

На правах рукописи

**Лэй Вин**

**МНОГОМОДУЛЬНЫЕ ДЕТЕКТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ  
УСКОРЕННОГО ПОИСКА НЕПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАМ-  
МА ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ**

01.04.01 - “Приборы и методы экспериментальной физики”

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010 г.

Работа выполнена в национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель *кандидат физико-математических наук,  
доцент,  
Кадилин Владимир Валериевич.*

Официальные  
оппоненты: *доктор физико-математических наук,  
профессор НИЯУ МИФИ  
Дмитренко Валерий Васильевич*

*кандидат физико-математических наук,  
заместитель главного конструктора-  
начальник научно- производственного  
отделения ФГУП «ВНИИА»  
Семенов Дмитрий Сергеевич*

Ведущая организация: *ОАО «НИИТФА»*

Защита диссертации состоится «11» марта 2010 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.130.07 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: *115409 Москва, Каширское шоссе, д.31*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Улин С.Е.

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы** Попадание источников ионизирующего излучения в сферу жизнедеятельности человека представляет серьезную угрозу его здоровью. Неучтенные и неконтролируемые источники ионизирующего излучения представляют большую опасность провокаций и террористических актов. Существует острая необходимость в обнаружении, локализации и мониторинговании территорий с очагами радиоактивного загрязнения окружающей среды. Эти очаги имеют, как правило, техногенное происхождение, поэтому не исключена вероятность их возникновения и сегодня. Ликвидация возникших очагов загрязнения может проводиться только после точной локализации места нахождения источников излучения. Поэтому проблема ускоренного обследования местности, загрязненной  $\gamma$ -излучающими радионуклидами и поиска локальных источников  $\gamma$ -излучения, проблема обнаружения источников ионизирующего излучения техногенного происхождения и определения места их локализации, а также разработка методов определения направления на источник  $\gamma$ -излучения имеет особую актуальность. Чрезвычайно важна задача обнаружения несанкционированного провоза радиоактивных материалов при проведении проверки грузов на контрольно-пропускных пунктах. Наиболее распространенными случаями обнаружения радиоактивных веществ являются точечные и непротяженные  $\gamma$ -источники искусственного происхождения и ядерные материалы, обладающие  $\gamma$ - и нейтронным излучением. Для решения подобных проблем необходимы приборы, способные проводить обнаружение и локализацию различных  $\gamma$ -источников, определять как энергию, так и интенсивность дискретных  $\gamma$ -линий. В качестве такого прибора можно использовать многомодульные

детектирующие устройства (ММДУ), укомплектованные сцинтилляционными детекторами.

По отклику (результату одного измерения) ММДУ возможно определение факта наличия источников  $\gamma$ -излучения; оценка дозовых характеристик поля излучения в точке измерения; определение количества точечных источников излучения и направлений на них (при некоторых ограничениях), определение плотности потока  $\gamma$ -излучения. В случае комплектации ММДУ модулями, позволяющими проводить оценку энергетического распределения потока излучения возможно определение типа источника.

В зависимости от вида решаемой задачи ММДУ могут иметь различную конфигурацию и комплектоваться различными регистрирующими устройствами. С помощью ММДУ можно проводить целенаправленный поиск и локализацию непротяженных источников ионизирующего излучения, что значительно ускоряет процесс обследования заданного участка местности из-за отсутствия необходимости сканирования всей территории. Оптимальная компоновка регистрирующих модулей ММДУ достигается расчетом функции отклика ММДУ, включая конструкцию ослабляющего излучение экрана, и самих детектирующих модулей устройства методами математического моделирования взаимодействия излучения с веществом в объеме детектирующего устройства.

**Целью работы** является разработка и создание расчетных моделей ММДУ, позволяющих определять направление на непротяженный источник  $\gamma$ -излучения и проводить ускоренный поиск источников, их локализацию и идентификацию.

Для достижения этой цели **решаются следующие задачи** :

1. выбор материала защитного экрана, типа сцинтилляционного детектора  $\gamma$ -излучения, и количества модулей устройства;
2. моделирование ММДУ с разными материалами защитного экрана и сцинтиллятора;
3. проведение анализа различных компоновок устройства;
4. проведение экспериментального исследования угловой зависимости откликов модели ММДУ и сравнение результатов эксперимента с результатами расчета;
5. разработка методов определения направления на источники  $\gamma$ -излучения и их локализации;
6. разработка методики ускоренного поиска источников  $\gamma$ -излучения.

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые разработаны расчетные и экспериментальные макеты систем детекторов на базе сцинтилляционных детекторов с различной конфигурацией и материалами защитных экранов и сцинтилляторов для определения направления на источники  $\gamma$ -излучения, их типа и локализации на плоскости по результатам единичного измерения.
2. Впервые разработана методика определения направления на источники  $\gamma$ -излучения с применением аналитического приближения угловой функции отклика ММДУ.
3. Впервые разработан алгоритм и программа на основе нейронных сетей по расчету параметров (направления, координат, активности) неизвестного источника по откликам ММДУ.
4. Впервые предложены методы применения разработанных моделей ММДУ для ускоренного направленного поиска локальных источни-

ков  $\gamma$ -излучения, определения их типа и локализации при обследовании участков местности.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что.

- создана методика расчета функции отклика ММДУ и других характеристик детектирующих устройств с анизотропной чувствительностью к излучению, позволяющая легко варьировать типы и конфигурацию детекторов и поглощающих экранов для выбора наилучшего варианта решения поставленной задачи;
- создана новая модель ММДУ2, позволяющая по результатам одного измерения проводить локализацию источника  $\gamma$ -излучения, ММДУ2 может быть установлено на подвижной платформе для ускорения поиска и локализации источника гамма-излучения;
- создан специализированный алгоритм, использующий нейронные сети, позволяющий в режиме on line по результатам одного измерения отклика ММДУ определять параметры источников  $\gamma$ -излучения, проводить их ускоренный поиск и локализацию;
- проведенное экспериментальное исследование разработанной методики и аппаратуры для решения задач обнаружения непротяженных источников ионизирующего излучения и полученное согласие экспериментальных и расчетных данных создают предпосылки к созданию опытной конструкции ММДУ и дооснащения ей мобильных лабораторий для обнаружения и локализации  $\gamma$ -источников.

**Автор выносит на защиту**

- Результаты расчетных исследований функций откликов ММДУ с различными конфигурациями защитного экрана и регистрирующих модулей.

- Конфигурацию ММДУ использующую выбранное количество и конфигурацию регистрирующих модулей и защитного экрана.
- Результаты экспериментального исследования характеристик модели ММДУ и сравнения их с результатами расчетного моделирования.
- Модель ММДУ2, позволяющую по результатам одного измерения провести локализацию источника  $\gamma$ -излучения.
- Алгоритм определения направления на источники излучения и параметров источников с применением аналитического приближения угловой функции отклика ММДУ и при помощи нейронных сетей.
- Алгоритм локализации источника излучения

#### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на XV Международной научной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2008», Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2009 (Санкт-Петербург 2009г), 7-ой Курчатовской молодежной научной школе и на научных сессиях МИФИ 2007-2009гг (4 доклада).

#### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 10 работ, перечень которых приведен в конце автореферата.

#### **Личное участие автора**

- Математическое моделирование ММДУ
- Разработка методов определения направления на источники  $\gamma$ -излучения и их локализации
- Постановка и проведение эксперимента

- Обработка результатов расчетных и экспериментальных исследований

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников.

Содержит 124 страницы, в том числе 71 рисунок и 17 таблиц. Список литературы включает 69 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, указаны научные новизна, практическая значимость и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются приборы для поиска источников  $\gamma$  - излучения. Для непротяженных  $\gamma$ - источников характерны линейные размеры, которые значительно меньше измеряемых расстояний, значимых для решения задачи обнаружения источников.

Радиометры для измерения угловых распределений могут содержать либо группу детекторов с анизотропной чувствительностью, оси которых расположены под некоторым углом относительно друг друга, либо – один детектор, поворачиваемый в пределах апертуры угла обзора. В первом случае измерения углового распределения выполняются параллельно для нескольких углов. Во втором случае измерения проводятся последовательно, и каждому углу ставится в соответствие свой результат измерения. Кроме того, используются системы детекторов  $\gamma$ - излучения с анизотропной угловой чувствительностью, являющейся однозначной функцией угла падения плоскопараллельного потока на детектор. Простейшими детекторами для исследования пространственного распределения потоков излучения являются детекторы, чувствительность которых не зависит от



направления потока излучения, но в этом случае требуется сканирование местности.

Изложено несколько примеров комплексов аппаратуры и отдельных детекторов, используемых для поиска и локализации источников  $\gamma$ -излучения. Рассмотрены ранее разработанные на кафедре «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ модели многомодульных детектирующих устройств.

**Во второй главе** рассматриваются методы моделирования взаимодействия излучения с детектирующим устройством с целью получения отклика устройства. Рассматривается метод Монте-Карло и некоторые примеры моделирования детекторов. Обоснован выбор пакета MCNP-4C для расчета откликов моделей устройств. Методы определения направления на источник  $\gamma$ -излучения при помощи ММДУ основаны на результатах измерений соотношений откликов составных частей ММДУ. Для расчетного исследования характеристик ММДУ была выбрана математическая модель устройства с симметричным расположением детекторов вокруг защитного экрана.

Большинство расчетов проводились для источника  $\gamma$ -излучения с энергией 662 кэВ (Cs-137). При представлении результатов принималось, что угол равный нулю соответствует направлению на источник излучения вектора, проходящего через центр детектора и середину первого модуля. Оценку качества экранировки излучения проводили по коэффициенту анизотропии  $K$ , равному отношению откликов первого модуля при углах  $0^\circ$  и  $180^\circ$ :  $K = n_1(\Psi = 0^\circ) / n_1(\Psi = 180^\circ)$  и скорости изменения отклика:

$$D = \frac{n_1(\theta = 30^\circ) - n_1(\theta = 50^\circ)}{20^\circ} \cdot 1000 [\text{град}^{-1}].$$

При получении угловой зависимости откликов ММДУ использованный функционал  $n_i$  в каждом модуле вычисляли для каждого значения угла  $\theta$  с шагом  $5^\circ$  при повороте детектора относительно вертикальной оси проходящей через центр детектора.

При выполнении моделирования были рассмотрены защитные экраны ММДУ из трех различных материалов. Такими материалами являются: алюминий, сталь (железо) и свинец. Известно, что чем больше атомный номер материала, тем эффективнее он поглощает  $\gamma$ -излучение, что увеличивает коэффициент анизотропии, но при этом уменьшает общую чувствительность ММДУ.

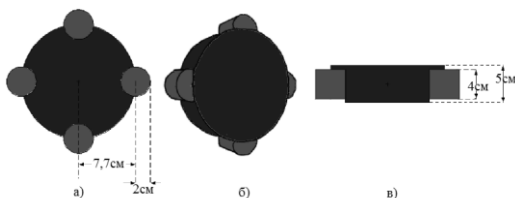


Рис. 1. Модель ММДУ использованная при проведении расчетов, а) Поперечное сечение устройства, б) Трехмерное изображение устройства, в) Продольное сечение устройства

При исследовании угловой зависимости чувствительности модулей ММДУ с экранами из различных материалов в качестве материала детектора был использован сцинтиллятор CsI(Tl) разных поперечных размеров и высотой 4 см. Экран имел форму цилиндра, его высота была равна 5 см (рис. 1). Количество детекторов (модулей) варьировалось.

Для обоснования выбора материала защитного экрана и сравнения способностей экранирования  $\gamma$ -излучения были построены угловые зависимости откликов модулей, приведенные на рис. 2. для трех материалов. Результаты, приведенные на графиках, нормированы на один испущенный источником фотон. Для большинства вариантов расчетов рассматри-

валось  $10^6$  историй ( $10^6$  фотонов в  $4\pi$ ), источник находился на расстоянии 20 см от центра устройства. Статистические погрешности результатов, как правило, меньше размеров точек.

Из данных представленных на рис. 2. видно, что при одинаковых размерах наибольшими экранирующими свойствами обладает свинцовый экран, но ММДУ с этим экраном имеет наименьшую суммарную чувствительность (рис.3). Алюминиевый экран, наоборот, имеет максимальную суммарную чувствительность и наихудшие экранирующие свойства. Железный экран достаточно хорошо экранирует  $\gamma$ -излучение Cs-137 и имеет достаточную чувствительность. Угловая зависимость суммарной чувствительности для него из трех рассмотренных экранов минимальна. Суммарную чувствительность ММДУ предлагается использовать для оценки активности источника, мощности дозы излучения в точке измерения и, в идеале, она не должна зависеть от углового положения источника. Кроме того, железный экран наиболее доступен для практического использования.

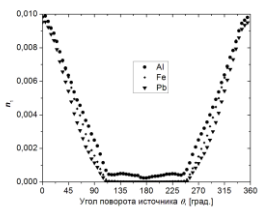


Рис 2. Угловая зависимость отклика 1-го модуля при использовании трех разных материалов экрана

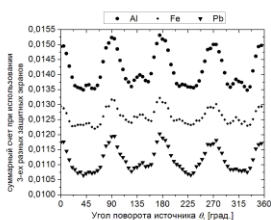


Рис 3. Угловая зависимость суммы откликов модулей для четырехмодульной модели ММДУ при использовании трех разных материалов экрана

Форма защитного экрана и сцинтилляторов, входящих в состав ММДУ, существенно влияет на угловую зависимость откликов. Было рассмотрено

несколько форм защитных экранов и сцинтилляторов CsI(Tl) разной фор-

мы. Для каждой формы экрана был определен коэффициент анизотропии. Расчеты проводились для трех материалов экранов. Результаты для железного экрана представлены в табл. 1.

Для каждого модуля имеется область наибольшего изменения угловой чувствительности и область практического отсутствия такой зависимости из-за экранировки излучения экраном и другими модулями. Степень указанной экранировки существенно зависит от материала экрана и его конфигурации. Наиболее предпочтительными являются модели № 1) и 2), как имеющие достаточно большой показатель анизотропии, высокую суммарную чувствительность и плавную зависимость отклика от направления на источник излучения. Данные схемы послужили прообразом разработанной физической модели четырех и шестимодульного ММДУ.

Таблица. 1. Значения  $K$  и откликов ММДУ с экраном из железа.

№	Варианты ММДУ1	$n_1(\theta=0^\circ)$	$n_1(\theta=180^\circ)$	$K$	$D$
1	4 модуля, цилиндр. сцинт, экран–цилиндр	9,83E-3± 9,8E-5	1,20E-5± 3,5E-6	819,17± 3,5E-4	0,11± 1,2E-4
2	6 модулей, цилиндр. сцинт, экран–цилиндр	9,86 E-3± 9,9E-5	1,00E-5± 3,2E-6	986,00± 3,2E-4	0,11± 1,2E-4
3	8 модулей, цилиндр. сцинт, экран–цилиндр	9,86 E-3± 9,9E-5	1,00E-5± 3,2E-6	986,00± 3,2E-4	0,11± 1,2E-4
4	4 модуля, цилиндр. сцинт, экран–крест	1,04 E-2± 1,0E-4	7,00E-6± 2,7E-6	1484,29± 2,6E-4	0,27± 1,0E-4
5	4 модуля, кубический сцинт, экран–крест	1,22 E-2± 1,1E-4	7,00E-6± 2,7E-6	1735,71± 2,2E-4	0,22± 1,1E-4
6	6 модуля, цилиндр. сцинт, экран–крест	1,04 E-2± 1,0E-4	7,00E-6± 2,7E-6	1485,71± 2,6E-4	0,27± 1,0E-4
7	6 модуля, кубический сцинт, экран–крест	1,22 E-2± 1,1E-4	7,00E-6± 2,7E-6	1747,14± 2,2E-4	0,28± 1,0E-4
8	8 модуля, цилиндр. сцинт, экран–крест	9,98 E-3± 1,0E-4	8,00E-6± 2,8E-6	1247,50± 2,8E-4	0,12± 1,4E-4
9	8 модуля, кубический сцинт, экран–крест	1,18 E-2± 1,1E-4	8,00E-6± 2,8E-6	1475,00± 2,4E-4	0,12± 1,2E-4

Свойства многомодульного устройства во многом зависят от примененных в модулях детекторов  $\gamma$ - излучения. В работе исследовались от-

клики ММДУ при применении в них сцинтилляционных детекторов разного типа. По результатам расчетов показано, что чем больше плотность сцинтиллятора, тем больше коэффициенты анизотропии. Чем ближе плотность сцинтиллятора к плотности экрана, тем регулярнее угловая зависимость откликов. Указанная закономерность вполне объяснима, так как сцинтилляторы модулей также являются защитными экранами для соседних модулей.

При разработке конструкций ММДУ необходимо учитывать не только угловые зависимости, но и технологичность сцинтиллятора, его стоимость, доступность, временные характеристики сигналов и ряд других факторов. Исходя из результатов расчетов, наиболее предпочтительными сцинтилляционными материалами являются BGO и  $\text{LaBr}_3$ . Для этих материалов получен высокий коэффициент анизотропии, кроме того  $\text{LaBr}_3$  имеет самый высокий световыход, а, следовательно, и энергетическое разрешение, малое время высвечивания, но стоимость его в настоящее время достаточно высока. Наибольшим коэффициентом анизотропии из рассмотренных материалов обладает BGO, но световыход и энергетическое разрешение данного сцинтиллятора невысоки.  $\text{CsI(Tl)}$  также может быть рекомендован качестве сцинтиллятора.

Угловые зависимости для всех вариантов исполнения ММДУ показывают, что толщина материала экрана при выбранных размерах слишком велика, особенно для экранов из железа и свинца. Для уменьшения массы конструкции экрана было предложено применить в центре ослабляющего экрана отверстие.

Угловые зависимости откликов и соответствующие коэффициенты анизотропии для разных материалов представлены на рис. 4. Наличие

отверстия уменьшает коэффициент анизотропии. Но в широком диапазоне углов угловая зависимость практически не меняется. Эти участки угловой зависимости откликов следует использовать для определения направления на источник излучения. Применение отверстия в экране вполне оправдано. Из результатов рис 4. видно, что железный экран достаточно хорошо экранирует  $\gamma$ - излучение как с отверстием, так и без него. Визуально угловые зависимости для экрана из железа не отличаются. Это еще один аргумент для выбора материала экрана.

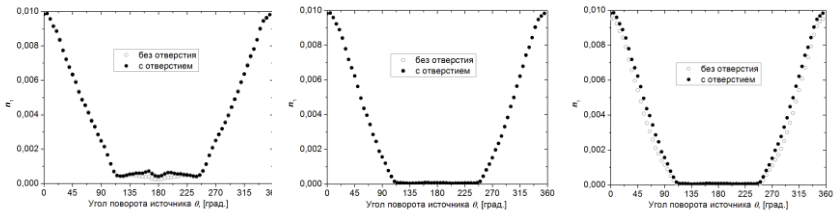


Рис. 4 Сравнение способности экранирования экрана с отверстием и без отверстия; радиусы экрана, отверстия и сцинтиллятора: 7,7см, 3см, 2см, соответственно алюминий. железо свинец

$$\begin{array}{lll}
 K_{Al}(б.о.) = 42,01 \pm 1,57 \times 10^{-3} & K_{Fe}(б. о.) = 819,17 \pm 3,53 \times 10^{-4} & K_{Pb}(б.о.) = 9510,00 \pm 1,05 \times 10^{-4} \\
 K_{Al}(с.о.) = 23,80 \pm 2,11 \times 10^{-3} & K_{Fe}(с.о.) = 130,93 \pm 8,85 \times 10^{-4} & K_{Pb}(с.о.) = 3170,00 \pm 1,82 \times 10^{-4}
 \end{array}$$

Исследовались изменения угловых зависимостей откликов от размеров отверстия в экране. Увеличение радиуса отверстия до 4,5см уменьшает коэффициент анизотропии только за счет увеличения отклика «теневого» модуля, практически не изменяя отклик в диапазонах углов 0-100° и 260-360°, которые важны для определения направления на источник.

Угловые зависимости чувствительности модулей для ММДУ с железным экраном при регистрации  $\gamma$ - излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ до 2 МэВ представлены на рис 5. При изменении энергии от 50 кэВ до 300 кэВ наблюдается изменение наклона зависимости в диапазоне

углов 20-90° и 270-310°. При энергиях больше 500 кэВ и до 2 МэВ характер зависимости практически не меняется.

Устройство, предназначенное для поиска источников радиации должно позволять определять мощность дозы в точке измерения.

С этой характеристикой полезно связать суммарный отклик модулей устройства. Результаты показывают, что с увеличением энергии  $\gamma$ -излучения суммарный отклик, в отличие от отклика «освещенного» модуля, возрастает, что улучшает энергетическую зависимость чувствительности (ход с жесткостью) устройства при определении поглощенной дозы.

На рис. 6. приведено сравнение откликов двух вариантов устройства и мощности дозы при регистрации излучений некоторых  $\gamma$ -источников при одинаковом количестве  $\gamma$ -квантов испущенных источником ( $10^6$  фотонов, расстояние до центра устройства 20см). Видно, что отклик достаточно точно отображает поглощенную дозу, наибольшие отличия наблюдаются для Co-57 и Ba-133.

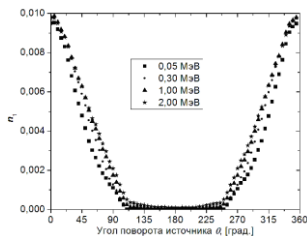


Рис 5. Угловая зависимость отклика первого модуля при регистрации  $\gamma$ -излучения с разной энергией

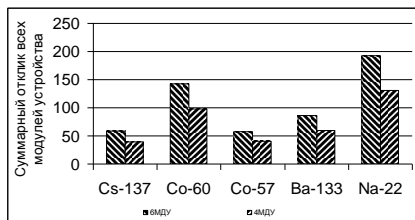
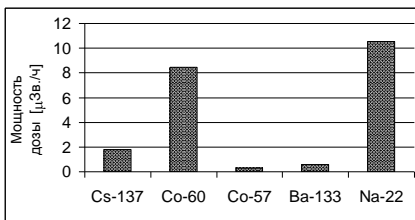


Рис.6. Сравнение суммарного отклика устройства и мощности дозы при регистрации излучений  $\gamma$ -источников

Для нахождения направления на источник  $\gamma$ -излучения на плоскости, достаточно провести одно измерение с помощью ММДУ. Чтобы осуществить локализацию точечного источника ионизирующего излучения необходимо провести два измерения в разных точках или одновременное измерение откликов двух пространственно разнесенных ММДУ. Применение двух ММДУ, дает возможность локализовать источник излучения.

Чаще всего, расположение источника с точностью до полупространства известно. В этом случае применение двух ММДУ с круговой чувствительностью не оправдано. В работе предложена новая модель ММДУ2, которая просматривает только половину всех пространственно-угловых положений источника. Но кроме направления она позволяет определить координаты источника. В этой модели все шесть модулей используются рационально, «теневые» модули отсутствуют. На рис.7-9 представлены расчетная схема и результаты расчета угловых характеристик откликов для модели ММДУ2.

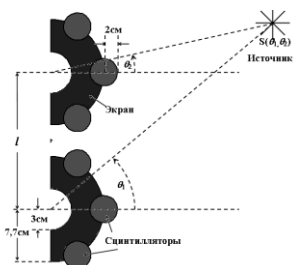


Рис. 7. Схема ММДУ2

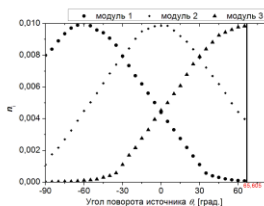


Рис. 8. Зависимость счета  $n_i$  от угла  $\theta_2$  для правой части ММДУ2 при  $l=20$  см

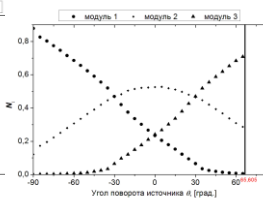


Рис. 9. Угловая зависимость отношения счета модулей, к суммарному счету трех модулей,  $N_i$  для правой части ММДУ2

**В третий главе** приведено описание конструкций и результаты экспериментальных исследований и математического моделирования



откликов соответствующих моделей ММДУ при регистрации излучения от точечного источника  $\gamma$ - излучения Cs-137.

Чувствительной частью каждого модуля является монокристалл CsI(Tl). Монокристалл представляет собой прямоугольный параллелепипед размерами 38см  $\times$  8см  $\times$  4,5см, заключенный в алюминиевый кожух. В работе исследовали две конфигурации ММДУ. Первая конфигурация содержит четыре модуля, которые симметрично крепятся вокруг защитного цилиндрического экрана, а вторая – шесть модулей.

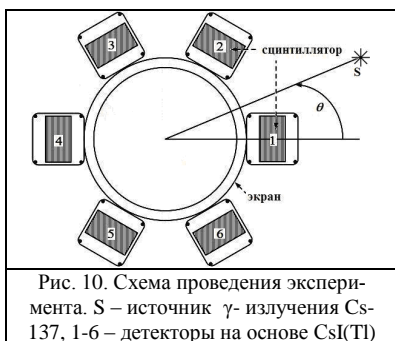


Рис. 10. Схема проведения эксперимента. S – источник  $\gamma$ - излучения Cs-137, 1-6 – детекторы на основе CsI(Tl)

Схема проведения экспериментальных исследований угловых зависимостей откликов модулей ММДУ приведена на рис. 10. Модели ММДУ комплектовались различными типами цилиндрических защитных экранов: свинцовым экраном внешним диаметром 24см, толщиной 1,8см, высотой

38см, композитным экраном, состоящим из алюминиевого цилиндра внешним диаметром  $d_1=8,25$  см и толщиной 0,2см, и свинцового цилиндра внешним диаметром  $d_2=9,25$ см и толщиной 1 см, высота экрана 37см. В качестве экрана из материала со средним Z был применен отрезок широко используемой при проведении строительных работ асбестоцементной трубы, высотой 40см внешним диаметром 33см и толщиной 2,7см. Все экраны специально не изготавливались. Точечный источник  $\gamma$ - излучения Cs-137 из набора ОСГИ активностью 11,35 кБк на момент проведения измерений находился на расстоянии 90см от центральной оси ММДУ.

Счет  $n_i$  в  $i$ -ом модуле за выбранное время измерения определяли по формуле:  $n_i = n_i^* - n_i^{фон}$ , где  $n_i^*$  - счет при наличии источника излучения,  $n_i^{фон}$  - фоновый счет. Относительный отклик  $i$ -го модуля определяли следующим образом:  $N_i = n_i / \sum_{j=1}^k n_j$ , где  $k=4$  для 4-х модульного детектора и  $k=6$  для 6-ти модульного. Зависимость относительного числа импульсов  $N_i(\theta)$  от угла  $\theta$  между осью симметрии детектора, проходящей через первый модуль, и направлением на источник аппроксимировали следующей функцией:

$$N_i(\theta) = \sum_{j=0}^m p_j \cdot \cos j \cdot (\theta - xc)$$

где  $m=3$  или  $m=6$ . Коэффициенты разложения  $p_i$  и параметр  $xc$  определяли

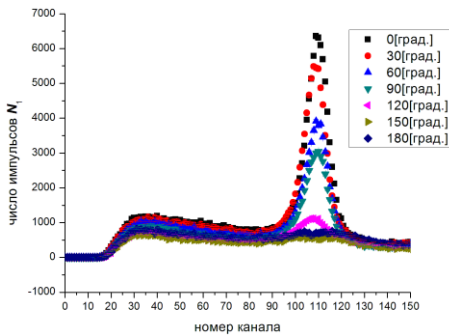


Рис. 11. Аппаратурный спектр  $\gamma$ -квантов от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  в модуле 1 при разном угловом положении источника

по методу наименьших квадратов.

На рис. 11. приведены аппаратные спектры источника  $\text{Cs-137}$ , для нескольких угловых положений первого модуля ММДУ. При обработке экспериментальных данных в качестве  $n_i$  использовали сумму числа импульсов в пике полного

поглощения с 90 по 120 каналы анализатора импульсов или полное число полученных сигналов. Наибольшие изменения в количестве зарегистри-

рованных сигналов при изменении углового положения детектора наблюдаются в пике полного поглощения.

На рис. 12. приведены графики угловой зависимости относительного отклика первого модуля для случаев фиксации полного числа импульсов и выделения пика полного поглощения (ППП). Несимметричность угловой зависимости интегрального счета можно объяснить регистрацией рассеянного от окружающих предметов  $\gamma$ -излучения, которое в ППП не входит. Для неизвестного источника излучения необходимо анализировать весь регистрируемый спектр излучений, но если источник известен или идентифицирован по спектральному распределению в модулях, направленных на источник излучения (определяется по максимуму интегрального счета), то для анализа направления следует учитывать сумму сигналов, попадающих в ППП. Нерегулярность угловой зависимости в диапазоне углов  $90^\circ$  и  $270^\circ$  обусловлена экранировкой соседними модулями.

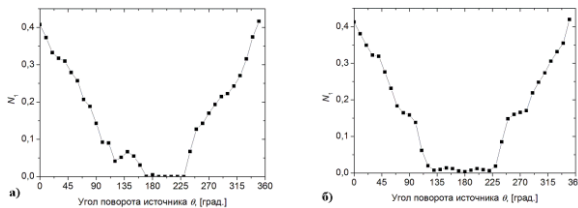


Рис. 12. Угловая зависимость относительных откликов первого модуля ММДУ:

а) интегральный счет, б) пик полного поглощения)

Сравнение данных эксперимента и результатов моделирования с помощью программы MCNP4 представлено на

рис. 13. В эксперименте и расчетах использовали свинцовый экран диаметром 24см и толщиной 1,8см. Из данных рис. 3.14, видно, что результаты моделирования хорошо описывают данные эксперимента. Небольшое

расхождению в районе 115 и 230 градусов для случая б) можно объяснить тем, что в расчете не были учтены все факторы эксперимента.

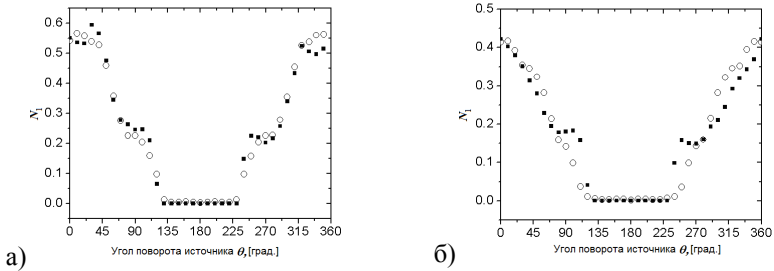


Рис. 13. Зависимость относительного отклика  $N_1(\theta)$  от угла  $\theta$   
 а) для 4-х модульного ММДУ; б) 6-ти модульного ММДУ.

Квадратики – эксперимент, кружки – расчет.

**В четвертой главе** рассматриваются методы определения направления на источник  $\gamma$ -излучения, основанные на анализе соотношений откликов модулей ММДУ.

Метод векторного сложения был разработан для модели ММДУ кубической формы, метод применим для четырехмодульного устройства и косинусоидальной угловой зависимости чувствительности модулей. В результате единичного измерения потока  $\gamma$ -излучения ММДУ получается вектор отклика, содержащий четыре элемента. По этим числам можно определить направление градиента плотности потока  $\gamma$ -излучения по соотношению:

$$\theta = \arctan\left(\frac{N_2 - N_4}{N_1 - N_3}\right) \quad \text{с погрешностью}$$

$$\Delta\theta = \frac{\sqrt{(N_2 + N_4)(N_1 - N_3)^2 + (N_1 + N_3)(N_2 - N_4)^2}}{(N_1 - N_3)^2 + (N_2 - N_4)^2}$$

Метод дает меньшую погреш-

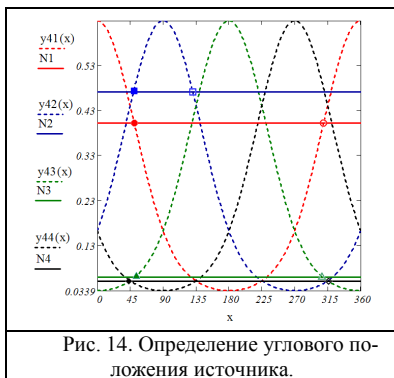
ность для ММДУ с алюминиевым экраном.

Метод подбора функции отклика от углового положения источника, заключается в том, что направление на источник или направление на

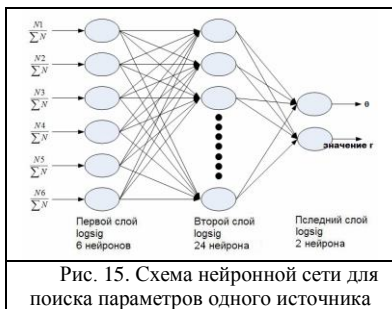
нескольких источников  $\gamma$ -излучения можно определить, решая систему уравнений, которые для каждого модуля подбирается индивидуально в процессе калибровки. Для всех вариантов конструкций угловая зависимость относительных откликов всех модулей за одно и тоже время приблизительно соответствует следующей функции:

$$N_j(\theta) = a \cdot \left( p_0 + p_1 \cos\left(\theta - \frac{360}{k} \cdot j - xc\right) + p_2 \cos\left(2 \cdot \left(\theta - \frac{360}{k} \cdot j - xc\right)\right) + p_3 \cos\left(3 \cdot \left(\theta - \frac{360}{k} \cdot j - xc\right)\right) \right)$$

где,  $k$  – количество модулей,  $j$  – номер модуля,  $xc$  – смещение пика,  $a$  – параметр, который при восстановлении одного источника можно считать равным единице, а при восстановлении двух источников – это соотношение мощностей двух источников и само уравнение тогда имеет несколько иной вид.



На рис. 14 приведены калибровочные зависимости и относительные отклики, полученные для углового положения источника равного  $55^\circ$ . В результате решения найден угол  $\theta = 54,4^\circ$ . Среднеквадратичная погрешность  $2,2^\circ$ . Результаты получены для источника с выходом  $10^6$  и расстоянием 100см.



подаются на первый слой нейронной сети, а угол  $\theta$  и значение параметра

$r$ , определяемого из соотношения:  $r = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi}{A}} \cdot R$ , где  $A$  – выход источника

$\gamma$ -излучения,  $R$  – расстояние между источником и устройством, исполь-

зуются как желаемые данные. Значение  $r$  определяет координату место-

положения источника излучения в цилиндрической системе координат и

позволяет найти расстояние до ис-

точника при единичной активности.

Истинное расстояние можно найти,

если активность источника известна

(или активность, если известно рас-

стояние). Схема сети показана на

рис. 15.

После обучения сети проводи-

лось ее тестирование с использова-

нием данных математического моде-

лирования и эксперимента. Точеч-

ный источник  $\gamma$ -излучения Cs-137 с

активностью 1,13 кБк находился на

Одним из современных методов получения информации на основе экспериментальных данных является метод, основанный на создании искусственных нейронных сетей.

Относительные отклики ММДУ используются как входные данные и

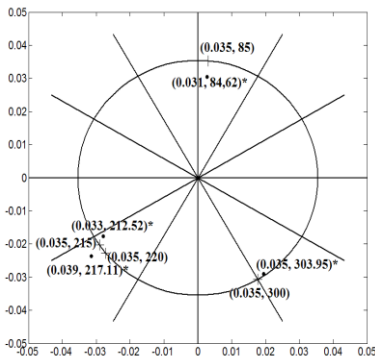


Рис. 16. Проверка сети для модели ММДУ1 (один источник крест – исходные значения; их координаты – в скобках; точка – результаты нейронной сети; их координаты – в скобках со звездой

расстоянии 90 см от центра ММДУ1. На рис. 16. показаны результаты тестирования сети. Погрешности  $\Delta\theta \leq 4^\circ$ ,  $\Delta R \leq 1,1$  см.

Определять направления и расстояния для двух источников можно с помощью другой нейронной сети. При этом было увеличено количество нейронов во втором слое нейронной сети. Работу сети проверяли, используя два источника с одинаковой активностью и разными расстояниями до устройства. Результаты тестирования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Проверка сети для модели ММДУ1 для двух источников

	варианты	1	2	3	4	5
заданные значения при моделировании	$\theta_1$ [град]	0,0	50,0	125,0	270,0	320,0
	$R_1$ [см]	55,9	93,2	96,9	123,0	85,7
	$\theta_2$ [град]	310,0	0,0	75,0	220,0	270,0
	$R_2$ [см]	93,2	55,9	111,8	85,7	123,0
результаты нейронной сети	$\theta_1$ [град]	0,91	50,1	124,5	270,2	321,3
	$R_1$ [см]	57,8	92,0	99,8	124,3	86,4
	$\theta_2$ [град]	309,7	0,4	74,2	219,9	270,6
	$R_2$ [см]	88,7	49,2	110,8	84,1	119,8

Расхождения определения направления на источник не превышают  $2^\circ$ , а при определении расстояния расхождение приблизительно 5 см.

Структура нейронной сети для модели ММДУ2 изменяется, в первом слое только 3 нейрона, а в последнем слое – только один нейрон. Каждая часть устройства определяет угол на источник независимо друг от друга.

Результаты тестирования сети для модели ММДУ2 показаны на рис. 17. Звезды – исходные положения источника; их угловые координаты представлены в скобках. Лучи – результаты нейронной сети; их значения в скобках со звездой. Эта модель позволяет определить координаты источника за одно измерение. Рассмотрено два варианта базы ММДУ2 – 20 и 150 см, предназначенных для установки на робототехническое устрой-

ство и автомобиль, соответственно. Погрешности локализации не превышают  $\pm 2^\circ$  для определения каждого угла.

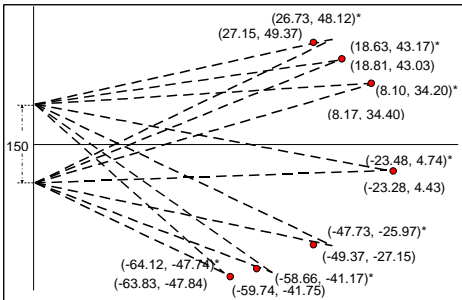


Рис. 17. Проверка сети для модели ММДУ2, база 150 см

Точки – исходные значения; их координаты – в скобках; лучи – результаты нейронной сети; их значения – в скобках со звездой

Рассмотрим некоторые из возможных вариантов локализации источников  $\gamma$ -излучения по откликам ММДУ.

Задача определения направления решается в режиме "on line", непосредственно после определения отклика устройства. По сум-

марному отклику находим мощность дозы и в случае значимого превышения ( $k \cdot \sigma$ ) ее над фоном можно:

1. Определить градиент плотности потока  $\gamma$ - излучения любым из приведенных выше методов. После нахождения градиента плотности потока  $\gamma$ - излучения, который можно считать направлением на непротяженный источник ионизирующего излучения (если известно или можно предположить, что источник один), могут быть применены два варианта поиска и локализации источника излучения.

Первый вариант - последовательное перемещение ММДУ вдоль найденных направлений. ММДУ перемещается вдоль найденных направлений до тех пор, пока наблюдается увеличение плотности потока  $\gamma$ -излучения.

Второй вариант - ММДУ перемещается под острым углом или перпендикулярно найденному направлению и проводится еще одно изме-



рение градиента плотности потока  $\gamma$ -излучения. По найденным направлениям, с учетом погрешностей определения углов, находится участок местности, в котором предположительно находится источник излучения. Таким образом, для нахождения градиента поля  $\gamma$ -излучения на плоскости, достаточно провести одно измерение ММДУ. Чтобы осуществить локализацию точечного источника ионизирующего излучения необходимо провести лишь два измерения.

2. Применение двух ММДУ, расположенных с противоположных сторон относительно исследуемого объекта, дает возможность локализовать источник излучения, скрытый в большом объеме ( контейнер, железнодорожный вагон, кузов грузовика ). Такая система может дополнить стационарные портальные мониторы рамочного типа, используемые на таможенных терминалах и КПП.

3. Найти направления на несколько источников методом решения трансцендентных уравнений или с помощью нейронной сети 2-го варианта. В последнем случае находятся два параметра, направление и приведенное расстояние до источника. Если активности источников известны, можно рассчитать расстояния до источников.

4. Применить модель ММДУ2, которая, если известна положение источника с точностью до полупространства, позволяет провести локализацию источника за одно измерение. Если расстояние до источника много больше базы ММДУ2, то можно приблизиться к источнику и повторить измерение. ММДУ2 предполагается располагать на самодвижущийся платформе (автомобиле, робототехническом устройстве и т.п.), что позволит значительно ускорить поиск и локализацию источника.

Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях и тестовые расчеты, показали, что рассмотренные варианты позволяют достаточно быстро найти локальный источник  $\gamma$ -излучения. Количество необходимых измерений и их экспозиция зависят от активности источника.

**В заключение** сформулируем основные результаты, полученные в ходе выполнения данной работы:

1. Создана методика расчета функции отклика ММДУ с различными типами и конфигурацией детекторов и поглощающих экранов. Показано, что
  - ✓ из рассмотренных трех материалов защитного экрана наиболее подходящими свойствами для создания ММДУ обладает железо;
  - ✓ наиболее предпочтительными сцинтилляционными материалами для создания ММДУ является CsI, для улучшения энергетического разрешения можно использовать  $\text{LaBr}_3$ .
  - ✓ применение сплошного экрана нецелесообразно. Экран должен иметь отверстие. Для экрана из железа радиус экрана  $\approx 7,7$  см, радиус отверстия  $\approx 4,5$  см;
  - ✓ мощность дозы излучения можно определять по суммарному отклику ММДУ, наилучшая энергетическая зависимость дозы получена для ММДУ с железным экраном.
2. Разработаны методики определения направления на непротяженные источники гамма-излучения, основанные на анализе откликов ММДУ с применением аналитического приближения угловой функции отклика и при помощи нейронных сетей.

3. Для локализации точечного источника ионизирующего излучения необходимо провести два измерения в разных точках или одновременное измерение откликов двух пространственно разнесенных ММДУ.

4. Создана новая модель ММДУ<sub>2</sub>, позволяющая по результатам одного измерения провести локализацию источника гамма-излучения. Модель состоит из двух частей, которые определяют направление на источник излучения независимо друг от друга.

5. Создан специализированный алгоритм, использующий нейронные сети по определению направлений, активности и расстояния до источников  $\gamma$ - излучения, позволяющий проводить их локализацию;

6. Проведено экспериментальное исследование разработанной методики и аппаратуры для решения задач обнаружения точечных источников ионизирующего излучения, получено хорошее согласие расчетных данных с экспериментальными.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Г. Л. Деденко, Лэй Вин, В. В. Кадилин, С. В. Исаков, Применение панорамных многомодульных устройств в решении задач радиационного мониторинга.// Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов. Том 17, М.: МИФИ, 2007, стр. 105-106.
2. Лэй Вин, В. В. Кадилин, Г. Л. Деденко, Ней Мью У, В. Т Самосадный, Исследование отклика ММДУ с различными защитными экранами при регистрации потоков  $\gamma$  излучения// Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов. Том 3, М.: МИФИ, 2008, стр. 177-179.
3. Лэй Вин, В. В. Кадилин, Г. Л. Деденко, Тант Зин, Сравнение результатов экспериментального и расчётного исследований при определении направления на источник  $\gamma$ - излучения с помощью ММДУ // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов. Том 3, М.: МИФИ, 2008, стр. 179-180.
4. Лэй Вин, Тант Зин, В. В. Кадилин, Г. Л. Деденко, Исследование характеристик панорамного датчика, предназначенного для ускоренного поиска источников  $\gamma$ - излучения// XV Международная научная конфе-

- рентия студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2008». Сб. тезисов, М.: Физический факультет МГУ, 2008, стр. 19-20.
5. Г. Л. Деденко, В. В. Кадилин, Лэй Вин, С. В. Исаков, В. Т Самосадный, Методы определения направления на локальный источник  $\gamma$ -излучения при помощи ММДУ// Научная сессия МИФИ-2009. Сб. Аннотации докладов. Том 1, М.: МИФИ, 2009, стр. 106.
  6. То Тун Ко, Лэй Вин. Применение нейронных сетей для обработки информации от многомодульных детекторов разных излучений// Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM'2009 T.1, Санкт-Петербург.,2009. стр. 235-238
  7. Г. Л. Деденко, В. В. Кадилин, Лэй Вин, С. В. Исаков, Исследование угловых характеристик многомодульных детектирующих устройств// Ядерные измерительно-информационные технологии ,№ 4-08, стр. 25-41.
  8. Лэй Вин, Г. Л. Деденко, В. В. Кадилин, и др. , Метод локализации точечного источника  $\gamma$ -излучения с использованием многомодульного детектирующего устройства и нейронных сетей// Естественные и технические науки, № 3, 2009, Компания Спутник+, стр. 42-44.
  9. Г. Л. Деденко, В. В. Кадилин, Лэй Вин, и др., Типы многомодульных детектирующих устройств и методы локализации точечных источников  $\gamma$ -излучения// Ядерные измерительно-информационные технологии № 3-09, стр. 43-64.
  10. Г. Л. Деденко, В. В. Кадилин, Лэй Вин, Определение направления на источник  $\gamma$  излучения и его локализация с помощью многомодульных детектирующих устройств и нейронных сетей// 7-я Курчатовская молодежная научная школа, Сб. Аннотации работ, М., 2009, стр. 129.