

*На правах рукописи*

Самойлова Мария Андреевна

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

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

**Научный руководитель:** **Потапов Виктор Николаевич,**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения Управление «Реабилитация» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

**Официальные оппоненты:** **Артемьев Борис Викторович**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра ИУ-4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», профессор

**Рябева Елена Васильевна**

кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра «Прикладная ядерная физика», заместитель директора института физико-технических интеллектуальных систем

**Ведущая организация:** **Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»), г. Москва, г. Троицк**

Защита состоится «30» июня 2022 г. в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01,  
кандидат физ.-мат. наук

С. В. Демидов

## Общая характеристика работы

### Актуальность и степень разработанности проблемы

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.

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 [1], позволяющий визуализировать источники ионизирующего излучения в режиме реального времени, гамма-сканер (гамма-локатор) [2], формирующий гамма-изображение объекта методом покоординатного сканирования из точки размещения прибора, и гамма-пионер [3] 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*) [4], «collimator» (*коллиматор*) [5], «occluding disk» (*затмевающий диск*) и «anticollimation telescope» [6], «shutter» (*затвор*) [7], «anticollimator» / «anticollimator» (*антиколлиматор*) [8 – 12]. Наиболее часто употребляемым и полно отражающим суть метода является термин «anticollimator».

Принцип действия антиколлиматора противоположен концепции классического коллиматора, когда для модуляции излучения детектор помещают в массивную защиту 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 методов, описанных в [4 – 12], 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  $5^\circ$ .

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 Курчатовская 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 и 6 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

1. 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

O. P. Ivanov, V. N. Potapov, M. A. Samoiloa et al. Gamma-Imaging for Remote Dosimetry in the Nuclear Industry // At Energy, 2022

2. 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

O. P. Ivanov, S. M. Ignatov, V. N. Potapov, M. A. Samoiloa, I. A. Semin. A Gamma Scanner with an Anticollimator for Visualization of  $\gamma$ -Radiation Sources // Instruments and Experimental Techniques, 2021, Vol. 64, No. 2, pp. 285–290

3. 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

4. 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)

5. 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. М.: МФТИ, 2019. – 402 с. (с. 320-321)

6. 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)

7. 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. (сс. 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) – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2018. – 1 CD-R

8. 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. (сс. 281-282)

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

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы и решаемые задачи, приведены научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава «Визуализация излучений. Приборы и методы. Литературный обзор»** посвящена анализу литературных данных по визуализации излучений. Представлен аналитический обзор методов формирования изображений, применяемых в разработке устройств визуализации для дистанционного обследования и картирования радиационной обстановки. 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. Отмечена тенденция к снижению массогабаритных характеристик приборов, повышению удобства их применения, повышению точности локализации.

Приведен краткий обзор основных экспериментов с применением техники антиколлимации в астрофизике. Показано, что метод сканирования с применением антиколлиматора ранее не применялся.

**Во второй главе «Разработка сканера с антиколлиматором для визуализации источников гамма-излучения»** описан процесс проектирования и создания прототипа устройства визуализации с антиколлиматором, приведены ключевые результаты промежуточных экспериментов.

Под антиколлиматором понимается объект, изготовленный из материала с высокой плотностью, который помещают перед детектором для пространственной модуляции гамма-излучения. В отличие от классического коллиматора, антиколлиматор поглощает излучение от источников, расположенных на одной оси с детектором, поэтому аппаратная функция такой системы будет обратна аппаратной функции детектора с классическим коллиматором.

Последовательно перемещая ось коллиматора детектора с антиколлиматором в области интереса (рис. 1), мы сможем получить изображение источников гамма-излучения (поз. 4): в точках, когда антиколлиматор (поз. 2) будет находиться между источником ионизирующего излучения (поз. 1) и детектором (поз. 3), интенсивность излучения будет значительно ниже. В результате, в точках расположения источников ионизирующего излучения будут формироваться «тени».

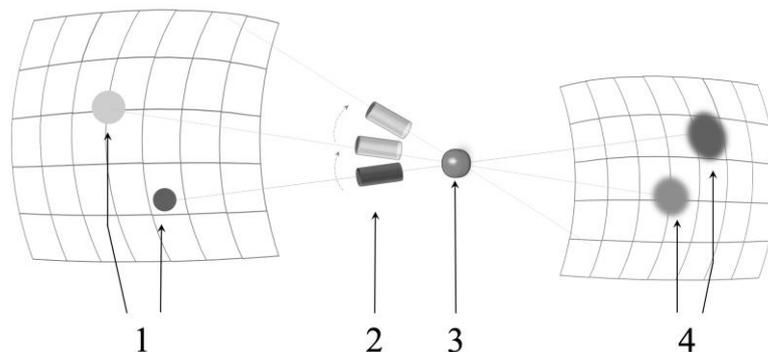


Рисунок 1 – Процесс формирования гамма-изображения методом сканирования с антиколлиматором

Ожидается, что применение описанного метода позволит сократить время обследования почти в два раза, поскольку классический метод требует двукратного сканирования области интереса. Кроме того, общая масса сканирующей системы с антиколлиматором значительно уменьшится, поскольку взамен массивной защиты будет применен небольшой антиколлиматор. Однако значительным ограничением такой системы следует отметить высокую загрузку спектрометрического тракта при измерениях в условиях высокого уровня внешнего гамма-фона. Данная проблема может быть решена применением детекторов с различной чувствительностью в зависимости от требований конкретной задачи.

Назначением разрабатываемого устройства является обследование подреакторных помещений выведенного из эксплуатации исследовательского реактора, где основными долгоживущими радионуклидами являются  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Результатом обследования является карта пространственного расположения источников гамма-излучения, получаемая наложением восстановленного изображения источников гамма-излучения в виде цветовой диаграммы на панорамную фотографию объекта.

#### Конструкция гамма-сканера с антиколлиматором

Гамма-сканер с антиколлиматором представляет собой детектирующую головку, размещенную с помощью фиксатора на поворотном-наклонном механизме. Управление устройством осуществляется дистанционно с помощью персонального компьютера. Аппаратная часть блока управления вынесена в отдельный бокс, в котором располагаются управляющий компьютер, спектроанализатор, контроллер поворотного механизма, узел питания и пр.

Детектирующая головка (рис. 2) состоит из антиколлиматора (поз. 2) и спектрометрического детектора (поз. 4), размещенных на одной оси с видеокамерой (поз. 1) и размещенных в едином корпусе (поз. 3). Спектрометрический детектор на основе кристалла сцинтиллятора CsI(Tl) (поз. 5) с кремниевыми фотоумножителями и предусилительной электроникой (поз. 6) расположен в металлическом корпусе и имеет разъем для подачи электропитания и вывода измерительной информации (поз. 7).

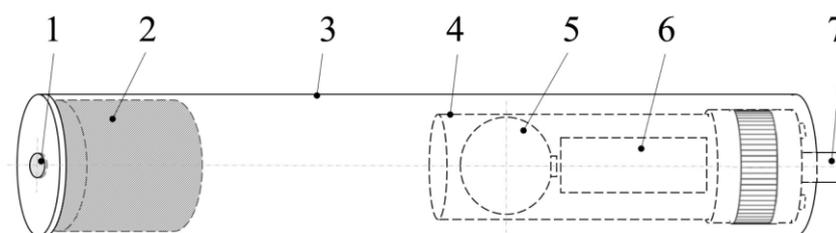


Рисунок 2 – Схема детектирующей головки гамма-сканера с антиколлиматором

### Спектрометрический детектор

Чувствительный объем детектора выполнен в форме шара для сохранения изотропии чувствительности при повороте детектирующего блока. В качестве сцинтиллятора детектора применяется монокристаллический йодид цезия, активированный таллием CsI(Tl).

Для ожидаемой максимальной мощности дозы в обследуемом помещении порядка в 0,1 мЗв/ч из расчета предельной загрузки детектора был подобран оптимальный объем кристалла сцинтиллятора — 6 см<sup>3</sup>.

В качестве фотоприемников применялись твердотельные кремниевые фотоумножители СРТА-149-35 с размером чувствительной области 3×3 мм, изготовленные в АО «Центр перспективных технологий и аппаратуры». При применении одного фотоприемника энергетическое разрешение по линии 662 кэВ составляло 18 % (рис. 3а). Для повышения эффективности светосбора было использовано четыре фотоприемника, что позволило добиться энергетического разрешения 12,1 % по линии 662 кэВ (рис. 3б).

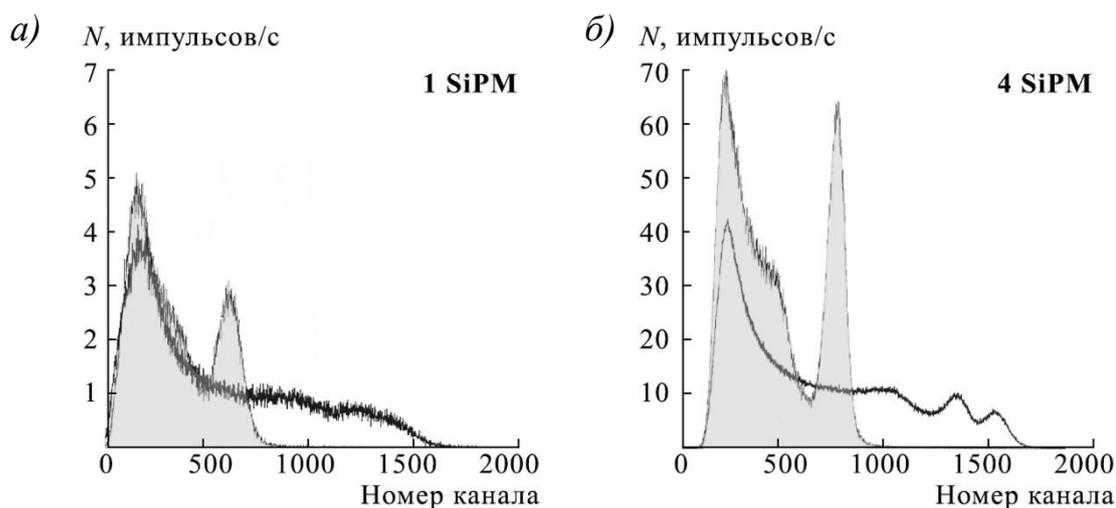


Рисунок 3 – Аппаратурные спектры радионуклидов <sup>60</sup>Со и <sup>137</sup>Сs, полученные на одном кристалле CsI(Tl) с одним (а) и четырьмя (б) фотоприемниками

Общие размеры детекторного блока составили Ø40×135 мм, а масса — менее 200 г. Это позволило создать максимально легкое и мобильное устройство.

### Спектроанализатор

Для получения и предварительной обработки информации с детектора применяется спектроанализатор «Колибри», изготовленный группой предприятий «ГринСтар». Это спектрометрическое устройство, предназначенное для преобразования импульсных сигналов, получаемых с детекторов ионизирующих излучений с последующим накоплением, преобразованием и выводом информации о получаемых амплитудных спектрах.

### Моделирование и оптимизация геометрических параметров

Для оптимизации геометрически значимых параметров системы сканирования была создана математическая модель спектрометрического детектора в форме шара объемом  $6 \text{ см}^3$  со свинцовым антиколлиматором. Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло в геометрии, показанной на рис. 4.

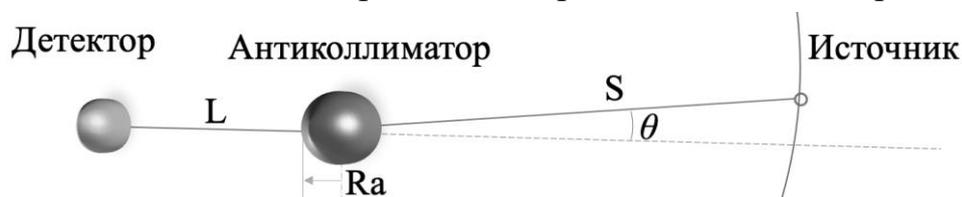


Рисунок 4 – Схема моделируемой системы гамма-сканера с антиколлиматором

В качестве материала антиколлиматора рассматривались свинец и вольфрам, поскольку они обладают высокой поглощающей способностью. Экранирующие свойства свинца несколько уступают вольфраму, однако вольфрам – дорогой, тугоплавкий материал, сложно поддающийся механической обработке, поэтому для создания прототипа гамма-сканера с антиколлиматором был выбран свинец.

Такая система многократно моделировалась с различными геометрическими значениями. Для каждой конфигурации сравнивались частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), величина отношения сигнала к шуму (ОСШ), а также форма аппаратной функции. На основании анализа полученных данных были определены оптимальные параметры системы и изготовлен прототип гамма-сканера.

### Аппаратная функция

Для реализации способа восстановления изображения 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. Аппаратная функция гамма-сканера определялась экспериментально и представлена на рис. 5.

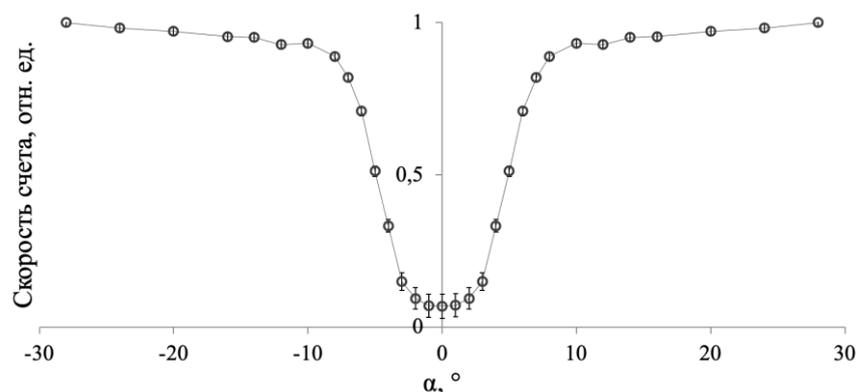


Рисунок 5 – Аппаратная функция детектора с антиколлиматором

### Поворотное устройство

Поворотно-наклонное устройство предназначено для позиционирования детектирующей головки по двум направлениям – полярному и азимутальному.

При выборе привода для разрабатываемого устройства оценивались требования к крутящему моменту и расчетной нагрузке, а также требования к скорости поворота и точности позиционирования. Поскольку для решения поставленной задачи требуется точное позиционирование системы, основными вариантами являлись шаговые двигатели и сервоприводы. Однако для контроля положения шагового двигателя требуются дополнительные датчики, поэтому для решения поставленной задачи в качестве вращающего элемента поворотного-наклонного механизма были выбраны сервоприводы.

### Видеокамера

Основными требованиями к средству получения фотоснимка являются легкость и высокая скорость работы. Для получения изображения выбран бескорпусной модуль видеокамеры IMX219 с максимальным разрешением 8 Мп (3280×2464) и массой всего 3 г. Подключение к контроллеру осуществляется при помощи специального видеовхода CSI (Camera Serial Interface), обеспечивающего качественную передачу сигнала на высокой скорости.

### Программное обеспечение

Связь между составными частями устройства обеспечивается программой управления «РТСКАpp». Программа предназначена для управления работой гамма-сканера с антиколлиматором и позволяет пользователю осуществлять настройку положения сканирующей головки и управлять измерениями.

Для определения области интереса в окне программы предусмотрено отображение снимка, получаемого из текущего положения сканирующей головки, с отображением отметки лазерного указателя, направленного вдоль оси антиколлиматора. Измерения выполняются в двух режимах – однократное фоновое измерение и по координатное сканирование.

Для сканирования области интереса пользователь устанавливает координаты начальной и конечной точек сканирования, угол перемещения детектирующей головки по каждой оси, а также время измерения в каждой точке. В процессе сканирования отображается фотоснимок из текущего положения детектирующей головки и указываются координаты текущей точки измерения. Результатом сканирования являются массив спектров и фотографий, соответствующие угловым координатам для каждой точки измерения.

### Обработка результатов измерений

Для визуализации распределения источников гамма-излучения в обследуемых помещениях используют данные зарегистрированного нерассеянного излучения. Для этого в аппаратурном спектре выделяется пик полного поглощения, формируемый нерассеянными гамма-квантами. Количественной характеристикой пика полного поглощения является скорость счета зарегистрированных импульсов  $n_{\vec{\Omega}_0}(\Delta E)$ , имп/с, в определенном энергетическом интервале  $\Delta E$  разностного спектра при направлении оси системы детектор — антиколлиматор, определяемом вектором  $\vec{\Omega}_0$ . Для выделения полезного сигнала выполняется набор фонового спектра, формируемого излучением от всех источников в помещении (измерение открытым детектором без антиколлиматора).

Угол зрения антиколлиматора  $\Delta\Omega$  достаточно велик (порядка  $15^\circ$ ), поэтому по результатам сканирования формируется «размазанная» картина распределения активности. Реальная картина распределения активности  $A_s(\vec{\Omega}')$  связана с результатами измерений  $n_{\vec{\Omega}_0}(\Delta E)$  интегральным уравнением вида:

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

где  $F(|\vec{\Omega}_0 \vec{\Omega}'|) \equiv F(\cos\vartheta)$  – аппаратная функция антиколлиматора;  
 $\Delta\Omega$  – телесный угол зрения антиколлиматора;  
 $C_{calibr}$  – коэффициент пропорциональности.

Интегральное уравнение (1) сводится к системе алгебраических уравнений, для решения которой применяется итерационный метод максимального правдоподобия, позволяющий определить фактическое распределение активности  $A_s(\vec{\Omega}')$ .

Описанный способ является процедурой восстановления изображения источников, которая осуществлялась по результатам каждого сканирования.

Для формирования дозовой карты необходимо определить вклад в мощность дозы гамма-излучения от распределенных в помещении источников. Для преобразования аппаратурного спектра в дозовую характеристику учитывается так называемый «ход с жесткостью», компенсировать который можно с помощью весовой функции  $K(E)$ . Для этого используется функциональная зависимость мощности дозы  $\dot{H}$  от аппаратурного спектра  $N(E)$ , которая определяется выражением

$$\dot{H} = \int_0^{E_0} K(E) N(E) dE \quad (2)$$

Весовая функция  $K(E)$  находится путем решения интегрального уравнения с привлечением функций отклика спектрометрического детектора на моноэнергетические гамма-кванты. Весовая функция для применяемого детектора (сцинтиллятор CsI(Tl) в форме шара объемом  $6 \text{ см}^3$ ) представлена на рис. 6а.

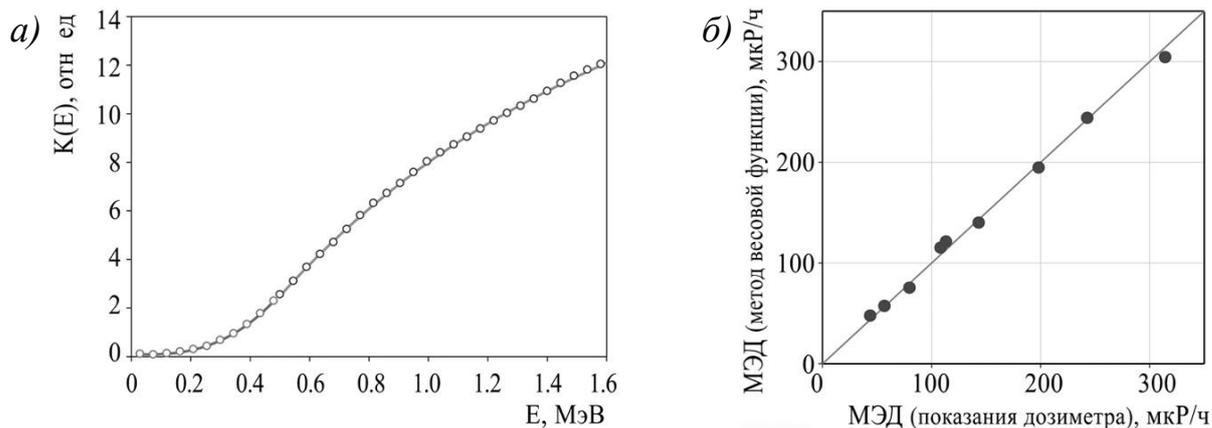


Рисунок 6 – Энергетическая зависимость функции  $K(E)$  для применяемого детектора (а). Сопоставление данных МЭД, измеренных дозиметром и методом весовой функцией (б).

Точность данного метода определения дозы излучения от источников разного спектрального состава была оценена экспериментально, путем сравнения значений мощности дозы, полученных методом весовой функции  $K(E)$ , с фактическими значениями, измеренными с помощью дозиметра. Результаты приведены на рис. 6б.

### Выводы

Разработан и создан прототип устройства для обследования радиационно-загрязненных помещений методом сканирования с применением антиколлиматора. Разработана методика обработки результатов измерений сканера с антиколлиматором.

В третьей главе «Испытания устройства» приведено описание выполненных экспериментов, а также представлены результаты испытаний прототипа гамма-сканера с антиколлиматором.

### Визуализация точечного источника

Процесс получения гамма-изображения хорошо иллюстрирует эксперимент по визуализации точечного источника (рис. 7).

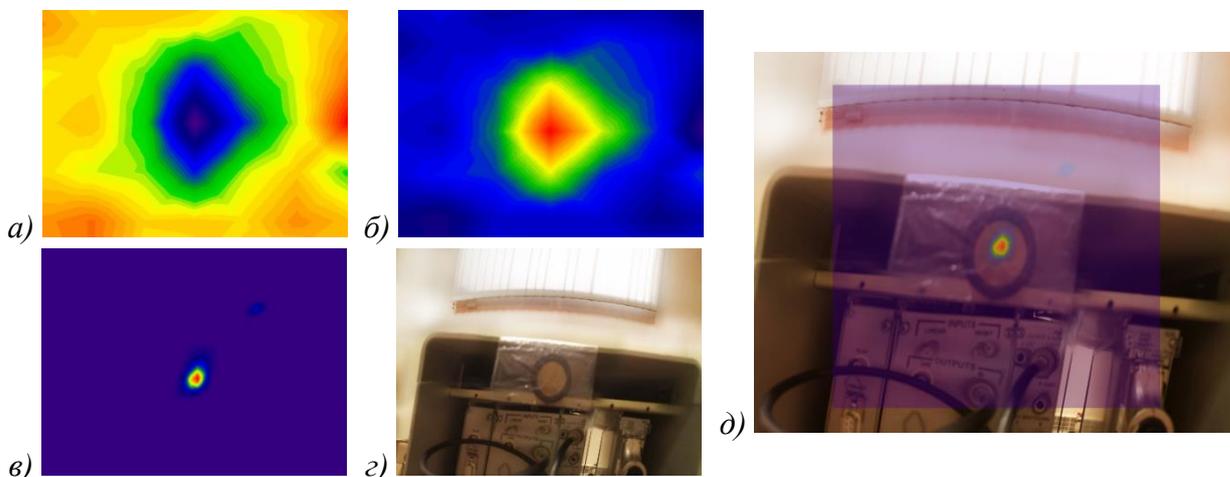


Рисунок 7 – Процедура обработки результатов измерений на примере визуализации точечного источника типа ОСГИ с радионуклидом  $^{22}\text{Na}$

В границах области сканирования случайным образом располагался точечный источник с радионуклидом  $^{22}\text{Na}$ . Для учета фона было выполнено измерение без антиколлиматора, учитывающее излучение от всех источников. Затем в процессе сканирования в каждой точке экспозиции снимались спектры, в каждом из которых определялась интегральная скорость счета в пике полного поглощения.

Графически результаты сканирования представлены в виде поверхностной цветовой диаграммы, в которой координаты соответствуют координатам сканирования, а цвет – величине скорости счета в пике полного поглощения. Итогом сканирования является негативное изображение (рис. 7а). Позитивное изображения (рис. 7б) представляет собой разностную картину, получаемую вычитанием измеренных данных из фонового измерения. Для повышения углового разрешения и точности локализации применяется процедура восстановления, результат которой показан на рис. 7в. Для визуализации распределения источников результат восстановления изображения (рис. 7в) накладывался на панорамное изображение (рис. 7г), получаемое в результате сшивки массива фотоснимков, сделанных в каждой точке сканирования. Полученная карта углового распределения активности (рис. 7д) качественно демонстрирует расположение гамма-источников, что подтверждает работоспособность устройства и эффективность применяемого метода гамма-визуализации.

#### Определение точности и воспроизводимости позиционирования

Точность позиционирования сканирующей головки гамма-сканера с антиколлиматором определялась по результатам испытания с применением лазерного указателя направления сканирующей головки. Измерения проводились для двух значений шага сканирования:  $2^\circ$  и  $5^\circ$ , поскольку в реальных условиях эксплуатации оптимальный шаг сканирования составляет  $5^\circ$ , а минимальный –  $2^\circ$ .

Точность позиционирования определялась как максимальное позиционное отклонение по каждой оси. Воспроизводимость позиционирования определялась как интервальная оценка разности положений сканирующей головки в двух сканированиях.

Результаты показывают стабильность работы поворотного устройства как при сканировании с шагом  $2^\circ$ , так и при шаге  $5^\circ$ . В обоих случаях отклонение от первоначальной позиции не превышает  $0,4^\circ$ . Точность позиционирования по результатам серии измерений не превышает  $1,5^\circ$ .

#### Определение зависимости счетной характеристики от МЭД

Экспериментально определялся верхний предел загрузки детектора. Для различных значений мощности дозы снимались аппаратурные спектры, в каждом

из которых определялись мертвое время и скорость счета во всем спектре и в пике полного поглощения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Результаты приведены на рис. 8.

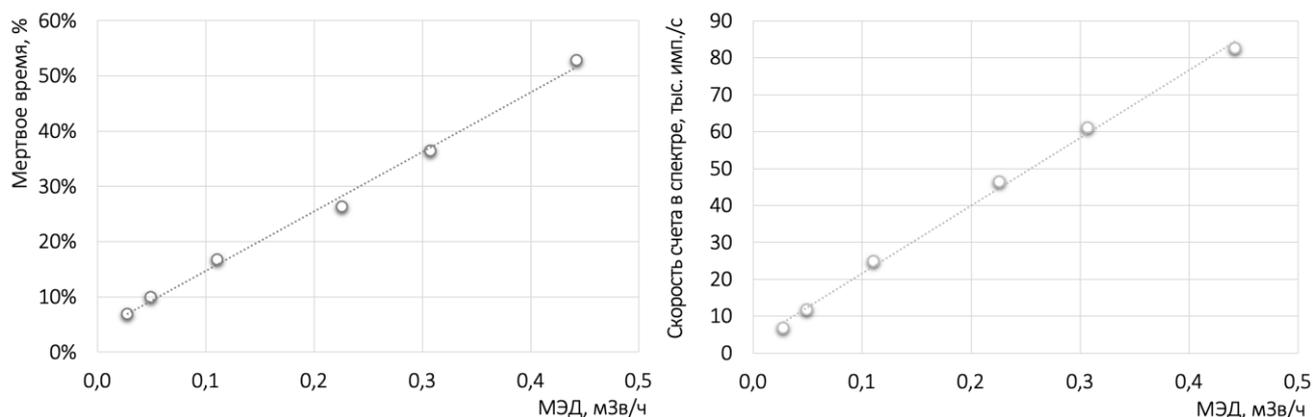


Рисунок 8 – Зависимость относительного мертвого времени от МЭД (слева) и зависимость интегральной скорости счета в аппаратном спектре от МЭД (справа)

Эксперимент показывает возможность работы в условиях максимальной мощности дозы в точке размещения устройства до значений порядка 0,1 мЗв/ч.

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

#### Влияние фоновой боковой подсветки

Важной характеристикой системы визуализации является возможность работы в условиях фоновой боковой подсветки. 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 боковой подсветки возможно получение изображения отдельного источника.

Для оценки влияния фонового излучения на работу гамма-сканера с антиколлиматором была проведена серия экспериментов с двумя точечными источниками с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ . Мощность дозы  $\dot{H}_1$ , создаваемая визуализируемым источником, составляла 0,01 мЗв/ч. Второй источник формировал поле боковой подсветки  $\dot{H}_2$  и располагался вне области сканирования на различных расстояниях. Результаты визуализации приведены на рис. 9(a-г).

Из экспериментальных данных следует, что при пятикратном превышении уровня фона над источником возможна качественная визуализация.

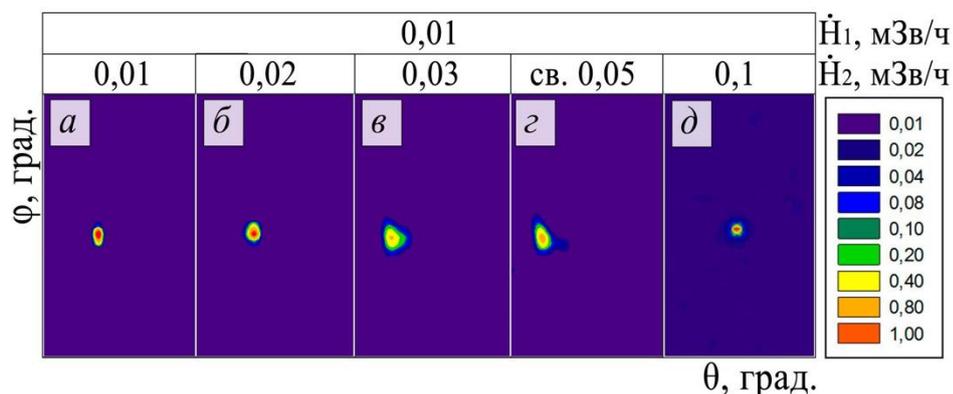


Рисунок 9 – Влияние излучения подсветки на качество восстановленного гамма-изображения точечного источника

Для случая десятикратного превышения проводилось моделирование, результаты которого показаны на рис. 9д. В работе представлен общий критерий допустимых значений уровней боковой подсветки в зависимости от мощности дозы, создаваемой визуализируемым источником. Анализ результатов измерений показал возможность визуализации источника и при 10-ти кратном превышении значения фона.

#### Мультинуклидное загрязнение

Пример получения изображений источников различного радионуклидного состава демонстрирует эксперимент по визуализации источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  (рис. 10).

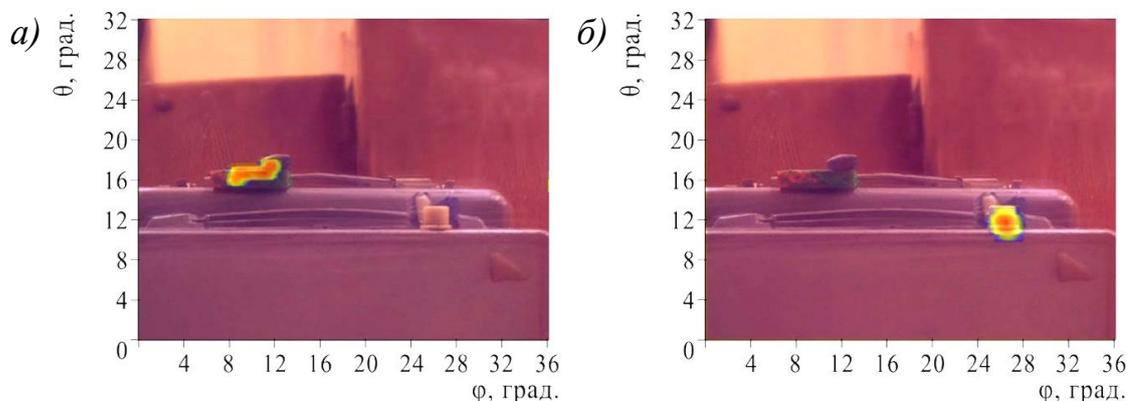


Рисунок 10 – Гамма-изображения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  (а) и  $^{60}\text{Co}$  (б)

В области сканирования размещались точечный источник с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  и протяженный источник с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  сложной Г-образной формы. По данным различных спектральных областей аппаратурных спектров отдельно получены изображения источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Реконструкция изображения итерационным методом позволяет не только определить их точное расположение, но также различает сложную форму источника  $^{137}\text{Cs}$ .

#### Оценка углового разрешения

Одним из основных параметров системы визуализации является угловое разрешение. Для сканера с антиколлиматором угловое разрешение определялось с

помощью двух точечных источников излучения с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ , размещаемых на различном угловом расстоянии друг от друга. Соотношение активностей составляло 3:1. Сканирование выполнялось с шагом  $5^\circ$ . При расположении источников на угловом расстоянии  $5,3^\circ$ , применение процедуры восстановления позволяет идентифицировать их как отдельные (рис. 11).

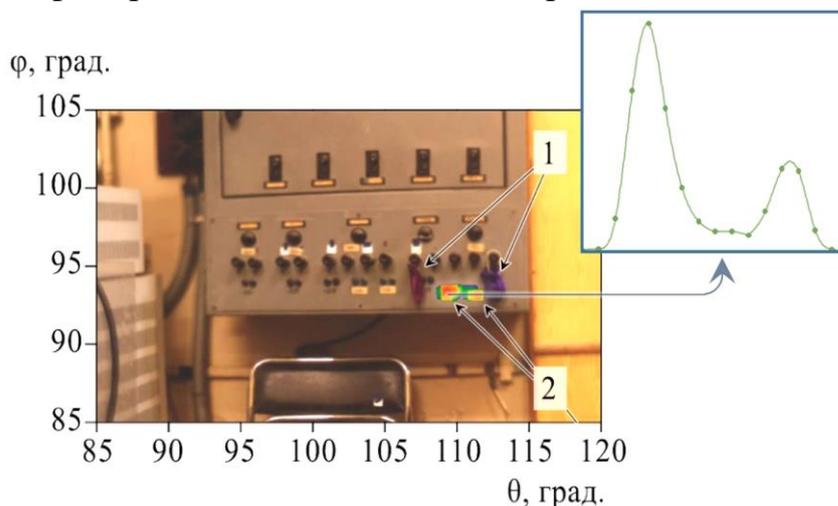


Рисунок 11 – Изображение двух точечных источников, расположенных на угловом расстоянии  $5,3^\circ$ . 1 – фактическое расположение, 2 – результаты визуализации.

Дополнительно в левом верхнем углу вынесен профиль гамма-изображения

Полученные результаты позволяют сделать заключение о том, что при шаге сканирования  $5^\circ$ , с применением процедуры восстановления, возможна визуализация двух точечных источников, расположенных на угловом расстоянии  $5^\circ$ . Здесь следует отметить, что качество восстановления, и в особенности угловое разрешение, зависят от множества факторов, таких как шаг сканирования, время экспозиции, количество выполняемых в процессе реконструкции итераций и др.

### Полевые измерения

Полевые испытания гамма-сканера с антиколлиматором проводились в одном из помещений здания с системой очистки воды первого контура реактора РФТ от радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Пример одного из результатов обследования показан на рис. 12.

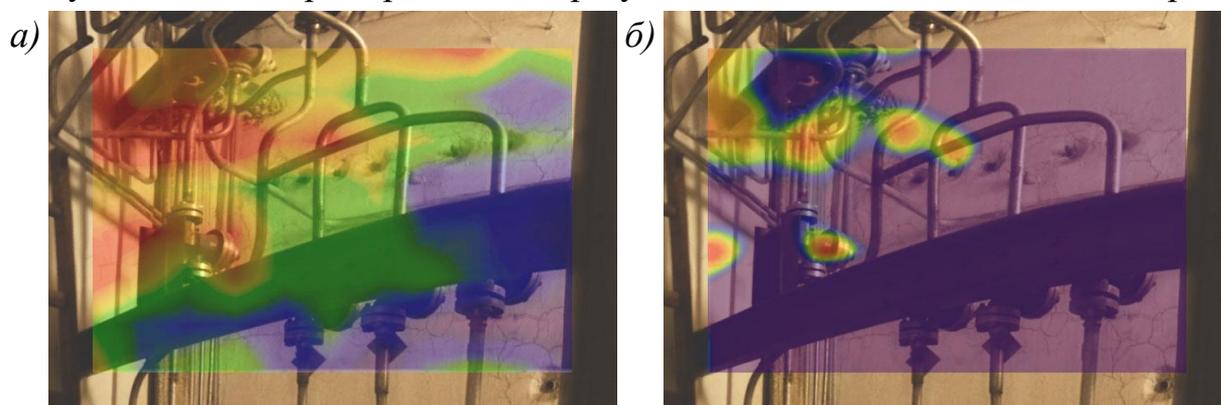


Рисунок 12 – Распределение активности  $^{137}\text{Cs}$  по результатам сканирования (а) и после обработки итерационным методом (б)

В месте расположения гамма-сканера уровень мощности дозы достигал значений 0,03 мЗв/ч. Сканирование проводилось в области интереса  $50^\circ \times 35^\circ$  с шагом  $5^\circ$  по каждой оси; время экспозиции составляло 60 с.

Обследование показало наличие в помещении радиоактивного загрязнения радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ . Других радионуклидов в помещении не обнаружено. Изображения, представленные на рис. 12, иллюстрируют изменение качества изображения в результате обработки итерационным методом. Наложение гамма-изображения на оптический снимок позволило локализовать наиболее загрязненные участки: вентили, сварочные швы, отдельные участки трубопровода.

### Выводы

Испытания устройства показывают перспективность применения методики покоординатного сканирования с применением антиколлиматора для обследования радиационно-загрязненных объектов. Продемонстрирована возможность локализации источников гамма-излучения с помощью прототипа гамма-сканера с антиколлиматором. Определены основные характеристики прототипа.

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 объема и массы 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.

## 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  $5^\circ$  (для шага сканирования  $5^\circ$ ) 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.

## Список литературы

1. 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
2. В. Е. Степанов, С. В. Смирнов, О. П. Иванов, А. С. Данилович. Дистанционно управляемый коллимированный детектор  $\gamma$ -излучения для измерения радиоактивных загрязнений // Атомная энергия. – 2010, т. 109, № 2, с. 82–84
3. 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
4. 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
5. 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
6. Baker R., Lovett R., Orford K. et al.  $\gamma$ -Rays of 1 to 10 MeV from the Crab and Cygnus Regions // Nature Physical Science 245, 18–19, 1973
7. 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, pp. 553–558, 1976
8. 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
9. 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
10. 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
11. Steven M. Kahn, Rashid A. Sunyaev, Peter von Ballmoos. High-Energy Spectroscopic Astrophysics // Springer, 2005
12. Patent EP0613023A2. Radiation camera systems. European Patent Application, Application number 94300288.1, Date of filling: 17.01.94, Priority: 22.01.93 GB 9301206, Applicant: British Nuclear Fuels PLC Risley Warrington Cheshire, WA3 6 AS (GB)

Самойлова Мария Андреевна

Формирование гамма-изображений радиоактивных  
объектов с помощью сканера с антиколлиматором

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 22.04.2022

Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Объём: усл. печ. л. 1,5.

Тираж 70 экз. Заказ № 4855/24.

Типография «Постер-М»

192296 Москва, ул. Молодежная, 3

[www.poster-m.su](http://www.poster-m.su)