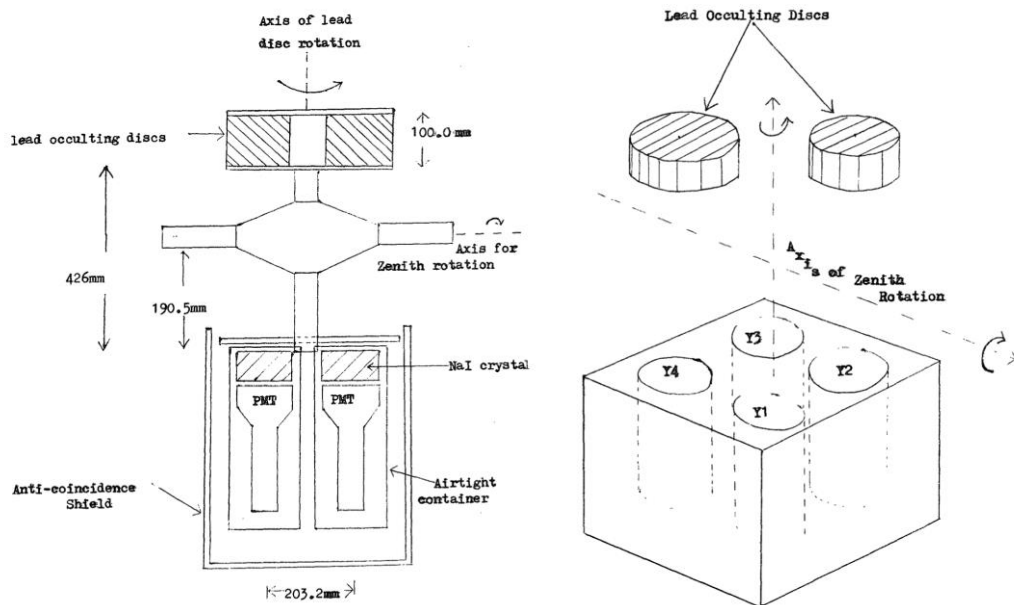


Рисунок 24 – Схематическое представление установки LEG4 [77]

Также следует отметить систему, описанную в [12, 78]. Для наблюдения полного спектра Крабовидной туманности с энергией примерно до 4 МэВ (Франция, 1975 г.) был сконструирован телескоп, состоящий из кристалла CsI(Tl) площадью 80 см^2 и высотой 2,5 см, защищенного от атмосферного фона активным экранированием NaI(Tl) толщиной 5 см. Свинцовый затвор толщиной 8 см и диаметром 12 см, разрезанный на два полуцилиндра, располагался на расстоянии 57 см от детектора. Две половины цилиндра сначала разделяются на 10 минут для наблюдения за источником, затем закрываются на 10 минут для накопления

фонового спектра, и так далее на протяжении всего полета. Итоговый спектр определяется путем вычитания показаний при закрытых заслонках из показаний при открытых заслонках.

Другое применение этого подхода было исследовано Морфиллом и Пипером и представлено в работе [13]. В предложенной схеме используется батарея параллельных цилиндрических NaI(Tl) спектрометров, которые вращаются вокруг оси, параллельной оси детекторов. На рис. 25 показана схема этой сборки. Здесь ось вращения перпендикулярна плоскости бумаги, и детектор, находящийся в положении А, закрывает излучение (от источника «*SOURCE*» на рис. 25), достигающее детектора, находящегося в положении D. В результате сигналы для детекторов в положении D модулируются по интенсивности, но только в одном детекторе за раз.

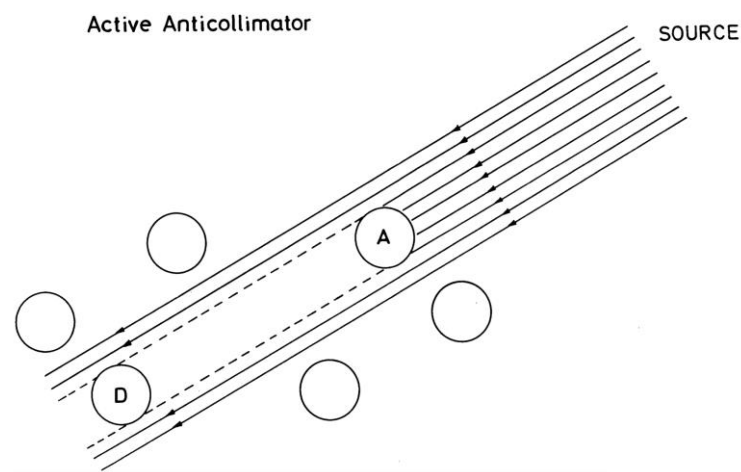


Рисунок 25 – Принципиальная схема узла активного антиколлиматорного детектора.

А – поглотитель, D – кристалл детектора для показанного положения источника, SOURCE – источник излучения. [13]

В эксперименте BATSE (the Burst And Transient Source Experiment) [79-81] был применен подход, называемый Occultation Transform Imaging, когда Земля выполняла функцию антиколлиматора. Телескоп размещался на борту обсерватории Комптон CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) и включал в себя восемь модулей детекторов, расположенных по углам космического аппарата. Каждый модуль детектора был оснащен тонким сцинтилляционным детектором большой площади LAD (сокр. от Large Area Detector), представляющим собой

кристалл сцинтиллятора NaI(Tl) диаметром 50,8 и высотой 1,27 см для исследований с высоким разрешением по времени, а также более толстым спектроскопическим детектором SD (сокр. от Spectroscopy Detector), представляющим собой кристалл сцинтиллятора NaI(Tl) диаметром 12,7 и высотой 7,62 см для расширения энергетического диапазона и обеспечения лучшего спектрального разрешения [82]. Применение антиколлимационной техники в эксперименте BATSE позволило получить данные для определения местонахождения новых астрофизических источников [80-81].

1.5 Выводы

Изложен краткий обзор исторических предпосылок, сформировавших актуальное состояние области приборостроения систем визуализации источников гамма-излучения.

Рассмотрен ряд доступных решений задач визуализации гамма-излучения для картирования радиационной обстановки на объектах использования атомной энергии. Разработка оптимальной системы визуализации для каждой конкретной задачи требует очень тщательного анализа определенных требований к таким характеристикам, как энергетическое и пространственное разрешение, время, доступное для обследования, масса и габаритные размеры, а также предельная стоимость системы.

Представлен опыт разработки и эксплуатации коммерческих систем визуализации источников гамма-излучения в пространстве на основе описанных методов формирования гамма-изображения. Рассмотрены основные результаты испытаний систем гамма-визуализации. На рынке заметна тенденция к снижению массогабаритных характеристик приборов, повышению удобства их применения, повышению точности локализации – повышению пространственного разрешения.

Изложены некоторые примеры и методы использования антиколлиматора для формирования гамма-изображений. Приведен краткий обзор основных экспериментов с применением техники антиколлимации в астрофизике. Показано, что метод сканирования с применением антиколлиматора ранее не применялся.

Глава 2. Разработка сканера с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения

Визуализация источников гамма-излучения позволяет планировать и оптимизировать реабилитационные работы на всех этапах. Целью применения устройств визуализации является снижение дозовых нагрузок на персонал. Приборы для получения гамма-изображений в зависимости от назначения различаются по своим рабочим характеристикам, определяющим условия работы и параметры получаемых гамма-изображений. Среди таких характеристик: максимальная МЭД (верхний предел загрузки детектора), минимальная регистрируемая активность, поле зрения в области интереса и угловое разрешение, эксплуатационные характеристики (вес, размер, простота использования), время измерений и пр. Так, для первичной оценки радиационной обстановки обследуемого объекта важны широкий угол обзора и возможность определения энергии излучения загрязняющих нуклидов; во время выполнения работ по фрагментации оборудования требуется получать гамма-изображения в широком диапазоне по МЭД с хорошим угловым разрешением; для оценки качества проведенных работ и проверки наличия остаточного загрязнения проводится характеристика объектов, которые имеют небольшое остаточное загрязнение и большую протяженность, поэтому хорошее угловое разрешение не требуется.

В разделе Глава 1 рассмотрен ряд методов визуализации гамма-излучения, каждый из которых находит свое применение при создании устройств, предназначенных для формирования гамма-изображений на различных стадиях реабилитации объектов использования атомной энергии. В отличие от приведенных в разделе Глава 1 примеров применения антиколлимационной техники, предложенный метод сканирования с антиколлиматором позволяет реализовать устройство, поле зрения которого ограничивается только возможностями поворотного механизма. При этом, по сравнению со сканирующими коллимированными системами, устройство будет значительно легче и мобильнее, что значительно расширит область возможных применений.

Целью настоящей работы является создание нового компактного устройства, которое позволит локализовать источники ионизирующего излучения путем их визуализации с помощью сканера с антиколлиматором [21 – 23].

Под антиколлиматором понимается объект, изготовленный из материала с высокой плотностью, который помещают перед детектором для пространственной модуляции гамма-излучения.

В отличие от классического коллиматора [83], антиколлиматор поглощает излучение от источников, расположенных на одной оси с детектором, поэтому аппаратная функция такой системы будет обратна аппаратной функции детектора с классическим коллиматором (рис. 26). Детектор, помещенный в коллиматор, регистрирует только то излучение, которое проходит через апертуру, а излучение от источников, расположенных вне поля зрения детектора, поглощается массивной защитой. В свою очередь открытый детектор, расположенный за антиколлиматором, будет регистрировать все излучение, кроме поглощенного антиколлиматором.

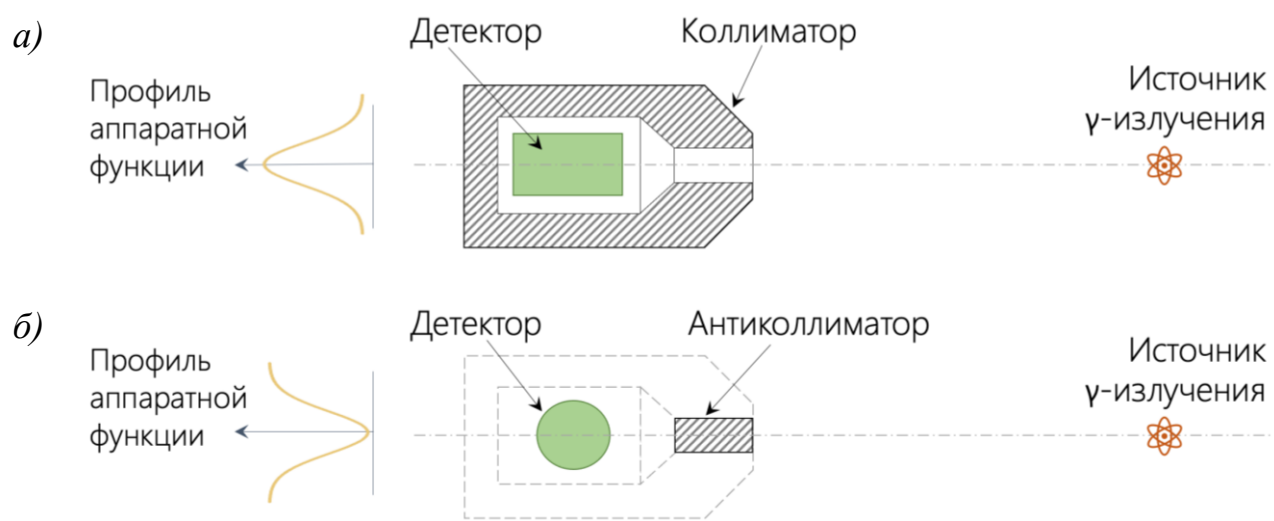


Рисунок 26 – Сравнительная схема регистрации излучения с помощью коллиматора (а) и антиколлиматора (б)

Последовательно перемещая ось детектора с антиколлиматором в области интереса (рис. 27), мы сможем получить изображение источников гамма-излучения: в точках, когда антиколлиматор будет находиться между источником ионизирующего излучения и детектором, регистрируемая интенсивность излучения будет ниже. В результате полученная картина будет инвертирована

относительно действительных значений активности – в точках расположения источников ионизирующего излучения будут формироваться так называемые «тени» – области с меньшей относительно соседних интенсивностью.

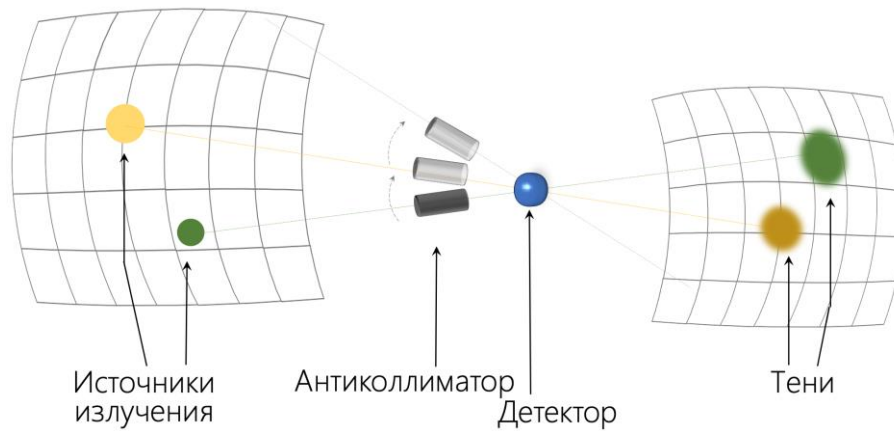


Рисунок 27 – Процесс формирования гамма-изображения методом сканирования с антиколлиматором

Для получения информации о действительном расположении и активности источников в обследуемом помещении необходимо вычлесть результаты сканирования с «теневого областью» из общего спектра, в котором суммируются активности всех источников в обследуемом помещении. Для этого необходимо провести измерение общей активности всех источников ионизирующего излучения в поле зрения детектора в точке размещения сканирующего устройства с открытым детектором (без антиколлиматора).

По полученным данным теневого изображения с помощью метода максимального правдоподобия [84] может быть получена восстановленная картина распределения источников ионизирующего излучения с более высоким пространственным разрешением.

Ожидается, что применение метода сканирования с антиколлиматором позволит в некоторых случаях сократить время обследования почти в два раза, поскольку классический метод требует двукратного сканирования области интереса: первое сканирование выполняется с закрытой апертурой для измерения фоновых значений активности в каждой точке, второе сканирование выполняется с открытой апертурой для измерения активностей источников в поле зрения детектора. Кроме того, общая масса сканирующей системы с антиколлиматором

значительно уменьшится, поскольку взамен массивной защиты для модуляции потока гамма-квантов будет использоваться небольшой антиколлиматор. Однако значительным ограничением системы с антиколлиматором следует отметить высокую загрузку спектрометрического тракта при измерениях в условиях высокого уровня внешнего фона и, как следствие, невозможность применения устройства в условиях обследования объектов с высокими активностями в точке размещения сканирующей системы. Данная проблема не возникает в рамках поставленной задачи и может быть решена применением детекторов с различной чувствительностью в зависимости от требований к условиям эксплуатации. Дополнительным преимуществом метода следует отметить экономическую составляющую – предлагаемый метод не требует применения массивной защиты или дорогостоящих позиционно-чувствительных детекторов.

2.1 Требования, предъявляемые к разрабатываемой системе

Сканирующее устройство должно выполнять покоординатное измерение в границах заданной области интереса в автоматическом режиме. Результатом работы устройства является карта пространственного расположения источников гамма-излучения обследуемого объекта, получаемая наложением восстановленного изображения источников гамма-излучения на панорамную фотографию объекта (рис. 28).

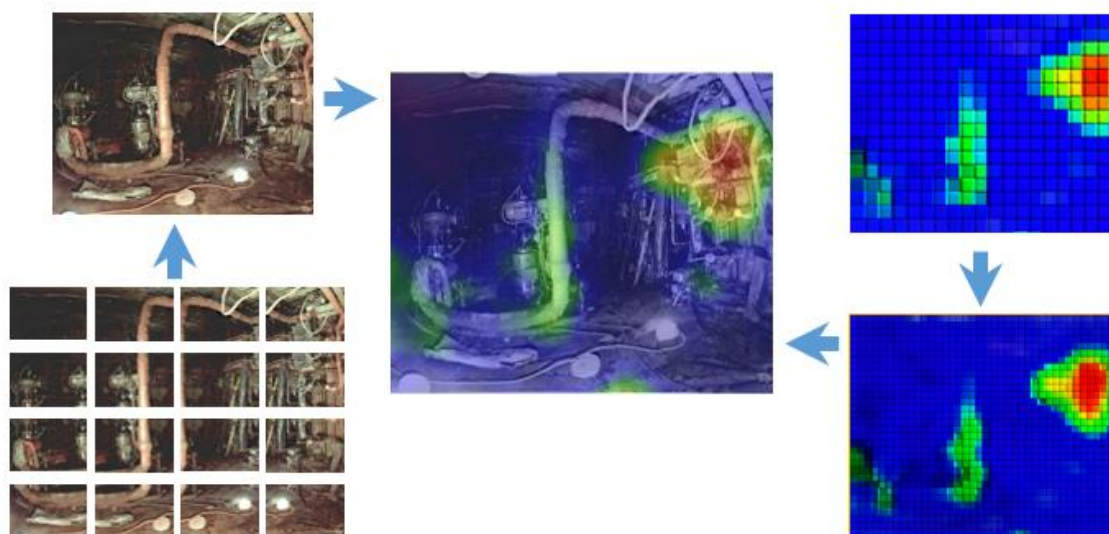


Рисунок 28 – Формирование карты пространственного распределения источников гамма-излучения

Для получения гамма-изображения требуется сформировать массив результатов измерений гамма-спектров в каждой точке заданного диапазона области интереса. Время измерения в каждой точке сканирования, угол перемещения и границы области интереса должны задаваться пользователем по результатам предварительной оценки условий сканирования.

Перевод детектирующей головки в новое положение на заданный угол должен осуществляться автоматически по окончании заданного времени измерения.

Для получения панорамного изображения требуется сформировать массив фотографий в каждой точке заданного диапазона области интереса. Также следует рассмотреть возможность автоматической сшивки фотографий в единое изображение.

Гамма-сканер с антиколлиматором должен состоять из следующих основных конструктивных элементов: спектрометрический детектор гамма-излучения, спектроанализатор, антиколлиматор, поворотный механизм, узел питания, видеокамера, соединители и дополнительное оборудование.

Назначением разрабатываемого устройства является обследование подреакторного помещения выведенного из эксплуатации исследовательского реактора. В таких помещениях основными долгоживущими радионуклидами являются ^{60}Co и ^{137}Cs . В таблице 1 [85] приведены их основные характеристики. Разрабатываемое устройство должно быть рассчитано для обследования радиационно-загрязненного помещения с мощностью дозы в точке его размещения порядка (0,001—0,1) мЗв/ч.

Таблица 1 – Основные характеристики радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs

Нуклид	Период полураспада	Энергии, кэВ (интенсивность, %)		
		Альфа	Бета	Гамма
^{60}Co	5,271 лет	–	95,77 (99,88 %)	347,14 (0,0075 %)
			625,8 (0,12 %)	826,1 (0,0076 %)
				1173,22 (99,85 %)
				1332,49 (99,98 %)
			2128,57 (0,0012 %)	
^{137}Cs	30,17 лет	–	174,3 (94,4 %)	661,66 (85,1 %)
			416,3 (5,6 %)	

Для решения поставленной задачи к сканирующей системе предъявляются следующие минимальные требования:

минимальное энергетическое разрешение детектора (по линии 662 кэВ) 15 %
 энергетический диапазон от 0,6 до 1,5 МэВ
 максимальная мощность дозы в точке размещения 0,1 мЗв/ч
 предельная масса установки 10 кг
 минимальный шаг сканирования (угол поворота) 2°
 угол зрения по горизонтали 180°
 угол зрения по вертикали 90°

Кроме того, спектрометрический детектор должен обеспечивать минимальную анизотропию чувствительности для снижения ее влияния на результаты измерений при перемещении сканирующей головки во время сканирования.

2.1.1 Конструкция гамма-сканера с антиколлиматором

Сканер включает блок измерений и блок управления, соединяемые посредством кабельного подключения. Конструктивно блок измерений гамма-сканера с антиколлиматором представляет собой детектирующую (сканирующую) головку, размещенную на поворотно-наклонном столике, управляемую дистанционно с помощью ПК.

Сканирующая головка (рис. 29) состоит из спектрометрического детектора (поз. 4 на рис. 29) и антиколлиматора (поз. 2 на рис. 29), размещенных в едином корпусе (поз. 3 на рис. 29) в фиксированной геометрии.

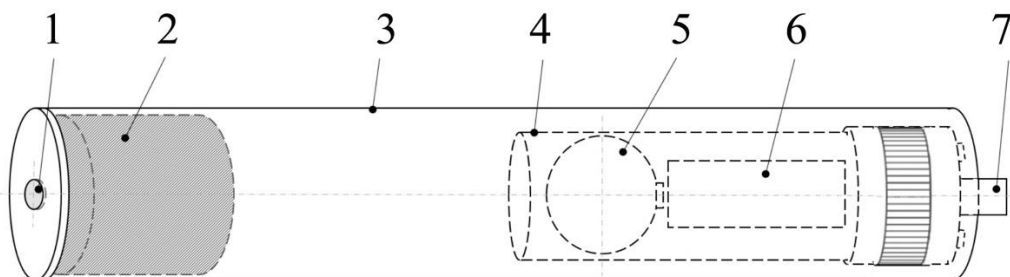


Рисунок 29 – Схема сканирующей головки гамма-сканера с антиколлиматором

На фронтальной стороне корпуса сканирующей головки соосно с центром чувствительного элемента детектора (поз. 5 на рис. 29) и антиколлиматора (поз. 2 на рис. 29) расположена видеокамера (поз. 1 на рис. 29). Спектрометрический детектор на основе сцинтиллятора йодида цезия CsI(Tl) (поз. 5 на рис. 29) с кремниевыми фотоумножителями и предусилительной электроникой (поз. 6 на рис. 29) расположен в металлическом корпусе и имеет разъем (поз. 7 на рис. 29) для подачи электропитания и вывода измерительной информации.

Поворотный механизм включает в себя два поворотных элемента, один из них по команде занимает положение, соответствующее азимутальной координате, другой – полярной. Сканирующая головка закреплена в держателе с помощью механической оснастки.

Управление функциями устройства осуществляет одноплатный компьютер с предустановленным приложением «РТСКАpp», пользовательский интерфейс которого позволяет определять границы области интереса, устанавливать параметры измерения (координаты сканирования и время экспозиции), а также контролировать процесс сканирования.

Питание осуществляется от сети переменного напряжения ~ 220 В с частотой 50 Гц.

На рис. 30 приведена общая структурная схема сканирующей системы.

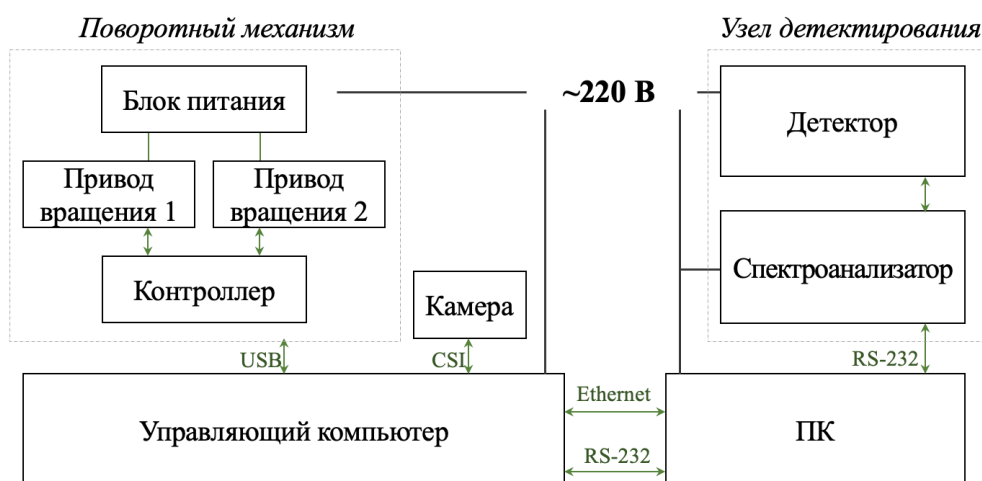


Рисунок 30 – Структурная схема гамма-сканера с антиколлиматором

2.1.2 Процесс формирования гамма-изображения

Обследование выполняется в несколько этапов. На рис. 31 приведена структурная схема процесса выполнения обследования. При подготовке к обследованию выполняются процедуры по настройке и калибровке применяемого оборудования, проводятся предварительные измерения, которые необходимы для оценки радиационной обстановки в точке размещения гамма-сканера с антиколлиматором, предположительной области сканирования и времени экспозиции.

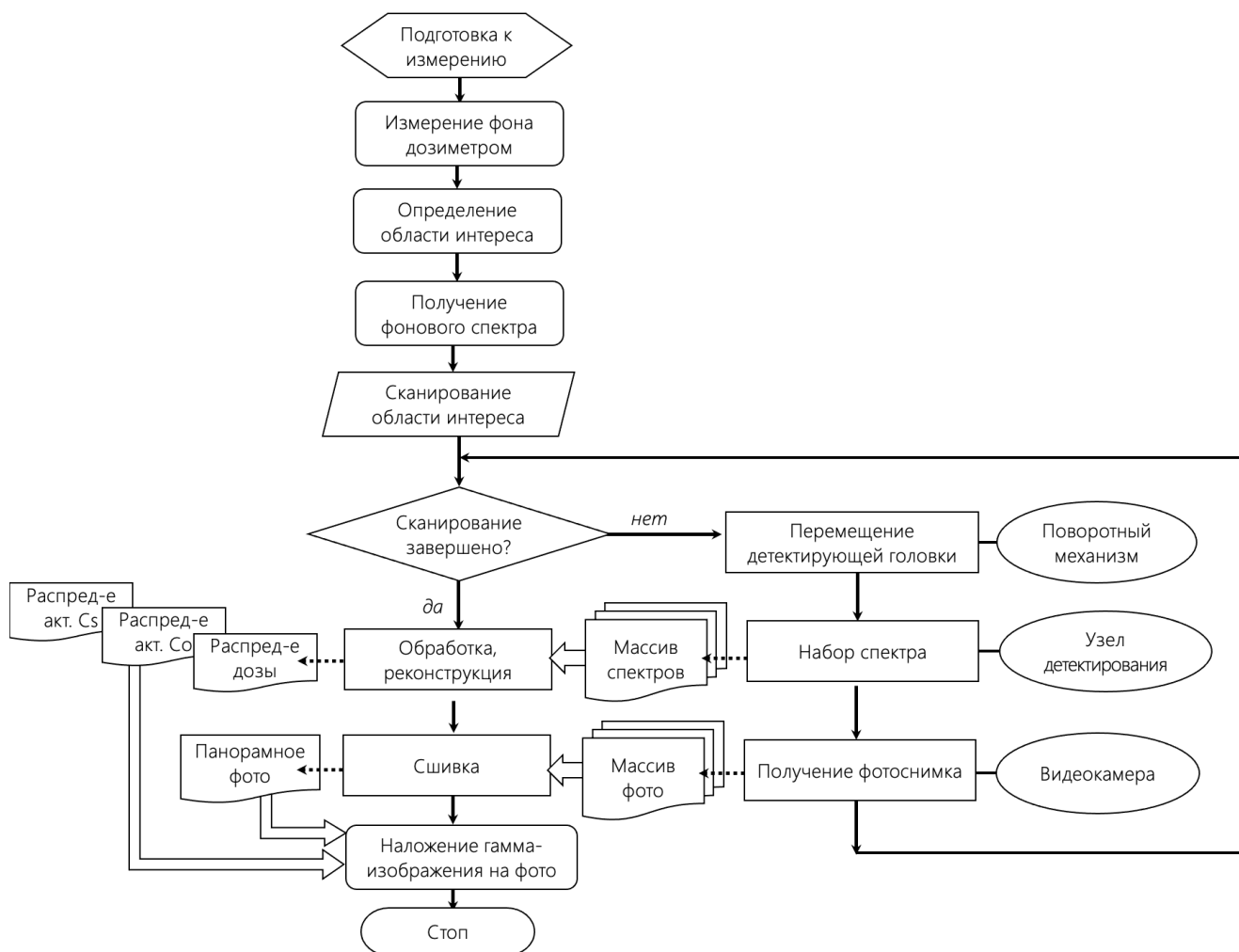


Рисунок 31 – Структурное представление процесса обследования радиационно-загрязненного объекта

Границы области интереса задаются двумя крайними положениями. Координаты этих точек определяются с помощью интерфейса программы «РТСКАpp» по показаниям лазерного указателя на местности или по фотоснимку

в окне программы. Шаг сканирования и время экспозиции определяются пользователем из условия оптимального соотношения времени, доступного для проведения обследования, и величины области интереса.

Фоновое измерение проводится для дальнейшей обработки результатов измерений и представляет собой аппаратный спектр от всех источников в помещении. Измерение выполняется в вертикальном положении сканирующей головки, когда антиколлиматор направлен вниз.

Сканирование выполняется по заданному алгоритму сканирования на основании введенных пользователем данных. В процессе сканирования формируется массив спектров и фотоснимков, получаемых в каждой точке сканирования.

Массив фотоснимков сшивается в панорамное изображение с помощью программных средств.

Массив спектров обрабатывается с учетом фонового измерения. В зависимости от поставленной задачи в результате обработки формируется дозовая карта или карта распределения активности.

Итоговое гамма-изображение накладывается на панорамный снимок объекта.

2.2 Разработка спектрометрического детектора

2.2.1 Обзор материалов детекторов

На сегодняшний день существует широкий выбор чувствительных элементов для регистрации ионизирующих излучений. Основными материалами для создания детекторов гамма-излучения являются сцинтилляторы, полупроводниковые и газонаполненные детекторы. Анализ рассмотренных в разделе Глава 1 устройств показывает, что для создания приборов для гамма-визуализации наиболее часто применяются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы.

При выборе материала детектора для гамма-сканера с антиколлиматором критериями отбора выступали в первую очередь такие характеристики как энергетическое разрешение, эффективность регистрации и анизотропия чувствительности.

Газонаполненные счетчики

Принцип действия основан на взаимодействии излучения с телом детектора, в результате ионизации, под действием приложенного напряжения, заряженные частицы создают ионизационный ток. Газонаполненные счетчики не требуют низких температур при эксплуатации, сравнительно недороги, а также устойчивы в широком температурном диапазоне и при воздействии вибрации. Однако, в силу низкой плотности газа (вещества детектора), теряемая частицей в объеме детектора энергия мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные излучения, таким образом газонаполненные счетчики подходят для регистрации в первую очередь мягкого гамма и рентгеновского излучений. Кроме того, необходимая для рождения электрон-ионной пары энергия довольно велика (30-40 эВ), вследствие чего увеличиваются относительные флуктуации числа зарядов и снижается энергетическое разрешение. В числе других недостатков следует отметить ограничение по загрузкам и искажение спектра при больших загрузках.

Полупроводниковые детекторы

Ряд преимуществ в сравнении с газонаполненными счетчиками имеют полупроводниковые детекторы. Большой популярностью пользуются детекторы на основе особо-чистого германия (ОЧГ) [86, 87], кремния [68], арсенида галлия GaAs, теллурида кадмия CdTe [65, 68] и теллурида цинка-кадмия CdZnTe [71]. В таблице 2 [88] приведены сравнительные характеристики некоторых полупроводниковых материалов.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики основных полупроводниковых материалов

Материал	Ge	Si	GaAs	CZT
Атомный номер Z	32	14	31,33	52
Плотность, г/см ³	5,33	2,33	5,32	5,78
Ширина запрещенной зоны, E _g , эВ	0,67	1,12	1,43	1,57
Энергия образования пары носителей, W, эВ	2,96	3,62	4,2	4,6

В полупроводниковом детекторе определенным образом формируется обедненная область, в которой нет свободных носителей заряда. Попадая в эту

область, заряженная частица способна вызвать ионизацию, в результате чего появляются свободные носители заряда – дырки в валентной зоне и электроны в зоне проводимости, которые под действием напряжения формируют импульс тока.

Детекторы на основе германия обладают наилучшим энергетическим разрешением, однако требуют криогенных температур при эксплуатации, а в некоторых случаях и при хранении. Например, для охлаждения устройства визуализации GeGI [86] до рабочих температур требуется порядка 5 ч.

Литий-дрейфовые кремниевые Si(Li) детекторы подходят для бета-, гамма- и рентгеновской спектроскопии в области низких энергий, могут работать при комнатной температуре, однако их характеристики значительно улучшаются, если их предварительно охладить жидким азотом.

Кремниевые ионно-имплантированные детекторы представляют собой обратно-смещенные диоды из монокристаллического кремния, изготовленные по технологии ионной имплантации. Низкая энергия образования электронно-дырочной пары и незначительная рекомбинация носителей в процессе сбора заряда обеспечивают высокое энергетическое разрешение, а высокая подвижность неравновесных носителей позволяет обеспечить временное разрешение $10^{-8} \div 10^{-9}$ с [89].

Теллурид кадмия достаточно давно зарекомендовал себя в качестве материала для регистрации излучений, однако долгое время технологии выращивания кристаллов оставались на довольно низком уровне – длительное время выращивания, наличие примесных элементов и высокая стоимость оставляли данный материал позади таких конкурентов, как германий и кремний. Современные детекторы на основе CdZnTe отличаются высокой эффективностью регистрации и обладают хорошим соотношением сигнала к шуму, а энергетическое разрешение сопоставимо с характеристиками ОЧГ детекторов.

В 1995 году была показана возможность применения полупроводникового материала CdZnTe при комнатной температуре с энергетическим разрешением 2 % при 662 кэВ, но с более низкой эффективностью регистрации [90]. В [74] сообщается о возможности регистрации гамма-излучения с энергией от 30 кэВ до

3 МэВ с энергетическим разрешением менее 1% (ПШПВ) для энергии 662 кэВ, что сопоставимо с энергетическим разрешением ОЧГ-детекторов. Высокая радиационная стойкость и линейность счетной характеристики как в счетном, так и в токовом режимах работы в широком диапазоне измерений мощности дозы CdZnTe [91] делают его привлекательным материалом для создания детекторов ионизирующих излучений.

Перспективными являются детекторы на основе кристалла алмаза. Они имеют высокий радиационный ресурс и сохраняют работоспособность при критических температурах. Кроме того, интерес к применению алмаза в качестве детектора ионизирующих излучений обусловлен его уникальными характеристиками: тканеэквивалентность, низкий темновой ток, высокое быстродействие, широкий диапазон спектральной чувствительности, доступность, низкая стоимость и относительно большая чувствительная область. В работе [92] рассмотрены характеристики детекторов на алмазах различного происхождения: природного, выращенного методом температурного градиента, а также полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Испытания в импульсном и токовом режимах работы алмазного детектора показали сохранение линейности измерительной характеристики в широком диапазоне мощностей доз от $1,0 \cdot 10^{-1}$ до $1,0 \cdot 10^5$ Гр/ч.

Сцинтилляторы

Наиболее перспективными для решения поставленной задачи являются сцинтилляторы.

Среди рассмотренных в разделе Глава 1 устройств визуализации гамма-излучения наиболее часто встречаются приборы на основе таких сцинтилляторов, как NaI [58, 10], NaI(Tl) [11, 82], LaBr₃ [60] и CsI(Tl) [41, 7, 43, 55].

В таблице 3 [48, 93] приведены сравнительные характеристики некоторых неорганических сцинтилляционных материалов: NaI(Tl), CsI(Tl), LaBr₃(Ce), CeBr₃ и BGO.

Таблица 3 – Сравнительные характеристики основных сцинтилляционных материалов

Материал	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	LaBr ₃ (Ce)	CeBr ₃
Плотность, г/см ³	3,67	4,51	7,13	5,08	5,23
Гигроскопичность	да	слабая	нет	да	да
Время высвечивания, нс	250	1 000	300	16	20
Отн. световыход, % от NaI(Tl)	100	45	20	165	130
Энергетическое разрешение* (662 кэВ), %	6-7	5-8	10,1-11	2,7-3,2	4
Длина волны макс. испускания, нм	415	550	480	380	380
* Лучшее значение энергетического разрешения из приведенных в [48, 93].					

Для изготовления сцинтилляторов применяются люминофоры, испускающие видимый свет при изменении орбитальным электроном энергетического уровня. Ионизирующее излучение может передать электронам энергию, достаточную для перемещения на более высокую электронную оболочку. В люминофоре электроны не могут оставаться на высокоэнергетических уровнях длительное время. Они переходят в основное состояние, испуская фотоны видимого света. В эффективном сцинтилляторе спектр излучения должен быть сдвинут относительно спектра поглощения в длинноволновую область.

Запатентованный в 1948 г, монокристаллический йодистый натрий, активированный таллием NaI(Tl) [94], продемонстрировал возможность применения в комбинации с фотоумножителем для использования в качестве детектора гамма-излучения [95] и до сих пор широко используется для регистрации ионизирующих излучений. Данный материал хорошо изучен, его характеристики хорошо известны и прогнозируемы. Основным преимуществом данного сцинтиллятора является высокий световыход [96]. Кроме того, неплохое энергетическое разрешение, отсутствие собственного фона и низкая стоимость делают его весьма привлекательным материалом для создания приборов для регистрации ионизирующих излучений. Однако кристаллы NaI(Tl) обладают высокой гигроскопичностью и чувствительны к температуре, что накладывает ряд ограничений на область возможных применений.

Другой популярный сцинтилляционный материал – монокристаллический йодид цезия, активированный таллием CsI(Tl), обладает высокой эффективностью

регистрации и очень низкой гигроскопичностью. Благодаря своей пластичности, кристаллы CsI(Tl) хорошо подвергаются механической обработке, что позволяет придавать им оптимальную для решения каждой конкретной задачи форму [97]. Кристаллы обладают высокой прочностью и радиационной стойкостью. В таблице 3 приведен относительный световой выход для CsI(Tl) с бищелочным ФЭУ (максимум спектральной чувствительности приходится на интервал от 350 до 450 нм.), однако большая часть излучения сцинтиллятора приходится на длиноволновую область (от 500 до 600 нм.), в связи с чем применение альтернативных фотоприемников позволяет добиться значительно лучшего значения светосбора. Согласно [98], сцинтиллятор CsI(Tl) обеспечивает значение светового выхода порядка 60 000 фот./МэВ при комнатной температуре. К недостаткам данного материала можно отнести сравнительно большое время высвечивания.

Широко применяется ортогерманат висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) [99], обладающий большим атомным числом, что делает его высокоэффективным поглотителем гамма-излучения. При одинаковом объеме кристаллов эффективность регистрации BGO значительно выше, чем для NaI(Tl) или CsI(Tl). Из недостатков стоит отметить наличие собственного фона, а также зависимость его свойств от температуры. Достоинствами сцинтиллятора BGO являются его хорошие механические свойства при обработке, низкая стоимость, отсутствие гигроскопичности и относительное быстрое действие.

Одним из наиболее перспективных считается сцинтиллятор на основе бромида лантана, активированного церием $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, запатентованный SaintGobain [100]. Монокристаллы сцинтиллятора имеют высокий световыход и короткое время высвечивания, что делает их подходящими для использования в современных спектрометрах. Высокое энергетическое разрешение кристаллов на основе галогенидов лантана позволяет использовать его при создании гамма-спектрометрической аппаратуры нового поколения. Основным недостатком является собственный фон от ^{138}La , что может вызвать значительные затруднения при измерении низких активностей. Впрочем, фоновый пик ^{138}La можно

использовать в качестве встроенного эталона для стабилизации коэффициента усиления. Согласно [101], допирование кристаллов позволяет улучшить их характеристики.

Монокристаллы бромида церия CeBr_3 [102] являются серьезным конкурентом бромида лантана. На рис. 32 приведены сравнительные спектры радионуклида ^{137}Cs , полученные с помощью спектрометрических детекторов с кристаллами размером 5×5 см на основе CeBr_3 , $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$. В работе [103] приведены результаты измерений собственного фона сцинтилляционных кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и CeBr_3 , выращенных в Институте твердого тела РАН. Спектр внутреннего фона кристалла CeBr_3 при энергиях св. 200 кэВ намного меньше в сравнении с фоном $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Среди преимуществ кристаллов CeBr_3 следует отметить низкий собственный фон, высокое энергетическое разрешение, высокий световыход, а также быстроедействие. Однако кристаллы CeBr_3 гигроскопичны.

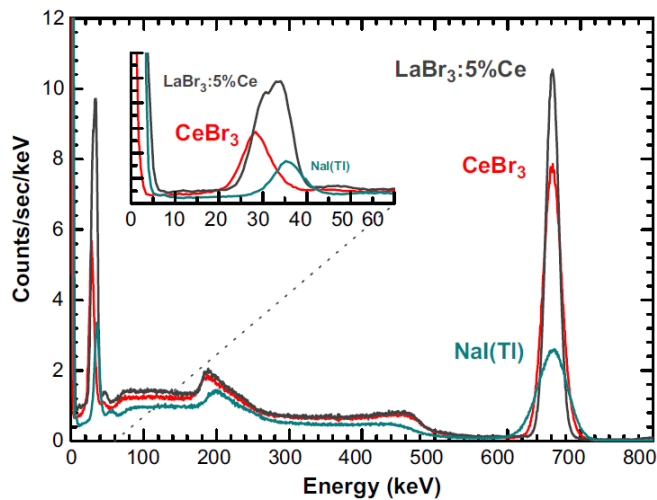


Рисунок 32 – Сравнение аппаратурных спектров ^{137}Cs , полученных с помощью детекторов на основе сцинтилляторов $\text{NaI}(\text{Tl})$ (голубой), CeBr_3 (красный) и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (серый) [104]

Несмотря на появление новых перспективных материалов детекторов, базовые сцинтилляторы $\text{NaI}(\text{Tl})$ и $\text{CsI}(\text{Tl})$ широко используются для решения прикладных задач ядерного приборостроения, поскольку их характеристики хорошо изучены, а свойства предсказуемы. Большинство рассмотренных материалов обладают достаточным энергетическим разрешением и диапазоном регистрируемых энергий. Однако одним из основных требований к

разрабатываемому детектору является минимальная анизотропия чувствительности, добиться которой можно сферической формой вещества детектора, поэтому оптимальным выбором будет негигроскопичный сцинтиллятор. Из рассмотренных вариантов таким свойством обладают BGO и CsI(Tl). BGO обладает худшим энергетическим разрешением, температурной нестабильностью и больше подходит для регистрации фотонов высоких энергий.

Фотоэлектронные умножители

Для получения сигнала со сцинтиллятора необходимо преобразовать свет, испускаемый телом детектора в электрический импульс. На сегодняшний день существует множество вариантов фотоэлектронных умножителей: система диодов, микроканальные, твердотельные, гибридные. Для снижения световых потерь спектр испускания сцинтиллятора и диапазон спектральной чувствительности применяемого фотоприемника должны быть оптимально согласованы. Спектр высвечивания сцинтиллятора, несогласованный с чувствительностью фотоприёмника, негативно сказывается на эффективности светосбора, а следовательно, на энергетическом разрешении.

Большая часть излучения сцинтиллятора CsI(Tl) приходится на длинноволновую часть спектра (> 500 нм), следовательно для него подходят мультищелочной фотокатод ФЭУ, гибридные или твердотельные фотоприемники.

Хорошо себя зарекомендовали твердотельные кремниевые фотоумножители (SiPM). В [105] описан кремниевый фотоэлектронный умножитель, представляющий собой фотоприемник на основе матрицы пикселей p-n-переходов с приложенным обратным напряжением смещения, превышающим напряжение пробоя. Матрица таких пикселей, каждый из которых работает в режиме Гейгера, выполняется на общей подложке. Попадая в активную область пикселя, квант света создает электрон, вызывающий гейгеровский разряд. На выход фотоумножителя поступает сумма всех зарядов, собранных с каждого пикселя. В работах [106, 107] показаны результаты исследования характеристик сцинтилляционных детекторов на основе монокристалла CsI(Tl) с кремниевым фотоэлектронным умножителем. В [108] показано, что энергетическое разрешение CsI(Tl)-фотодиодного детектора

объемом в несколько кубических сантиметров составляет порядка 5% (ПШПВ) для энергии 662 кэВ.

При создании спектрометрического детектора для гамма-сканера с антиколлиматором для получения сигнала от сцинтиллятора CsI(Tl) были выбраны кремниевые твердотельные фотоумножители. Спектр высвечивания сцинтиллятора CsI(Tl) хорошо согласуется со спектром поглощения кремниевых фотоумножителей СРТА 149-35 (рис. 33).

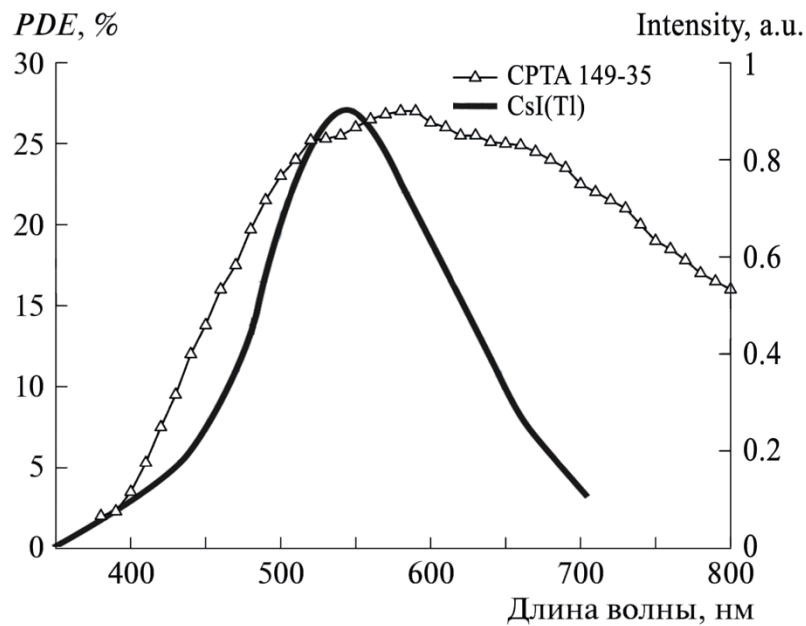


Рисунок 33 – Спектр высвечивания сцинтиллятора CsI(Tl) (шкала *Intensity*) [48] и спектр поглощения фотоумножителя СРТА 149-35 (шкала *PDE*) [109]

В качестве альтернативы для проведения работ на объектах с высокоактивными загрязнениями возможно применение алмазного детектора, обладающего тканеэквивалентностью и меньшей чувствительностью. Для регистрации гамма-излучения в низкоэнергетической области спектра будет эффективно применение ортогерманата висмута.

2.2.2 Геометрия детектора

Для регистрации излучения в системе гамма-сканера с антиколлиматором был изготовлен спектрометрический детектор [24, 25] на основе сцинтиллятора CsI(Tl) с кремниевыми твердотельными фотоумножителями СРТА-149-35 [110 – 112], с размером чувствительной области 3×3 мм каждый.

Чувствительный элемент детектора выполнен в форме шара (рис. 34) для снижения анизотропии чувствительности детектора при повороте сканирующей головки. Кроме того, сферическая форма кристалла сцинтиллятора позволяет использовать относительно небольшой фотоприемник, в то же время обеспечивая хорошую эффективность светосбора, что позволяет установить оптимальное соотношение между эффективностью регистрации и уровнем шумов электроники [113].

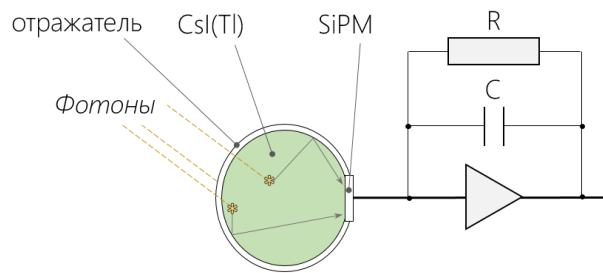


Рисунок 34 – Схематическое изображение сборки кристалла сцинтиллятора и фотоприемника

Объем сцинтиллятора определялся из расчета оптимальной загрузки детектора в обследуемых помещениях с мощностью дозы порядка 0,1 мЗв/ч и составил 6 см³.

Соединение сцинтиллятора с твердотельным фотоумножителем обеспечивалось с помощью оптического клея. Для повышения светосбора чувствительный элемент детектора со всех сторон был окружен светоотражателем из фторопластового порошка.

Фото чувствительного элемента детектора на основе кристалла сцинтиллятора CsI(Tl) в форме шара приведено на рис. 35а, – на кристалле, расположенном справа, прикреплен фотоумножитель СРТА-149-35, внешний вид которого отдельно представлен на рис. 35б.

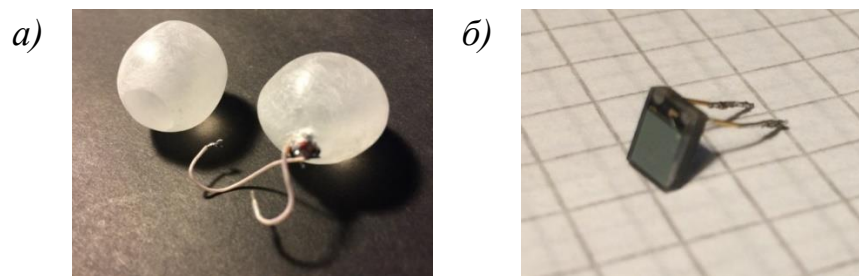


Рисунок 35 – Фото применяемого кристалла детектора (а) и фотоприемника (б)

2.2.3 Характеристики детектора

Общие геометрические размеры детектора составили $\text{Ø}40 \times 135$ мм (рис. 36), а масса не превысила 200 г. Это позволяет создать максимально легкое и мобильное сканирующее устройство.

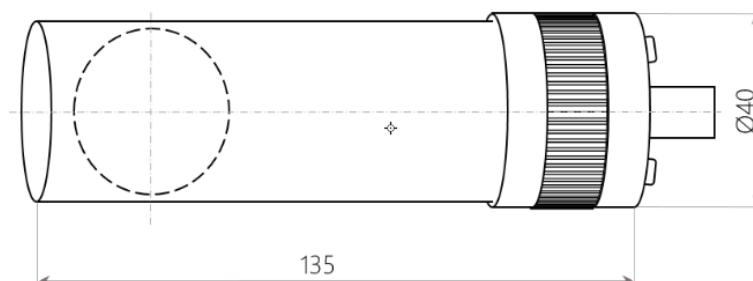


Рисунок 36 – Схематический чертеж применяемого спектрометрического детектора

Одной из важнейших характеристик спектрометрического детектора является энергетическое разрешение. При использовании одного фотоприемника энергетическое разрешение по линии 662 кэВ составило 18 %, что является недостаточным для решения поставленной задачи.

Поскольку энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора в значительной степени зависит от эффективности светосбора, при создании детектора были применены дополнительные фотоприемники. В ходе работ была проведена оценка зависимости разрешающей способности узла детектирования от количества применяемых твердотельных кремниевых фотоумножителей.

На рис. 37 приведены аппаратурные спектры радионуклидов ^{137}Cs (серый) и ^{60}Co (бесцветный), полученные с применением различного числа фотоприемников. Показано, как меняется аппаратурный спектр в зависимости от количества применяемых фотоприемников.

При применении одного фотоприемника энергетическое разрешение составляет 18 % (рис. 37а), для двух – 15,5% (рис. 37б), для трех – 13,2 % (рис. 37в), использование четырех кремниевых фотоумножителей позволило достичь значения энергетического разрешения 12,1 % по линии 662 кэВ (рис. 37г).

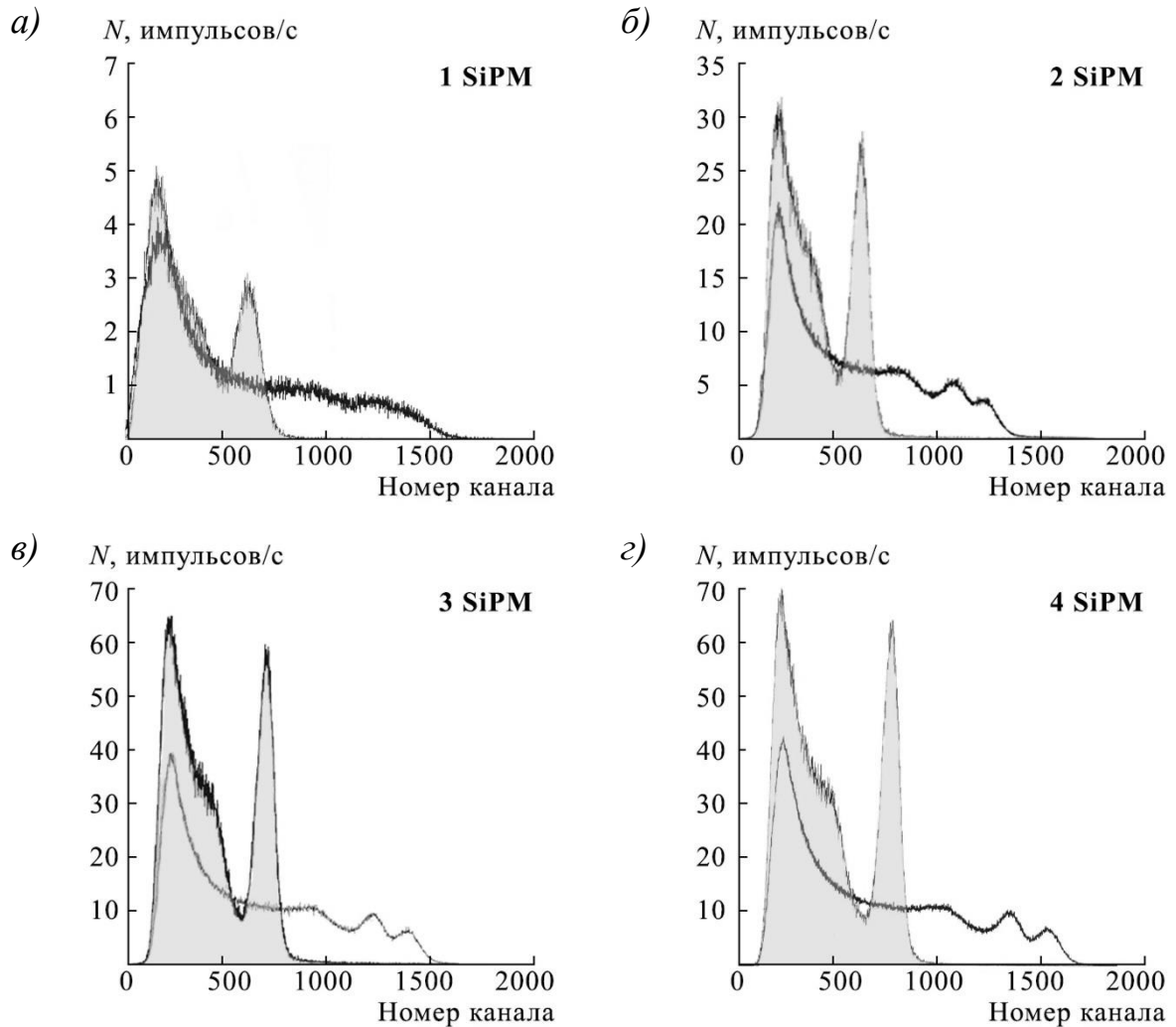


Рисунок 37 – Аппаратурные спектры радионуклидов ^{137}Cs (серый спектр) и ^{60}Co (бесцветный спектр), полученные на одном кристалле сцинтиллятора CsI(Tl) с применением различного количества фотоприемников: 1 шт. (а), 2 шт. (б), 3 шт. (в), 4 шт. (г)

Поскольку разрабатываемое устройство предназначено для обследования радиационно-загрязненных помещений, где основными долгоживущими радионуклидами являются ^{60}Co и ^{137}Cs , энергетического разрешения 12,1 % по энергии 662 кэВ (^{137}Cs) в вполне достаточно для реализации системы.

Для сцинтилляционных детекторов важно иметь представления о диапазоне регистрируемых энергий, в особенности о его нижней границе. На рис. 38 приведены спектры радионуклидов ^{241}Am (рис. 38а), ^{137}Cs (рис. 38б) и ^{60}Co (рис. 38в), полученные с помощью описанного выше спектрометрического детектора.

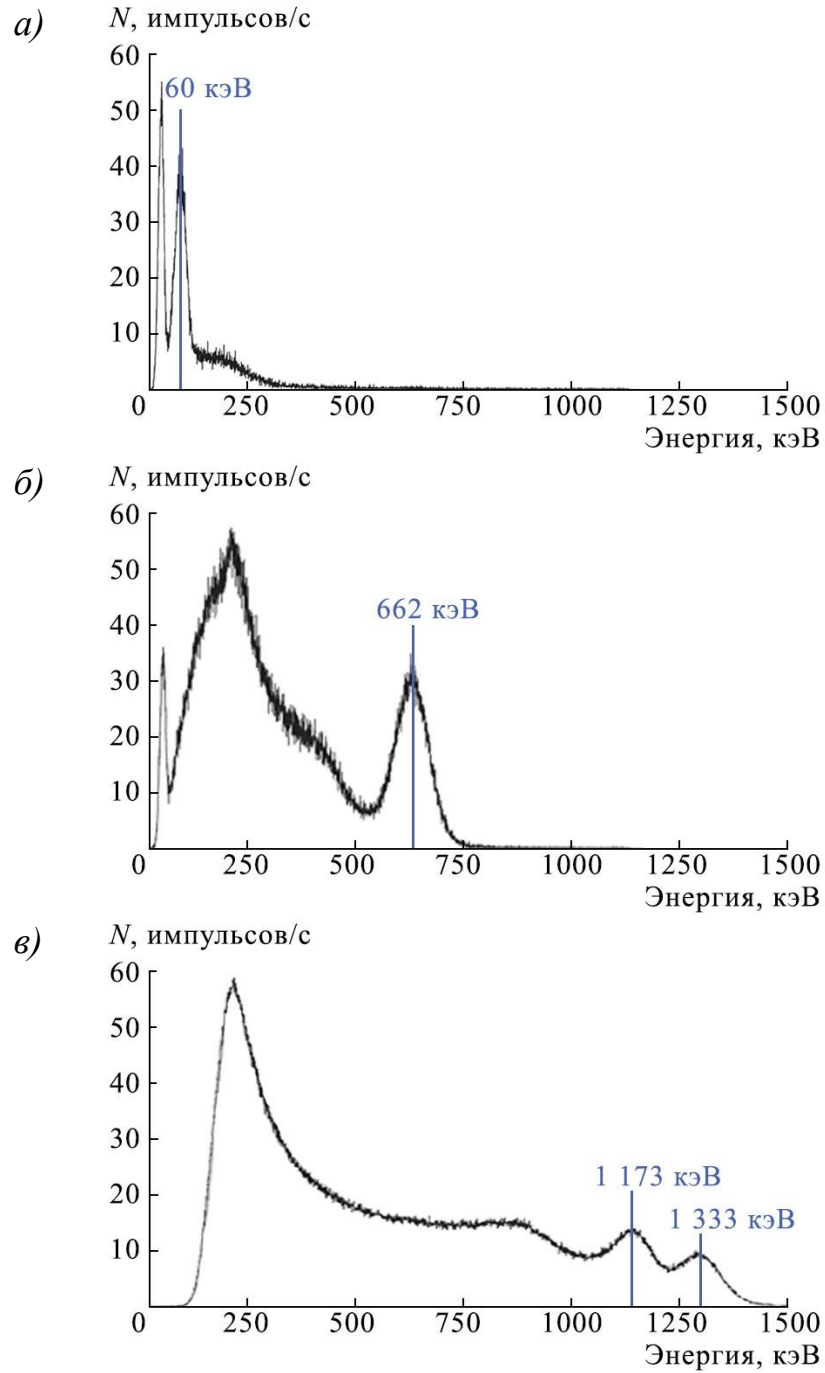


Рисунок 38 – Энергетические спектры радионуклидов ^{241}Am (а), ^{137}Cs (б) и ^{60}Co (в), полученные детектором, применяемым в гамма-сканере с антиколлиматором

Таким образом, разработанный детектор позволяет регистрировать гамма-излучение в диапазоне энергий от 50 кэВ до 1,5 МэВ.

Эффективность взаимодействия пучка гама-квантов с кристаллом детектора определяется как число провзаимодействовавших гамма-квантов к числу гамма-квантов, попавших в объем детектора, и оценивается по формуле:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - e^{-\mu R} \quad (2)$$

где N – число провзаимодействовавших квантов;

N_0 – число падающих квантов;

μ – линейный коэффициент ослабления (для 662 кэВ $\mu = 0,34$);

R – радиус детектора.

Для энергии 662 кэВ и радиуса кристалла сцинтиллятора $R=1,1$ см эффективность взаимодействия составит 32 %.

2.3 Моделирование и оптимизация геометрических параметров

2.3.1 Метод Монте-Карло

Статистическое моделирование (метод Монте-Карло) – важнейший метод, который используется для расчетов радиационных полей в прикладных задачах физики ядерных реакторов, защиты от излучений, дефектоскопии, радиобиологии и других науках.

Под численным статистическим моделированием понимается реализация вероятностной модели объекта с целью получения оценки изучаемых интегральных характеристик этого объекта на основе закона больших чисел.

В самом общем виде схему метода Монте-Карло можно представить следующим образом. Пусть нам требуется вычислить некую величину I . Предполагается, что можно построить некую случайную величину ξ с математическим ожиданием $E\xi$, равным I , и конечной дисперсией $D\xi$, причем выборочные значения ξ_i величины ξ возможно реализовать программно. Построив большое количество n выборочных значений $\xi_1 \dots \xi_n$, на основе закона больших чисел получим $I = E\xi = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i}{n}$.

С помощью метода Монте-Карло находят решение задач, рассматривая поведение отдельных частиц. История частицы прослеживается с момента испускания ее источником до исчезновения в результате поглощения или выхода

из рассматриваемого объема. Траектория движения каждой частицы разбивается на ряд участков, суммарно составляющих её полный пробег. В любой заданный момент времени моделируется взаимодействие частицы со средой, а тип этого взаимодействия выбирается случайно из набора возможных реакций с определенным весовым коэффициентом. Вероятности взаимодействия определяются сечениями соответствующих реакций в материалах, входящих в состав среды, в которой движется частица. Отклик измерительной системы определяется из объема накопленной информации о большом числе историй отдельных частиц.

Таким образом моделируются процессы, происходящие в измерительной системе, рассчитывается её отклик.

Возможности метода Монте-Карло ограничиваются надежностью применяемых допущений и точностью описания системы.

2.3.2 Параметры оптимизации

При разработке гамма-сканера с антиколлиматором с помощью компьютерного моделирования проводилась оптимизация геометрически значимых параметров системы сканирования: формы антиколлиматора, диаметра антиколлиматора, расстояния между центром чувствительного элемента детектора и антиколлиматором.

В качестве материала антиколлиматора рассматривались свинец ($Z = 82$, плотность $11,3 \text{ г/см}^3$) и вольфрам ($Z = 74$, плотность $19,3 \text{ г/см}^3$), поскольку они обладают наилучшей поглощающей способностью. Экранирующие свойства свинца несколько уступают вольфраму: длина свободного пробега гамма-квантов с энергией $1,5 \text{ МэВ}$ составляет $1,05 \text{ см}$ для вольфрама и $1,73 \text{ см}$ для свинца [44], однако вольфрам – дорогой, тугоплавкий материал, сложно поддающийся механической обработке, поэтому для создания прототипа гамма-сканера с антиколлиматором был выбран свинец.

Для оптимизации геометрически значимых параметров системы [26] сканирования была создана математическая модель спектрометрического

детектора с антиколлиматором из свинца с переменными геометрическими параметрами (рис. 39).

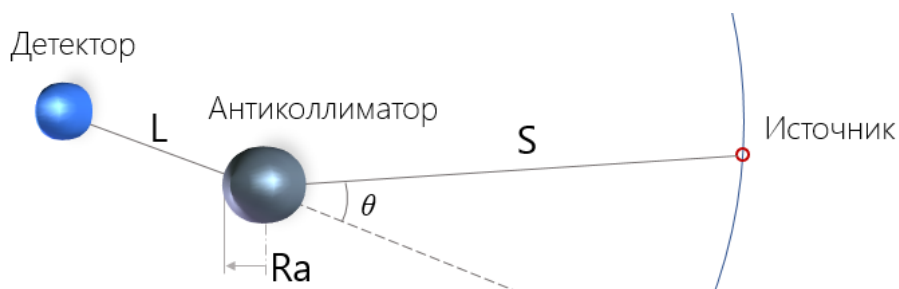


Рисунок 39 – Схема моделируемой системы гамма-сканера с антиколлиматором

Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло для детектора на основе кристалла сцинтиллятора CsI(Tl) в форме шара объемом 6 см^3 .

В процессе моделирования рассчитывалась аппаратная функция сканирующей системы с антиколлиматором для ряда различных геометрических комбинаций детектор—антиколлиматор. Методом Монте-Карло разыгрывалось распределение излучения от точечного источника ^{137}Cs с активностью $1 \cdot 10^6$ Бк, размещенного на расстоянии 5 м от центра детектора в центре области сканирования.

На первом этапе моделировались показания детектора без антиколлиматора. На втором этапе, по данным расчетов аппаратной функции и модели источника, в заданной геометрии рассчитывалась функция отклика детектора в каждой точке сканирования в области $90^\circ \times 90^\circ$ с шагом сканирования 5° по каждой оси. На основании полученных расчетов формировалось изображение результатов измерений сканера с антиколлиматором (рис. 40а). Затем, поскольку в результате сканирования с применением антиколлиматора изображение инвертировано, из полученного изображения вычитались показания детектора без антиколлиматора, после чего изображение обрабатывалось итерационным методом для получения восстановленного изображения (рис. 40б).

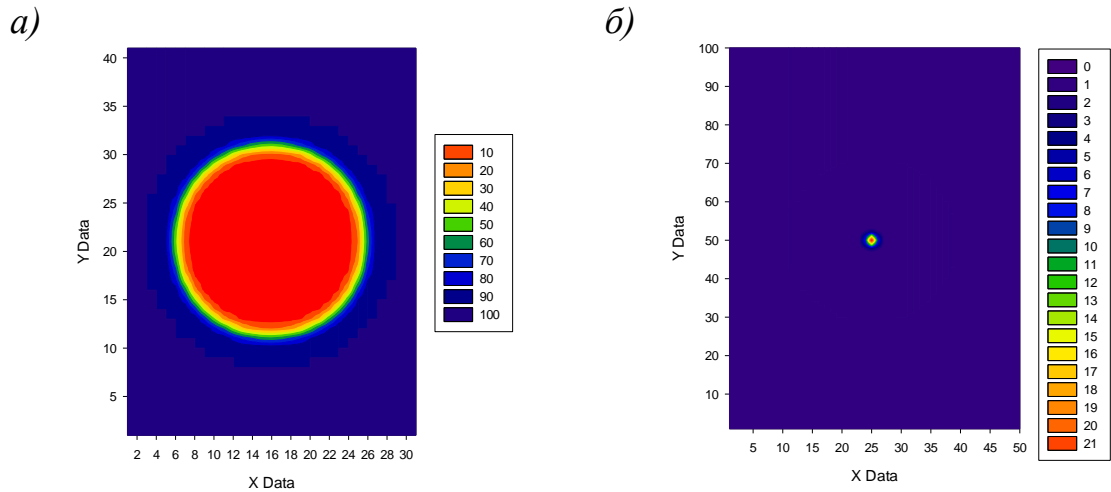


Рисунок 40 – Пример результата моделирования (а) теневого изображения и его восстановления (б) для точечного источника

Для оптимизации было многократно выполнено моделирование сканирующей системы со свинцовым антиколлиматором в форме цилиндра или шара, с различными радиусами (от 1 до 3 см), удаленным на различные расстояния (от 10 до 20 см) от центра чувствительного элемента детектора. Высота цилиндрического антиколлиматора была выбрана равной 4 см из соображений оптимальной поглощающей способности свинца для гамма-излучения с энергиями до 1,5 МэВ [44].

Критериями оптимизации были выбраны частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), величина отношения сигнала к шуму (ОСШ), а также форма аппаратной функции.

2.3.3 Частотно-контрастная характеристика

Основным критерием для оптимизации была выбрана ЧКХ, или функция передачи модуляций (Modulation Transfer Function, MTF). ЧКХ является широко известным параметром, характеризующим разрешение системы формирования изображения, и одним из наиболее важных критериев для работы с изображениями в научном сообществе [114]. Кроме того, ЧКХ – эффективный инструмент для анализа и проектирования систем визуализации и их компонентов, а построение графика ЧКХ дает представление о зависимости отклика системы или её компонента от различных пространственных частот. На рис. 41 показана суть формирования графика ЧКХ.

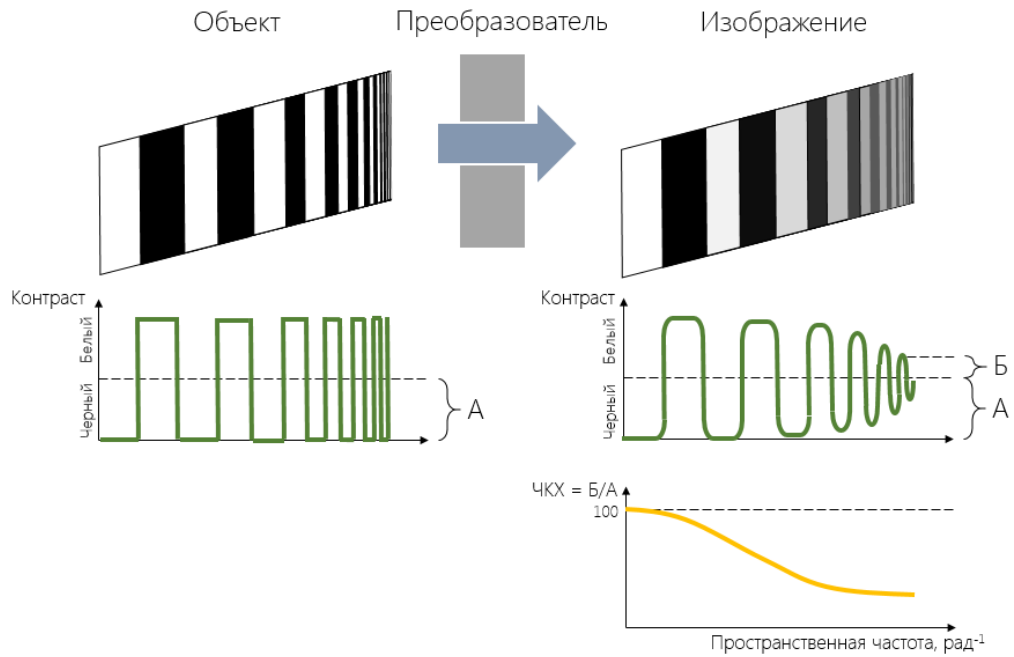


Рисунок 41 – Графическое представление частотно-контрастной характеристики

ЧКХ характеризует систему формирования изображения как преобразователь, при прохождении через который амплитуда компонентов пространственно-частотного спектра объекта уменьшается в различной степени в зависимости от их пространственной частоты ν [115].

На рис. 42 приведены полученные по результатам компьютерного моделирования примеры графиков ЧКХ для детектирующих систем со сферическими антиколлиматорами различных диаметров, расположенных на расстоянии 20 см от центра детектора. По вертикальной оси откладывается значение ЧКХ в относительных единицах $M(\nu)$, % – единица соответствует максимальному контрасту, ноль означает отсутствие контраста. По горизонтальной оси откладывается пространственная частота ν , рад⁻¹.

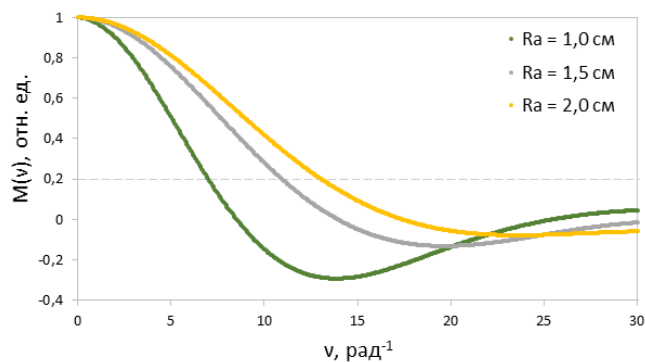


Рисунок 42 – Пример рассчитанной частотно-контрастной характеристики

Для анализа полученных результатов сравнивались значения частоты ν , при которых значение функции $M(\nu)$ составляло 20 % (на рис. 42 отмечено горизонтальной пунктирной линией). Данный параметр можно интерпретировать как расстояние между двумя источниками гамма-излучения, при котором контраст составит 20 %. Чем выше это значение, тем более близко расположенные источники могут быть разрешены как отдельные. Это позволило оценить, при каком радиусе антиколлиматора система визуализации будет обладать наилучшим разрешением.

На рис. 43 приведены полученные по результатам моделирования графики зависимости величины $\nu(M=0,2)$, рад⁻¹ от радиуса антиколлиматора, R_a , см, для трех значений расстояния между антиколлиматором и центром детектора.

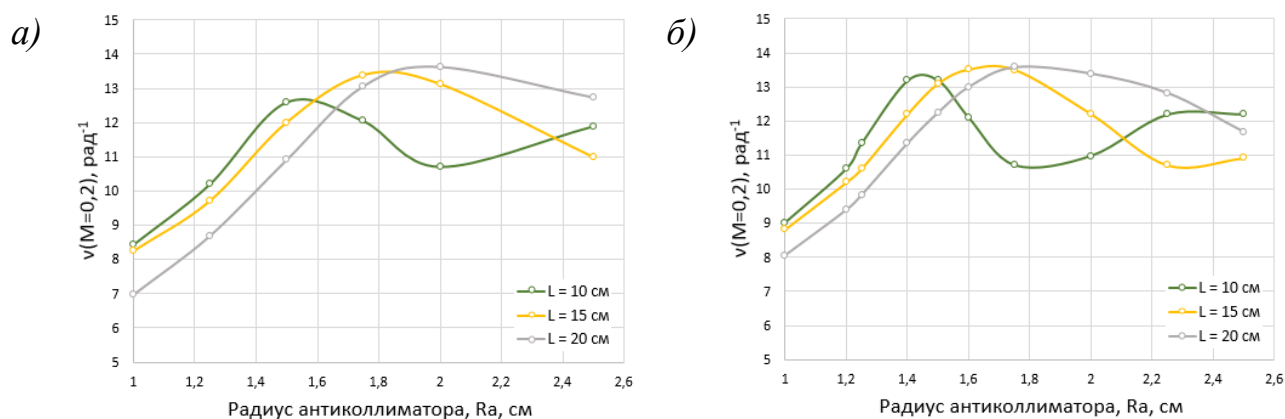


Рисунок 43 – Графики зависимости функции $\nu(M=0,2)$ от радиуса в форме шара (а) и в форме цилиндра (б), полученные по результатам моделирования

Как видно из рис. 43, зависимость функции $\nu(M=0,2)$ от радиуса антиколлиматора имеет сложный характер и достигает максимума в точках $R_a=1,5$ см при $L=10$ см, $R_a=1,8$ см при $L=15$ см и $R_a=2,0$ см при $L=20$ см для антиколлиматора в форме шара; а также в точках $R_a=1,4$ см при $L=10$ см, $R_a=1,6$ см при $L=15$ см и $R_a=1,8$ см при $L=20$ см для антиколлиматора в форме цилиндра.

Во всех перечисленных случаях, кроме условий шара с $R_a=1,5$ см и $L=10$ см, значение максимума функции $\nu(M=0,2)$ составило примерно $13,5$ рад⁻¹, следовательно, их можно рассматривать как равнозначные.

2.3.4 Оценка отношения сигнал/шум

Поскольку полученных данных недостаточно для определения оптимальных геометрических параметров системы, в качестве дополнительного критерия было предложено оценить ОСШ. Это безразмерная величина, численно равная отношению интеграла скорости счета импульсов, обусловленных регистрацией излучения, к статистическому шуму зарегистрированных гамма-квантов. Очевидно, что для повышения качества визуализации, ОСШ должно быть по возможности высоким.

На рис. 44 приведены графики зависимости ОСШ, отн. ед. от радиуса антиколлиматора R_a , см для трех значений расстояний между антиколлиматором и центром детектора, полученные по результатам моделирования.

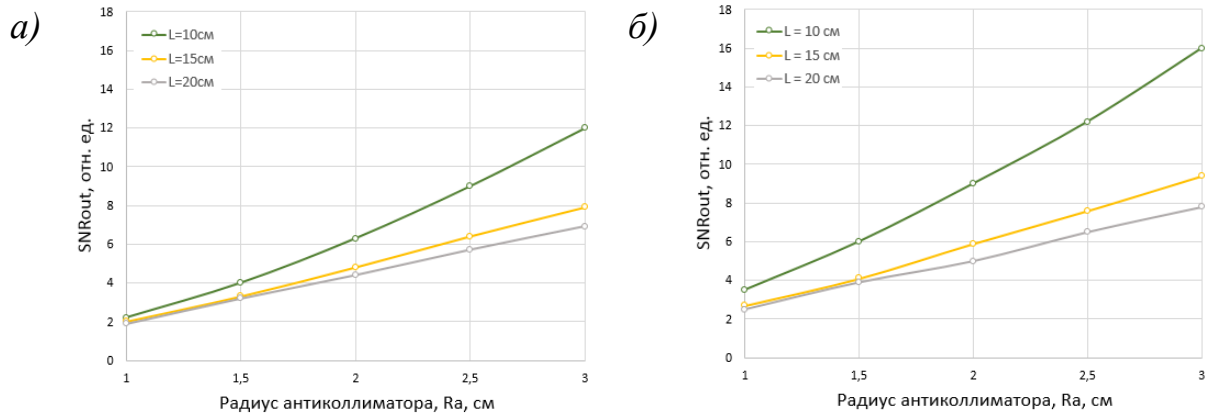


Рисунок 44 – Графики зависимости отношения сигнал/шум от геометрических параметров системы для антиколлиматора в форме шара (а) и цилиндра (б), полученные по результатам моделирования

Как видно из рис. 44, ОСШ снижается с увеличением расстояния между центром детектора и антиколлиматором, а с увеличением радиуса антиколлиматора ОСШ растет практически линейно.

2.3.5 Аппаратная функция детектора

Для реализации способа восстановления методом максимального правдоподобия необходима информация об аппаратной функции сканера с антиколлиматором.

Аппаратная функция включает в себя комплекс свойств детектирующей системы и графически может быть представлена как функция отклика детектора от угловой координаты источника излучения (рис. 45).

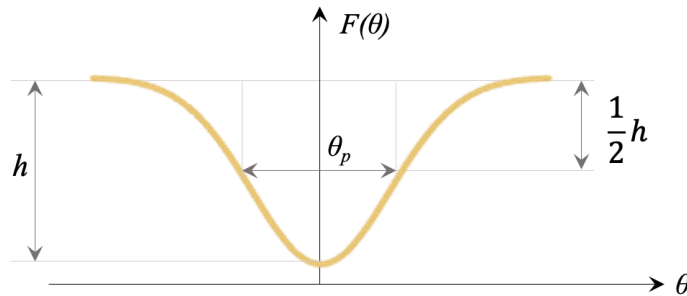


Рисунок 45 – Графическое представление аппаратной функции сканера с антиколлиматором

Такую функцию определяют путем перемещения детектирующей головки относительно точечного источника излучения вдоль линии, проходящей через такой источник (см. подраздел 2.4). Очевидно, что вид этой функции обусловлен геометрическими параметрами антиколлиматора и его удаленности от детектора.

Глубина аппаратной функции (параметр h на рис. 45) характеризует эффективность поглощения гамма-квантов защитой и зависит от высоты блокирующего объекта (для антиколлиматора в форме шара – от его радиуса): чем больше высота, тем глубже аппаратная функция, а следовательно, точнее могут быть определены высокоэнергетические источники излучения.

Угол раствора аппаратной функции антиколлиматора (значение угла θ на половине глубины функции, см. рис. 45) определяет угловое разрешение системы и допустимую величину шага сканирования. Чем меньше угол раствора, тем меньший шаг необходимо выбирать при сканировании, а следовательно, потребуется большее время, необходимое для сканирования. Также с аппаратной функцией коррелирует номинальная (без процедуры реконструкции) разрешающая способность устройства – два близко расположенных источника могут быть качественно разрешены, если их угловое расстояние примерно равно ширине аппаратной функции на половине её высоты. Угол раствора зависит не только от поперечного сечения антиколлиматора (возрастает с увеличением диаметра), но

также от расстояния между детектором и антиколлиматором – чем меньше это расстояние, тем больше угол раствора.

На рис. 46 приведены аппаратные функции гамма-сканера с цилиндрическим антиколлиматором для геометрических параметров системы, соответствующих максимумам функций $\nu(M=0,2)$ (см. рис. 43). Данные получены по результатам компьютерного моделирования.

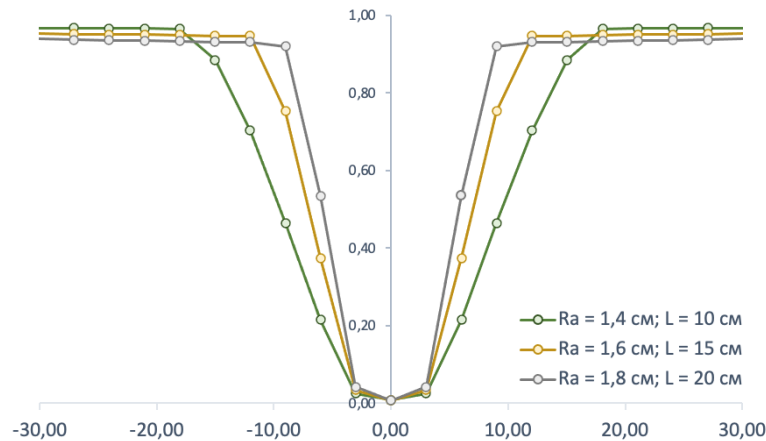


Рисунок 46 – Аппаратные функции для антиколлиматоров в форме цилиндра

2.3.6 Результаты моделирования

Результаты моделирования показывают, что оптимальное разрешение системы может быть достигнуто применением антиколлиматора в форме шара с параметрами $Ra=1,8$ см при $L=15$ см и $Ra=2,0$ см при $L=20$ см, либо в форме цилиндра высотой 4 см с параметрами $Ra=1,4$ см при $L=10$ см, $Ra=1,6$ см при $L=15$ см и $Ra=1,8$ см при $L=20$ см.

Для перечисленных значений Ra и L величина ОСШ составляет примерно 4 отн. ед. в случае сферического антиколлиматора и чуть больше 5 отн. ед. для цилиндра, поэтому предпочтительнее будет цилиндрический антиколлиматор. Кроме того, форма цилиндра значительно проще реализуема с точки зрения изготовления.

Поскольку угол раствора аппаратной функции системы должен быть достаточно широким с точки зрения сокращения времени сканирования и в то же время достаточно узким для обеспечения оптимальной точности, из

рассмотренных вариантов решено было применить средний по ширине угла раствора.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что оптимальными геометрическими параметрами гамма-сканера с антиколлиматором будут:

- форма антиколлиматора – цилиндр;
- диаметр антиколлиматора – 1,6 см;
- расстояние между детектором и антиколлиматором – 15 см.

2.4 Аппаратная функция

2.4.1 Экспериментальное определение аппаратной функции

Аппаратная функция определяет изменение чувствительности детектирующей системы в зависимости от угла падения гамма-квантов относительно оси детектор-антиколлиматор и необходима для обработки результатов сканирования при восстановлении итерационным методом. Для восстановления изображения расположения источников ионизирующего излучения по полученным данным требуется определить фактическую аппаратную функцию детектора с антиколлиматором.

Для определения аппаратной функции детектора с антиколлиматором был проведен модельный эксперимент. Детектор устанавливался в статичном положении на плоскости. Источник с радионуклидом ^{137}Cs перемещался относительно детектирующей системы, как показано на рис. 47, на заданный угол. Точки размещения источника отмечены красными кружками. Расстояние между источником и детектором оставалось постоянным.

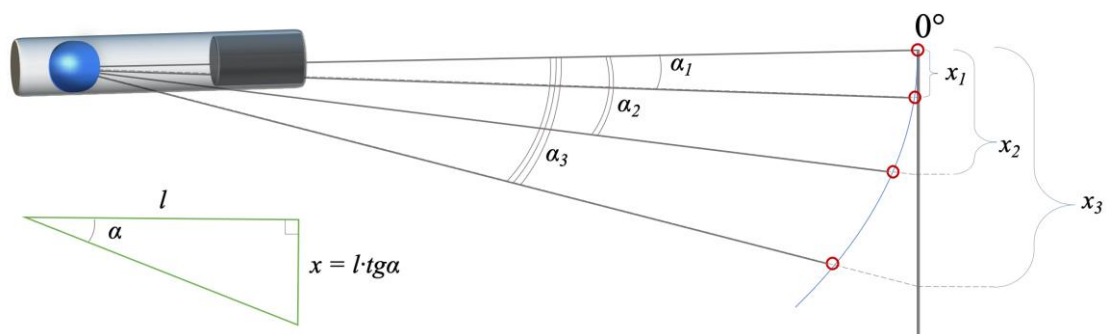


Рисунок 47 – Схема эксперимента по определению аппаратной функции

Положение источника, при котором центры детектора, антиколлиматора и источника находятся на одной оси, соответствует углу поворота 0° . Время каждого измерения составляло 300 с. Источник размещался на расстоянии $l = 125$ см от центра детектора.

Для сокращения влияния систематической погрешности на результат измерений была проведена энергетическая калибровка по источникам ^{60}Co и ^{137}Cs . В точке размещения детектора была измерена скорость счета импульсов фона в области спектра, соответствующей пику полного поглощения ^{137}Cs .

Поскольку аппаратная функция симметрична, измерения проводились в интервале углов от 0° до 28° , а вторая половина строилась к ней в зеркальном отображении. В каждой точке была измерена скорость счета импульсов в пике полного поглощения радионуклида ^{137}Cs . Поскольку для решения задачи восстановления требуется аппаратная функция, выраженная в относительных, а не абсолютных единицах, полученные значения скорости счета импульсов были нормированы по формуле

$$N_{\text{норм}} = \frac{N_i - N_{\phi}}{\max(N_i - N_{\phi})} \quad (3)$$

где N_i – скорость счета импульсов в пике полного поглощения для i -го измерения, имп/с;

N_{ϕ} – скорость счета импульсов фона.

Графическое представление аппаратной функции, полученной в результате измерений, дано на рис. 48.

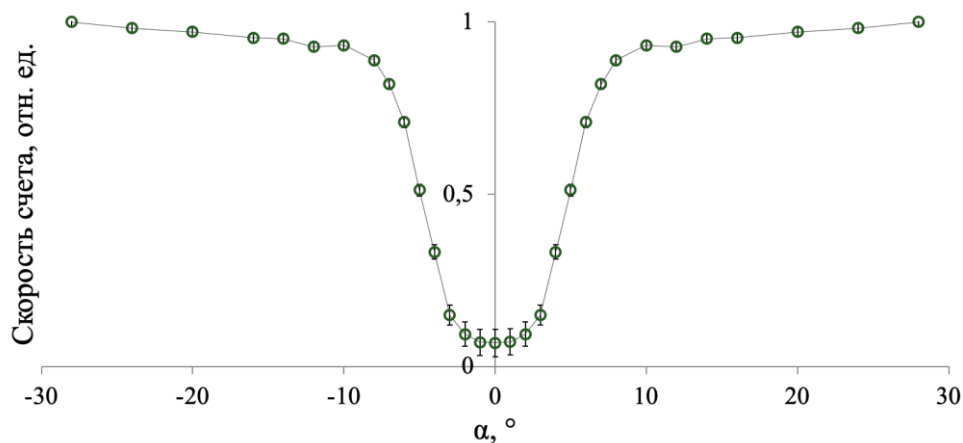


Рисунок 48 – Аппаратная функция детектора с антиколлиматором

Полная ширина аппаратной функции на половине высоты составила 10° .

2.4.2 Модернизация системы

Прототип гамма-сканера с антиколлиматором был изготовлен с геометрическими параметрами, определенными по итогам анализа результатов математического моделирования, описанного в подразделе 2.3. Однако при разработке поворотного механизма конструкция гамма-сканера была дополнена конструктивными элементами и крепежом, влияние которых не учитывалось при математическом моделировании и первичном определении аппаратной функции в лабораторных условиях. Модельные испытания показали, что наличие дополнительных элементов внесло искажения в аппаратную функцию системы сканирования. На рис. 49 приведены результаты этих измерений: красной линией с красными треугольниками в точках измерений показана аппаратная функция $(1-F(\theta))$, снятая перемещением источника вдоль оси OX ; синей линией с синими квадратами в точках измерений показана аппаратная функция $(1-F(\theta))$, снятая перемещением источника вдоль оси OY .

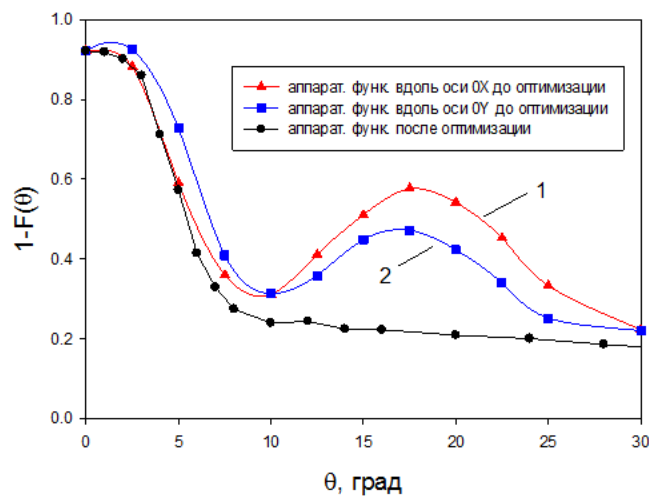


Рисунок 49 – Аппаратные функции $(1-F(\theta))$, полученные в двух взаимно перпендикулярных направлениях – в горизонтальном OX (красный) и в вертикальном OY (синий) до модернизации системы гамма-сканера с антиколлиматором и после (черный)

Приведенные на рис. 49 синяя и красная аппаратные функции качественно отличаются от полученных расчетным путем (рис. 46) и экспериментально без установленных элементов крепления (рис. 48). Эти отличия обусловлены влиянием крепёжных элементов поворотного механизма (рис. 50, поз. 1), которое ранее не

учитывалось. Дополнительное ослабление излучения в крепежном элементе привело к появлению дополнительных «горбов» (рис. 49, поз. 1 и 2) в аппаратной функции. Положение крепежного элемента (рис. 50, поз. 1) обусловлено тем, что центр тяжести сканирующей головки оказался расположенным между детектором и антиколлиматором (рис. 50а). В результате такого расположения элемент крепежа поглощает часть излучения от источников гамма-излучения, вследствие чего возникают дополнительные теневые области, которые и приводят к появлению указанных выше «горбов».

Для исключения влияния крепежных элементов, в конструкцию устройства были внесены изменения. Сканирующая головка устанавливалась в фиксирующем кольце так, чтобы между детектором и антиколлиматором отсутствовали какие-либо дополнительные элементы (рис. 50б). Это сократило расстояние между детектором и антиколлиматором с 15 до 10 см, а для того, чтобы угол раствора аппаратной функции не изменился, был уменьшен диаметр антиколлиматора с 32 до 23 мм. Для коррекции положения центра масс после выноса детектора вперед, в конструкцию также был добавлен противовес.

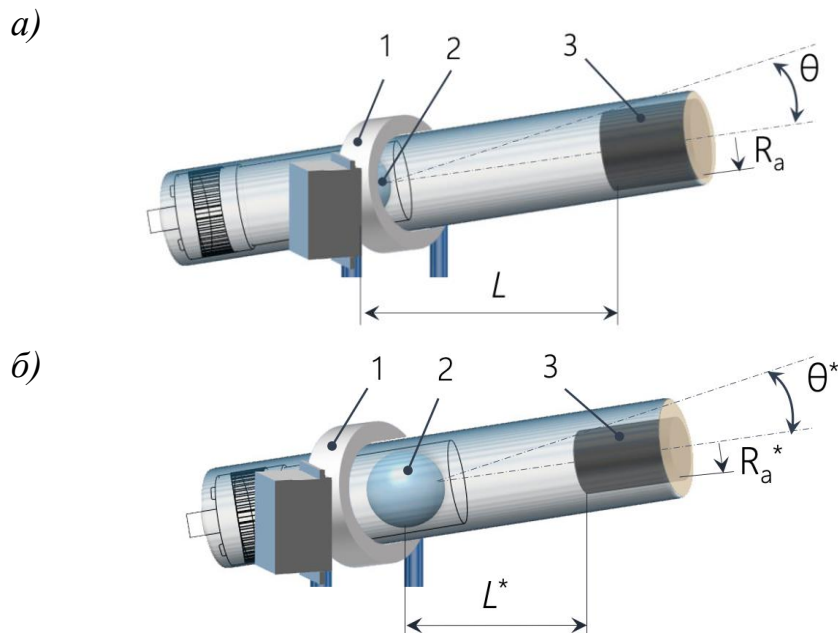


Рисунок 50 – Схема расположения элементов гамма-сканера до оптимизации (а) и после оптимизации (б). 1 – фиксатор детектирующей головки, 2 – чувствительный элемент детектора, 3 – антиколлиматор

После внесения изменений в конструкцию повторно осуществлялось измерение аппаратной функции, вид которой представлен на рис. 49 (черная линия с черными кружками в точках измерений). Как видно из этого рисунка, аппаратная функция модернизированной системы сканирования имеет те же характеристики (угол раствора $\theta \approx 5^\circ$), но без искажений и артефактов в виде дополнительных «горбов».

В результате внесения изменений в конструкцию детектирующей головки и крепежных элементов гамма-сканер получает ряд преимуществ. Во-первых, сократилась масса устройства. Во-вторых, существенно уменьшается момент инерции вращающихся элементов, что снижает нагрузку на поворотный механизм и обеспечивает более устойчивую работу при перемещении сканирующей головки.

2.4.3 Аппроксимация аппаратной функции

Для применения при восстановлении распределения активности методом максимального правдоподобия, аппаратная функция, описанная в п. 2.4.2, аппроксимировалась функцией следующего вида

$$f(x) = f_0 + c \cdot x + \frac{a}{1 + (x/z)^b}, \quad (4)$$

с коэффициентами, значения которых приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты для аппроксимации аппаратной функции

f_0	c	a	z	b
0,0822	$2,89 \times 10^{-3}$	0,6543	5,75	-5,069

Качество аппроксимации можно оценить по представлению функции на рис. 51.

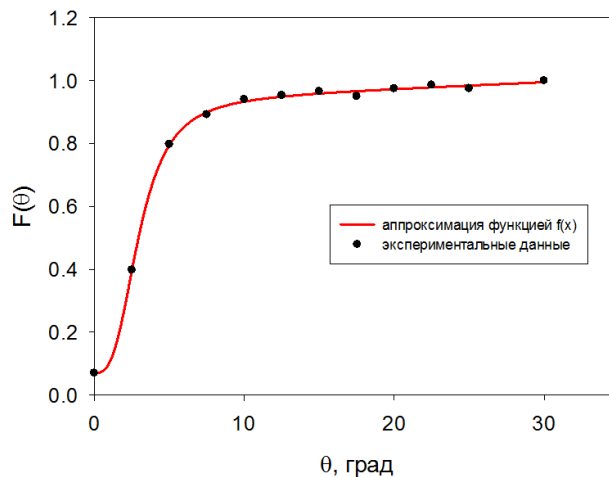


Рисунок 51 – Аппроксимация результатов измерения аппаратной функции

2.5 Поворотное устройство

Поворотно-наклонное устройство предназначено для позиционирования детектирующей головки и должно обеспечивать возможность поворота по двум направлениям: полярному и азимутальному, с точностью не менее 2 градусов. Детектирующая головка состоит из детектора массой порядка 200 г и антиколлиматора массой порядка 200 г, установленного на расстоянии 10 см от центра кристалла детектора, помещенных в общий корпус.

2.5.1 Варианты исполнения поворотного механизма

На сегодняшний день существует множество вариантов реализации электропривода: асинхронный двигатель с редуктором, мотор-редуктор постоянного тока (коллекторный двигатель), шаговый двигатель, бесколлекторный двигатель и сервоприводы.

При выборе привода для разрабатываемого устройства рассматривались требования к крутящему моменту, требования к скорости поворота, точность позиционирования, массогабаритные показатели.

Асинхронные двигатели применяются при создании устройств, не требующих высокой точности позиционирования, для решения задач вращения с постоянной скоростью. При подаче напряжения питания от сети переменного тока ~220В начинается вращение вала двигателя. Скорость вращения определяется передаточным числом редуктора. Преимуществами таких двигателей являются высокая надежность и простота применения. Недостаток асинхронных двигателей заключается в необходимости применения дополнительных датчиков и контроллеров для управления параметрами вращения.

Мотор-редукторы постоянного тока (коллекторный двигатель) также находят применение в устройствах, не требующих высоких показателей точности, однако, в отличие от асинхронных двигателей, для их работы требуется источник питания постоянного тока. Двигатель начинает вращение сразу после подачи напряжения питания. Управление скоростью вращения возможно изменением подаваемого на мотор напряжения питания, а управление направлением вращения

обеспечивается изменением полярности напряжения питания. Основными преимуществами такого двигателя являются низкая стоимость и простота применения. Однако трение деталей коллектора приводит к быстрому износу, что негативно сказывается на их ресурсе.

Бесколлекторный двигатель представляет собой ротор-магнит, вращающийся внутри статора с обмотками, а следовательно, благодаря отсутствию трения внутри механизма он значительно долговечнее коллекторного. Управление скоростью и направлением вращения осуществляется аналоговым сигналом. Преимущества таких двигателей заключаются в их надежности, высокой эффективности и стабильности. К недостаткам можно отнести более высокую стоимость.

Шаговый двигатель применяется для точного позиционирования – он позволяет выполнять поворот вала на определенный угол с точностью до десятых долей градуса. Управление шаговым двигателем сводится к описанию количества шагов в заданном направлении с заданной скоростью.

Преимуществами шаговых двигателей являются высокая точность позиционирования и длительный срок службы. Среди недостатков шаговых двигателей стоит отметить нагрев при работе и необходимость контроля позиционирования.

Сервопривод представляет собой интеллектуальное устройство, состоящее из привода (электромотор с редуктором) и управляющего блока с энкодером обратной связи. Управление серводвигателем осуществляется управляющим сигналом — последовательностью импульсов постоянной частоты и переменной длительности, который сравнивается с внутренним сигналом встроенного датчика положения. В сервоприводах применяются три типа моторов: обычный мотор с сердечником, мотор без сердечника и бесколлекторный мотор.

Сервоприводы обладают рядом преимуществ: плавность и точность перемещения, надежность, безотказность. Однако стоимость качественного сервопривода будет достаточно высока, а для его управления необходимо обеспечить качественный управляющий сигнал.

Поскольку для решения поставленной задачи требуется точное позиционирование системы, основными вариантами реализации поворотного механизма являются шаговые двигатели и сервоприводы. В сравнительной таблице 5 приведены их основные отличия.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики шаговых двигателей и сервоприводов

Параметр	Шаговые двигатели	Сервоприводы
Момент	Резко падает с увеличением скорости	Высокий на всем диапазоне скоростей
Токопотребление	Шаговый двигатель постоянно потребляет большой ток	Ток потребления пропорционален нагрузке
Нагрев	Сильный	Слабый
Обратная связь по положению	Отсутствует. Пропущенный шаг останется незамеченным	Есть. Положение вала будет скорректировано
Точность позиционирования	Не более 5% от величины шага	Определяется энкодером
Безопасность	Высокая. Если вал двигателя заклинило – он просто будет пропускать шаги	Низкая. При заклинивании вала сервопривод может провернуть передачу, повредив её
Резонанс ротора	Резонанс может привести к пропуску шагов и пр.	Отсутствует
Срок службы	Очень большой	Очень большой

Из таблицы 5 видно, что сервоприводы обладают рядом преимуществ. В разрабатываемой системе основным требованием является необходимость точного позиционирования, а поскольку для контроля положения шагового двигателя требуются дополнительные датчики, для решения поставленной задачи в качестве вращающего элемента поворотно-наклонного механизма были выбраны сервоприводы.

Для создания прототипа сканирующей системы был выбран простой сервопривод, работающий на коллекторном моторе, и позволяющий устанавливать и удерживать угол направляющего вала в пределах от 0 до 180°. Крутящий момент: от 15,7 до 18,5 кг·см в зависимости от напряжения питания. Внутренний цифровой интерфейс обеспечивает высокую скорость отклика и стабильность при внешнем

механическом воздействии. Титановые шестерни обеспечивают надежность при эксплуатации.

Внешний вид детектирующей головки, смонтированной на поворотном механизме гамма-сканера с антиколлиматором, показан на рис. 52.

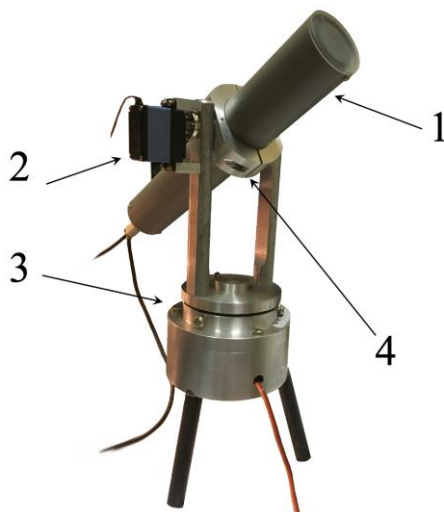


Рисунок 52 – Фото внешнего вида сканирующей головки на поворотном механизме

Детектирующая головка (поз. 1) размещается на поворотно-наклонном устройстве (поз. 2, 3) с помощью фиксатора (поз. 4). Один из сервоприводов (поз. 3) обеспечивает перемещение детектирующей головки по азимутальной координате, а второй (поз. 2) – по полярной.

В процессе предварительных испытаний гамма-сканера с антиколлиматором была выявлена необходимость внесения изменений в конструкцию сканирующей головки (см. п. 2.4.2). Также в процессе тестирования лабораторного образца устройства, была выявлена потребность в повышении мощности сервопривода, отвечающего за перемещение сканирующей головки по полярной координате, поэтому было принято решение установки более мощного сервопривода взамен используемого ранее. Кроме того, для удобства определения направления оси сканирующей головки, на корпусе был установлен лазерный указатель, включающийся на несколько секунд каждый раз, когда сканирующая головка принимает новое положение.

На рис. 53 показан внешний вид гамма-сканера с антиколлиматором после модернизации.

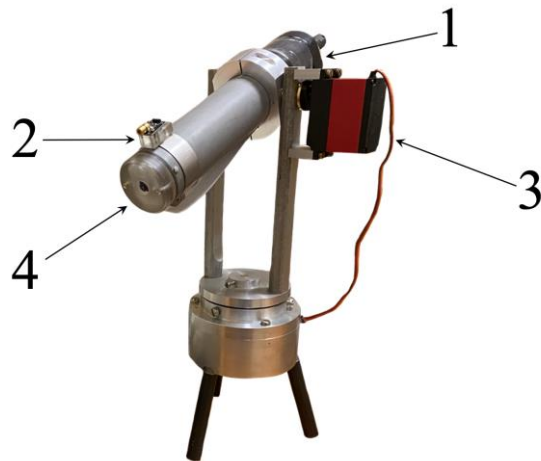


Рисунок 53 – Фото внешнего вида сканирующей головки на поворотном механизме после модернизации. 1 – противовес, 2 – лазерный указатель, 3 – новый сервопривод, 4 – камера

2.6 Спектроанализатор

Процессор импульсных сигналов «Колибри» [116, 117] – спектрометрическое устройство, предназначенное для преобразования импульсных сигналов, получаемых с детекторов ионизирующих излучений с последующим накоплением, преобразованием и выводом информации о получаемых амплитудных спектрах. Для получения амплитудных спектров устройство имеет в своем составе все необходимые средства для обеспечения работы детекторов ионизирующих излучений: спектрометрический тракт (усилитель и АЦП), вычислитель, источник питания предусилителя и источник высокого напряжения. Ввода-вывод информации осуществляется посредством графического дисплея и клавиатуры. Устройство может обеспечивать работу сцинтилляционных, газонаполненных и полупроводниковых детекторов.

Встроенное программное обеспечение спектроанализатора позволяет управлять набором спектра, считывать текущий спектр в реальном времени, включать и выключать высокое напряжение смещения детектора, получать и изменять состояние спектрометра, настройки, уставки окончания набора спектра, конфигурацию спектрометра и пр. Спектры и команды управления спектроанализатором передаются по стандартному последовательному интерфейсу RS-232. На рис. 54 приведен пример спектра радионуклидов ^{60}Co и ^{137}Cs , полученного с помощью спектрометрического детектора, описанного в

подразделе 2.2, и спектроанализатора Колибри, в окне прикладного программного обеспечения «eSBS.exe».

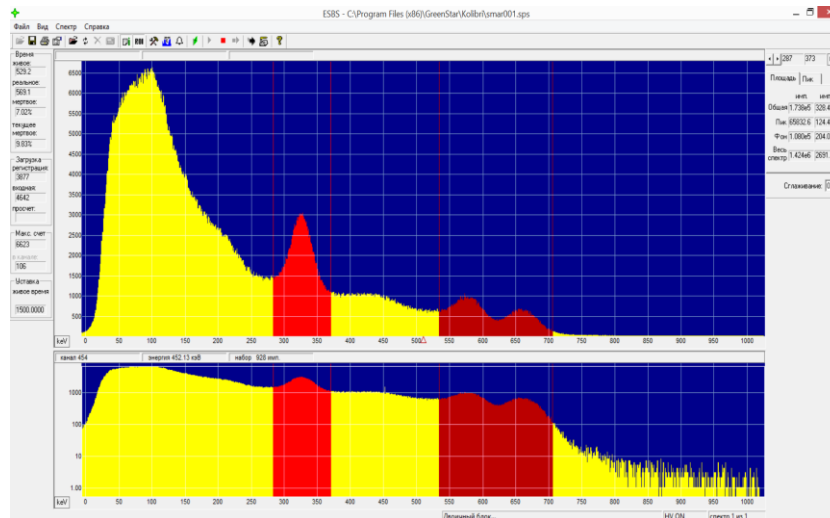


Рисунок 54 – Пример аппаратного спектра спектра при регистрации излучения радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co

2.7 Видеокамера

Основными требованиями к устройству получения фотоснимка являются легкость, компактность и высокая скорость работы. Для получения видеоизображения обследуемого объекта выбран модуль видеокамеры 8MP IMX219 (рис. 55).

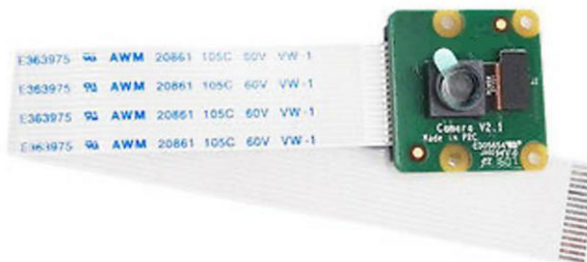


Рисунок 55 – Внешний вид применяемой видеокамеры

Компактный бескорпусной модуль видеокамеры оснащен восьмимегапиксельным сенсором Sony IMX 219 PQ CMOS с объективом с фиксированным фокусом. Эквивалентное фокусное расстояние 33 мм. Светосила объектива f/2. Масса видеомодуля составляет всего 3 г, размеры: 25×23×9 мм. Подключение к контроллеру осуществляется при помощи специального видеовхода CSI (Camera Serial Interface), обеспечивающего качественную передачу сигнала на высокой скорости.

2.8 Программа управления

Программа управления «РТСКАpp» была создана специально для гамма-сканера с антиколлиматором и предназначена для осуществления связи между его составными частями, а также для управления измерениями. Программа позволяет управлять положением сканирующей головки, получать изображения с видеокамеры и подавать контрольные команды на спектроанализатор через дополнительное консольное приложение «GSAC_Win».

Пользовательский интерфейс программы «РТСКАpp» (рис. 56) позволяет настроить область интереса, выполнить фоновое измерение, а также установить параметры и запустить сканирование в области интереса.

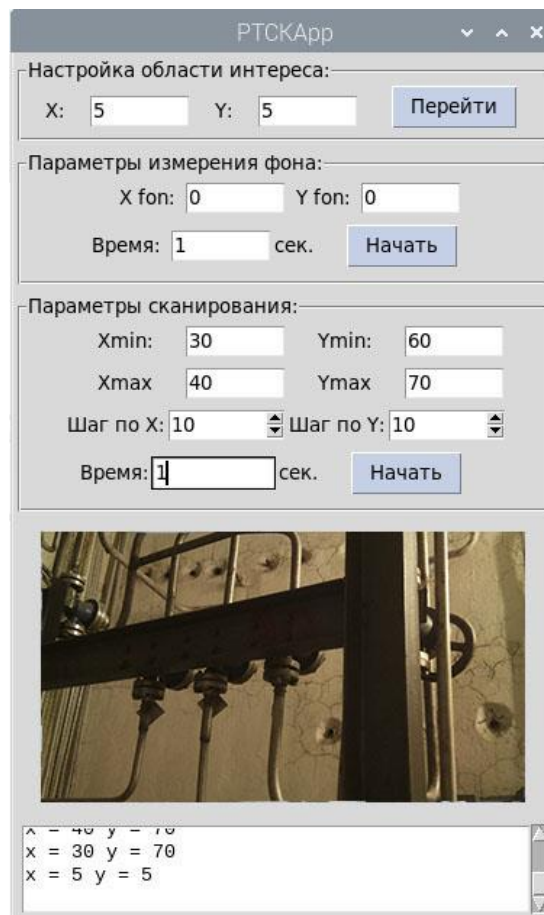


Рисунок 56 – Пользовательский интерфейс программы «РТСКАpp»

Область «Настройка области интереса» окна «РТСКАpp» позволяет определить границы области интереса. Для этого пользователю необходимо задать ожидаемые координаты «X» и «Y» предполагаемой точки в области интереса и нажать на кнопку «Перейти», после чего поворотный механизм установит

сканирующую головку в положение, соответствующее заданным координатам, на три секунды включится лазерный указатель, а в нижней части диалогового окна отобразится фото, полученное в заданной точке.

Область «Параметры измерения фона» окна «РТСКАpp» позволяет задать положение системы для однократного измерения или измерения фона – спектра, полученного без антиколлиматора (вертикально). Для этого пользователю необходимо задать координаты положения детектирующей головки («Xfon», «Yfon»), время измерения («Время») в секундах и нажать кнопку «Начать», после чего поворотный механизм переместит сканирующую головку в положение, соответствующее заданным координатам, в нижней части диалогового окна отобразится фото, полученное в установленной точке, а спектроанализатору будет направлена команда начала измерения. Во время измерения окно становится неактивно. В соответствующей директории будет создан файл фонового спектра «fon.txt». Также данная область окна может быть использована для выполнения однократного измерения.

В области «Параметры сканирования» настраивается область сканирования (рис. 57): координаты начальной («Xmin», «Ymin») и конечной («Xmax», «Ymax») точек сканирования, угол перемещения детектирующей головки по каждой оси («Шаг по X», «Шаг по Y»), а также время измерения в каждой точке сканирования («Время») в секундах. После ввода всех параметров нужно нажать кнопку «Начать», после чего система приступит к сканированию.

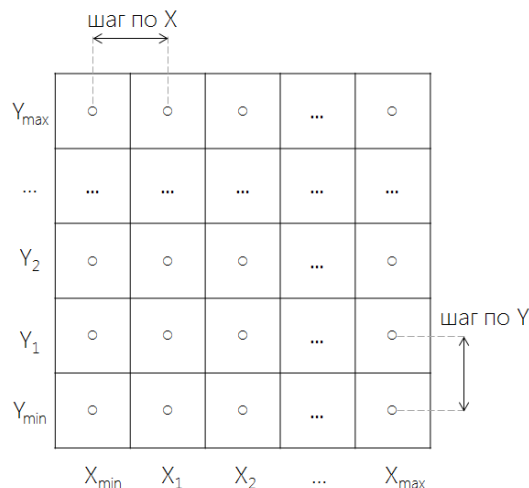


Рисунок 57 – Координатная сетка области сканирования

Для решения данной задачи разработан алгоритм сканирования. Пользователь задает начальные координаты сканирования – X_{min} , Y_{min} , конечные координаты сканирования – X_{max} , Y_{max} , а также шаг сканирования по каждой оси – ΔX , ΔY . По команде пользователя программа приступает к сканированию. Если конечные координаты введены неверно ($X_{max} \neq X_{min} \cdot \Delta X$ или $Y_{max} \neq Y_{min} \cdot \Delta Y$), программа приступает к сканированию с условиями $X_{max} := X_{min} \cdot \Delta X$ или $Y_{max} := Y_{min} \cdot \Delta Y$.

Команды, соответствующие необходимым координатам, передаются микроконтроллеру, отвечающему за положение сервоприводов, который подает сигнал на соответствующий сервопривод для установки необходимого положения.

При перемещении в новую позицию сканирования обновляется изображение в нижней части окна, а в области под фотоснимком указываются координаты текущей точки. Во время измерения окно становится неактивно, программа направляет управляющие команды с нужным положением координат детектора на микроконтроллер, управляющий поворотными сервоприводами, а также на ПК через консольное приложение «GSAK_Win» для отправки информации об измерении и команды старта измерения спектроанализатору. Для каждого измерения в заданной директории формируется файл с текущим фотоснимком.

Для оперативного контроля положения предусмотрены отображение фотоснимка текущего положения, область вывода информации в нижней части окна программы, а также включение лазерного указателя для определения направления оси сканирования.

При запуске сканирования рассчитывается и отображается в нижней части окна необходимое для его выполнения время.

Фотоснимки в каждой точке сканирования сохраняются в заданной директории для дальнейшей склейки в панораму. Фотоснимкам присваиваются имена, соответствующие координатам положения детектирующей головки с расширением «.jpg». Если присваиваемое имя занято, то существующий файл будет заменен на новое изображение.

Язык программирования – Python.

2.8.1 Консольное приложение «GSAC_Win»

Для автоматизации старта измерений требуется отладка взаимодействия между управляющим процессором и спектроанализатором. Однако, поскольку первый управляется под операционной системой Linux, для которой не существует библиотек управления спектроанализатором «Колибри», потребовалось дополнительное приложение, обрабатывающее команды, направляемые с «РТСКАpp» и позволяющее передавать управляющие команды на спектроанализатор «Колибри» в операционной системе Windows.

Консольное приложение непрерывно опрашивает последовательный порт и, по поступлении команды с управляющего компьютера, обрабатывает ее, определяя текущие координаты и заданное время измерения, после чего направляет по последовательному интерфейсу RS-232 команду спектроанализатору к началу измерения, а также информацию о необходимом времени измерения. Затем программа продолжает опрашивать порт спектроанализатора о состоянии набора до получения команды о завершении операции и направляет запрос на получение спектра измерения.

По окончании измерения в указанной директории на ПК формируется файл спектра с именем, соответствующим номеру точки измерения и расширением «.txt», в первой строке файла указано «живое» время измерения, во второй строке – «реальное» время измерения, далее – построчно приводятся измеренные значения скорости счета в каждом канале спектра, начиная с первого канала.

Язык программирования – C++.

2.8.2 Обработка изображений для получения панорамного снимка

Поскольку область сканирования может значительно превышать угол обзора видеокамеры, для качественного представления результатов обследования требуется сшивка фотоснимков, полученных при сканировании, в панорамное изображение.

В самых общих чертах процесс создания панорамного снимка выглядит следующим образом.

В самом начале требуется получить достаточный набор кадров. После этого, последовательно перебирая пары изображений из набора, следует произвести обнаружение особых точек и вычисление их дескрипторов на этих изображениях. Особые точки – это точки (пиксели) с характерной окрестностью, т. е. точки, отличающиеся своей окрестностью от всех соседних точек. Далее следует сопоставление особых точек на основе их дескрипторов. Дескрипторы особых точек – это алгоритмы, описывающие каждую особую точку и её окрестность в виде числового набора признаков. Стоит иметь в виду, что при этом не исключено получение ложных соответствий. Далее следует найти проективное преобразование, которое переводило бы точки одного кадра в соответствующие точки другого наилучшим образом. После получения нужного набора проективных преобразований имеет место техническая процедура склейки изображений, а именно: для каждого пикселя конечной панорамы (x, y) по каждому каналу (RGB) рассчитывается среднее арифметическое значение интенсивностей пикселей с координатами (x, y) всех кадров, включающих в себя пиксель с такими координатами.

Для автоматизации сшивки снимков, получаемых в результате сканирования, было рассмотрено несколько вариантов стандартных программ для формирования панорамных снимков. Для этого сравнивались результаты сшивки одного массива снимков несколькими программными решениями.

Для обработки снимков, получаемых гамма-сканером с антиколлиматором, оптимальным вариантом программы для создания панорамного снимка является приложение «AutoStitch» [118], поскольку алгоритмы данного продукта при обработке изображений предполагают, что камера вращается вокруг точки, а в нашем случае – вокруг детектора. Приложение «AutoStitch» предназначено для формирования панорамных снимков на основе методов сшивки SIFT и RANSAC [119, 120].

2.9 Обработка результатов измерения

Рассмотрим процесс сканирования области интереса, формализованное представление которой приведено на рис. 58.

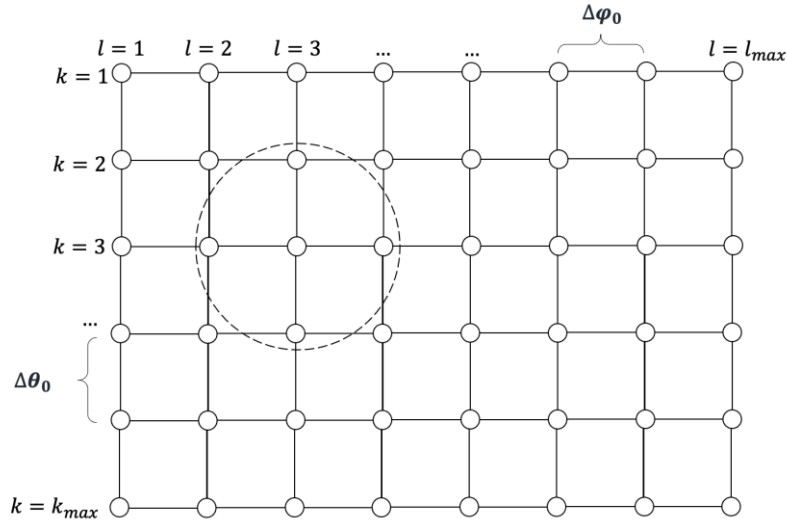


Рисунок 58 – Формализованное представление сканирования на сетке в угловых координатах

При сканировании гамма-сканером с антиколлиматором в соответствии с заданным алгоритмом изменяются полярная и азимутальная координаты оси антиколлиматора сканирующей головки. На рис. 58 дано формализованное представление такого процесса – в узлах сетки с координатами (l_j, k_j) проводятся измерения. Здесь j – номер точки сканирования, такой что $j = 1, 2, \dots, N$, причем $j = (k_j - 1) \cdot l_{max} + l_j$, а индексы l_j и k_j однозначно определяются соотношениями

$$k_j = \begin{cases} \frac{j}{l_{max}} & \text{если остаток} = 0 \\ \left\lfloor \frac{j}{l_{max}} \right\rfloor + 1 & \text{если остаток} \neq 0 \end{cases} \text{ и } l_j = j - (k_j - 1) \cdot l_{max}.$$

Полярная координата θ изменяется от начального θ_0 до конечного θ_{max} значений на угол $\Delta\theta_0$ по координатам с индексами $k = 1, 2, \dots, k_{max}$.

Азимутальная координата φ изменяется от начального φ_0 до конечного φ_{max} значений на угол $\Delta\varphi_0$ по координатам с индексами $l = 1, 2, \dots, l_{max}$.

Всего выполняется $N = k_{max} \cdot l_{max}$ измерений.

Для визуализации распределения активности в обследуемых помещениях используются данные зарегистрированного нерассеянного излучения, а это

означает, что в аппаратурном спектре необходимо выделить пик полного поглощения, т.к. он формируется нерассеянными гамма-квантами. Количественной характеристикой пика полного поглощения является скорость счета зарегистрированных импульсов в области его расположения в аппаратурном спектре, т.е. в некотором энергетическом интервале ΔE . Скорость счета в пике полного поглощения определяется как интегральная сумма показаний в заданном энергетическом диапазоне $N(\Delta E)$ в единицу времени.

Первым этапом выполняется измерение «фона» – активности от всех источников обследуемого объекта, измеренной открытым детектором (без антиколлиматора, либо в положении, когда антиколлиматор находится вне области сканирования и не вносит вклад в измерение). Данное измерение выполняется однократно. В результате получаем спектр, из которого можем определить значение скорости счета импульсов фона в пике полного поглощения для каждого интересующего нас радионуклида $N_{\Phi}(\Delta E)$, имп/с.

Далее приступаем к сканированию в соответствии с приведенным на рис. 58 представлением координатной сетки. Результатами измерений гамма-сканера с антиколлиматором являются аппаратурные спектры, полученные детектором с различной ориентацией оси сканирующей головки – в каждой точке сканирования с координатами (l_j, k_j) снимается спектр, из которого определяется значение скорости счета импульсов в пике полного поглощения для каждого интересующего нас радионуклида $N_{\Phi+j}(\Delta E)$, имп/с.

Для дальнейшей работы необходимо выделить скорость счета импульсов, обусловленную излучением источников, расположенных в пределах эффективного телесного угла антиколлиматора $N_j(\Delta E)$, имп/с. Для этого из значения скорости счета импульсов фона $N_{\Phi}(\Delta E)$ вычитаются показания скорости счета импульсов $N_{\Phi+j}(\Delta E)$, полученной в рассматриваемой точке:

$$N_j(\Delta E) = N_{\Phi}(\Delta E) - N_{\Phi+j}(\Delta E) \quad (5)$$

Таким образом, результаты измерений во всей области сканирования можно представить в виде прямоугольной матрицы $N = [n_{kl}]$, элементами которой

являются значения $[n_{kl}] \equiv N(\theta_k, \varphi_l)$ скорости счета импульсов, обусловленной излучением источников ионизирующего излучения, расположенных в пределах телесного угла антиколлиматора, в пике полного поглощения, при ориентации оси сканирующей головки с угловыми координатами

$$\theta_k = \theta_0 + (k - 1)\Delta\theta_0 \quad (k = 1, 2, \dots, k_{max})$$

$$\varphi_l = \varphi_0 + (l - 1)\Delta\varphi_0 \quad (l = 1, 2, \dots, l_{max}).$$

Рассмотрим положение детектирующей головки, когда ось сканирующей головки имеет направление, определяемое вектором $\vec{\Omega}_0$ (рис. 59). В таком положении детектор будет регистрировать все гамма-кванты, кроме тех, что распространяются в пределах эффективного телесного угла антиколлиматора $\Delta\Omega_{эфф}$.

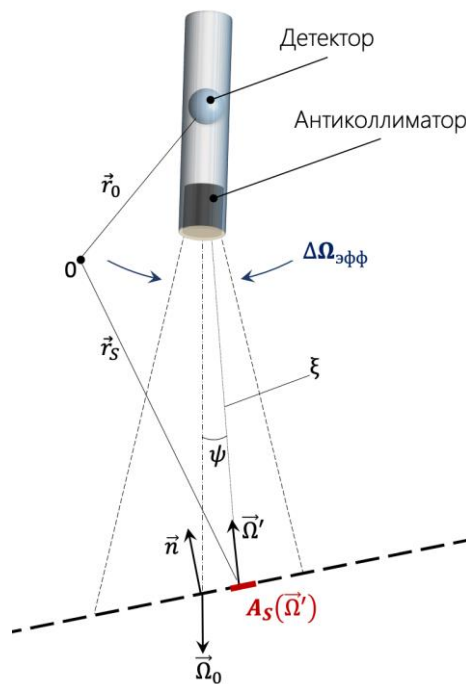


Рисунок 59 – Условная схема регистрации излучения гамма-сканером с антиколлиматором

На рис. 59 точкой «0» обозначено начало отсчета сферической системы координат, радиус-вектор \vec{r}_0 определяет положение детектирующей головки, вектор \vec{r}_s – координату точки на обозначенной пунктиром псевдоповерхности, расположенной на расстоянии ξ от детектора, причем $\vec{r}_s = \vec{r}_0 - \vec{\Omega}|\vec{r}_0 - \vec{r}_s| = \vec{r}_0 - \vec{\Omega} \cdot \xi$.

Пусть в области эффективного телесного угла антиколлиматора в данном положении детектирующей головки будет расположен источник с поверхностной

активностью $A_s(\vec{\Omega}')$. Положим скорость счета в пике полного поглощения за вычетом фона в данном измерении, равной $n_{\vec{\Omega}_0}(\Delta E)$. Тогда связь между показаниями детектора $n_{\vec{\Omega}_0}(\Delta E)$ и действительной поверхностной активностью $A_s(\vec{\Omega}')$ будет описываться интегральным уравнением вида:

$$n_{\vec{\Omega}_0}(\Delta E) = C_{calibr} \frac{1}{|\vec{\Omega}_0 \vec{n}|} \int_{\Delta\Omega} d\vec{\Omega}' \cdot F(|\vec{\Omega}_0 \vec{\Omega}'|) \cdot A_s(\vec{\Omega}') \quad (6)$$

где $F(|\vec{\Omega}_0 \vec{\Omega}'|)$ – аппаратная функция антиколлиматора

$$F(|\vec{\Omega}_0 \vec{\Omega}'|) = F(|\cos \psi|) \equiv F(\psi);$$

C_{calibr} – коэффициент пропорциональности.

Здесь использовались приближения, что в пределах телесного угла антиколлиматора сохраняется соотношение $|\vec{\Omega}' \vec{n}| \cong |\vec{\Omega}_0 \vec{n}|$, поверхностная активность A_s рассматриваемого источника постоянна, а среда между сканирующей системой и загрязненной поверхностью представляет собой воздушную среду со слабыми поглощающими свойствами, т. е. не поглощает гамма-излучение.

Значение действительной поверхностной активности $A_s(\vec{\Omega}')$ находится из решения системы алгебраических уравнений, являющейся следствием интегрального выражения (6).

Область поля зрения детектора с антиколлиматором (на рис. 58 обозначена штриховой окружностью), как правило, превышает размер углового шага сканирования и определяется видом аппаратной функции. Вследствие чего, измерения в соседних точках не являются некоррелированными, что приводит к размазыванию изображений локальных источников. Для восстановления информации об истинном расположении источников ионизирующего излучения в области интереса применяется итерационный метод восстановления.

Для получения более высокого углового разрешения необходимо перейти к новой сетке с шагом $\Delta\varphi < \Delta\varphi_0$ и $\Delta\theta < \Delta\theta_0$ (рис. 60).

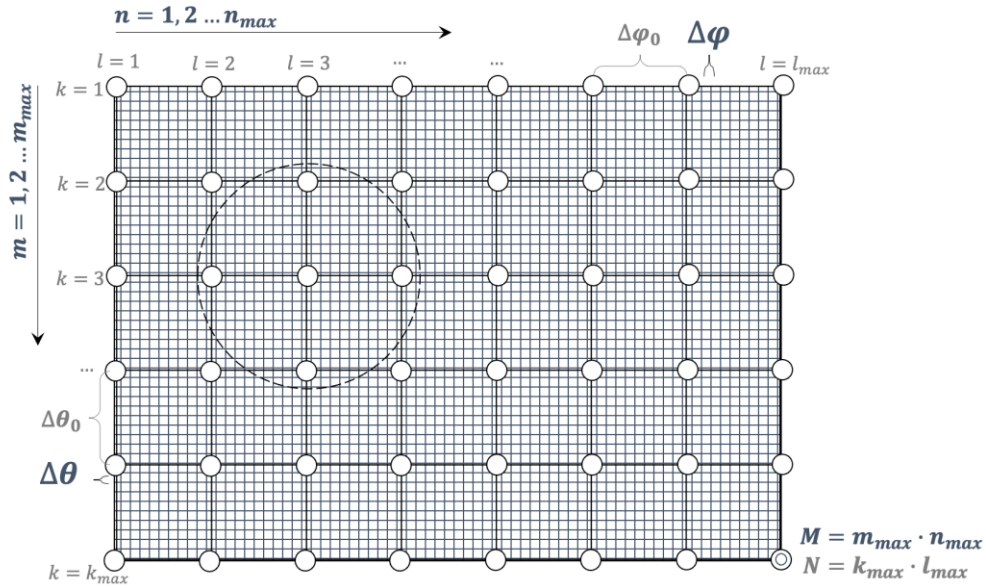


Рисунок 60 – Перенормировка коэффициентов для перехода в новую систему координат с более высоким пространственным разрешением

В новой сетке азимутальная координата φ изменяется от начального φ_0 до конечного φ_{max} значений на угол $\Delta\varphi$ с индексами $n = 1, 2, \dots, n_{max}$, полярная координата θ меняется от начального θ_0 до конечного θ_{max} значений на угол $\Delta\theta$ с индексами $m = 1, 2, \dots, m_{max}$. Всего $M = n_{max} \cdot m_{max}$ точек. Здесь нумерация ведется по $i = 1, 2, \dots, M$, причем $i = (m_i - 1) \cdot n_{max} + n_i$,

$$m_i = \begin{cases} \frac{i}{n_{max}} & \text{если остаток} = 0 \\ \left\lfloor \frac{i}{n_{max}} \right\rfloor + 1 & \text{если остаток} \neq 0 \end{cases}, \text{ а } n_i = i - (m_i - 1) \cdot n_{max}.$$

Для результатов измерений по всей области сканирования получаем систему уравнений вида:

$$n_j \cong \sum_{i=1}^M F(|\cos \psi_{ji}|) \cdot x_i \cdot \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\varphi = \sum_{i=1}^M \tilde{F}_{ji} \cdot x_i, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

где $x_i \equiv A_s(\theta_{m_i}, \varphi_{n_i})$

$\theta_i \equiv \theta_{m_i}$

$\varphi_i \equiv \varphi_{n_i}$

$\tilde{F}_{ji} = F(|\cos \psi_{ji}|) \cdot \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\varphi$, где $\cos \psi_{ji} = |\vec{\Omega}_{0j} \cdot \vec{\Omega}_i|$

при $\vec{\Omega}_{0j} = \{\sin \theta_{0k_j} \cos \varphi_{0l_j}, \sin \theta_{0k_j} \sin \varphi_{0l_j}, \cos \theta_{0k_j}\}$

$\vec{\Omega}_i = \{\sin \theta_{m_i} \cos \varphi_{n_i}, \sin \theta_{m_i} \sin \varphi_{n_i}, \cos \theta_{m_i}\}$

Для решения системы уравнений (7) может применяться итерационный метод (например, метод направленного расхождения М. З. Тараско или метод максимального правдоподобия [121, 122]).

В этом методе система уравнений (7) преобразуется к виду:

$$\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{F}} \cdot \hat{\mathbf{X}} \quad (8)$$

где $\hat{\mathbf{P}}$ – матрица-вектор с элементами $\hat{n}_j = n_j / \sum_{j=1}^N n_j$

$\hat{\mathbf{F}}$ – матрица с элементами $\hat{F}_{ji} = \tilde{F}_{ji} / \sum_{j=1}^N \tilde{F}_{ji}$

$\hat{\mathbf{X}}$ – матрица-вектор с элементами $\hat{x}_i = x_i [\sum_{j=1}^N \hat{F}_{ji} / \sum_{j=1}^N \hat{n}_j]$

Итерационный процесс определяется выражением:

$$\hat{x}_i^{(n+1)} = \hat{x}_i^{(n)} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\hat{F}_{ji} \cdot \hat{n}_j / \sum_{i=1}^M \hat{F}_{ji} \cdot \hat{x}_i^{(n)} \right] \quad (9)$$

где $\hat{\mathbf{X}}^{(n)}$ – n-я итерация матрицы-вектора $\hat{\mathbf{X}}$

По окончании итерационного процесса искомое решение (например, поверхностная активность) получают обратным преобразованием из $\hat{\mathbf{X}}^{(n)}$, т.е.

$$x_i^{(n)} = \frac{\hat{x}_i^{(n)}}{[\sum_{i=1}^M \hat{F}_{ji} / \sum_{j=1}^N \hat{n}_j]} \quad (10)$$

Для реализации описанного метода восстановления (метод максимального правдоподобия) была создана программа для ЭВМ на языке Фортран (gl_ant777_exp.for), имеющая государственную регистрацию и получившую название «Программа восстановления пространственного распределения источников излучения по результатам измерений гамма-сканером с антиколлиматором» [123].

2.9.1 Способ оценки мощности дозы по аппаратурному спектру

При проведении реабилитационных работ первоочередной задачей является локализация наиболее активных участков объекта для определения последовательности проводимых работ [4]. Наиболее удобным инструментом для анализа полученных данных является дозовая карта обследуемого помещения, представляющая собой картину распределения дифференциальной мощности дозы обследуемого объекта. Для формирования такой карты необходимо определить вклад в мощность дозы гамма-излучения от распределенных в помещении

источников. Основной задачей в такой ситуации будет преобразование аппаратного спектра в показания мощности дозы излучения.

При измерении мощности дозы с помощью спектрометрического детектора на основе кристалла сцинтиллятора CsI(Tl) возникает проблема его «хода с жесткостью», т.е. зависимости эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии. Известно, что низкоэнергетическое излучение имеет более высокую эффективность регистрации в чувствительном объеме детектора, в то время как вклад такого излучения в дозу ниже по сравнению с высокоэнергетическими гамма-квантами, что, собственно говоря, и приводит к «ходу с жесткостью» детекторов, у которых чувствительный объем изготовлен не из тканезквивалентного материала. В дозиметрах, чтобы исключить энергетическую зависимость чувствительности, как правило, используют систему фильтров, которая в большей степени поглощает низкоэнергетическое излучения, выравнивая таким образом «ход с жесткостью». Однако существует и другой подход, если есть более подробная информация о спектральных характеристиках регистрируемого излучения. Такой информацией может служить аппаратный спектр излучения спектрометрического детектора.

Предположим, что в точке \vec{r}_0 поле излучения источника гамма-излучения определяется дифференциальным по углу и энергии потоком фотонов $\Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}, E')$.

При выполнении измерений гамма-сканером с антиколлиматором в каждой точке сканирования в соответствии с выражением (5) определяется скорость счета импульсов в пике полного поглощения разностного спектра, обусловленная только теми фотонами, которые распространяются вдоль оси антиколлиматора $\vec{\Omega}_0$ в пределах эффективного телесного угла антиколлиматора $\Delta\Omega_{эфф}$. Формально эту выделенную часть потока можно представить в виде:

$$\Delta\Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}, E') = \Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}_0, E') \cdot \Delta\Omega_{эфф} \quad (11)$$

где $\Delta\Omega_{эфф}$ – эффективный телесный угол антиколлиматора.

В точке \vec{r}_0 этот поток фотонов создает мощность дозы $\dot{H}(\vec{r}_0)$, которая определяется по формуле

$$\begin{aligned} \dot{H}(\vec{r}_0) &= \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \int_0^{E_0} dE' f_a(E') \Delta\Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}, E') = \\ &= \Delta\Omega_{\text{эфф}} \int_0^{E_0} dE' f_a(E') \Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}_0, E') \end{aligned} \quad (12)$$

где $f_a(E) \equiv \mu_a(E) \cdot E$,

где $\mu_a(E)$ – линейный коэффициент поглощения энергии фотонов с энергией E в воздухе или тканеэквивалентной среде [44]

Если в точку \vec{r}_0 поместить спектрометрический изотропный (сцинтиллятор в форме шара) детектор, то его показанием будет сформированный аппаратурный спектр $N(E)$, функция которого в некотором приближении может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} N(E) &= \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \int_0^{E_0} dE' \Delta S_{\text{дет}} \langle \varepsilon(E') G(E, E') \rangle \cdot \Delta\Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}, E') = \\ &= \Delta S_{\text{дет}} \cdot \Delta\Omega_{\text{эфф}} \int_0^{E_0} dE' G^*(E, E') \cdot \Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}_0, E') \end{aligned} \quad (13)$$

где $\varepsilon(E')$ – эффективность регистрации детектором фотонов с энергией E' ;

$G(E, E')$ – функция отклика детектора на регистрацию фотона с энергией E' ;

$\langle \varepsilon(E') G(E, E') \rangle \equiv G^*(E, E')$ – усредненная функция отклика детектора (аппаратурный спектр при регистрации моноэнергических фотонов с энергией E');

E_0 – максимальная энергия излучения, падающего на детектор

$\Delta S_{\text{дет}}$ – площадь поперечного сечения сферического сцинтиллятора

Поскольку и аппаратурный спектр $N(E)$, определяемый формулой (13), и мощность дозы $\dot{H}(\vec{r}_0)$, определяемая формулой (12), формируются одним и тем же потоком гамма-квантов $\Delta\Phi(\vec{r}_0, \vec{\Omega}_0, E')$, то очевидно, что между ними должна существовать функциональная связь. Будем полагать, что такая функциональная зависимость определяется выражением (14).

$$\dot{H}(\vec{r}_0) = \int_0^{E_0} K(E)N(E)dE \quad (14)$$

где $K(E)$ – функция, которая обеспечивала бы выполнение условия (14) для аппаратного спектра при регистрации фотонов любого спектрального состава

Используя выражения (12) и (13), можно показать, что функция $K(E)$ является решением уравнения

$$f_a(E') = A_{colibr} \int_0^{E_0} dE K(E)G^*(E, E') \quad (15)$$

Решение интегрального уравнения (14) относится к некорректным задачам, поэтому здесь могут быть использованы специальные численные методы, например, метод регуляризации Тихонова [124] или итерационный метод максимального правдоподобия [125].

Значение константы $A_{colibr} \approx \Delta S_{дет} \cdot \Delta \Omega_{эфф}$ определяется при калибровке с использованием точечного изотропного источника. Для этого осуществляется набор аппаратного спектра $N(E)$ от калибровочного источника и с помощью дозиметра измеряется фактическая мощность дозы \dot{H} . Затем определяется коэффициент пропорциональности между \dot{H} и величиной $\int_0^{E_0} K(E)N(E)dE$, что и дает значение константы A_{colibr} .

Результаты численного решения уравнения (15) представлены на рис. 61.

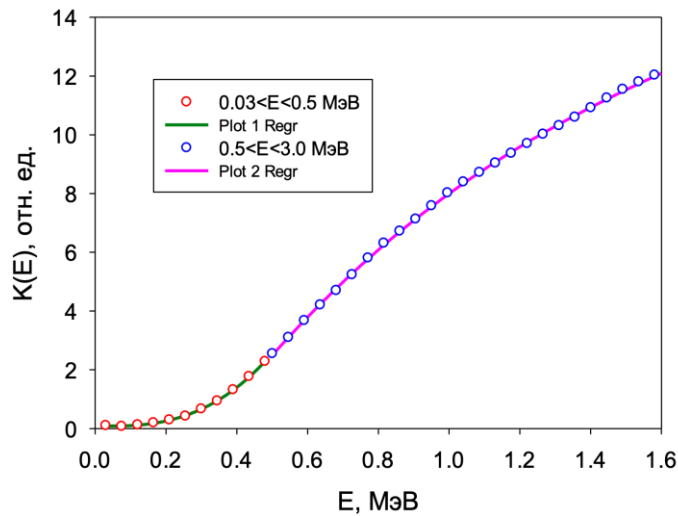


Рисунок 61 – Энергетическая зависимость функции $K(E)$ для спектрометрического детектора с кристаллом сцинтиллятора CsI(Tl) в форме шара объемом 6 см³

Для практического использования функция $K(E)$ может быть аппроксимирована двумя полиномами разного порядка:

$$K(E) \approx \begin{cases} \sum_{i=0}^m a_i E^i, \text{ если } 0,015 < E < 0,5 \text{ МэВ}, m = 3 \\ \sum_{i=0}^n b_i E^i, \text{ если } 0,5 < E < 3,0 \text{ МэВ}, n = 5 \end{cases} \quad (16)$$

с коэффициентами, приведенными в таблице 6.

Таблица 6 – Коэффициенты для выражения (16)

$a_0 = 0,1087$	$a_1 = -0,6194$	$a_2 = 3,978$	$a_3 = 14,130$	–	–
$b_0 = -5,745$	$b_1 = 19,62$	$b_2 = -6,702$	$b_3 = 0,8374$	$b_4 = -0,0956$	$b_5 = 0,0756$

Такое представление функции $K(E)$ хорошо согласуется с численным решением уравнения (15), что подтверждают данные, также показанные на рис. 61.

При решении уравнения (15) функции $G^*(E, E')$ рассчитывались методом Монте-Карло для детектора CsI(Tl) с учетом его параметров: размера, формы, энергетического разрешения и т.п. На рис. 62 приведены примеры типичного вида таких функций для четырех значений энергий E' , полученные по результатам математического моделирования методом Монте-Карло. Для реализации метода максимального правдоподобия использовался набор этих функций для диапазона энергий E' от 0,015 до 3,0 МэВ с шагом 0,015 МэВ.

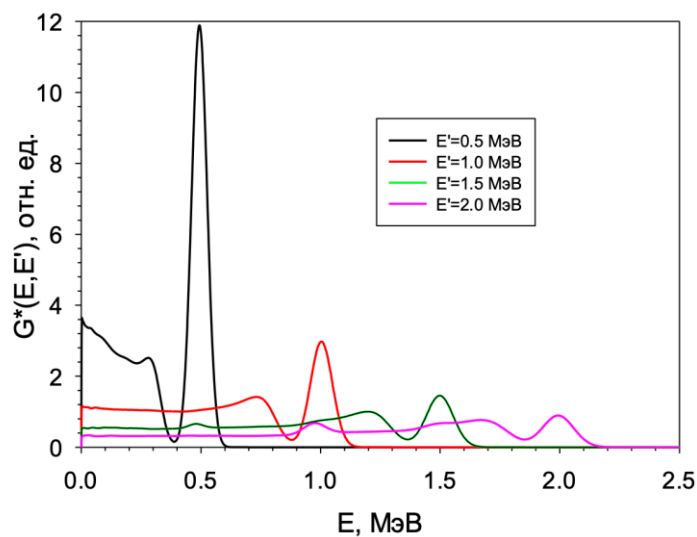


Рисунок 62 – Типичный вид функций $G^*(E, E')$ для четырех выбранных значений энергий E'

Функция $f_a(E)$ определялась через сечения взаимодействия фотонов в воздухе.

Представленная на рис. 61 зависимость $K(E)$ имеет простой физический смысл. Как отмечалось, в области низкой энергии фотоны имеют высокую эффективность регистрации, но в дозу такие фотоны вносят меньший вклад, чем высокоэнергетические. Поэтому, согласно уравнению (14), $K(E)$ является весовым множителем для зарегистрированного фотона, вклад в мощность дозы которого уменьшается со снижением его энергии.

Эффективность применения данного метода расчета дозы излучения хорошо подтверждается экспериментально. Для подтверждения описанной методики проводился эксперимент по определению зависимости значений мощности дозы, полученных расчетным методом весовой функции $K(E)$, от фактических значений, измеренных с помощью дозиметра. Для этого использовались дозиметр ДРГ-01Т1 и комплект источников типа ОСГИ с радионуклидами ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co и ^{152}Eu .

Радионуклидные источники размещались на расстоянии 150 мм от детектора в различных комбинациях – в таблице 7 приведены применяемые при каждом измерении радионуклиды. Фактическое значение мощности дозы определялось с помощью дозиметра ДРГ-01Т1, расположенного также на расстоянии 150 мм от источников излучения. При каждом измерении фиксировались несколько значений показаний дозиметра ДРГ-01Т1, которые в дальнейшем усреднялись.

Таблица 7 – Радионуклидный состав и результаты выполненных измерений

Номер измерения	Радионуклиды	МЭД (дозиметр), мкР/ч	МЭД (метод весовой функции), мкР/ч
1	^{137}Cs	57,0	57,0
2	^{22}Na	44,0	47,4
3	^{60}Co	143,5	139,8
4	^{152}Eu	80,0	75,1
5	$^{137}\text{Cs} + ^{152}\text{Eu}$	113,5	120,9
6	$^{22}\text{Na} + ^{152}\text{Eu}$	108,5	114,8
7	$^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs}$	198,5	194,4
8	$^{137}\text{Cs} + ^{22}\text{Na} + ^{60}\text{Co}$	243,0	243,7
9	$^{137}\text{Cs} + ^{22}\text{Na} + ^{60}\text{Co} + ^{152}\text{Eu}$	314,5	304,0

Для вычисления значений мощности дозы методом весовой функции $K(E)$ во время каждого измерения детектором гамма-сканера снимался аппаратурный

спектр. Расчетное значение МЭД вычислялось описанным выше методом. Пример аппаратурного спектра излучения совокупности источников ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co и ^{152}Eu (измерение № 9) приведен на рис. 63.

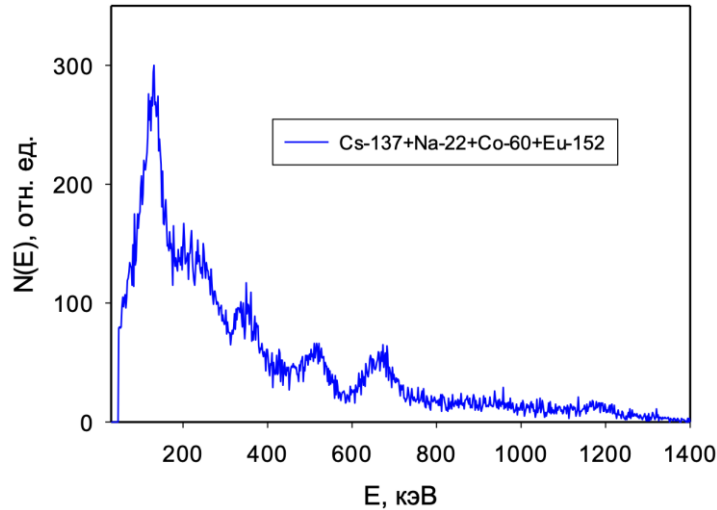


Рисунок 63 – Аппаратурный спектр излучения источников $^{137}\text{Cs} + ^{22}\text{Na} + ^{60}\text{Co} + ^{152}\text{Eu}$

По результатам измерений была построена зависимость значений МЭД, вычисленных методом весовой функции $K(E)$, от значений МЭД, измеренных дозиметром ДРГ-01Т1. Результаты приведены на рис. 64.

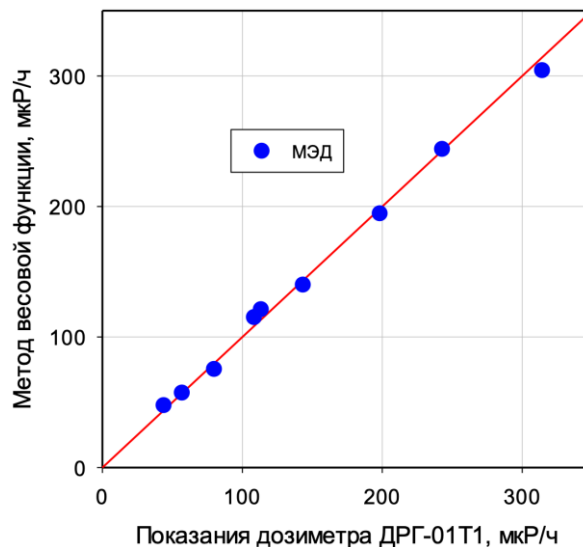


Рисунок 64 – Сопоставление данных МЭД, полученных измерением дозиметром ДРГ-01Т1 и методом весовой функцией с использованием аппаратурных спектров излучения 4-х источников в различных комбинациях

Как видно из рис. 64, значения МЭД, восстановленные по аппаратурному спектру, хорошо согласуются с фактически измеренными значениями.

2.10 Выводы

Разработано устройство для обследования радиационно-загрязненных помещений методом сканирования с применением антиколлиматора.

Гамма-сканер с антиколлиматором (рис. 65) представляет собой детектирующую головку, размещенную в поворотно-наклонном механизме, управляемую дистанционно с помощью блока управления и ПК. Для удобства при использовании и перемещении аппаратная часть блока управления вынесена в отдельный бокс, в котором располагаются управляющий компьютер, спектроанализатор, контроллер поворотного механизма, узел питания и пр. Сканирующая головка состоит из спектрометрического детектора, антиколлиматора и видеокамеры.



Рисунок 65 – Фото внешнего вида гамма-сканера с антиколлиматором

Специально для гамма-сканера с антиколлиматором был разработан компактный и легкий спектрометрический детектор, обладающий следующими характеристиками:

- эффективность регистрации (для энергии 662 кэВ) – 32 %;
- энергетическое разрешение по ^{137}Cs – 12,1 %;
- диапазон регистрируемых энергий – от 50 кэВ до 1,5 МэВ;
- размеры – $\text{Ø}40 \times 135$ мм;
- масса – 200 г.

Оптимизация геометрических параметров выполнялась математическим моделированием с применением метода Монте-Карло. Критериями оценки являлись ЧКХ, ОСШ и форма аппаратной функции. На основании анализа данных, полученных по результатам моделирования, были определены оптимальные параметры системы и изготовлен прототип гамма-сканера.

По результатам предварительных лабораторных испытаний конструкция системы была модернизирована – чувствительный элемент вынесен ближе к антиколлиматору, установлен противовес, усилен поворотный механизм, а на сканирующей головке размещен лазерный указатель.

Для позиционирования сканирующей головки разработан и реализован поворотный механизм на основе двух сервоприводов, управляемых контроллером.

Управление устройством осуществляется с помощью персонального компьютера посредством программы «РТСКАpp». Программа позволяет пользователю осуществлять настройку положения сканирующей головки и управлять измерениями. Взаимодействие между спектроанализатором и ПК обеспечивается дополнительным консольным приложением. Программное обеспечение создавалось специально для сканера с антиколлиматором.

Для повышения углового разрешения системы визуализации применяется процедура реконструкции (восстановления) итерационным методом. Для оценки вклада в дозу от источников, расположенных в границах области сканирования, применяется метод весовой функции.

Изготовлен прототип гамма-сканера с антиколлиматором (рис. 65).

Глава 3. Оценка технических и метрологических параметров системы

Для определения основных характеристик системы визуализации, а также для отработки способа получения изображения распределения активности в загрязненных помещениях по результатам измерений гамма-сканера с антиколлиматором, была проведена серия экспериментов.

3.1 Визуализация точечного источника

Эксперимент по визуализации точечного источника хорошо демонстрирует все этапы получения гамма-изображения.

Точечный источник с радионуклидом ^{22}Na случайным образом был размещен в границах области сканирования. Фоновое измерение, учитывающее излучение от всех источников в помещении, выполнялось в вертикальном положении сканирующей головки. Сканирование области интереса выполнялось в автоматическом режиме. По результатам сканирования был сформирован массив спектров, каждый из которых соответствовал определенным угловым координатам. В каждом спектре определялась интегральная скорость счета в пике полного поглощения рассматриваемого радионуклида для соответствующих координат: для радионуклида ^{22}Na рассматривался пик аннигиляционного излучения с энергией 511 кэВ (рис. 66).

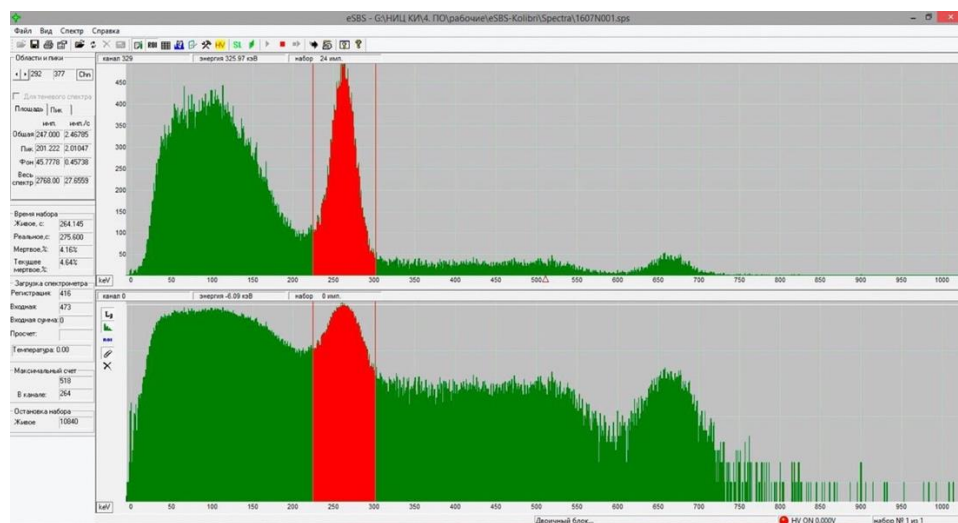


Рисунок 66 – Аппаратурный спектр радионуклида ^{22}Na .

Графически результаты сканирования представлены на рис. 67а в виде поверхностной цветовой диаграммы, в которой координаты соответствуют координатам сканирования, а цвет – величине скорости счета в пике полного поглощения.

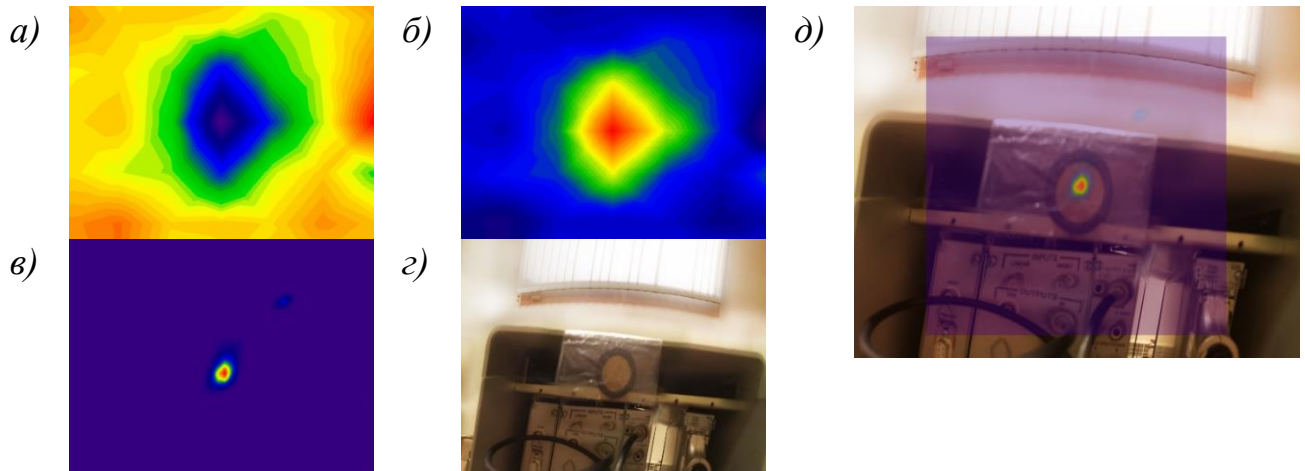


Рисунок 67 – Процедура обработки результатов измерений на примере визуализации точечного источника типа ОСГИ с радионуклидом ^{22}Na : формирование гамма-изображения (а); результат вычитания из фонового спектра (б); восстановленное изображение (в); панорамное фото (г); результат наложения восстановленного изображения на панорамное фото (д)

Итогом сканирования является негативное изображение (рис. 67а). Позитивное изображения (рис. 67б) представляет собой разностную картину, получаемую вычитанием измеренных данных из фонового измерения. Для этого теневые данные каждой точки сканирования вычитаются из фоновых результатов от всех источников обследуемого помещения.

Для повышения углового разрешения и точности локализации источника применяется процедура восстановления, результат которой показан на поверхностной цветовой диаграмме на рис. 67в.

Для визуализации распределения источников гамма-излучения результат восстановления (рис. 67в) накладывался на панорамное изображение (рис. 67г), получаемое в результате сшивки массива фотоснимков, сделанных в каждой точке сканирования. Итоговая карта углового распределения активности (рис. 67д) качественно демонстрирует расположение точечного гамма-источника с радионуклидом ^{22}Na , что подтверждает работоспособность устройства и эффективность применяемого метода гамма-визуализации.

3.2 Модельный эксперимент

Основной задачей модельного эксперимента была оценка эффективности применения итерационного метода реконструкции гамма-изображения, описанного в подразделе 2.9. Кроме того, важно было оценить, как влияет расположение источников гамма-излучения относительно узлов сетки сканирования на качество восстановления картины распределения активности источников.

Результаты измерений в модельном эксперименте были получены при перемещении детектирующей головки гамма-сканера в ручном режиме для исключения погрешности позиционирования. Для этого использовалась плоская поверхность с нанесенной на нее координатной сеткой, наподобие представленной на рис. 58. Узлы координатной сетки соответствовали положениям оси сканирующей головки при сканировании с шагом 5° .

Поскольку работа сканера осуществлялась в ручном режиме, установка заданного положения оси его антиколлиматора производилась с помощью лазерной указки. Луч лазера наводился на соответствующий узел сетки и выполнялось измерение. Так как сетка наносилась на плоскую поверхность, то при равномерном угловом шаге сканирования расстояние между узлами не было постоянным, поэтому их линейные координаты соответствовали значениям функции $x_l = R \cdot \operatorname{tg}(\varphi_l)$.

Расстояние между плоской поверхностью с координатной сеткой и гамма-сканером было равно $R = 3$ м.

Сканирование выполнялось с угловым шагом 5° по каждой оси. Выбор шага сканирования определяет общее время измерения, т.к. время измерения обратно пропорционально квадрату шага сканирования $t_{\text{tot}} \sim \frac{1}{(\Delta\theta)^2}$. Это означает, что уменьшение шага сканирования в 2 раза увеличивает время измерения в 4 раза. Поэтому при реальных измерениях минимальный шаг сканирования, как правило, не должен быть меньше 5° .

При проведении модельного эксперимента использовались источники излучения с радионуклидом ^{137}Cs с активностями $\sim 6 \cdot 10^7$ Бк и $\sim 3 \cdot 10^7$ Бк.

Общий вид расположения гамма-сканера с антиколлиматором и координатной сетки, по которой проводилось сканирование и на которой располагались источники, показан на рис. 68. Крупным планом показан один из источников.

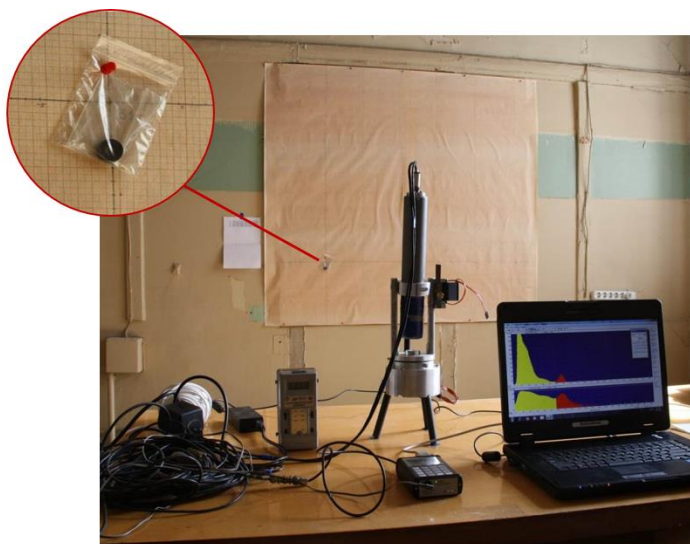


Рисунок 68 – Гамма-сканер с антиколлиматором во время проведения модельных экспериментов. Увеличен один из источников излучения

На первом этапе модельного эксперимента рассматривались точечные источники, расположенные непосредственно в узлах координатной сетки, по которой осуществлялось сканирование (рис. 69, столбец «Расположение источников»). Угловое расстояние между источниками составляло: 5° для измерения № 2; 10° для измерения № 3.

На рис. 69 приведены результаты визуализации точечных источников в виде исходных (столбец «Исходное изображение») и восстановленных итерационным методом (столбец «Восстановленное изображение») гамма-изображений, полученных в результате проведения эксперимента.

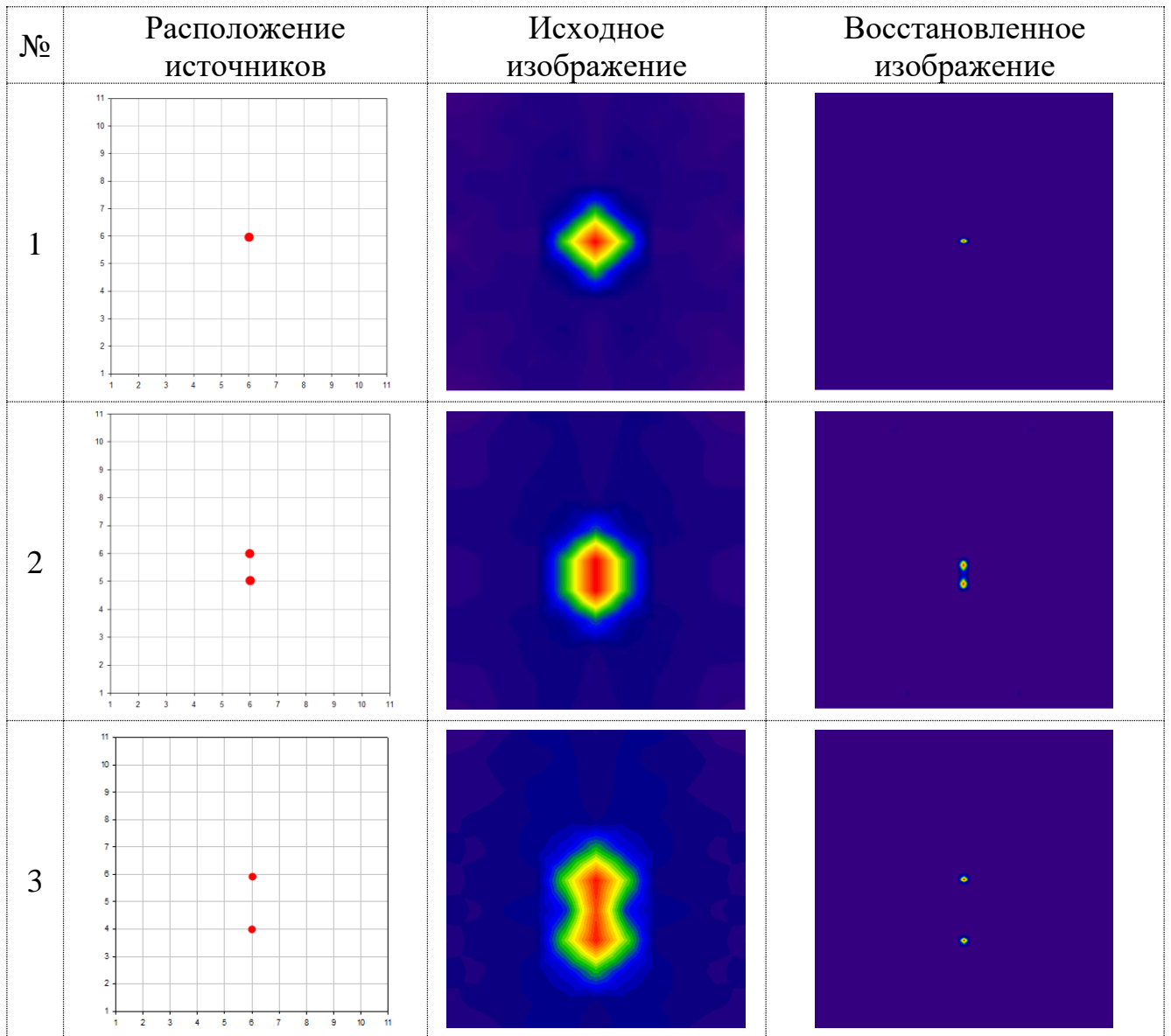


Рисунок 69 – Схемы расположения источников, результаты измерения и восстановления для случая попадания источника в узел сетки сканирования

Как видно из рис. 69, в идеальном случае (расположение источников в узлах сетки) восстановленные изображения имеют очень хорошее разрешение. При этом хорошо восстанавливаются два источника, расположенные друг от друга на угловом расстоянии в 5° .

На втором этапе модельного эксперимента точечные источники размещались вне узлов сетки сканирования. На рис. 70 представлены результаты эксперимента с одним источником, на рис. 71 – с двумя источниками, расположенными вне узлов сетки сканирования.

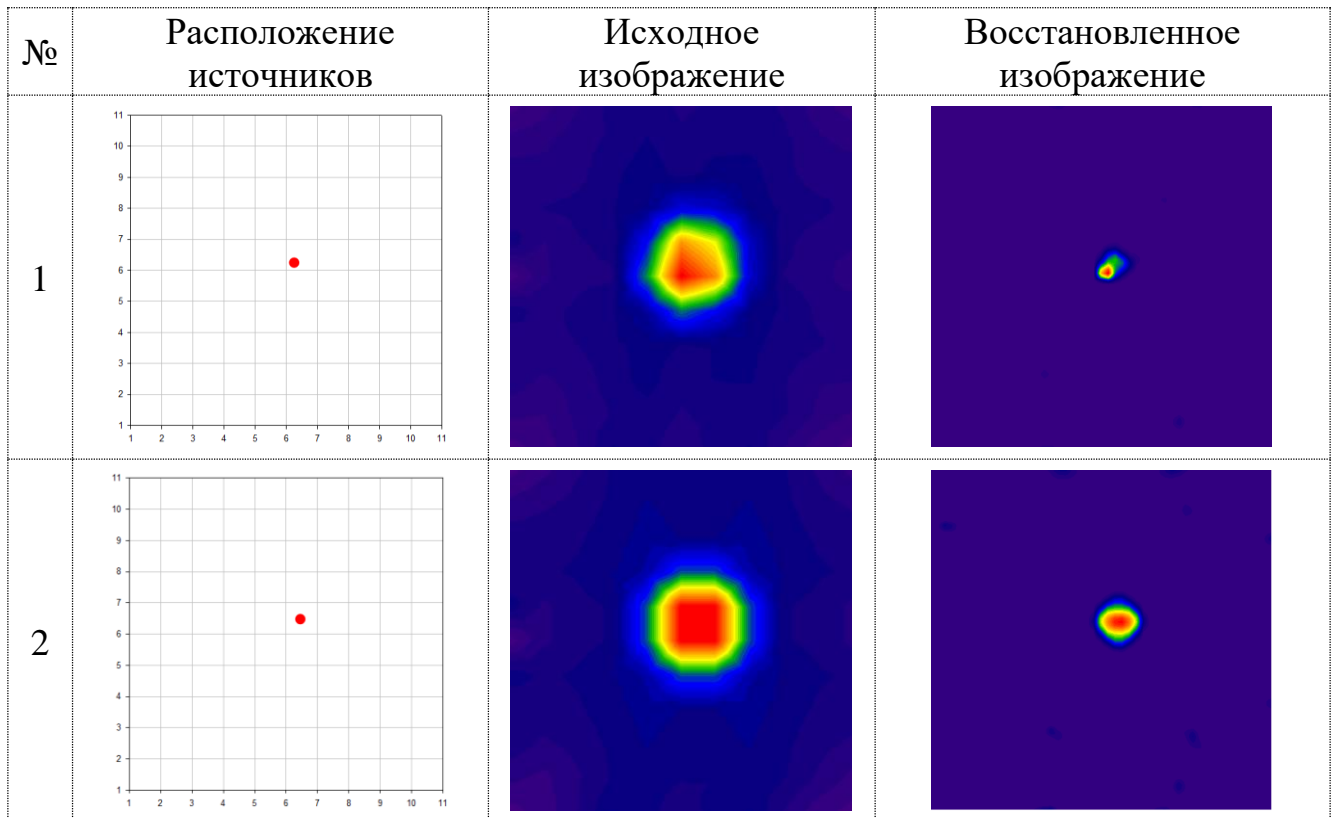


Рисунок 70 – Схемы расположения источников, результаты измерения и восстановления для точечного источника вне узлов сетки сканирования

Результаты эксперимента показывают, что если источник излучения находится не в узле сетки сканирования, то пространственное разрешение заметно ухудшается, что наглядно отражено в результатах, представленных на рис. 70. Тем не менее, результаты восстановления изображения подтверждают работоспособность метода, описанного в подразделе 2.9.

Это утверждение справедливо и для случая визуализации двух точечных источников, расположенных случайным образом вне узлов координатной сетки. На рис. 71 показаны результаты восстановления двух источников с соотношением активностей 2:1, помещенных вне узлов сетки. Угловое расстояние между источниками составляло: 5° для измерения № 1; 10° для измерения № 2; 5° для измерения № 3.

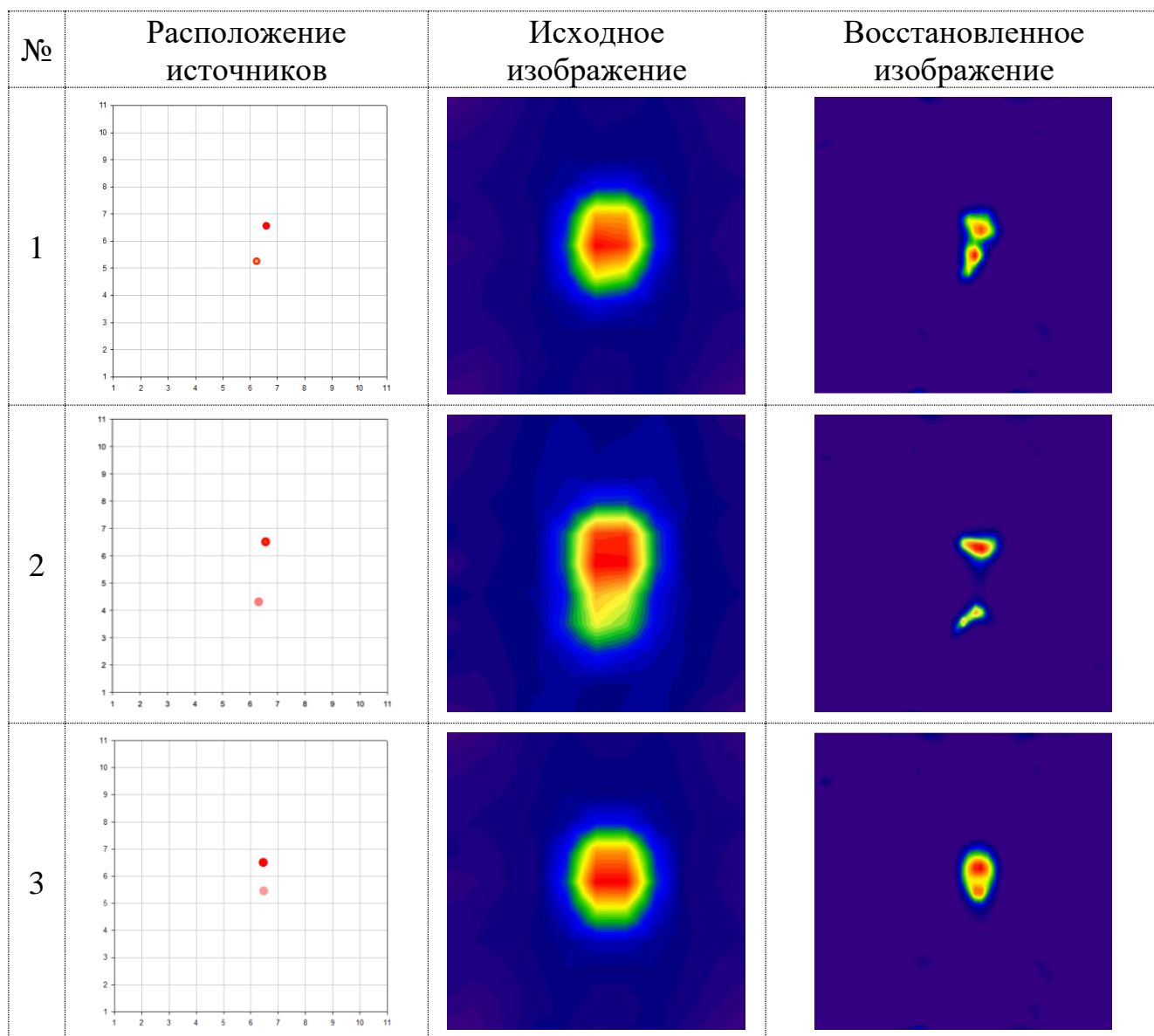


Рисунок 71 – Схемы расположения источников, результаты измерения и восстановления для случая, когда источники не попадают в узлы сетки сканирования

Модельный эксперимент показал возможность применения методики сканирования с применением антиколлиматора, а также эффективность применения итерационного метода для восстановления реальной картины распределения активности.

3.3 Контрольный эксперимент

Контрольные испытания системы гамма-сканера с антиколлиматором в автоматическом режиме проводились для отладки работы прототипа гамма-сканера с антиколлиматором.

Точечный источник с радионуклидом ^{137}Cs активностью порядка 10^5 Бк размещался на расстоянии 50 см от центра детектора.

С помощью изображения, получаемого с видеокамеры, в программе «РТСКАpp» были определены границы области интереса. Измерение «фоновое» спектра (рис. 72) проводилось в таком положении детектирующей головки, что антиколлиматор не попадал в область интереса. По фоновому спектру с помощью программы «eSBS.exe» были определены номера каналов, соответствующие границам пика полного поглощения по энергии 662 кэВ радионуклида ^{137}Cs .

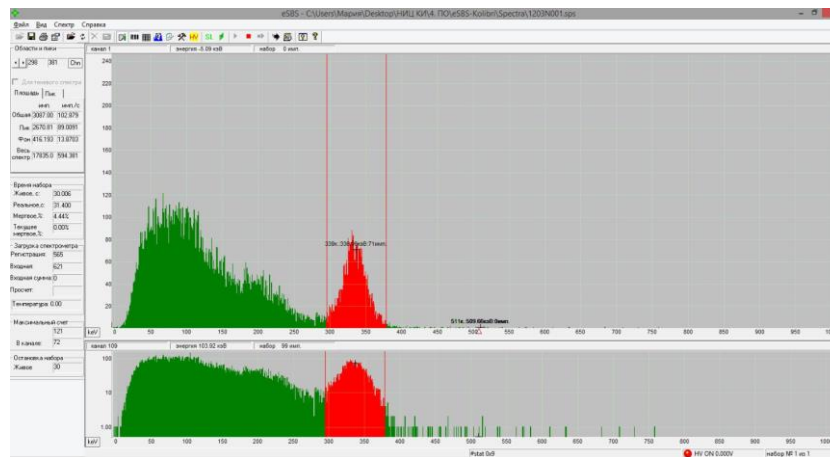


Рисунок 72 – Спектр фонового измерения

Сканирование выполнялось в автоматическом режиме – по команде управляющего компьютера детектирующая головка принимала соответствующее положение, в котором захватывалось и сохранялось фото, соответствующее текущему положению системы, а также формировался полученный спектр с указанием координат и времени измерения. Перемещение детектирующей головки осуществлялось с угловым шагом 5° по каждому направлению. Время измерения в каждой точке сканирования составляло 60 сек.

По результатам измерений был сформирован массив спектров. В каждой точке сканирования определялся вклад источников, расположенных в пределах телесного угла антиколлиматора в текущем положении сканирующей головки. Для этого определялся интеграл скорости счета в пике полного поглощения ^{137}Cs , границы которого определялись по фоновому спектру. Это значение вычиталось из скорости счета в пике полного поглощения фонового спектра. С помощью

информации о координатах каждого измерения, результаты сканирования накладывались на панорамный снимок. Результат наложения карты распределения активностей на панорамное изображение приведен на рис. 73а.

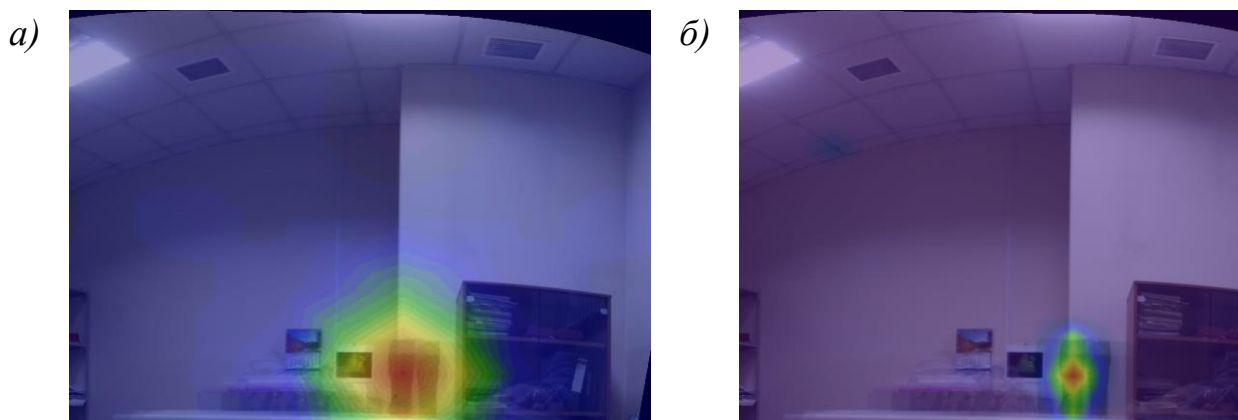


Рисунок 73 – Результат наложения данных, полученных по итогам измерения (а) и восстановления (б), на панорамное изображение объекта

Полученные результаты обрабатывались методом максимального правдоподобия с помощью программы «gl_ant777_exp.for» [123]. Результат наложения восстановленного пространственного распределения источников излучения по результатам измерений гамма-сканером с антиколлиматором на панорамное изображение приведен на рис. 73б.

Контрольный эксперимент показал возможность применения прототипа гамма-сканера с антиколлиматором в лабораторных условиях в автоматическом режиме. Отработан процесс получения гамма-изображения точечного источника. Продемонстрировано успешное восстановление изображения методом максимального правдоподобия.

3.4 Определение точности и воспроизводимости позиционирования

Точность позиционирования сканирующей головки гамма-сканера с антиколлиматором определялась по результатам испытания с применением лазерного указателя направления сканирующей головки. Для этого на расстоянии 130 см от гамма-сканера с антиколлиматором располагалась вертикальная поверхность, на которой отмечалось направление оси сканирующей головки, определяемое по положению луча лазерного указателя. Воспроизводимость позиционирования определялась повторным сканированием и определением

отклонения позиции от первого измерения, соответствующей точке с соответствующими координатами.

Сканирование выполнялось в автоматическом режиме. Измерения проводились для двух значений шага сканирования – 2° (первое измерение) и 5° (второе измерение), поскольку в реальных условиях эксплуатации оптимальным шагом при сканировании является 5° , а минимальным – 2° .

Точность позиционирования x , град., определялась как максимальное позиционное отклонение по каждой оси:

$$x = \max \left| \arctg \left(\frac{P_3 - P_d}{L} \right) \right| \quad (17)$$

где P_d – действительная позиция, мм;

P_3 – заданная позиция, мм;

L – расстояние между сканером и координатной плоскостью, мм.

Поскольку положения сканирующей головки отмечались на плоской поверхности, угловые координаты определялись из соотношения $x_l = R \cdot tg(\varphi_l)$. Прежде всего определялась «опорная» точка в положении, когда ось сканирующей головки направлена перпендикулярно вертикальной поверхности, на которой отмечалась координатная сетка (на рис. 74 обозначена красным). Далее расчетным путем определялись теоретические значения расстояний между соседними точками P_3 для заданного значения угла α ($\alpha = 2^\circ$ для первого сканирования и $\alpha = 5^\circ$ – для второго). Действительные расстояния P_d определялись с помощью штангенциркуля.

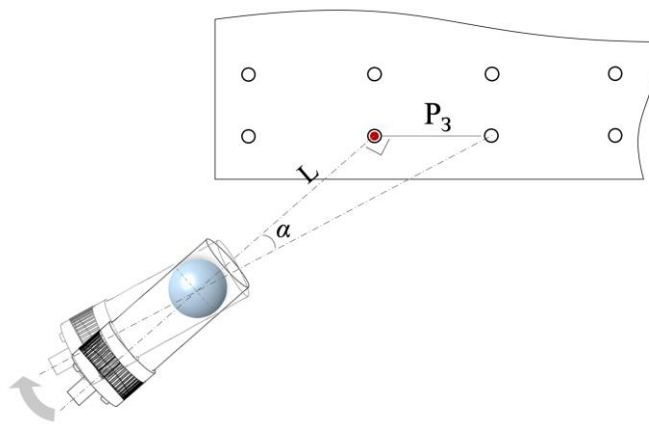


Рисунок 74 – Схематическое представление процесса определения точности позиционирования

По результатам двукратных сканирований получены следующие значения:

- для шага 2° точность горизонтального позиционирования составила $1,1^\circ$;
- для шага 2° точность вертикального позиционирования составила $0,9^\circ$;
- для шага 5° точность горизонтального позиционирования составила $1,3^\circ$;
- для шага 5° точность вертикального позиционирования составила $1,3^\circ$.

Таким образом, точность позиционирования не превышает $1,5^\circ$.

Воспроизводимость позиционирования определялась как интервальная оценка разности между положениями сканирующей головки в двух сканированиях. Повторное сканирование выполнялось после полной перезагрузки устройства и отключения питания. На рис. 75 приведены графики зависимости повторяемости отклонения от первого сканирования для экспериментов с шагом 2° (рис. 75а) и 5° (рис. 75б). По горизонтали даны значения углов отклонения от первого сканирования, град.; по вертикали – относительное количество точек с отклонением, соответствующем указанному углу, %.

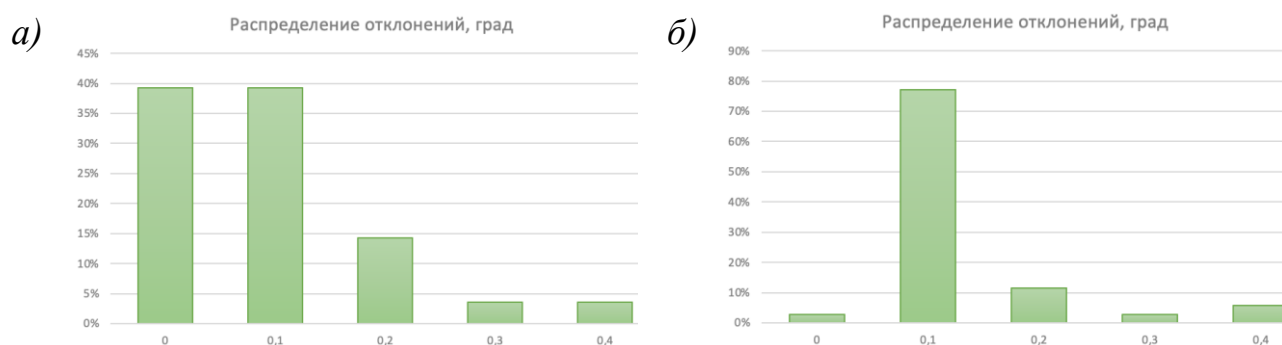


Рисунок 75 – Воспроизводимость позиционирования. Распределение отклонений при шаге сканирования 2° (а) и 5° (б)

Результаты показывают стабильность работы поворотного устройства как при сканировании с шагом 2° , так и при шаге 5° . В обоих случаях отклонение от первоначальной позиции не превышает $0,4^\circ$.

3.5 Определение зависимости счетной характеристики от МЭД

Для определения максимально возможного значения мощности дозы, при котором может выполняться гамма-визуализация с помощью гамма-сканера с антиколлиматором, был проведен эксперимент по снятию зависимости загрузки детектора от МЭД.

В процессе испытания изменялось расстояние между детектирующей головкой и точечным источником с радионуклидом ^{137}Cs для изменения значения мощности дозы в точке расположения детектора. Значение МЭД рассчитывалось из активности источника и расстояния между источником и детектором, а также контролировалось с помощью контрольного дозиметра. В каждой точке снимался аппаратный спектр.

Значение МЭД \dot{X} , мЗв/ч, рассчитывалась по формуле

$$\dot{X} = K_{\gamma} \cdot \frac{A}{R^2} \quad (18)$$

где K_{γ} – гамма-постоянная для радионуклида ^{137}Cs [44]

A – активность источника гамма-излучения, Бк

R – расстояние от источника гамма-излучения до детектора, м

Фактическое значение МЭД контролировалось с помощью дозиметра. На рис. 76 приведены графики зависимости МЭД от расстояния, полученные расчетным путем (зеленый) и экспериментально (желтый).

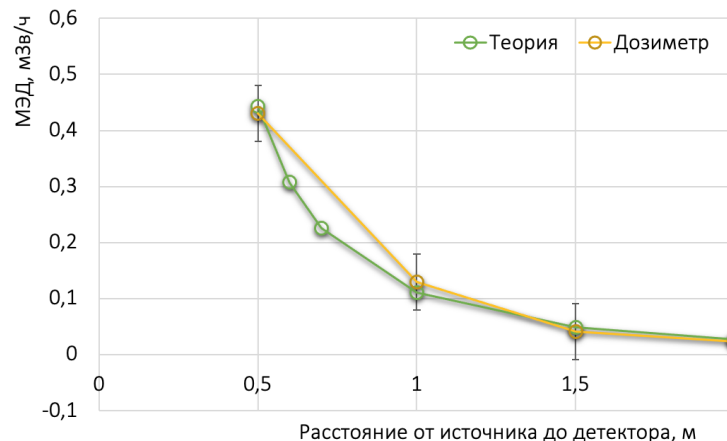


Рисунок 76 – Зависимость МЭД от расстояния между точечным источником с радионуклидом ^{137}Cs и детектором

Для оценки максимального значения мощности дозы в точке размещения гамма-сканера с антиколлиматором при выполнении обследования, в каждом спектре определялись мертвое время, интегральная скорость счета во всем спектре и скорость счета в пике полного поглощения радионуклида ^{137}Cs . В таблице 8 приведены результаты измерений.

Таблица 8 – Результаты измерений МЭД

Расстояние, м	МЭД, мЗв/ч		Мертвое	Скорость счета, имп/с	
	ф-ла (18)	дозиметр		в пике	в спектре
0,5	0,443	0,43	53%	2 065	82 540
0,6	0,307	—	36%	3 245	61 054
0,7	0,226	—	26%	2 705	46 452
1,0	0,111	0,13	17%	1 918	24 826
1,5	0,049	0,04	10%	931	11 704
2,0	0,028	0,02	7%	577	6 810

На рис. 77, 78 приведены графики полученных результатов.

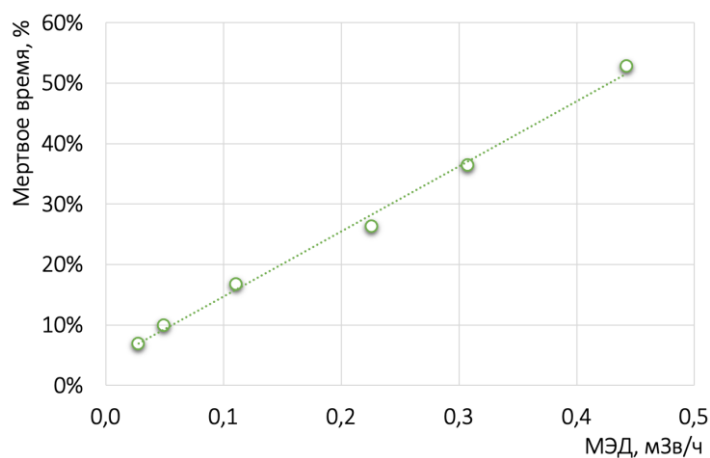


Рисунок 77 – Зависимость относительного мертвого времени от МЭД в точке размещения гамма-сканера с антиколлиматором

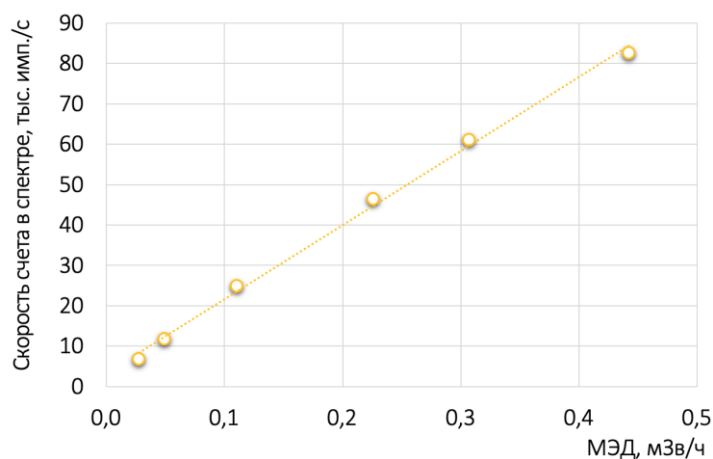


Рисунок 78 – Зависимость интегральной скорости счета в аппаратурном спектре от МЭД в точке размещения гамма-сканера с антиколлиматором

Во время проведения испытания было обнаружено смещение пика полного поглощения в аппаратурном спектре при увеличении мощности дозы (рис. 79).



Рисунок 79

Испытания гамма-сканера с антиколлиматором показывают возможность работы в условиях максимальной мощности дозы в точке размещения устройства до значений порядка 0,1 мЗв/ч. При более высоких МЭД наблюдается смещение пика полного поглощения в область более низких энергий (рис. 79), а относительное мертвое время превышает 20 % от реального.

Чувствительность гамма-сканера с антиколлиматором к МЭД определялась как отношение числа зарегистрированных в пике полного поглощения радионуклида ^{137}Cs импульсов к фактическому значению МЭД в точке размещения детектора и составила $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}/(\text{мЗв/ч})$.

3.6 Влияние фоновой боковой подсветки

Минимальная визуализируемая активность зависит от множества параметров, таких как время экспозиции, шаг сканирования и, что очень важно, от влияния фонового (бокового) излучения.

Одним из недостатков способа локализации источников излучения с помощью сканера с антиколлиматором является влияние боковой подсветки источников, расположенных вне области тени антиколлиматора. В отличие от классической схемы сканера с защитой, которая существенно снижает фоновое поле излучения, в предложенной схеме измерения полезный сигнал нужно выделять на фоне достаточно большой подложки. Поэтому возникает вопрос: до какого уровня мощности дозы боковой подсветки еще возможно получение изображения отдельно выделенного источника? Этот вопрос был рассмотрен на примере излучения источников радионуклида ^{137}Cs .

Для оценки допустимых значений мощности дозы боковой подсветки в пуассоновском приближении было получено выражение:

$$\dot{H}_{sb} \leq \frac{t \cdot r_d^2 \varepsilon}{8K_\gamma} \left[\frac{(1 - \tau)}{k} \right]^2 \dot{H}_{sm}^2 - \frac{(1 - \tau^2)}{2} \dot{H}_{sm} \quad (19)$$

- где \dot{H}_{sb} – мощность дозы, создаваемая источниками боковой подсветки в месте расположения детектирующей головки сканера
 \dot{H}_{sm} – мощность дозы источника визуализации
 t – время экспозиции
 r_d – радиус сцинтиллятора
 ε – эффективность регистрации детектора
 $1/\tau$ – величина ослабления антиколлиматором гамма-квантов ^{137}Cs
 k – параметр надежности ($k = 3$ для доверительной вероятности 0,999)
 K_γ – гамма-постоянная для радионуклида ^{137}Cs [44]

Поскольку работа сканера с антиколлиматором возможна в условиях максимальной мощности дозы в точке размещения до 0,1 мЗв/ч (см. подраздел 3.5), должно выполняться условие

$$\dot{H}_{sb} + \dot{H}_{sm} \leq 0,1 \text{ мЗв/ч} \quad (20)$$

Формула (19) вместе с условием (20) определяют область возможных значений мощности дозы боковой фоновой подсветки \dot{H}_{sb} , при которой источник, создающий мощность дозы \dot{H}_{sm} , будет обнаружен с доверительной вероятностью 0,999. Эта область в графическом виде представлена на рис. 80.

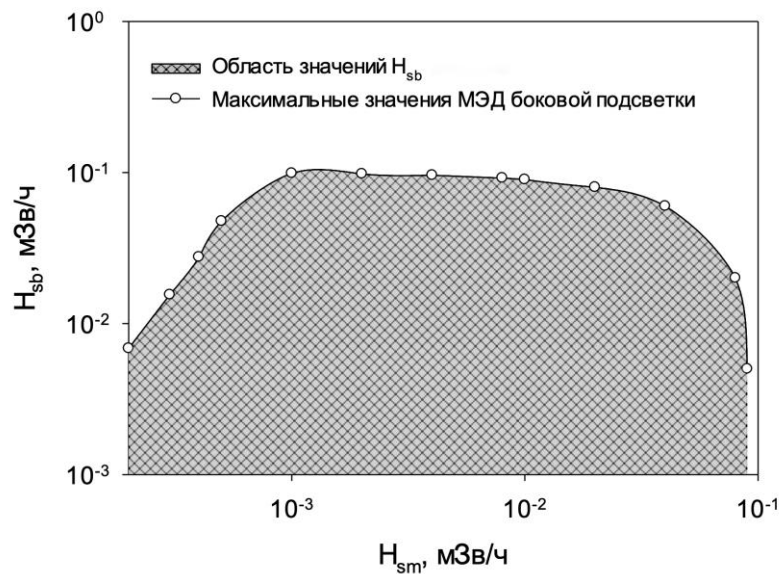


Рисунок 80 – Область допустимых значений мощности дозы боковой фоновой подсветки. Заштрихованное поле определяет область возможных значений мощности дозы боковой фоновой подсветки при времени экспозиции $t = 30$ с

Эти данные удобно представить в относительном виде, т.е. как отношение $\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm}$, которое указывает на то, во сколько раз боковая подсветка может превышать мощность дозы, создаваемую визуализируемым источником. Эта информация показана на рис. 81.

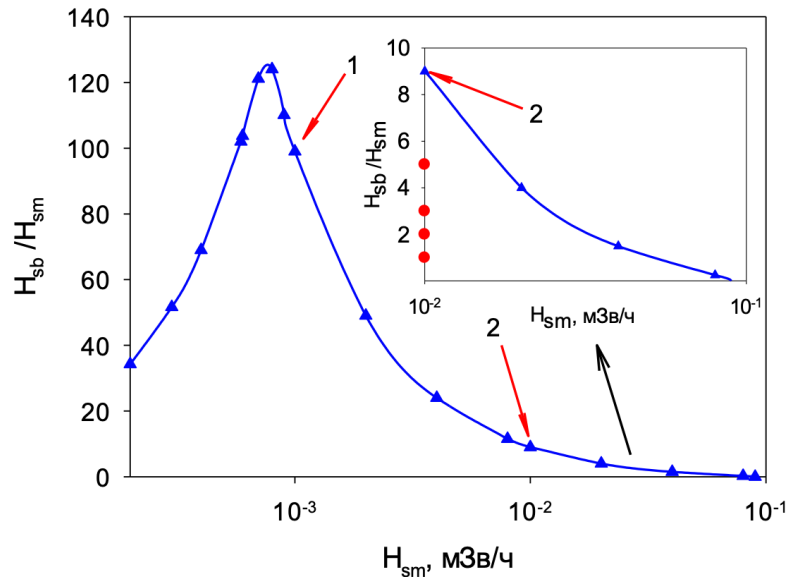


Рисунок 81 – Зависимость допустимой величины превышения боковой подсветки от мощности дозы, создаваемой визуализируемым источником. В правом верхнем углу на крупном плане красными точками отмечены экспериментальные значения экспериментально подтвержденных величин. Красными стрелками (поз. 1) и (поз. 2) указаны предельные случаи, которые были подтверждены в прямых модельных расчетах

На первый взгляд, представленная на рис. 80 информация противоречит здравому смыслу, а именно: чем больше мощность дозы, создаваемая источником ($\dot{H}_{sm} \geq 10^{-2}$ мЗв/ч), тем меньше уровни боковой подсветки, при которых возможна его визуализация. Однако этот факт обусловлен требованием выполнения условия (20), обусловленного максимально допустимой нагрузкой спектрометрического детектора.

Для оценки влияния фонового излучения на работу гамма-сканера с антиколлиматором была проведена серия экспериментов с двумя точечными источниками с радионуклидом ^{137}Cs .

Один источник (№ 1 на рис. 82) размещался в пределах сканируемой области интереса, а второй источник (№ 2 на рис. 82) формировал фоновую подсветку. В

процессе проведения эксперимента для изменения значения создаваемой мощности дозы изменялось расстояние между источником № 2 и гамма-сканером.

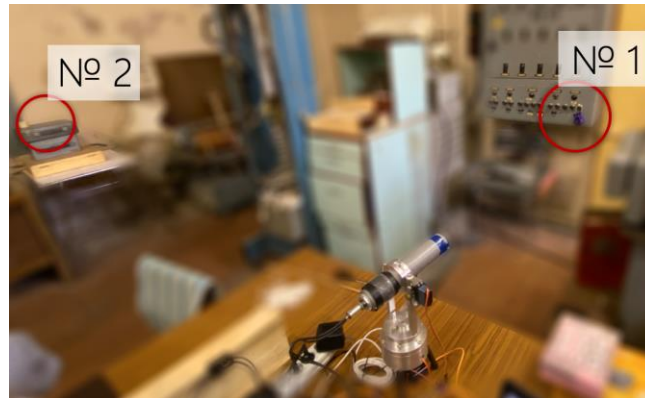


Рисунок 82 – Фото эксперимента по изучению влияния фонового излучения на разрешающую способность гамма-сканера с антиколлиматором

Мощность дозы \dot{H}_{sm} , создаваемая источником (№ 1) в точке размещения гамма-сканера, составляла 0,01 мЗв/ч. Фоновая мощность дозы \dot{H}_{sb} , создаваемая вторым источником (№ 2), в точке размещения гамма-сканера изменялась от 0,01 мЗв/ч до 0,05 мЗв/ч. На рис. 81 соответствующие этим условиям эксперимента значения $\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm}$ отмечены красными точками на крупном плане. Как видно из этого рисунка, значения $\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm}$ в эксперименте удовлетворяют условиям (19) и (20), поэтому при получении изображения источника №1 не возникло проблем (см. рис. 83).

При реализации этого эксперимента область сканирования представляла собой квадрат $20^\circ \times 20^\circ$. Сканирование выполнялось в автоматическом режиме с шагом 4° по каждой оси.

На рис. 83 приведены результаты серии экспериментов. Измерению на рис. 83а соответствует фоновая мощность дозы \dot{H}_{sb} 0,01 мЗв/ч; измерению на рис. 83б – 0,02 мЗв/ч; измерению на рис. 83в – 0,03 мЗв/ч; измерению на рис. 83г – св. 0,05 мЗв/ч.

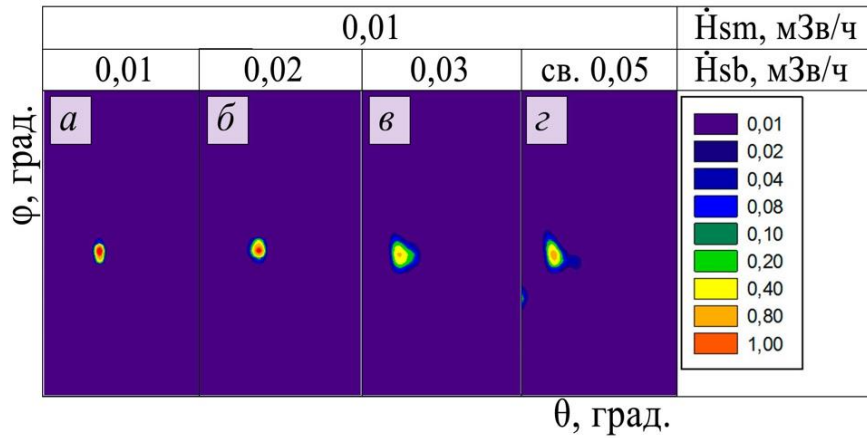


Рисунок 83 – Влияние излучения подсветки на качество восстановленного гамма-изображения точечного источника

Эксперимент показывает не только возможность получения изображения источника №1, но и подтверждает высокую разрешающую способность гамма-сканера в условиях высоких фоновых активностей. С увеличением мощности дозы боковой подсветки в некоторой степени происходит размытие изображения точечного источника гамма-излучения, впрочем, интегральная интенсивность области расположения источника сохраняется во всех рассмотренных случаях. Также в случаях, приведенных на рис. 83*в* и 83*г*, заметно незначительное смещение расположения изображения точечного источника в сторону боковой подсветки.

Однако отношение $\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm}$ в эксперименте не достигало предельно допустимых значений. Как следует из данных рис. 81, изображение источника, создающего мощность дозы 10^{-2} мЗв/ч, может быть восстановлено даже при фоновой подсветке в ~ 10 раз большей мощности дозы (до $\sim 10^{-1}$ мЗв/ч). Этот случай (поз. 2 на рис. 81) был воспроизведен путем моделирования методом Монте-Карло. Результат восстановленного изображения такого источника при предельном фоновом суммарном значении мощности дозы 10^{-1} мЗв/ч представлен на рис. 84*а*. Как видно из рис. 84*а*, проблема восстановления изображения отсутствует, но, согласно требованиям условия (20), дальнейшее увеличение фоновой подсветки невозможно из-за превышения предельно допустимого уровня мощности дозы на детекторе.

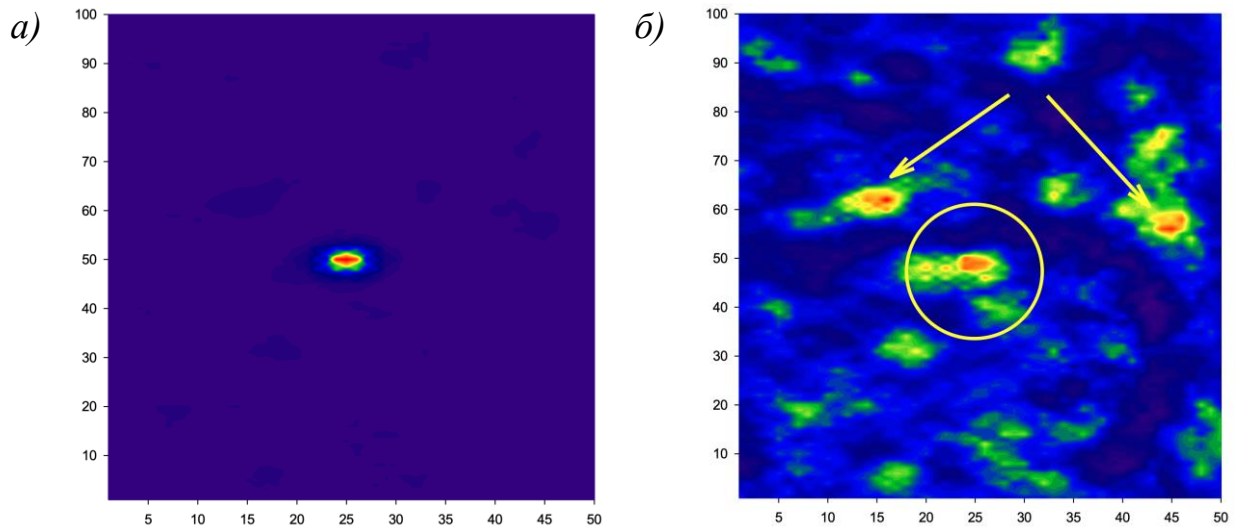


Рисунок 84 – Восстановленные изображения точечных источников, рассчитанных по математической модели сканера. Мощность дозы, создаваемой источником на детекторе 10^{-2} мЗв/ч при фоновой подсветке 10^{-1} мЗв/ч ($\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm} = 10$) (а), и (б) – 10^{-3} мЗв/ч при такой же фоновой подсветке ($\dot{H}_{sb}/\dot{H}_{sm} = 100$)

Но больший интерес представлял другой предельный случай, когда восстанавливаемый источник создавал мощность дозы 10^{-3} мЗв/ч, а фоновая подсветка превышала этот уровень почти в 100 раз (поз. 1 на рис. 81). Результаты моделирования и восстановления изображения для этого случая показаны на рис. 84б. Здесь уже наблюдается заметное ухудшение изображения точечного источника (отмечено в круге), т.к. появляются существенные артефакты (обозначены стрелками).

Следует отметить, что формула (19) предназначена для оценки «сверху» значения предельного фонового излучения, т.к. получена для случая в предположении идеального детектора с изотропной чувствительностью. Несмотря на то, что сцинтиллятор детектора имел сферическую форму, он был помещен в цилиндрический корпус, что приводит к небольшой анизотропии чувствительности детектора, а это, в свою очередь, влияет на оценку предельного фонового уровня излучения. Тем не менее, по результатам экспериментов и моделирования можно утверждать, что получение изображения источника возможно при 10-ти кратных и более высоких уровнях боковой подсветки.

Формально этот случай (поз. 1 на рис. 81) удовлетворяет условиям (19) и (20), но качество получаемых изображений уже на пределе возможностей идентификации. Тем не менее, результаты моделирования указывают на то, что по формулам (19) и (20) возможна оценка предельных условий измерений для сканера с антиколлиматором.

Результаты эксперимента подтверждают эффективность применяемой методики визуализации в случае пятикратного превышения поля излучения фоновой боковой подсветки относительно определяемого источника, а результаты модельных расчетов указывают, что в ряде случаев и более кратные превышения тоже возможны.

3.7 Мультинуклидное загрязнение

По результатам сканирования может быть сформирована дозовая карта, демонстрирующая вклад в мощность дозы в точке расположения сканера, вносимый источниками, расположенными в области сканирования. Такая картина является безусловно полезным инструментом, но не отображает нуклидный состав загрязнения.

Для идентификации нуклидного состава загрязнения по фоновому спектру выполняется поиск источников, присутствующих в обследуемом помещении (точнее тех источников, излучение от которых регистрируется в точке размещения сканера). Затем для каждого обнаруженного источника формируется гамма-изображение, представляющее собой карту распределения активности соответствующего радионуклида. Такое гамма-изображение накладывается на панорамный снимок объекта.

Возможность применения гамма-сканера с антиколлиматором для визуализации загрязнения различного радионуклидного состава демонстрирует эксперимент по визуализации источников ^{137}Cs и ^{60}Co [19]. В области интереса размещались точечный источник с радионуклидом ^{60}Co и протяженный источник с радионуклидом ^{137}Cs сложной Г-образной формы (рис. 85).

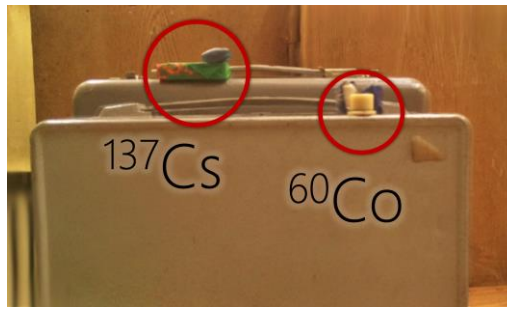


Рисунок 85 – Расположение источников во время эксперимента

С помощью гамма-сканера с антиколлиматором было выполнено сканирование области, в которой располагались источники. В каждой точке области сканирования снимались спектры гамма-излучения (рис. 86).



Рисунок 86 – Спектр радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co

Сканирование выполнялось в автоматическом режиме с шагом 4° по каждому направлению. Область сканирования составляла 40° по горизонтали и 32° по вертикали.

По данным различных спектральных областей аппаратурных спектров отдельно получены изображения источников ^{137}Cs и ^{60}Co . Процедура восстановления изображений источников результатам сканирования осуществлялась методом максимального правдоподобия. На рис. 87 показаны результаты наложения гамма-изображений, полученных по результатам измерения, на панорамное фото обследуемого объекта.

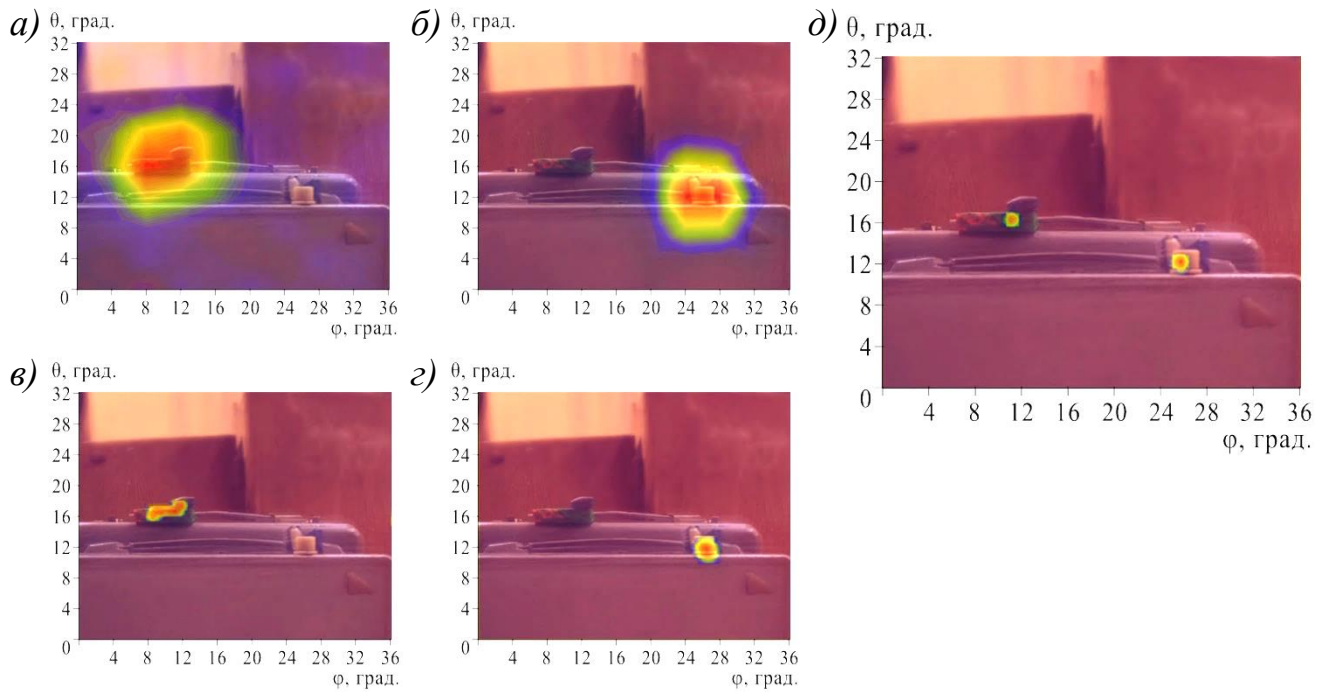


Рисунок 87 – Результаты сканирования и восстановления гамма-изображения радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co с помощью гамма-сканера с антиколлиматором

Картина распределения дифференциальной по телесному углу мощности дозы в области сканирования показана на рис. 87д. Такая дозовая карта демонстрирует наличие в области сканирования двух источников. Поскольку на спектре (рис. 86) определяются пики источников ^{137}Cs и ^{60}Co , следует рассмотреть каждый из них по отдельности.

На рис. 87а показаны результаты наложения данных о распределении активности радионуклида ^{137}Cs в области сканирования на снимок объекта. Визуализация данных, полученных в результате восстановления итерационным методом (рис. 87в), позволяет точнее локализовать источник ^{137}Cs .

Гамма-изображение точечного источника ^{60}Co , полученное по результатам сканирования, приведено на рис. 87б. Результат восстановления итерационным методом распределения активности ^{60}Co в области сканирования показан на рис. 87г.

По итогам обработки экспериментальных данных сформирована дозовая карта, а для каждого радионуклида получены восстановленные изображения источников, которые не только определяют их радионуклидный состав и расположение, но также различают сложную форму источника ^{137}Cs .

3.8 Оценка углового разрешения

Экспериментально угловое разрешение гамма-сканера с антиколлиматором определялось с помощью двух точечных источников ионизирующего излучения с радионуклидом ^{137}Cs (рис. 88). Активность источника, размещенного справа (№ 2), в три раза меньше, чем активность левого (№ 1).



Рисунок 88 – Фото эксперимента по определению углового разрешения гамма-сканера с антиколлиматором

Источники устанавливались на вертикальной поверхности на расстоянии 2 м от гамма-сканера с антиколлиматором на определенном угловом расстоянии друг от друга. В процессе эксперимента угловое расстояние между источниками изменялось и устанавливалось равным $5,3^\circ$, $7,1^\circ$, $8,5^\circ$, 11° и 14° .

Сканирование выполнялось в автоматическом режиме с шагом 5° в каждом направлении. Поле сканирования представляло собой прямоугольную область высотой 20° и шириной 35° . Дополнительно было выполнено фоновое измерение в вертикальном положении детектирующей головки. Результаты измерения обрабатывались итерационным методом с помощью программы восстановления, после чего накладывались на панорамное изображение обследуемого объекта (рис. 89). Мощность дозы в точке размещения гамма-сканера составляла порядка $0,04$ мЗв/ч.

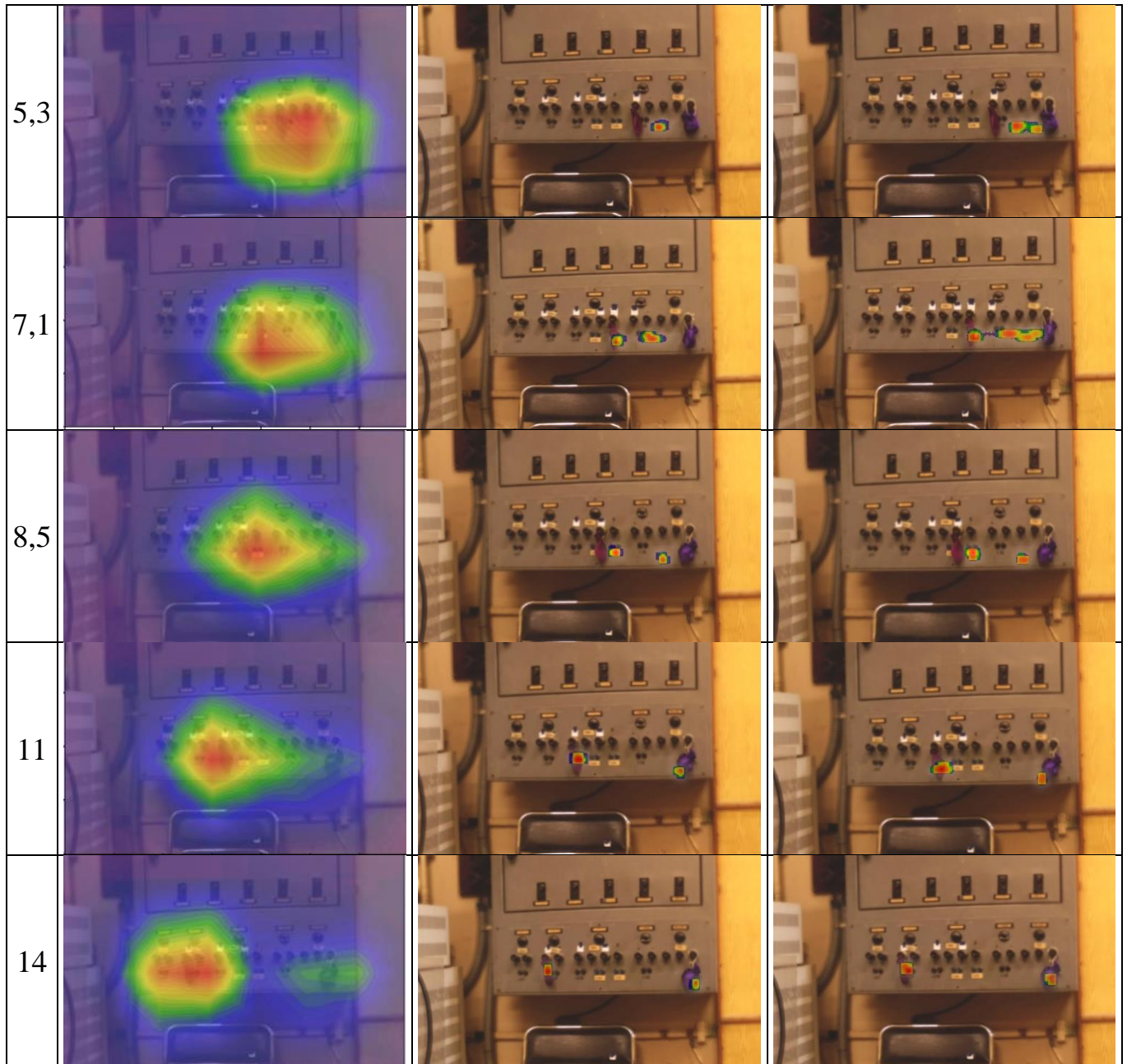


Рисунок 89 – Результаты эксперимента по определению углового разрешения

На рис. 89 в первом столбце приведены значения углового расстояния между рассматриваемыми источниками. Во втором столбце приведены результаты наложения экспериментальных данных, полученных по результатам сканирования, на фотоснимок области интереса для каждого значения углового расстояния между источниками. В третьем столбце приведены результаты восстановленных изображений источников ^{137}Cs в области сканирования. В четвертом – вклад дифференциальной мощности дозы различных источников излучения, расположенных в области интереса.

Точечные источники, расположенные на угловом расстоянии 14° , хорошо различимы даже по результатам исходных измерений (до реконструкции).

Два точечных источника, расположенные на угловом расстоянии 11° , однозначно разрешаются системой после выполнения процедуры восстановления. Положение источников гамма-излучения на восстановленном изображении соответствует их фактическому расположению в пространстве.

При размещении источников гамма-излучения на угловом расстоянии $8,5^\circ$ заметно некоторое размытие и незначительное смещение, однако после процедуры восстановления два точечных источника разрешаются в хорошем качестве, а соотношение значений интегральных интенсивностей восстановленных источников соответствует фактическому соотношению активностей источников.

При угловом расстоянии между двумя точечными источниками в $7,1^\circ$ они разрешаются как два отдельных источника, однако можно заметить, что интенсивность более активного источника ниже, а положение менее активного источника на гамма-изображении смещено в сторону более активного источника.

При сканировании в автоматическом режиме с шагом 5° и восстановлении поверхностной активности два источника, расположенные на угловом расстоянии $5,3^\circ$, не разрешаются – визуализируется один точечный источник. Однако восстановление дозовой составляющей позволяет выполнить реконструкцию двух точечных источников более точно – как видно из рис. 90 при таком способе восстановления хорошо различимы оба точечных источника.

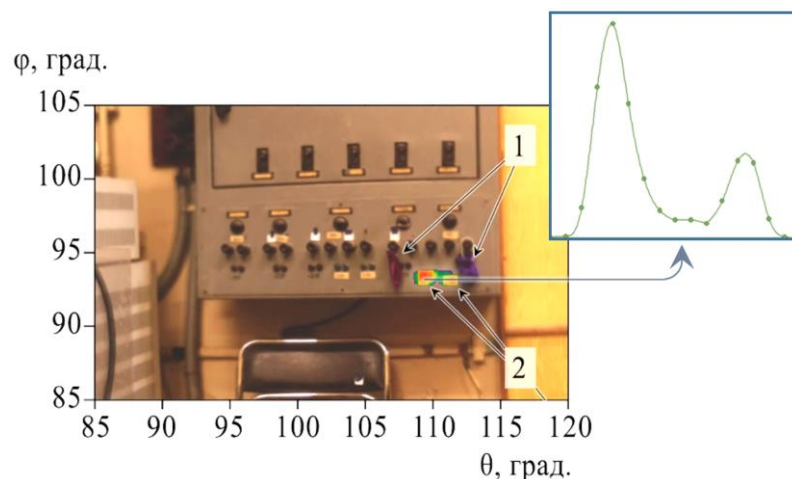


Рисунок 90 – Изображение источников, расположенных на угловом расстоянии $5,3$ град, через понятие дифференциальной мощности дозы. Дополнительно вынесен профиль гамма-изображения

Важно отметить, что качество восстановления (и в особенности угловое разрешение системы) зависит от множества факторов: шаг сканирования, время экспозиции, количество выполняемых в процессе реконструкции итераций и др.

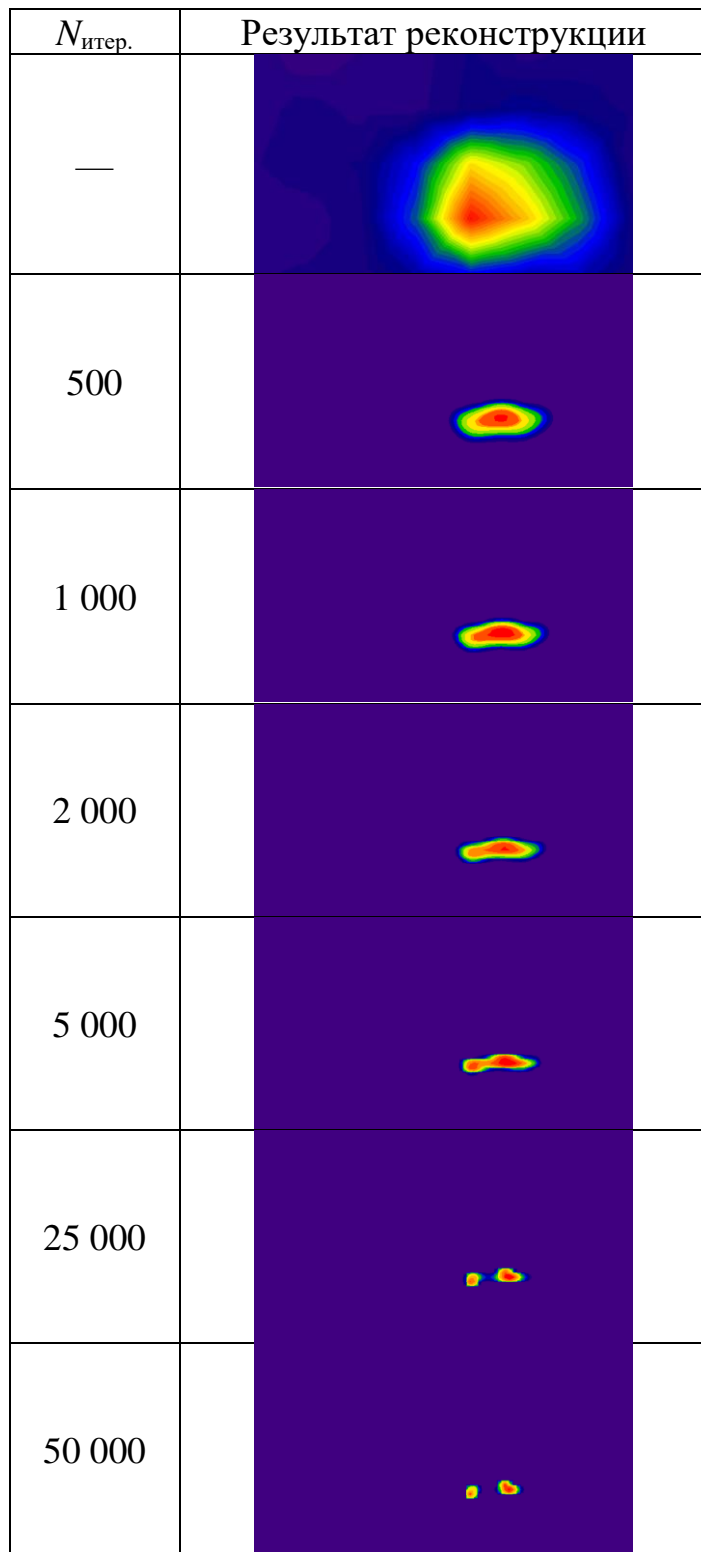


Рисунок 91

На рис. 91 показана зависимость качества гамма-реконструкции распределения активности радионуклида ^{137}Cs от числа выполняемых в процессе восстановления итераций $N_{\text{итер.}}$ для случая двух точечных источников, расположенных на угловом расстоянии $7,1^\circ$. Как можно наблюдать, с увеличением количества итераций улучшается качество реконструкции и, если процедура восстановления в 1 000 итераций позволяет только более точно локализовать область загрязнения, итерационный процесс с 25 000 итераций позволяет восстановить два отдельно расположенных точечных источника.

Функция рассеяния точки (или функция профиля изображения точечного источника) для восстановленного изображения точечного источника хорошо демонстрирует зависимость результатов восстановления от количества выполняемых итераций.

На рисунке 92 приведены функции рассеяния точки, полученные на основании экспериментальных данных отдельного точечного источника, при их восстановлении в зависимости от числа итераций от 100 до 10 000.

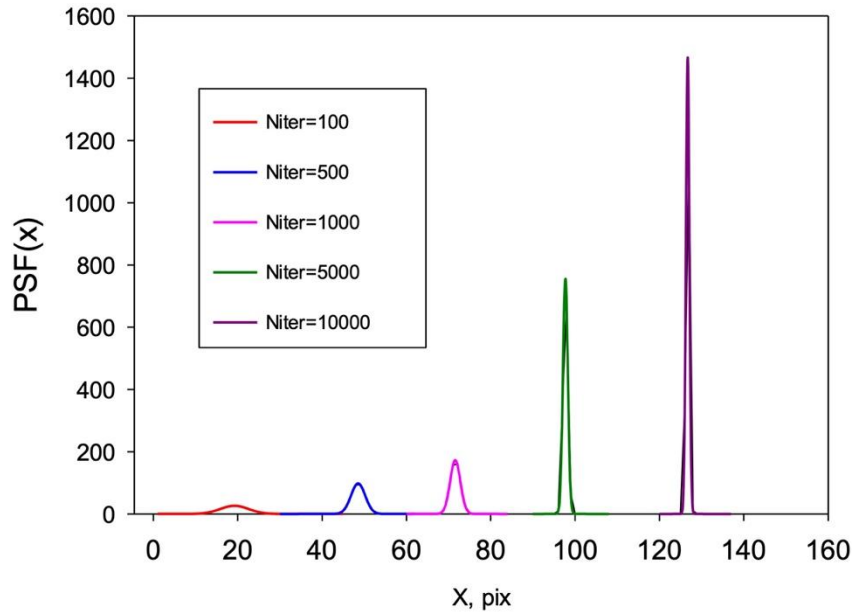


Рисунок 92 – Профили изображений точечного источника (функции рассеяния точки), полученные при разном количестве итераций процесса восстановления

Используя функцию рассеяния точки (*англ. Point Spread Function, PSF*), аппроксимированную функцией Гаусса, для каждого случая можно определить частотно-контрастную характеристику (*англ. Modulation Transfer Function, MTF*) по формуле:

$$MTF(\nu) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} PSF(x) \cos(2\pi\nu x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} PSF(x) dx} \quad (21)$$

где $MTF(\nu)$ – частотно-контрастная характеристика,
 ν – пространственная (угловая) частота,
 $PSF(x)$ – функция рассеяния точки.

Ниже приведена зависимость ЧКХ от числа итераций при восстановлении изображений, полученная по экспериментальным данным (данным изображения отдельного точечного источника).

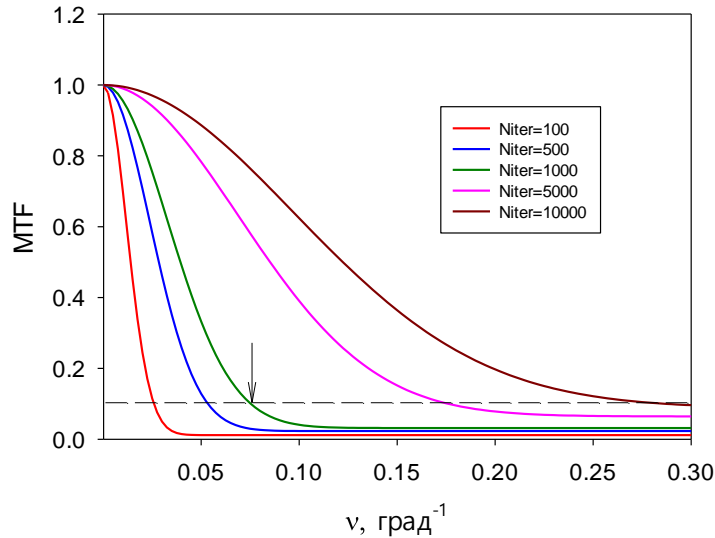


Рисунок 93 – Частотно-контрастные характеристики для изображений точечных источников в зависимости от числа итераций процесса восстановления

Точка пересечения кривой $MTF(v)$ с уровнем контраста изображения 10 % (т.е. значением v при котором $MTF(v) = 0,1$) определяет угловую частоту, обратная величина которой дает значение углового разрешения, выраженное в градусах. Таким образом, это значение определяет угловое расстояние между двумя точечными источниками, при котором на изображении они различаются как отдельные точки. Контраст изображения в 10% – общепринятая (в радиационной дефектоскопии, оптике) величина, позволяющая говорить о возможности выявления двух точечных источников. В таблице 9 даны значения углового разрешения для частотно-контрастных характеристик, показанных на рис. 93.

Таблица 9 – Угловое разрешение для точечных источников при различных значениях числа итераций процесса восстановления

Число итераций, N_{iter}	Угловое разрешение (v^{-1})
100	39,2°
500	19,1°
1 000	13,5°
5 000	5,7°
10 000	3,6°

Приведенные в таблице 9 данные, полученные через $MTF(v)$, характеризуют угловое разрешение, которое определяется путем наложения изображений

отдельных точечных источников, расположенных на некотором угловом расстоянии с пространственной частотой ν . Это идеальный случай. Однако на процесс восстановления заметно влияет наличие соседних источников, т.е. при восстановлении изображение отдельного источника будет отличаться от его изображения, полученного в окружении соседних источников. Поэтому данные таблицы 9 являются оценочными. Тем не менее, прямой эксперимент с двумя точечными источниками (см. рисунок 90) показал, что реально можно различить эти источники при угловом расстоянии порядка 5° . Полученные результаты приводят к заключению о том, что применение процедуры восстановления, при шаге сканирования 5° , позволяет визуализировать два точечных источника, расположенных на угловом расстоянии не менее 5° .

3.9 Полевые измерения

Полевые измерения гамма-сканером с антиколлиматором проводились в одном из помещений здания с системой очистки воды первого контура реактора РФТ от радионуклида ^{137}Cs .

Обследование включало сканирование двух областей интереса. Первое сканирование проводилось в области интереса $70^\circ \times 80^\circ$ и временем экспозиции в каждой точке 30 с, второе – в области интереса $50^\circ \times 35^\circ$ и временем экспозиции 60 с. Сканирование выполнялось в автоматическом режиме с шагом 5° по каждой оси.

Мощность дозы в точке размещения гамма-сканера с антиколлиматором составляла 0,03 мЗв/ч.

Сканирование осуществлялось в условиях достаточно жесткого влияния боковой фоновой подсветки, т.к. помещение здания очистки содержало довольно сложную систему трубопроводов, со всех сторон окружающих место расположения гамма-сканера. Это подтверждают данные рис. 94, где представлены реальные аппаратурные спектры фонового излучения и одного из измерений, произведенного в процессе сканирования.

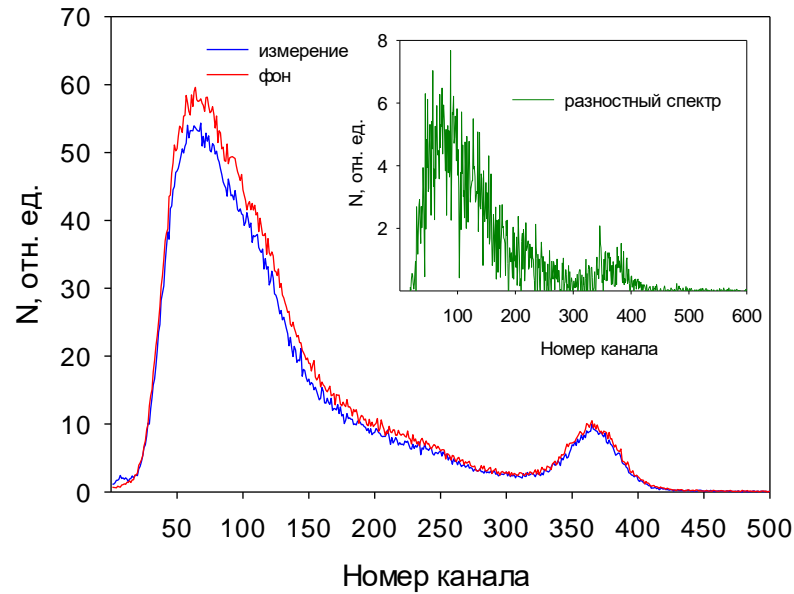


Рисунок 94 – Аппаратурные спектры фонового (красный) и измеренного (синий) излучений в одной из точек сканирования. Разностный спектр, представленный в верхнем углу (зеленый), определяет полезный сигнал

Разностный спектр определяет полезный сигнал, по которому восстанавливается картина распределения активности и дифференциальной мощности дозы. Из рис. 94 видно, что разностный сигнал отличается от фонового в 10 раз, что подтверждает ранее установленный критерий возможности проведения измерений при 10-ти кратном превышении фона боковой подсветки.

Обследование показало наличие в помещении радиоактивного загрязнения радионуклидом ^{137}Cs . Других радионуклидов в помещении не обнаружено. Результаты измерений обрабатывались итерационным методом. Наложение гамма-изображения на оптический снимок позволило локализовать наиболее загрязненные участки: вентили, сварочные швы, отдельные участки трубопровода.

Первое сканирование

Результаты первого сканирования [20] показаны на рис. 95 и 96. На рис. 95*б* и 96*б* приведены результаты наложения данных, полученных по результатам сканирования, на панорамный фотоснимок области сканирования. На рис. 95*а* и 96*а* приведены результаты наложения на панорамный фотоснимок данных, восстановленных методом максимального правдоподобия.

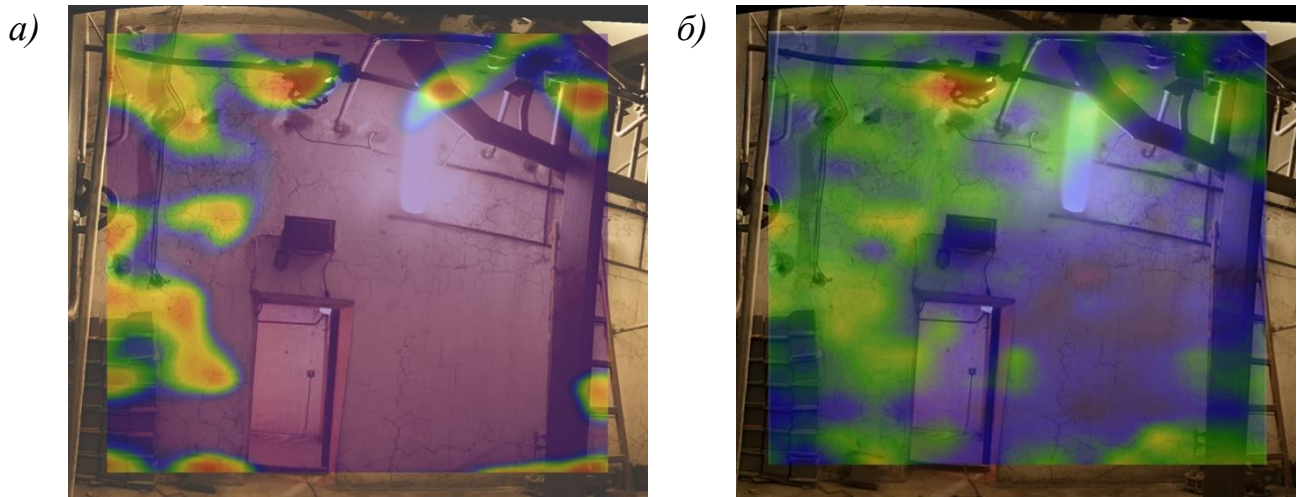


Рисунок 95 – Распределение активности ^{137}Cs по результатам первого сканирования (б) и после обработки итерационным методом (а)

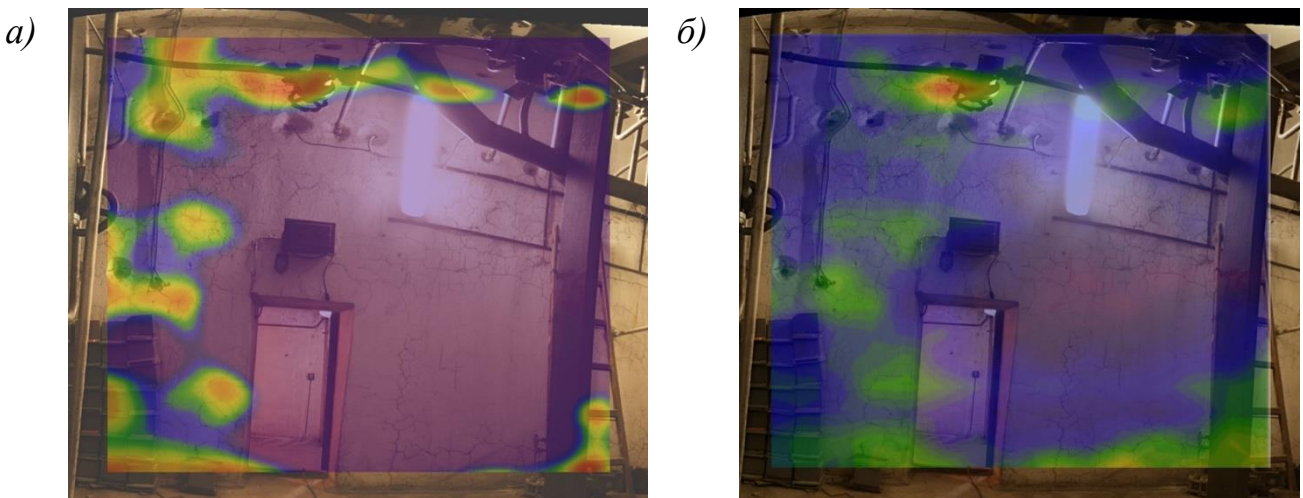


Рисунок 96 – Распределение дифференциальной мощности дозы по результатам первого сканирования (б) и после обработки итерационным методом (а)

Второе сканирование

На рис. 97 показано полное панорамное фото обследуемого при втором сканировании участка с выделенной желтым прямоугольником областью сканирования.

Результаты второго сканирования [18] показаны на рис. 98 и 99. На рис. 98б и 99б приведены результаты наложения данных, полученных по результатам сканирования, на панорамный фотоснимок области сканирования. На рис. 98а и 99а приведены результаты наложения на панорамный фотоснимок данных, восстановленных методом максимального правдоподобия.

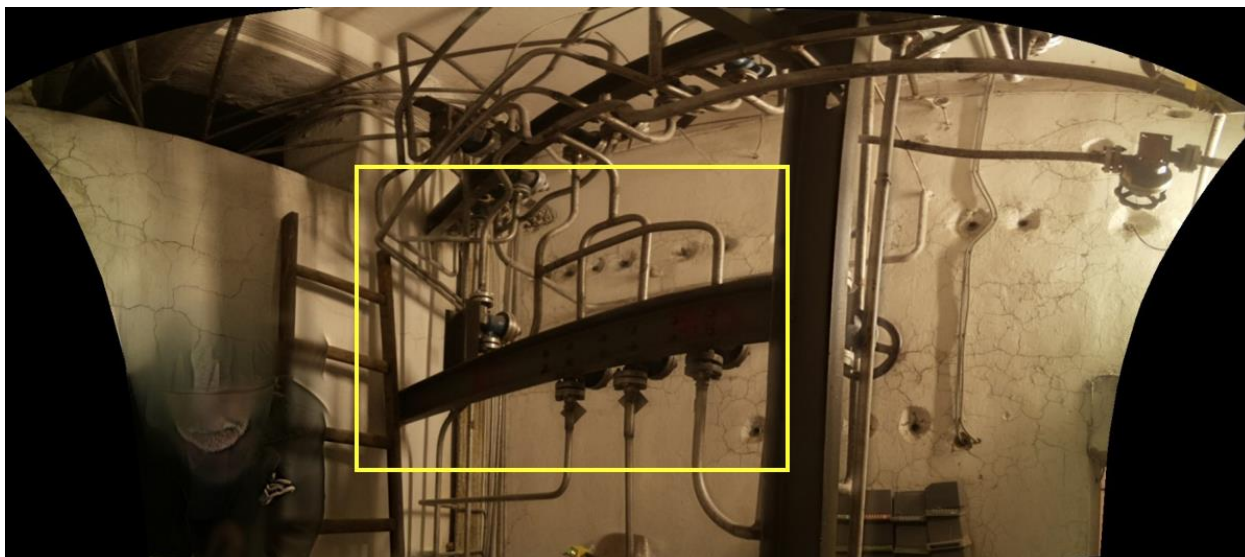


Рисунок 97 – Панорамное изображение обследуемой области. Желтым отмечена область сканирования

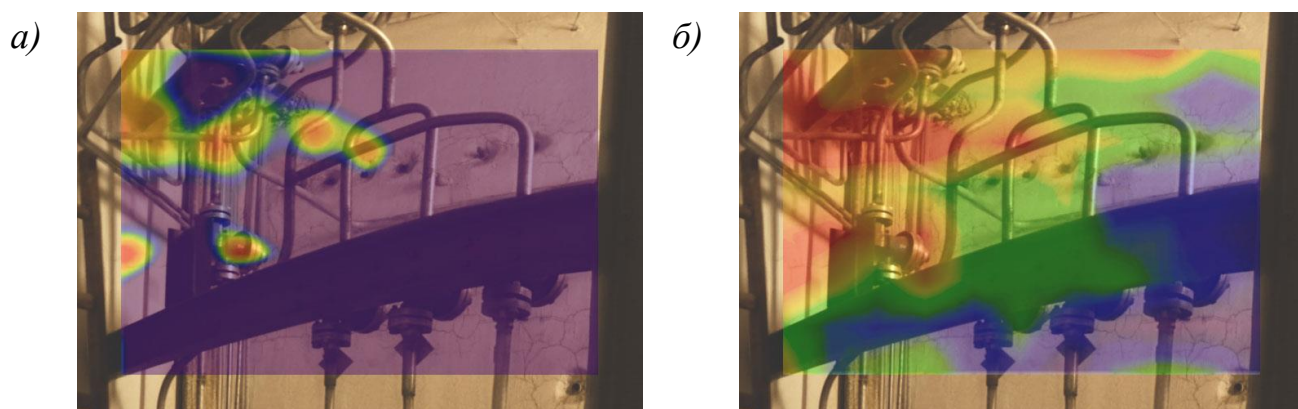


Рисунок 98 – Распределение активности ^{137}Cs по результатам второго сканирования (б) и после обработки итерационным методом (а)

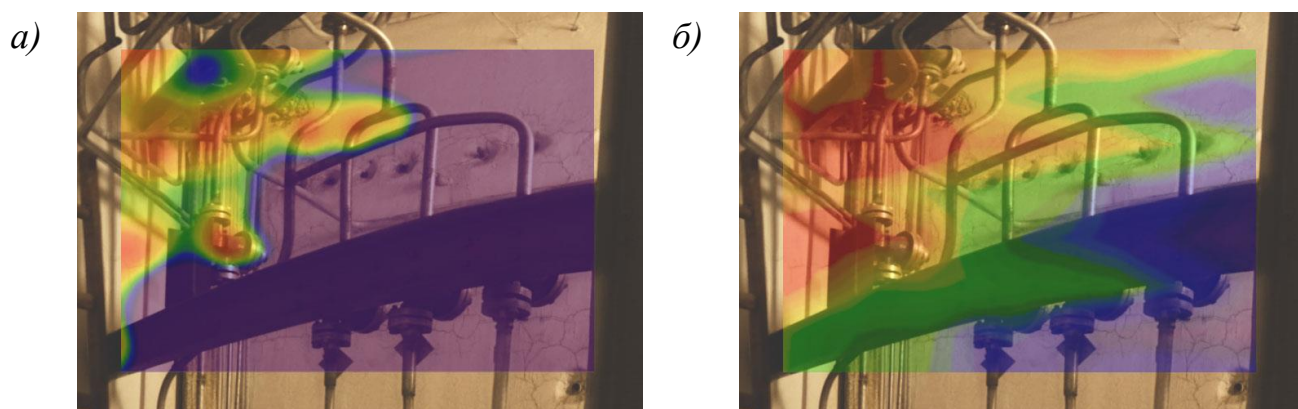


Рисунок 99 – Распределение дифференциальной мощности дозы по результатам второго сканирования (б) и после обработки итерационным методом (а)

3.10 Выводы

Испытания гамма-сканера с антиколлиматором показывают перспективность применения разработанного устройства для обследования радиационно-загрязненных объектов. Использование методики сканирования с антиколлиматором целесообразно в условиях ограниченного времени, доступного для проведения сканирования, а также при необходимости многократных перемещений установки.

Продемонстрирована возможность локализации источников гамма-излучения методикой сканирования с применением антиколлиматора.

Разработанная сканирующая система с антиколлиматором обладает следующими характеристиками:

Масса сканирующей головки.....	4 кг
Масса блока управления.....	4 кг
Габаритные размеры сканирующей головки (Ш×В×Г)	160×550×110 мм
Габаритные размеры блока управления (Ш×В×Г)	300×310×150 мм
Угловое разрешение (при шаге сканирования 5°).....	5°
Точность позиционирования	1,5°
Угол зрения (азимутальный)	180°
Угол зрения (полярный)	150°
Максимальная мощность дозы в точке размещения	0,1 мЗв/ч
Энергетический диапазон	от 50 кэВ до 1,5 МэВ
Эффективность регистрации (для энергии 662 кэВ)	30 %
Энергетическое разрешение (для энергии 662 кэВ)	12,1 %
Параметры питающей сети	~220 В (50 Гц)

Ключевым преимуществом гамма-сканера с антиколлиматором перед аналогичными системами, применяющими коллиматор, является его масса, поскольку для повышения эффективности регистрации требуется увеличение объема детектора, что приводит к значительному увеличению защиты от гамма-излучения. В нашем случае изменение объема детектора мало влияет на габариты

и массу антиколлиматора, поэтому общий вес установки будет меняться незначительно в широком спектре решаемых задач. Масса гамма-сканера с антиколлиматором составила 8 кг: сканирующая головка 4 кг и блок электроники 4 кг. Такие характеристики позволяют сравнивать разработанное устройство с мобильными системами на основе камеры Комптона или кодирующих апертур.

В качестве примеров реализации сканирования с коллиматором можно привести ряд установок. Масса гамма-локатора, применявшегося при выполнении работ по выводу из эксплуатации и реабилитации исследовательского реактора МР на территории НИЦ «Курчатовский институт», составляла порядка 47 кг. Сканирующая головка гамма-локатора, применявшегося при обследовании центрального зала ЧАЭС, весила порядка 40 кг [83]. Из них детектирующий блок – 30 кг и поворотное устройство – 10 кг [126]. Масса устройства RadScan600 составляла около 125 кг (из них 105 кг – сканирующая головка) [127]. Сканирующая головка прибора RadScan®900 весит 43,3 кг [128]. Общий вес всех компонентов прибора для гамма-визуализации RadSearch составляет менее 54 кг [60].

Масса гамма-сканера с антиколлиматором составила 8 кг: сканирующая головка 4 кг и блок электроники 4 кг. Такие характеристики позволяют сравнивать разработанное устройство с мобильными системами на основе камеры Комптона: GeGI (14 кг), NEMI (4,5 кг), Polaris-H (4 кг) и на основе кодирующих апертур: HiSpect (8 кг), iPIX (2,5 кг), ORNL HPGe Imager (14 кг) [129].

Заключение

Работа посвящена разработке и реализации нового метода визуализации источников гамма-излучения.

Основные результаты работы заключаются в следующем

1. Разработан и реализован метод формирования гамма-изображений, основанный на применении техники сканирования с антиколлиматором. Экспериментально продемонстрирована возможность визуализации источников гамма-излучения с помощью сканера с антиколлиматором. При создании системы сканирования с антиколлиматором учитывался опыт разработки и эксплуатации аналогичных устройств. Предложенный метод позволяет создавать легкие устройства для визуализации гамма-излучения, – масса сконструированного прибора значительно ниже аналогичных устройств, применяющих коллимационную технику. Использование сканера с антиколлиматором сокращает время, необходимое для сканирования за счет особенности конструкции детектора, что дает возможность проводить однократное измерение фонового излучения, что в результате повышает производительность устройства.

2. Разработана методика анализа результатов измерений сканера с антиколлиматором, что позволяет повысить угловое разрешение системы. Экспериментально продемонстрирована возможность визуализации источников гамма-излучения и формирования гамма-изображений с угловым разрешением на уровне 5° (для шага сканирования 5°) при применении процедуры реконструкции картины изображения итерационным методом максимального правдоподобия.

3. Отработана методика визуализации распределения гамма-источников путем наложения восстановленных результатов сканирования обследуемого объекта на панорамное оптическое изображение. Применение гамма-сканера дает возможность не только локализовать источники гамма-излучения, но и позволяет определить их радионуклидный состав, а также оценить вклад в дозу от каждого источника излучения.

4. Определены основные характеристики гамма-сканера с антиколлиматором: энергетическое разрешение 12,1 % для энергии 662 кэВ, предельное рабочее значение МЭД – 0,1 мЗв/ч, чувствительность к МЭД – $2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}/(\text{мЗв/ч})$, точность позиционирования сканирующей головки лучше $1,5^\circ$. Получена аппаратная функция системы сканирования с антиколлиматором. Экспериментально показана возможность локализации точечных и протяженных гамма-источников различного радионуклидного состава. В работе приведен метод расчета дозы излучения для оценки вклада от каждого обнаруженного источника излучения; продемонстрирована возможность формирования картины распределения дифференциальной мощности дозы. Представлен общий критерий допустимых значений уровней боковой подсветки в зависимости от мощности дозы, создаваемой визуализируемым источником. Показана возможность визуализации источника при 10-ти кратном превышении значения фона.

5. Получены результаты работы гамма-сканера в реальных условиях эксплуатации, которые позволили оптимизировать работу по демонтажу загрязненного оборудования с целью снижения дозовой нагрузки на работающий персонал.

В дальнейшем возможно усовершенствование сканирующей системы с антиколлиматором путем её унификации. Также возможна разработка коммерческой системы визуализации для решения широкого спектра задач. Применение комплекта детекторов с различной чувствительностью даст возможность выполнять измерения в широком диапазоне; для автономной работы установки возможно питание от аккумуляторной батареи; реализация аппаратной части одним управляющим компьютером с дисплеем сделает установку мобильнее и удобнее в эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 14.08.2019 № 1808).

Автор выражает благодарность сотрудникам ККНР Управления «Реабилитация» НИЦ «Курчатовский институт» за ценные замечания и советы при проведении исследований. Отдельно хотелось бы отметить вклад в создание прототипа устройства и выразить благодарность Игнатову Сергею Михайловичу и Семину Илье Алексеевичу. Эта работа не могла быть выполнена без поддержки Иванова Олега Петровича, чьи полезные советы и обсуждения способствовали ее успешному завершению, а критические замечания были неоценимы.

Автор обязан также Сафронову Алексею Михайловичу за помощь при проведении модельного эксперимента, а Чеснокову Александру Владимировичу и Семёнову Сергею Геннадиевичу за помощь и организацию всех мероприятий, связанных с выполнением данной работы.

Хотелось бы выразить искреннюю признательность и благодарность научному руководителю Потапову Виктору Николаевичу за постановку научных задач, поддержку и помощь в работе.

Также автор благодарит коллектив ГП «ГринСтар», в частности Ермака Михаила Григорьевича за технические консультации.

Список сокращений

CZT – CdZnTe

MURA – Modified Uniformly Redundant Array

RGB – аббревиатура английских слов red, green, blue — красный, зелёный, синий

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

АЭС – атомная электростанция (*анг. NPP*)

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ВХРАО – временное хранилище радиоактивных отходов

ДРГ-01Т1 – дозиметр мощности экспозиционной дозы широкодиапазонный носимый ДРГ-01Т1

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (*анг. CMOS*)

МР – материаловедческий петлевой реактор

МЭД – мощность экспозиционной дозы

ОСШ – отношение сигнала к шуму (*анг. SNR*)

ОЧГ – особо чистый германий (*анг. HPGe*)

ПЗС – прибор с зарядовой связью (*анг. CCD*)

ПК – персональный компьютер

ПЧД – позиционно-чувствительный детектор

ПШПВ – полная ширина на половине максимума (*анг. FWHM*)

РФТ – реактор физико-технический

ФРТ – функция рассеяния точки (*анг. PSF*)

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель (*анг. PMT*)

ЧАЭС – Чернобыльская атомная электростанция

ЧКХ – частотно-контрастная характеристика (*анг. MTF*)

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭОП – Электронно-оптический преобразователь (*анг. image intensifier*)

Список литературы

1. Nuclear Energy Agency, Strategic aspects of nuclear radiological emergency management. Planning for Effective Decision Making. Consequence Management and Transition to Recovery, NEANo. 6387, OECD, 2010.
2. Волков В.Г., Чесноков А.В. Реабилитация радиационного наследия. Научно-технический опыт Курчатовского института // Москва, ИзДАТ, 2008, 120 с.
3. Волков В.Г., Волкович А.Г., Иванов О.П., Павленко В.И., Потапов В.Н., Семенов С.Г., Чесноков А.В. Радиационное обследование радиоактивных объектов Кирово-Чепецкого химического комбината // Атомная энергия, т. 107, вып. 2, август 2009, с. 75-81.
4. А. С. Данилович, В. И. Павленко, В. Н. Потапов и др. Технологии обращения с РАО при выводе из эксплуатации исследовательских реакторов МР и РФТ // Радиоактивные отходы No 2 (3), 2018.
5. Stepanov Alexey, Ivanov Oleg, Stepanov V. How Useful Are Imaging and Remote Sensing Technologies in Decontamination & Decommissioning // WM2017 Conference, March 5 – 9, 2017, Phoenix, Arizona, USA.
6. Иванов О.П., Степанов В.Е., Смирнов С.В. и др. Дистанционно управляемые приборные средства для проведения измерений в интенсивных полях гамма-излучений // Ядерные измерительно-информационные технологии, 2011, № 2(38), с. 48—50.
7. В. Е. Степанов, С. В. Смирнов, О. П. Иванов, А. С. Данилович. Дистанционно управляемый коллимированный детектор γ -излучения для измерения радиоактивных загрязнений // Атомная энергия. – 2010, т. 109, № 2, с. 82-84.
8. В.Г.Волков, Ю.А.Зверьков и др. Подготовка к выводу из эксплуатации исследовательского реактора МР в РНЦ «Курчатовский институт» // Атомная энергия. 2008, т.104, №5, с. 259-264.
9. Adams D. J., Hillier R. R., Janes A. F. et al. A Sky-Scan for Discrete Sources of Gamma-Rays in the Energy Region 240 to 1000 keV // Astrophysical Letters, Vol. 3, p.51, 1969.
10. Daju S., Hillier R. R., Janes A. F., et al. The X-ray Spectrum of the Crab Nebula between 20 keV and 3 MeV // Astrophysical Letters, Vol. 6, p.225, 1970.
11. Baker R., Lovett R., Orford K. et al. γ -Rays of 1 to 10 MeV from the Crab and Cygnus Regions // Nature Physical Science 245, 18–19, 1973.
12. P. Mandrou, M. Niel, J. Narbonne, C. Sabaud et al. Opale, a balloon gamma-ray telescope for the 100 keV-5 MeV energy range // Nuclear Instruments and Methods Volume 133, Issue 3, 15 March 1976, Pages 553-558, 1976.

13. G. Morfill, G. F. Pieper. A directional low energy gamma-ray detector // Proceedings of Conference on Transient Cosmic Gamma-and X-Ray Sources, LA-5505-C, p. 206, 1973.
14. S. V. Golenetskii and E. P. Mazets. A modulating anticollimator in a low- and medium-energy gamma-ray telescope // Soviet Astronomy Letters, vol. 4, Sept.-Oct. 1978, p. 231-233. Translation. Pisma v Astronomicheskii Zhurnal, vol. 4, Sept.-Oct. 1978, p. 429-432.
15. Baker, R. E., Burnell, S. J., Lovett, R. R., Orford, K. J., & Ramsden, D. Detection Methods for Gamma-Ray Sources in the Energy Range 1-10 MeV // Proceedings of the 13th International Conference on Cosmic Rays, held in Denver, Colorado, Volume 4 (AS and TI Sessions), p.2722, 1973.
16. Steven M. Kahn, Rashid A. Sunyaev, Peter von Ballmoos. High-Energy Spectroscopic Astrophysics // Springer, 2005.
17. Patent EP0613023A2. Radiation camera systems. European Patent Application, Application number 94300288.1, Date of filing: 17.01.94, Priority: 22.01.93 GB 9301206, Applicant: British Nuclear Fuels PLC Risley Warrington Cheshire, WA3 6 AS (GB).
18. О. П. Иванов, В. Н. Потапов, М. А. Самойлова, С. М. Игнатов. Метод получения гамма-изображения для дистанционной дозиметрии в атомной промышленности // Атомная энергия, 2021, том 130, № 4, сс. 228-232.
- О. P. Ivanov, V. N. Potapov, M. A. Samoilova et al. Gamma-Imaging for Remote Dosimetry in the Nuclear Industry // At Energy, 2022.
19. О. П. Иванов, С. М. Игнатов, В. Н. Потапов, М. А. Самойлова, И. А. Семин. Гамма-сканер с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения // Приборы и техника эксперимента, 2021, № 2, сс. 115-120.
- О. P. Ivanov, S. M. Ignatov, V. N. Potapov, M. A. Samoilova, I. A. Semin. A Gamma Scanner with an Anticollimator for Visualization of γ -Radiation Sources // Instruments and Experimental Techniques, 2021, Vol. 64, No. 2, pp. 285–290.
20. О. П. Иванов, В. Н. Потапов, М. А. Самойлова, Визуализация источников гамма-излучения с помощью сканера с антиколлиматором // Известия высших учебных заведений. Физика, 2021, №2-2, сс. 27-33.
21. Иванов О.П., Потапов В.Н., Самойлова М.А. Визуализация источников гамма-излучения с помощью сканера с антиколлиматором // X Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов 9-13 ноября 2020 года, г. Томск. г. Кемерово: изд-во «Практика», 2020. – 242 с. (с. 32).
22. М.А. Самойлова, В.Н. Потапов. Применение антиколлиматора для построения изображений распределения источников ионизирующего излучения в помещении // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18-24 ноября 2019 года. Фундаментальная и прикладная физика. — М.: МФТИ, 2019. — 402 с. (сс. 320-321).

23. С. М. Игнатов, В. Н. Потапов, М. А. Самойлова. Применение антиколлиматора в разработке гамма-сканера для обследования радиационно-загрязненных помещений // Сборник тезисов V Всероссийского молодежного научного форума «Open Science 2018», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2018.— 189 с. (с. 150).

24. Игнатов С. М., Потапов В. Н., Самойлова М. А. Разработка устройства для визуализации распределения гамма-излучающих радионуклидов // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тезисов докладов V Международной научно-технической конференции (2–5 октября 2018 г., Москва). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2018. – 306 с. (с. 279-280).

Игнатов С. М., Потапов В. Н., Самойлова М. А. Разработка устройства для визуализации распределения гамма-излучающих радионуклидов // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики [Электронный ресурс]: сб. докладов V Международной научно-технической конференции (2–5 октября 2018 г., Москва) = Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power [e-resource]: Collection of papers of V International Scientific and Technical Conference (October 2–5, 2018, Moscow). – Электрон. текст. дан. (1 файл в формате pdf: 197,03 Мб). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2018. – 1 CD-R.

25. Самойлова М. А., Игнатов С. М., Потапов В. Н. Разработка блока детектирования для гамма-сканера с антиколлиматором // Современные проблемы физики и технологий. VII-я Международная молодежная научная школа-конференция, 16-21 апреля 2018 г.: Тезисы докладов. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2018.— 376 с. (с. 281-282).

26. М. А. Баранова, С. М. Игнатов, В. Н. Потапов. Оптимизация геометрических параметров системы гамма-сканера с антиколлиматором // XV-я Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа, 14-17 ноября 2017 г., Москва [Текст] : сборник аннотаций / Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт". - Москва : Курчатовский институт, 2017. - 345 с. (с. 11).

27. E.L. Chupp. Gamma-Ray Astronomy: Nuclear Transition Region, Springer Science & Business Media, 1976.

28. Bambi, C. Tutorial Guide to X-ray and Gamma-ray Astronomy, 2020.

29. Riccardo Giacconi, Herbert Gursky, Frank R. Paolini, and Bruno V. Rossi. Evidence for x-Rays From Sources Outside the Solar System // Physical Review Letters, 9, 439, 1962.

30. Minoru Oda. High-Resolution X-Ray Collimator with Broad Field of View for Astronomical Use // Applied Optics Vol. 4, Issue 1, pp. 143-143, 1965.

31. Minoru Oda. Optical Identification and Interpretation of X-Ray Sources // Space Science Reviews, Volume 8, Issue 4, pp.507-533, 1968.

32. Klebesadel R. W., Strong I. B., & Olson R. A. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin // Astrophysical Journal, vol. 182, p.L85, 1973.

33. Kellogg, E. M. X-ray astronomy in the UHURU epoch and beyond // Newton Lacy Pierce Prize Lecture, *Astrophysical Journal*, vol. 197, May 1, 1975, pt. 1, p. 689-691, 693-695, 697-704. NASA-supported research, 1975.
34. Dicke, R. H. Scatter-Hole Cameras for X-Rays and Gamma Rays // *Astrophysical Journal*, vol. 153, p.L101, 1968.
35. Caroli E., Stephen J. B., Di Cocco G. et al. Coded aperture imaging in X- and gamma-ray astronomy // *Space Science Reviews (ISSN 0038-6308)*, vol. 45, no. 3-4, 1987, p. 349-403., 1987.
36. Волкович А.Г., Коба Ю.В., Ликсонов В.И. и др. Применение коллимированного детектора при ликвидации последствий аварии в машинном зале 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия*, 1990, т. 69, вып. 6, с. 389—391.
37. Волкович А.Г., Потапов В.Н., Смирнов С.В., и др. Измерение полей фотонного ионизирующего излучения в реакторном зале 4-го блока Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия*, 2000, т. 88, вып. 3, с. 203—207.
38. Oleg P. Ivanov, Vyacheslav E. Stepanov, Alexey S. Danilovich. Gamma-Imaging Systems for Ecological and Nuclear Environment Measurements // *Conference: 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, 2010.*
39. Ivanov O., Sudarkin A., Stepanov V., Urutskoev L. Portable X-ray and gamma-ray imager with coded mask: performance characteristics and methods of image reconstruction // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 422(1-3), 729–734, 1999.
40. O. P. Ivanov, V. N. Potapov, C. Schmidt, et al. Development of new version of RayMoS gamma-camera with coded mask // *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 2008.
41. Gmar M., Gal O., Le Goaller C., Ivanov O. P., Potapov V. N. Stepanov. Development of coded-aperture imaging with a compact gamma camera // *IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record*, 2003.
42. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Иванов О.П. и др. Радиационная защита при выводе из эксплуатации исследовательских материаловедческих реакторов МР и РФТ НИЦ «Курчатовский институт» // *Атомная энергия*, 2013, т.115, вып.2, стр. 104-110.
43. Ivanov Oleg, Potapov Victor, Ignatov S. et. al. Experience of Gamma-Locator System Using for Radiation Monitoring During Rehabilitation Works at Temporal Radwaste Storage Area of Kurchatov Institute // *The 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, 2007.
44. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник // М., Энергоатомиздат, 1995, 496 с.

45. Alexey Danilovich, Oleg Ivanov, Victor Potapov et al. New Remote Method for Estimation of Contamination Levels of Reactor Equipment // WM2013 Conference, February 24 – 28, 2013, Phoenix, Arizona, USA, Paper no. 13175.
46. Z.He, S.V.Guru, D.K.Wehe, G.F.Knoll, A.Truman, D.Ramsden. Portable Wide Angle Gamma Ray Vision Systems // IEEE Trans. NS-42, No.4, 668-674, 1995.
47. Anger, Hal O. Scintillation Camera // Review of Scientific Instruments. 29 (1): 27–33, 1958.
48. Saint-Gobain Crystals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.crystals.saint-gobain.com/>
49. A.N.Sudarkin, O.P.Ivanov, V.E.Stepanov, L.I.Urutskov. Portable gamma-ray imager and its application for the inspection of the near-reactor premises contaminated by radioactive substances // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 414, Issues 2–3, 11 September 1998, Pages 418-426.
50. K.Kuroda. Position sensitive photomultiplier // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 196, Issue 1, 1 May 1982, Pages 187-197.
51. E. E. Fenimore and T. M. Cannon. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays // Appl. Opt. 17, 337-347, 1978.
52. Gottesman Stephen, Fenimore E. New family of binary arrays for coded aperture imaging // Applied optics. 28. 4344-52, 1989.
53. Ю.Н. Мартынюк, И.Б. Вишневский. Промышленный прототип портативной гамма-камеры для применения на объектах атомной энергетики // АНРИ №4 (87) 2016 с. 13-23.
54. Arthur Holly Compton: Nobel Prize in Physics (1927) – Compton effect.
55. M. Kagayaag, H. Katagiriag, R. Enomoto et al. Development of a low-cost-high-sensitivity Compton camera using CsI(Tl) scintillators (γ I) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 804, Pages 25-32, 2015.
56. L.E. Smith, Z. He, D.K. Wehe, G.F. Knoll, S.J. Wilderman. Design and modeling of the Hybrid Portable Gamma Camera system // IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 45(3), pp. 963-969, 1998.
57. K. A. Hughes and J. A. Lightfoot. RadScan 600-a portable instrument for the remote imaging of gamma contamination: its design and use in aiding decommissioning strategy // IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record, Anaheim, CA, USA, 1996, pp. 930-933 vol.2., 1996.
58. K.A. Hughes, G. Mottershead, D.J. Thornley. Use of gamma ray imaging instrumentation in support of true waste characterization challenges // WM'04 Conference, Tucson, AZ, 2004.

59. Santo James, Maul Mike, Lucero Randy, Clapham Martin. Application of Remote Gamma Imaging Surveys at the Turkey Point PWR Reactor Facility // Proceedings of the Institute of Nuclear Materials Management (INMM), 2006.
60. John A. Mason, Marc R. Looman, Adam J. Poundall, Daniel Pancake and Richard Creed. Development and Testing of a Novel Gamma ray Camera for Radiation Surveying, Contamination Measurement and Radiation Detection // Proceedings of INMM12, Orlando, Florida, July 2012. (12-A-409-INMM).
61. J. A. Mason, R. Creed, M. R. Looman, D. Pancake, A. J. Poundall and A. C. N. Towner. Testing and Performance Validation of a Sensitive Gamma Ray Camera Designed for Radiation Detection and Decommissioning Measurements in Nuclear Facilities- 13044 // WM2013 Conference, February 24 – 28, 2013, Phoenix, Arizona, USA. (WM13-13044).
62. Chiron M., Diop C. M., Gal O. et al. The use of three dedicated nuclear measurement tools for D and D operations in nuclear facilities // Proceedings of the SFEN 2003 Conference. Decommissioning challenges: An Industrial Reality, 2003.
63. O Gal, C Izac, F Jean, F Lainé, C Lévêque, A Nguyen. CARTOGAM – a portable gamma camera for remote localisation of radioactive sources in nuclear facilities // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 460, Issue 1, 11 March 2001, Pages 138-145, 2001.
64. Toubon Hervé, Nohl B., Lefevre, S. et al. New methodology for source location and activity determination in preparation of repairing or decommissioning activities, 2006.
65. Amgarou Khalil, Patoz Audrey, Rothan Dominique, Mena Nabil. iPIX: A New Generation Gamma Imager for Rapid and Accurate Localization of Radioactive Hotspots // Conference: IAEA Symposium on International Safeguards: Linking Strategy, Implementation and People, At Vienna, Volume: IAEA–CN–220, 2014.
66. Amgarou Khalil, Paradiso Vincenzo, Patoz Audrey et al. A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager // Journal of Instrumentation. 11. P08012., 2016.
67. Иванов О.П., Семин И.А., Сафронов А.М., Торицын О.С. Испытания системы визуализации полей гамма-излучения iPIX в НИЦ «Курчатовский Институт» // АНРИ №2 (89) 2017 с. 66-70.
68. Takeda Shin'ichiro, Harayama Atsushi, Ichinohe Yuto, et al. A portable Si/CdTe Compton camera and its applications to the visualization of radioactive substances // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 787. 207-211, 2015.
69. D. Matsuura et al. ASTROCAM 7000HS Radioactive Substance Visualization Camera // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 51, no. 1, pp. 68-75, Mar. 2014.

70. Ikeda Naoaki, Kei Genba, Atsushi Harayama et al. Residual Radiation Measurements at J-PARC MR Using the ASTROCAM 7000HS Newly Developed Radioactive Substance Visualization Camera // 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2016), 2016.
71. Christopher G. Wahl, Willy Kaye, Weiyi Wang et al. Polaris-H Measurements and Performance // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Seattle, WA, 2014.
72. Wahl Christopher, Kaye Willy, Wang Weiyi et al. The Polaris-H imaging spectrometer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 422. 10.1016/j.nima.2014.12.110, 2015.
73. Orion Radiation Measurement Group [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cztlab.engin.umich.edu/>
74. S. Joshi. Coded Aperture Imaging Applied to Pixelated CdZnTe Detectors // Ph. D. Thesis, University of Michigan, 2014.
75. О. П. Иванов, В. Н. Потапов, А. С. Сафронов. Исследование возможностей портативной комптоновской гамма-камеры Поларис при выводе из эксплуатации и реабилитации объектов атомной промышленности // АНРИ №4 (95) 2018 с. 24-36.
76. Ivanov, O. P., Potapov, V. N., Safronov, A. M., & Stepanov, A. V. The Improving of the Angular Resolution of Gamma-Ray Images of Portable Compton Camera with Special Iterational Method // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2019.
77. E.P.A Bailey. Gamma Ray Astronomy in the Low Energy Range, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, 1979.
78. Mandrou P., Niel M., Vedrenne G., Dupont A. A low-energy gamma-ray observation of the Crab Nebula // Astrophysical Journal, Part 1, vol. 212, Mar. 15, 1977, p. 704-706, 1977.
79. Fishman G. J., Meegan C. A., Wilson R. B. et al. Overview of Observations from BATSE on the Compton Observatory // Astronomy and Astrophysics Supplement, Vol.97, NO. 1/JAN, P. 17, 1993.
80. Ling J. C., Wheaton W. A., Wallyn P. et al. A BATSE Earth Occultation Catalog of 0.031.8 MeV Gamma-Ray Source Spectra and Light Curves for Phases 13 (1991-1994) // The Astrophysical Journal Supplement Series, 127:79-124, 2000.
81. B. A. Harmon, G. J. Fishman, C. A. Wilson et al. The Burst and Transient Source Experiment Earth Occultation Technique // The Astrophysical Journal Supplement Series, 138:149-183, 2002.
82. Fishman Gerald, Meegan C., Wilson R. et al. The BATSE experiment on the Gamma Ray Observatory: Solar flare hard X ray and gamma-ray capabilities // Max'91 Workshop 2: Developments in Observations and Theory for Solar Cycle 22, 1989.

83. A.V. Chesnokov, S.M. Ignatov, V.N. Potapov, S.B. Shcherbak, L.I. Urutskoev. Determination of surface activity and radiation spectrum characteristics inside buildings by a gamma locator // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Vol. 401, No. 2,3, pp. 414-420, 1997.
84. Потапов В.Н., Чесноков А.В., Щербак С.Б. Расчет распределения мощности эквивалентной дозы на основе данных, полученных с помощью гамма-локатора // Атомная энергия. Т.92, вып. №4, 2002, с. 324-332.
85. Live Chart of Nuclides [Электронный ресурс]: интерактивная таблица нуклидов на сайте МАГАТЭ — Режим доступа: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
86. J.G. Dreyer, M.T. Burks, E.L. Hull. Next Generation Germanium Systems for Safeguards Applications // Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 2014.
87. L. Mihailescu, K.M. Vetter, M.T. Burks et al. SPEIR: A Ge Compton camera // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 570 (2007) 89–100.
88. Stefano Del Sordo, Leonardo Abbene, Ezio Caroli. Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications // Sensors (Basel); 9(5), 2009.
89. Карцев И.С., Глыбин Ю.Н., Чигарин И.Ю., Шевченко А.П. Измерение характеристик альфа-излучающих радионуклидов с применением ионно-имплантированных кремниевых детекторов // Инженерная физика. — №12, 2017.- С.24-28.
90. Luke, P.N. Unipolar Charge Sensing with Coplanar Electrodes— Application to Semiconductor Detectors // Nuclear Science, IEEE Transactions on. 42. 207 - 213, 1995.
91. Rybka A.V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 537. 147-156, 2004.
92. Baranova M, Boyko A, Chebyshev S. et al. Development of wide-ranged diamond-based detector unit for gamma radiation measurement // Journal of Physics: Conference Series. 675, 2016.
93. Website of SCIONIX scintillation detectors [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://scionix.nl/>
94. Patent. US patent 2585551, Robert Hofstadter, «Means for detecting ionizing radiations».
95. Robert Hofstadter. The Detection of Gamma-Rays with Thallium-Activated Sodium Iodide Crystals // Phys. Rev. 75, 796 – Published 1 March 1949; Erratum Phys. Rev. 75, 1611, 1949.

96. I. Holl, E. Lorenz and G. Mageras. A measurement of the light yield of common inorganic scintillators // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 35, no. 1, pp. 105-109, Feb. 1988.
97. H. Grassmann, E. Lorenz, H. G. Moser. Properties of CsI(Tl) — Renaissance of an old scintillation material // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 228, Issues 2–3, Pages 323-326, 1985.
98. Valentine J., Wehe D., Knoll G., & Moss C. Temperature dependence of absolute CsI(Tl) scintillation yield // *Conference Record of the 1991 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1991.
99. Zhang H, Vu NT, Bao Q, et al. Performance Characteristics of BGO Detectors for a Low Cost Preclinical PET Scanner. // *IEEE Trans Nucl Sci*. 2010; 57(3):1038-1044.
100. Patent. U.S. patent application 61/493,805 (6 June 2011).
101. Yang Kan, Menge Peter, Ouspenski Vladimir. Enhanced Alpha-Gamma Discrimination in Co-doped LaBr₃:Ce // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 63, 2016.
102. Patent. United States Patent, CeBr₃ scintillator US7405404B1, Inventor Kanai S. Shah, Current Assignee: Radiation Monitoring Devices Inc.
103. Июдин А.Ф., Богомолов В.В., Свертилов С.И. и др. Особенности собственного фона в сцинтилляционных кристаллах LaBr₃:Ce и CeBr₃ // *Приборы и техника эксперимента* №6, стр.16-24, 2009.
104. Quarati Francesco G. A., Pieter Dorenbos, J.J.M. van der Biezen et al. Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr₃ gamma-ray spectrometers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2013.
105. Е. А. Георгиевская, С. Н. Клемин, Л. А. Филатов и др. Твердотельный электронный умножитель многоцелевого назначения на основе гейгеровских микроячеек // *Прикладная физика* № 2, 2003.
106. Игнатов С.М., Маневский Д.А., Потапов В.Н., Чиркин В.М. Сцинтилляционный детектор гамма – излучения на основе твердотельного фотоумножителя // *Приборы и техника эксперимента*, №3, с.1-6, 2007.
107. S. M. Ignatov, M. G. Mitelman, V. N. Potapov and O. P. Ivanov. Characteristics of CsI(Tl) scintillating detector based on solid state photo multiplier // *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Dresden, Germany, pp. 1195-1197, 2008.
108. Кудин А.М., Бороденко Ю.А., Гринев Б.В., Диденко А.В. и др. Сцинтилляционные сборки «CsI(Tl) + фотодиод» для регистрации гамма-квантов и протонов // *Приборы и техника эксперимента*, № 1, 0032-8162, 2010.
109. Игнатов С.М., Потапов В.Н. Параметры новых сцинтилляционных детекторов // *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 2011, с 25-31.

110. V. Golovin, V. Saveliev. Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation // Section A of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 518, 2004, pp 560-565.
111. V. Saveliev, V. Golovin. Silicon avalanche photodiodes on the base of metal-resistor-semiconductor (MRS) structures // Nucl. Instr. Meth. A 442, 2000, pp 223-229.
112. Сайт ООО ЦПТА (Центр перспективных технологий и аппаратуры) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cpta-apd.ru/>
113. L.J. Meng, D. Ramsden, V.M. Chirkin, V.N. Potapov, O.P. Ivanov, S.M. Ignatov. The desing and performance of a large-volume spherical CsI(Tl) scintillation counter for gamma-ray spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Vol. 485, pp. 468-476, 2002.
114. Lechner, B. J. The modulation transfer function. Information Display. 22, 2006.
115. Александр Гурвич. Физические основы радиационного контроля и диагностики // Атомэнергоиздат, 1989, 168 с.
116. Сайт ООО НИПП «Грин Стар Инструментс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://greenstar.ru>
117. А. Б. Дорин, В. Ф. Ельцин, Г. Е. Скакун, А. К. Чураков. Спектрометрические комплексы СКС группы предприятий «ГРИН СТАР».
118. AutoStitch - Matthew Brown [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matthewalunbrown.com/autostitch/autostitch.html>
119. Brown M. and Lowe D. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features // International Journal of Computer Vision. 74(1), pages 59-73, 2007.
120. Brown M. and Lowe D. G. Recognising Panoramas // International Conference on Computer Vision (ICCV2003). pages 1218-1225, Nice, France, 2003.
121. Тараско М. З. Метод наименьшего направленного расхождения для решения некоторых математико-статистических задач экспериментальной ядерной физики: дис. канд. физ.-мат. Наук: 01.04.02 / Тараско Михаил Захарович, - Обнинск, 1973. – 113 с.
122. Тараско М. З., Крамер-Агеев Е. А., Тихонов Е. Б. Применение метода направленного расхождения для восстановления дифференциального спектра быстрых нейтронов // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений, вып. 11, М.: Атомиздат, 1970, стр. 125-133.
123. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663243 «Программа восстановления пространственного распределения источников излучения по результатам измерений гамма-сканером с антиколлиматором» от 14 октября 2019.
124. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов А.В., Ягода А.Т. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 187 с.

125. Прохоров Ю.В. Математический энциклопедический словарь, М.: Советская энциклопедия, 1988.
126. O.P. Ivanov, A.V. Chesnokov, A.N. Sudarkin, V.E. Stepanov, L.I. Urutskoev. History of development and application of gamma-ray imagers in Russia since 1986 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 422, pages 677-682, 1999.
127. Gamma-Ray Imaging System, Innovative Technology Summary Report, DOE/EM-0390. November. Washington, DC : U.S. DOE, 1998.
128. RadScan-900 datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cavendishnuclear.com/wp-content/uploads/2019/10/RadScan-900-Products-and-Services-2019_10.pdf
129. 2016 Technology Demonstration Workshop (TDW) on Gamma Imaging-External, Report of Department of Safeguards IAEA, 2017.