

На правах рукописи



РАДЧЕНКО СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**Алгоритмы обработки измерительной информации для
информационно-измерительных систем обнаружения азотосодержащих
веществ на основе гамма-спектрометрии**

Специальность: 05.11.16 — Информационно-измерительные и
управляющие системы (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вострецов Алексей Геннадьевич

Официальные оппоненты: Кирьянов Валерий Павлович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН», в.н.с.
Полосаткин Сергей Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт Ядерной Физики Сибирского отделения РАН им. Г.И. Будкера», с.н.с.

Ведущая организация: Федерального государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «12» февраля 2013 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шпилевая Ольга Яковлевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для бесконтактного обнаружения взрывных устройств (ВУ) и взрывчатых веществ (ВВ) применяются информационно-измерительные системы, основанные на измерении параметров высокоэнергетического излучения, прошедшего через исследуемый объект, при этом используют различные виды излучений: рентгеновское излучение, электромагнитные волны с частотами от единиц МГц до сотен ГГц, широкополосное терагерцовое излучение, нейтронное излучение, облучение электронами, облучение высокоэнергетическими гамма-квантами.

Одним из наиболее эффективных является метод обнаружения, основанный на облучении объекта гамма-квантами с последующим цифровым анализом спектрального состава вторичного гамма-излучения.

Большинство известных взрывчатых веществ характеризуются повышенным содержанием азота по сравнению с обычными веществами. Известно, что при облучении исследуемого объекта гамма-излучением с энергией квантов 9.17 МэВ, данное излучение резонансно поглощается ядрами атомов азота и рассеивается другими веществами. Сравнение спектров первичного и вторичного излучений позволяет определить наличие взрывчатых веществ в составе объекта. К достоинствам метода следует отнести высокую чувствительность, а также низкий уровень радиационного облучения окружающей среды и сканируемых объектов: на порядок ниже облучения, происходящего при использовании рентгеновского излучения, и на два порядка ниже, чем при облучении быстрыми нейтронами. Пространственное разрешение, получаемое при использовании метода, составляет 0.1-1.0 см, что делает его перспективным для обследования крупных грузов.

Известно несколько зарубежных работ и патентов, описывающих результаты работы указанного метода. Начало исследований, а также основные результаты были получены М. Голдбергом и Д. Вартски. В России аналогичные работы ведутся в Институте Ядерной Физики СО РАН им. Г.И. Будкера группой ученых под руководством профессора А.В. Бурдакова, в Национальном исследовательском томском политехническом университете основателем данного направления был профессор В.Л. Чахлов.

Подробное изучение работ по гамма-спектрометрии позволяет сделать вывод о том, что основное внимание авторов уделено совершенствованию аппаратной части информационно-измерительных систем как основы повышения их чувствительности. В то же время чувствительность и достоверность обнаружения ВВ во многом определяется характеристиками алгоритмов обработки информации, поступающей от первичных измерительных преобразователей, которая, в силу специфики применяемых детекторов высокоэнергетического излучения, носит статистический характер. Существующие алгоритмы не учитывают возможные изменения фоновой и полезной составляющих спектра и не обеспечивают автоматическую подстройку под данные изменения с поддержкой постоянного уровня ложного обнаружения и максимизацией вероятности правильного обнаружения.

Поэтому тема диссертационной работы, посвященной созданию эффективных методов и алгоритмов обработки первичной измерительной информации в системах обнаружения азотосодержащих веществ, является актуальной.

Целью диссертационной работы является создание методов и алгоритмов, обеспечивающих устойчивость характеристик эффективности к изменению уровней фоновой и полезной составляющих спектра, а также повышение точности анализа энергетического спектра вторичного гамма-излучения в информационно-измерительных системах обнаружения азотосодержащих веществ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка математической модели спектра вторичного гамма-излучения.
2. Представление спектра в ортонормированном базисе и определение интенсивности отдельных спектральных линий.
3. Выделение признаков различия гамма-спектров при наличии и отсутствии азота в исследуемом объекте и формулировка задачи обнаружения азотосодержащего вещества в анализируемой пробе.
4. Разработка алгоритмов обнаружения азотосодержащих веществ, автоматически подстраивающихся под параметры наблюдаемого спектра.
5. Разработка алгоритмов совокупной оценки параметров спектральных линий гамма-излучения.
6. Исследование эффективности разработанных алгоритмов.
7. Оценка практической реализуемости разработанных алгоритмов в информационно-измерительных системах.

Методы исследований. При выполнении исследований в работе использовался комплексный подход, основанный на применении методов статистической физики, теории вероятностей и математической статистики, теории устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов, теории измерений, теории информационно-измерительных систем, имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Способ аппроксимации спектра вторичного гамма-излучения на основе его представления в ортонормированном базисе, построенном с учетом аналитического описания отклика детектора и выделения вклада отдельных спектральных линий.
2. Алгоритмы обнаружения азотосодержащих веществ на основе метода контраста и сравнения интенсивностей разнесенных по шкале энергии спектральных линий.
3. Алгоритм совокупной оценки параметров спектральных линий на основе полных достаточных статистик.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен способ представления отсчетов спектра гамма-излучения в ортонормированном базисе, где в качестве базисных векторов выбраны вектора, составленные из отсчетов нормированного отклика детектора гамма-квантов на воздействие излучения с бесконечно узким энергетическим спектром и ортогонализированные с помощью модифицированной процедуры Грама-Шмидта. Подобное представление позволяет существенно упростить анализ спектрального состава излучения.

2. Разработана процедура оценки интенсивности плохо разрешимых спектральных линий, основанная на переходе от коэффициентов разложения спектра в ортонормированном базисе к коэффициентам исходного базиса, составленного из отсчетов нормированного отклика детектора гамма-квантов на воздействие излучения с бесконечно узким энергетическим спектром.

3. Разработан равномерно наиболее мощный инвариантный алгоритм обнаружения азотосодержащих веществ в анализируемой пробе на основе данных однократного измерения энергетического спектра и сравнения интенсивностей двух спектральных линий, одна из которых при наличии азотосодержащего вещества подвергается резонансному поглощению излучения атомами азота, вторая остается неизменной. Алгоритм не требует априорных сведений о параметрах наблюдаемого спектра и пригоден для реализации в автоматическом режиме.

4. Предложен равномерно наиболее мощный несмещенный алгоритм для обнаружения поглощения отдельных пиков в спектре вторичного гамма-излучения при прохождении через вещество, основанный на контрасте двух экспериментальных выборок – опорной – в отсутствие анализируемой пробы, и рабочей – при ее наличии. Этот алгоритм также не требует априорных сведений о параметрах наблюдаемого спектра и пригоден для реализации в автоматическом режиме.

5. Предложены эффективные оценки интенсивности спектральных линий, полученные на основе полных достаточных статистик и минимизирующие среднеквадратическую погрешность измерения.

Практическая ценность работы. Полученные в ходе работы алгоритмы позволяют существенно повысить эффективность информационно-измерительных систем обнаружения азотосодержащих веществ, так как разработанные алгоритмы обеспечивают автоматическую подстройку систем под изменяющиеся параметры анализируемых объектов и условий измерения и тем самым исключают влияние человеческого фактора при принятии конечного решения.

Помимо решения задач обнаружения азотосодержащих веществ, разработанные алгоритмы могут найти применение для решения задач анализа спектрального состава излучения и определения ширины спектральных линий.

Личный вклад. Автором работы осуществлена формулировка задач, а также получены основные результаты, выносимые на защиту.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы были внедрены в НИР, выполненные по проектам №2.1.1./3465

"Исследование генерации и поглощения резонансного гамма-излучения в реакциях на ядрах углерода и азота" и №2.1.1./11431 "Исследование генерации и поглощения резонансного гамма-излучения в реакциях на ядрах углерода и азота" в рамках Аналитической ведомственной программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 г.)». Кроме того, полученные в диссертации результаты внедрены в Институте Ядерной Физики СО РАН им. Г.И. Будкера (г. Новосибирск) при создании экспериментальной установки для обнаружения азотосодержащих веществ и исследования резонансного поглощения гамма-квантов ядрами атомов азота.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на следующих мероприятиях: Международный форум по стратегическим технологиям IFOST-2009 (Вьетнам, 2009), X международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010» (Новосибирск, 2010), «Научная сессия НГТУ» (Новосибирск, 2011), Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2011), XI международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012» (Новосибирск, 2012).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 работы в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 156 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 60 наименований и приложения. Основной текст изложен на 128 страницах, содержит 40 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи исследования. Рассмотрены вопросы новизны и практической значимости полученных результатов.

В первой главе приводится аналитический обзор по теме диссертационного исследования, включающий анализ существующих алгоритмов обработки спектрометрической информации и методов обнаружения азотосодержащих веществ. Показано, что одним из перспективных методов обнаружения азотосодержащих веществ является метод, основанный на использовании высокоэнергетического гамма-излучения и анализе спектрометрических данных излучения, прошедшего через вещество, так как при облучении исследуемого объекта гамма-излучением кванты с энергией 9.17 МэВ резонансно поглощаются ядрами атомов азота и рассеиваются другими веществами. Гамма-кванты с другими энергиями (например, 2.36 МэВ) не подвержены резонансному поглощению и

рассеиваются атомами азота. Сравнение спектральных линий, резонансно поглощаемых и рассеиваемых атомами азота, позволяет определить наличие азотосодержащих веществ в составе объекта.

В ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера разработана и изготовлена установка, позволяющая проводить эксперименты по исследованию объектов на предмет наличия в них азотосодержащих веществ (рис. 1). Для генерации резонансных гамма-квантов используется мощный протонный ускоритель на основе тандема ВИТА. Он способен генерировать протонный пучок с энергией частиц около 2МэВ и током до 5мА в непрерывном режиме. Резонансные кванты получаются в реакции $C^{13}(p,\gamma)N^{14}$. Реакция происходит в графитовой мишени, обогащенной изотопом C^{13} , под действием протонов, ускоренных до энергии 1.75МэВ. При поглощении протона ядром C^{13} образуется возбужденное ядро N^{14} , которое излучает гамма-квант с энергией 9.17МэВ. Эти гамма-кванты излучаются в форме конуса с углом раскрытия $\sim 80,7^\circ$.

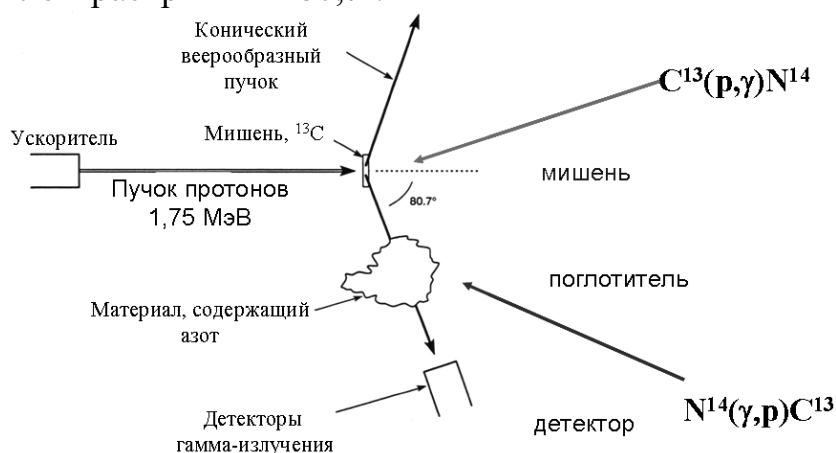


Рис.1. Схема экспериментальной установки

В спектре гамма-квантов, регистрируемых детектором, помимо резонансного пика с энергией 9,17 МэВ, присутствуют пики с меньшей энергией, так как возбужденное ядро азота имеет несколько уровней, и снятие возбуждения может происходить каскадным образом. Кроме того, в спектре регистрируемого излучения присутствуют помеховые составляющие, обусловленные фоновым излучением. Уровни спектральных составляющих зависят от состава исследуемого вещества и, как правило, являются априорно неопределенными. Немалую роль в решении задачи обнаружения играет применяемый алгоритм обработки наблюдаемых данных. Реализуемые в информационно-измерительных системах алгоритмы в настоящее время предусматривают участие оператора, за которым остается окончательное принятие решения о наличии азотосодержащего вещества. Для уменьшения влияния человеческого фактора и повышения достоверности принимаемых решений необходим автоматический режим работы информационно-измерительной системы, для чего, в свою очередь, необходимы алгоритмы, обеспечивающие устойчивость системы к изменениям свойств исследуемого спектра в реальных условиях. Это делает актуальной задачу разработки помехоустойчивых алгоритмов обнаружения азотосодержащих веществ, пригодных для реализации в автоматическом режиме, обеспечивающих

устойчивость характеристик обнаружения в условиях изменяющегося спектрального состава регистрируемого излучения и повышающих достоверность обнаружения, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа.

Вторая глава посвящена разработке моделей спектра гамма-излучения. Ввиду того, что в спектрометре для регистрации гамма-квантов используется фотоэлектронный умножитель, каждая спектральная линия представляет собой случайную пуассоновскую величину, от интенсивности которой зависит число зарегистрированных фотонов данной энергии. Наиболее простым для моделирования является представление спектра в виде набора спектральных линий, представляющих собой случайные пуассоновские величины с различными параметрами интенсивности, а также фона, имеющего постоянную интенсивность на протяжении всего спектра.

Для описания формы функции интенсивности j -го одиночного пика предложено использовать известное представление в виде гауссовой функции с

единичной площадью $f_j(e - \varepsilon_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(e - \varepsilon_j)^2}{2\sigma^2}\right\}$, где e – энергия, ε_j –

расположение j -го спектрального пика на оси энергий, $j = 1, \dots, n$, с параметром ширины σ , определяемым аппаратной функцией детектора, n – число спектральных пиков. Для характеристики интенсивности j -го спектрального пика вводится специальный масштабирующий коэффициент S_j , таким образом, функция интенсивности одиночного j -го пика описывается зависимостью $S_j f_j(e - \varepsilon_j)$.

Задавая необходимое число спектральных пиков и учитывая, что в наблюдаемых данных всегда присутствует фоновая составляющая, можно получить модельную функцию интенсивностей спектральных линий наблюдаемого спектра в виде суперпозиции функций отдельных пиков, а также слагаемого, задающего фон постоянной интенсивности (рис. 2).

Моделирование реального спектра сводится к генерации независимых случайных пуассоновских величин в соответствии с модельной функцией, которые имитируют наблюдаемые энергетические отсчеты спектра вторичного гамма-излучения (рис. 3).

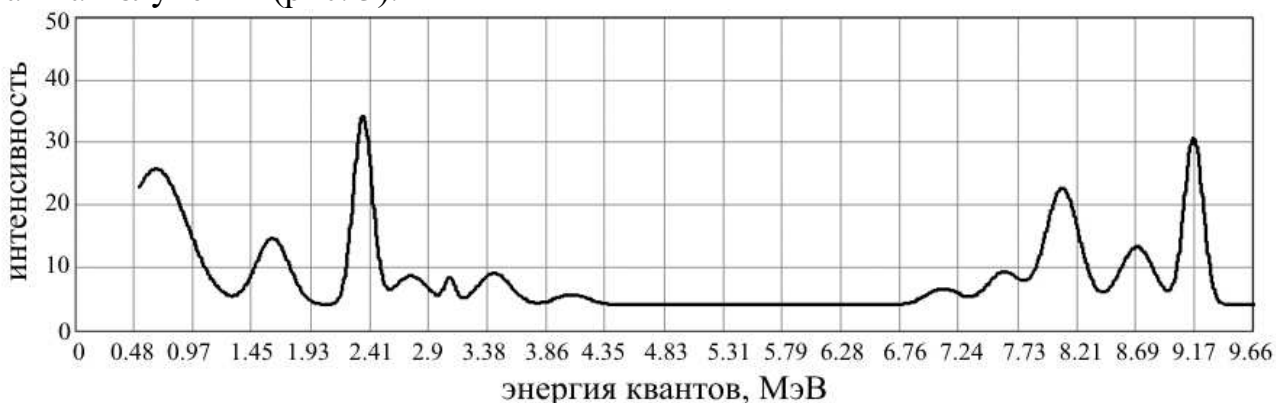


Рис.2. Модельная функция интенсивностей спектральных линий

Полученная таким образом модель спектра будет иметь практически те же статистические характеристики, что и реальный спектр. Данная модель использовалась при синтезе алгоритмов обработки спектрометрических данных и при оценке их эффективности методом имитационного моделирования.



Рис. 3. Модель спектра гамма-излучения

Рассмотренная модель требует априорной информации о расположении пиков на энергетической оси, их ширине и интенсивности. Если при решении задачи обнаружения азотосодержащего вещества вся необходимая для построения соответствующего алгоритма информация является известной (известно положение обнаруживаемых пиков, ширина пика задается аппаратной функцией детектора, а знание интенсивности пика, как будет показано ниже, не требуется), то при решении задачи анализа спектра положение пиков и их интенсивности являются неизвестными. Поэтому в общем случае для анализа спектра необходима универсальная модель, позволяющая адекватно описывать наблюдаемый спектр. Для построения такой модели предложено представить вектор отсчетов функции интенсивностей спектральных линий в ортонормированном базисе, получаемом следующим образом. На первом этапе в качестве базисных принимается набор векторов $f^{(j)} = \{f_1^{(j)}, \dots, f_N^{(j)}\}$ ($j = 0 \dots N_f - 1$, N_f — число базисных векторов, N — число отсчетов наблюдаемого спектра, $N = 2000$), где каждый базисный вектор (кроме последнего) состоит из отсчетов пары гауссовских функций, описывающих форму основного пика и соответствующего ему пика single-escape (некоторые кванты неполностью взаимодействуют со сцинтиллятором, вследствие чего оказываются зарегистрированными в пределах пика single-escape, имеющего меньшую энергию) с учетом их положения на энергетической оси, имеющих ширину σ^2 (характеристика детектора) и расположенных на оси энергий с одинаковым шагом. Последний, $(N_f - 1)$ -й вектор, имеет единичные координаты и характеризует фоновую составляющую спектра.

На втором этапе осуществляется ортогонализация полученного базиса с помощью модифицированной процедуры Грама-Шмидта. Для аппроксимации функции интенсивности спектральных линий с использованием полученного ортонормированного базиса необходимо найти ортогональную проекцию

вектора отсчетов наблюдаемого спектра на пространство, натянутое на базисных ортонормированных векторах:

$$\hat{F} = \sum_{j=0}^{N_f-1} a_j \cdot E_j,$$

где \hat{F} – аппроксимирующий вектор отсчетов функции интенсивностей спектральных линий, $a_j = (F, E_j)$, F – N -мерный вектор отсчетов наблюдаемого спектра, (\cdot, \cdot) – скалярное произведение, E_j , $j = 0 \dots N_f - 1$, – N -мерные базисные ортонормированные вектора, N_f – число базисных векторов. Реальный спектр и результат аппроксимации функции интенсивностей спектральных линий по его $N = 2000$ отсчетам при использовании $N_f = 76$ базисных векторов приведены на рис. 4 (функция интенсивностей показана полужирной сплошной линией).

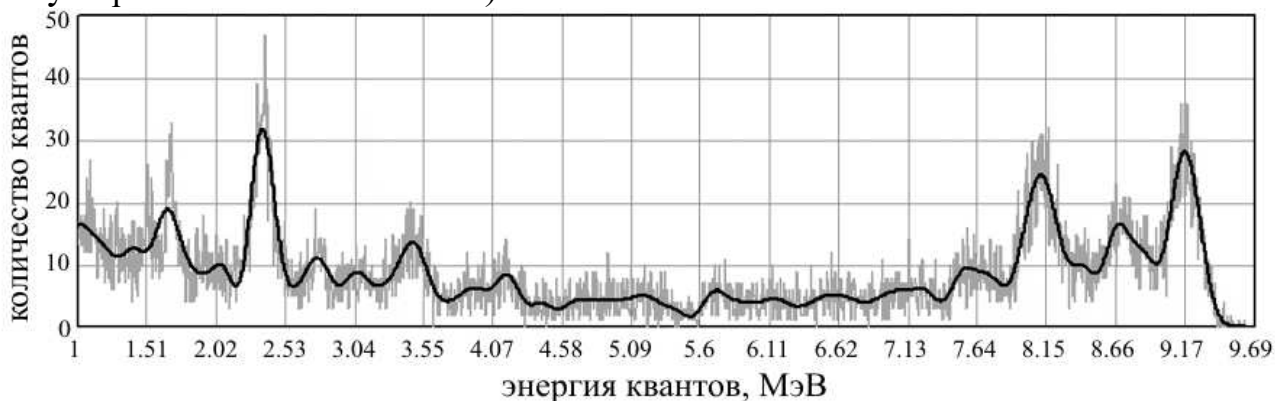


Рис. 4. Результат аппроксимации реального спектра

Установлено, что возможно дополнительно повысить точность аппроксимации отдельных участков спектра, располагая базисные функции в соответствии с истинным расположением спектральных линий, положение которых известно, а также соответствующих им пиков single-escape. Однако при этом необходимо осуществлять дополнительную обработку базиса: группы линий, отстоящих друг от друга на расстоянии, не превышающем минимально допустимый шаг, необходимо заменить более широкими линиями с усредненным значением энергии. Данное требование обусловлено характеристикой детектора.

Применение такого базиса позволяет определить вклад отдельных спектральных линий в общую картину спектра, что особенно актуально в случае близкого расположения линий и наличия фонового излучения, уровень которого сопоставим с интенсивностью полезной составляющей спектра. Для определения интенсивности отдельных спектральных линий, а также уровня фонового излучения, была разработана процедура, позволяющая осуществлять переход от ортонормированного базиса к исходному. Коэффициенты разложения спектра в исходном базисе дают оценку интенсивности соответствующего пика.

Результат применения этой процедуры к участку спектра 7.1 – 9.6 МэВ (рис. 5) приведен на рис. 6.

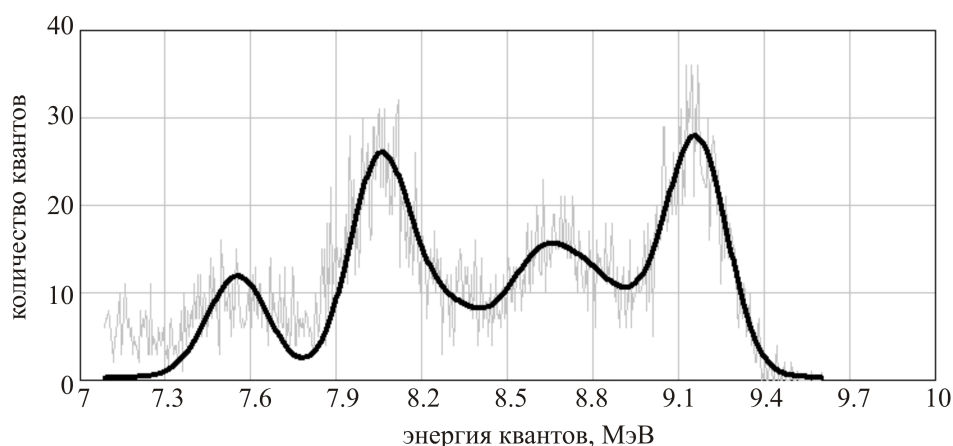


Рис. 5. Аппроксимация участка спектра 7.1 – 9.6 МэВ

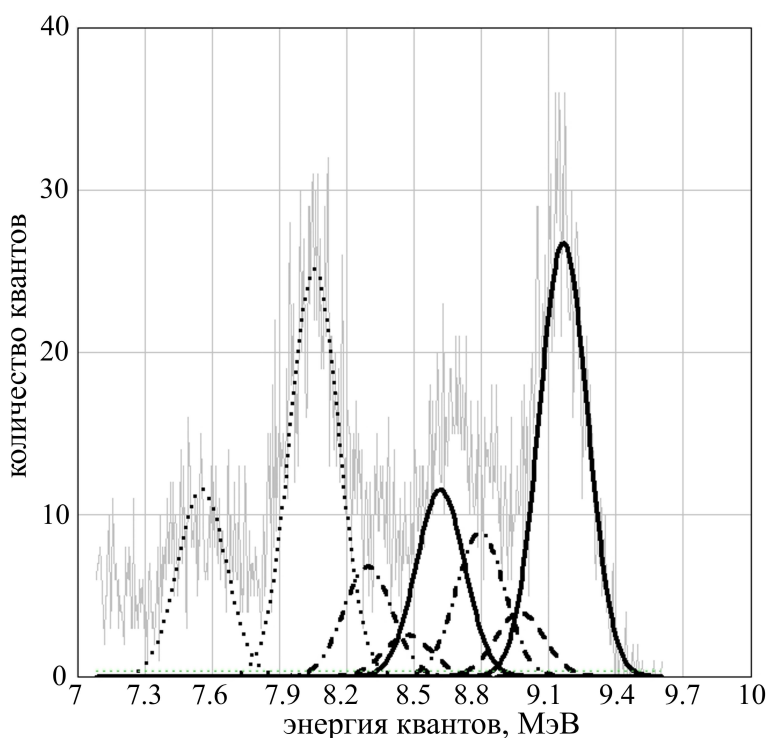


Рис. 6. Выделение вклада отдельных спектральных линий

Несмотря на то, что на рис. 5 визуально можно выделить не более четырех пиков, предложенная процедура позволила установить наличие 5 основных пиков (линии 9.17 МэВ (штриховая линия), 8.62 МэВ (точечная линия), 8.80 МэВ (сплошная линия), 8.98 МэВ (штрихпунктирная линия), 8.06 МэВ (точечная линия) и трех пиков single-escape.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов обнаружения азотосодержащих веществ в условиях априорной неопределенности вторичного спектра гамма-излучения.

Анализируемый объект облучается потоком гамма-квантов с широким энергетическим спектром. Если объект не содержит азота, то спектр излучения после прохождения объекта практически не изменится. Наличие атомов азота

приводит к резонансному поглощению пика 9.17 МэВ который во вторичном излучении будет ослаблен. Этот факт был использован при формулировке задачи обнаружения как задачи проверки статистических гипотез относительно параметров распределения вероятностей отсчетов спектра. При этом для преодоления априорной неопределенности интенсивностей спектральных линий и фона было использовано два подхода и разработано соответственно два алгоритма.

Первый подход основан на использовании свойств спектральных линий 2.36 МэВ и 9.17 МэВ. Первый пик практически не поглощается атомами азота, в то время как второй подвергается резонансному поглощению. Степень поглощения зависит от концентрации азота. В отсутствие поглощения отношение интенсивностей этих пиков определяется генератором гамма квантов, является известным и равным K_0 . При наличии поглощения гамма-квантов отношение интенсивностей пиков 2.36 МэВ и 9.17 МэВ будет зависеть от концентрации атомов азота и превысит величину K_0 .

В качестве исходных данных для синтеза алгоритма обнаружения приняты два выборочных вектора – вектор $\mathbf{x} = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$, составленный из отсчетов спектра на выходе детектора в области 2.36 МэВ, и вектор $\mathbf{y} = \{y_i, i = 1, \dots, n\}$, составленный из отсчетов спектра в области энергетического пика 9.17 МэВ. Для описания функции интенсивности спектральных линий использовалась разработанная во второй главе модель, в соответствии с которой для энергетического пика 2.36 МэВ использована функция $KSf(\Delta e_i)$, а для энергетического пика 9.17 МэВ – функция $Sf(\Delta e_i)$, где $f(\Delta e_i)$, $i = 1, \dots, n$, – отсчеты нормированной гауссовской функции с единичной площадью, S – неизвестная интенсивность пика 9.17 МэВ, K – коэффициент отношения интенсивностей пиков 2.36 МэВ и 9.17 МэВ, $\Delta e_i = e_i - \varepsilon$ – расстояние между i -м отсчетом спектра в области соответствующего пика и положением этого пика (2.36 МэВ или 9.17 МэВ) на оси энергий. Число отсчетов n выбрано таким образом, чтобы площадь под аппроксимирующей функцией $f(\Delta e_i)$ между крайними отсчетами в пределах пика была не менее 99%.

Совместное распределение вероятностей векторов \mathbf{x} и \mathbf{y} имеет следующий вид:

$$p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\exp\{-(K+1) \cdot S \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\}}{\prod_{i=1}^n (x_i! y_i!)} \exp\left\{\sum_{i=1}^n [\log(KSf(\Delta e_i))]x_i + \sum_{i=1}^n [\log(Sf(\Delta e_i))]y_i\right\}.$$

Задача обнаружения азотосодержащего вещества сформулирована как задача проверки сложных статистических гипотез относительно параметра K совместного распределения векторов \mathbf{x} и \mathbf{y} :

$$\begin{aligned} H_0 : K &= K_0 \text{ (азот отсутствует);} \\ H_1 : K &> K_0 \text{ (азот присутствует).} \end{aligned} \quad (1)$$

Для упрощения решения задачи (1) было предложено использовать известную аппроксимацию распределения выборочных векторов, справедливую для случая большого количества регистрируемых квантов:

$$w(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^n \left(\frac{1}{\sqrt{K_0}}\right)^n \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\sum_{i=1}^n \left(X_i - 2\sqrt{KSf(\Delta e_i)}\right)^2 + \frac{1}{K_0} \sum_{i=1}^n \left(Y_i - 2\sqrt{K_0Sf(\Delta e_i)}\right)^2\right]\right\}, \quad (2)$$

где $X_i = 2\sqrt{x_i + 1}$, $Y_i = 2\sqrt{K_0} \sqrt{y_i + 1}$, $i = 1, \dots, n$.

Распределение (2) инвариантно относительно группы аддитивных преобразований $G = \{g : X_i \rightarrow X_i + b_i; Y_i \rightarrow Y_i + b_i \sqrt{K_0}\}$, отражающих априорную неопределенность параметра S . Чтобы обеспечить устойчивость алгоритма к изменению параметра S , его решающая функция отыскивалась в классе инвариантных относительно группы G алгоритмов. В результате был получен равномерно наиболее мощный инвариантный алгоритм, задаваемый решающей функцией

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n [\sqrt{K_0} \sqrt{y_i + 1} - \sqrt{x_i + 1}] \sqrt{f(\Delta e_i)} > C/2; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пороговая константа C определяется исходя из допустимого значения вероятности α принятия ложного решения о поглощении γ -квантов и задается выражением:

$$C = t_{1-\alpha} \sqrt{(1 + K_0) \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)},$$

где $t_{1-\alpha}$ – квантиль порядка $(1 - \alpha)$ стандартного нормального распределения.

Второй подход основан на использовании метода контраста. Поскольку при прохождении гамма-квантов через азотосодержащее вещество поглощению подвергается только один спектральный пик – 9.17 МэВ, то процедуру обнаружения присутствия атомов азота можно построить на основе сравнения интенсивностей пиков 9.17 МэВ до и после экспонирования исследуемого вещества. В качестве исходных данных приняты две выборки: опорная \mathbf{x} , полученная при экспозиции контейнера без азотосодержащего вещества (в этом случае пик 9.17 МэВ остается не поглощенным) и рабочая выборка \mathbf{y} , полученная при экспозиции контейнера с помещенным в него исследуемым веществом. Наличие в исследуемом веществе атомов азота приведет к поглощению спектрального пика 9.17 МэВ. Поскольку это единственное отличие между спектрами двух выборок, то вместо полного спектра можно ограничиться только той его частью, которая соответствует пику 9.17 МэВ.

Совместное распределение выборочных векторов в данном случае имеет вид

$$p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\exp\left\{-S_0 \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\right\}}{\prod_{i=1}^n (x_i!)} \exp\left\{\sum_{i=1}^n x_i \log(S_0 f(\Delta e_i))\right\} \times \\ \times \frac{\exp\left\{-S_1 \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\right\}}{\prod_{i=1}^n (y_i!)} \exp\left\{\sum_{i=1}^n y_i \log(S_1 f(\Delta e_i))\right\},$$

и обладает достаточными статистиками $T(x, y) = \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i\right)$, $U(x, y) = \sum_{i=1}^n x_i$, совместное распределение которых, в свою очередь, задается функцией

$$w(U, T) = \frac{\exp\left(-\left(S_0 + S_1\right) \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\right)}{U!(T-U)!} \exp\left\{U \log\left[\frac{S_0}{S_1}\right] + T \log\left[S_1 \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\right]\right\}. \quad (3)$$

Данное распределение характеризуется полезным $\lambda = \log\left[\frac{S_0}{S_1}\right]$ и мешающим $\mu = \log\left[S_1 \sum_{i=1}^n f(\Delta e_i)\right]$ параметрами.

Задача обнаружения азотосодержащего вещества может быть сформулирована как задача проверки сложных статистических гипотез относительно параметров распределения (3):

$$\begin{aligned} H_0 : \lambda = 0; \mu \in (-\infty, \infty) & \quad (\text{азот отсутствует}); \\ H_1 : \lambda > 0; \mu \in (-\infty, \infty) & \quad (\text{азот присутствует}). \end{aligned} \quad (4)$$

В работе получен равномерно наиболее мощный несмещенный алгоритм решения задачи (4), решающая функция которого имеет следующий вид:

$$\varphi(U, T) = \begin{cases} 0, & U < C(T), \\ \gamma(T), & U = C(T), \\ 1, & U > C(T). \end{cases}$$

Здесь $C(T)$ – пороговая функция, $\gamma(T)$ – параметр рандомизации, зависящие от достаточной для мешающего параметра μ статистики T и заданного уровня α вероятности ложного принятия решения о наличии азотосодержащего вещества. Для их конкретизации при каждом фактическом значении статистики T необходимо решить уравнение

$$\int_0^T \varphi(U, T) w(U | \lambda = 0, T) dU = \alpha.$$

Исследование эффективности разработанных алгоритмов проводилось методом имитационного моделирования на ЭВМ. Зависимости вероятности правильного обнаружения от соотношения интенсивностей пиков для рассмотренных алгоритмов приведены ниже на рис. 7. Для каждого значения S_0/S_1 моделировалось 5000 пар спектров, для каждой пары вычислялась решающая функция, вероятность правильного обнаружения алгоритма определялась по количеству положительных решений для выбранного значения S_0/S_1 . Уровень вероятности ложной тревоги задавался на уровне $\alpha = 0.01$.

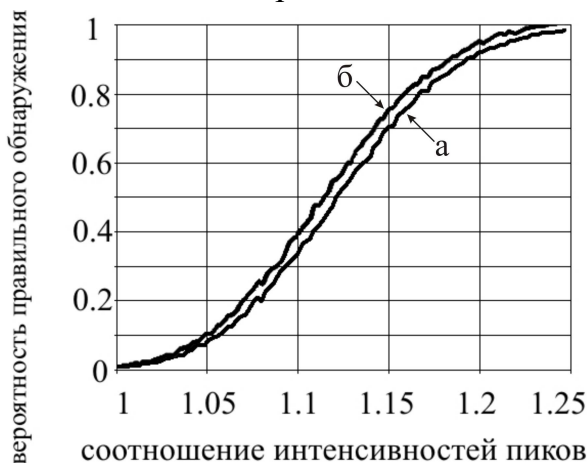


Рис. 7. Зависимость вероятности правильного обнаружения от степени поглощения а) для алгоритма, основанного на сравнении интенсивностей двух пиков одного спектра; б) для алгоритма, основанного на методе контраста

Как видно из рисунков, оба алгоритма достаточно эффективны: при 20-процентном превышении пика в опорной выборке над пиком в рабочей выборке (степень поглощения около 20%) вероятность правильного обнаружения оказывается более 0.9, при этом контрастный алгоритм (линия «б») оказывается несколько эффективнее.

Эффективность работы алгоритмов также зависит и от набранной статистики при проведении измерений, объем которой определяется длительностью измерения. На рис. 8 приведены зависимости вероятности принятия правильного решения для контрастного алгоритма при разных интенсивностях опорного пика.

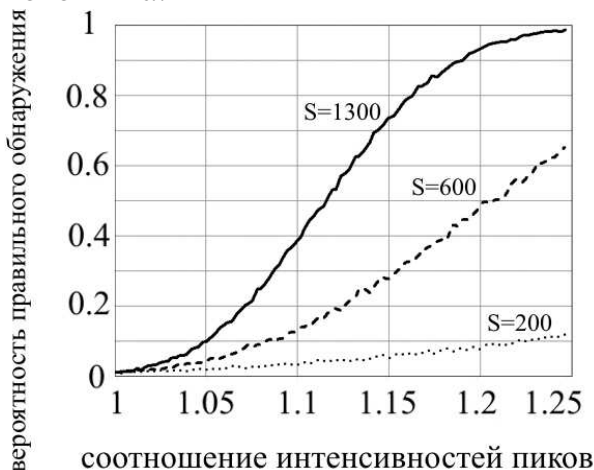


Рис. 8. Зависимость вероятности правильного обнаружения от степени поглощения при разных интенсивностях опорного пика

Четвертая глава диссертации содержит описание разработки алгоритмов совместной оценки параметров спектральных линий энергетического спектра гамма-излучения.

Форму отдельной спектральной линии можно аппроксимировать гауссовой кривой со средним значением, соответствующим положению спектральной линии на энергетической шкале, параметром σ^2 , определяющим ширину спектральной линии, а также параметром S , определяющим интенсивность линии.

В окрестности одной спектральной линии, определяемой шириной аппаратной функции детектора, формируется выборка $\mathbf{x} = (x_{n_1}, \dots, x_{n_2})$, состоящая из n отсчетов, взятых в точках t_i на оси энергий гамма-квантов, $i = n_1, \dots, n_2$ ($1 + n_2 - n_1 = n$). Отсчеты x_i отстоят друг от друга по оси энергий на значение τ , определяемое величиной младшего разряда АЦП, применяемого в системе: $t_i = i \cdot \tau$. Смещение линии относительно начала координат выражается параметром t_0 .

Интенсивность одного отсчета определяется выражением:

$$\lambda_i = \frac{S}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{(t_i - t_0)^2}{2\sigma^2}},$$

где параметр S определяет интенсивность спектральной линии.

Совместная плотность распределения вероятностей выборки определяется выражением

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{\prod_{i=n_1}^{n_2} x_i!} \left(\frac{S}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right)^{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i} \exp \left\{ - \sum_{i=n_1}^{n_2} \left[\frac{(t_i - t_0)^2 \cdot x_i}{2\sigma^2} \right] - \sum_{i=n_1}^{n_2} \left[\frac{S}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t_i - t_0)^2}{2\sigma^2}} \right] \right\}. \quad (5)$$

В работе показано, что распределение (5) обладает полными достаточными статистиками $T_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=n_1}^{n_2} x_i$ и $T_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=n_1}^{n_2} (t_i - t_0)^2 x_i$, на основе которых с использованием теоремы Лемана-Шеффе получены эффективная оценка интенсивности и оценка параметра ширины спектрального пика:

$$\hat{S} = \sum_{i=n_1}^{n_2} x_i \cdot \tau, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} (t_i - t_0)^2 x_i}{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i}.$$

Оценка параметра ширины не является эффективной, поскольку она получена с использованием полных достаточных статистик, но ее выражение не является их линейной комбинацией.

Анализ погрешности полученных оценок проводился методом численного моделирования на ЭВМ. Для каждого значения оцениваемого параметра генерировались 1000 независимых выборок, по которым оценивались интенсивность исследуемой спектральной линии (параметр S) и ее ширина (параметр σ^2) и вычислялись систематическая и случайная составляющие погрешности.

Результаты моделирования приведены на рис. 9.

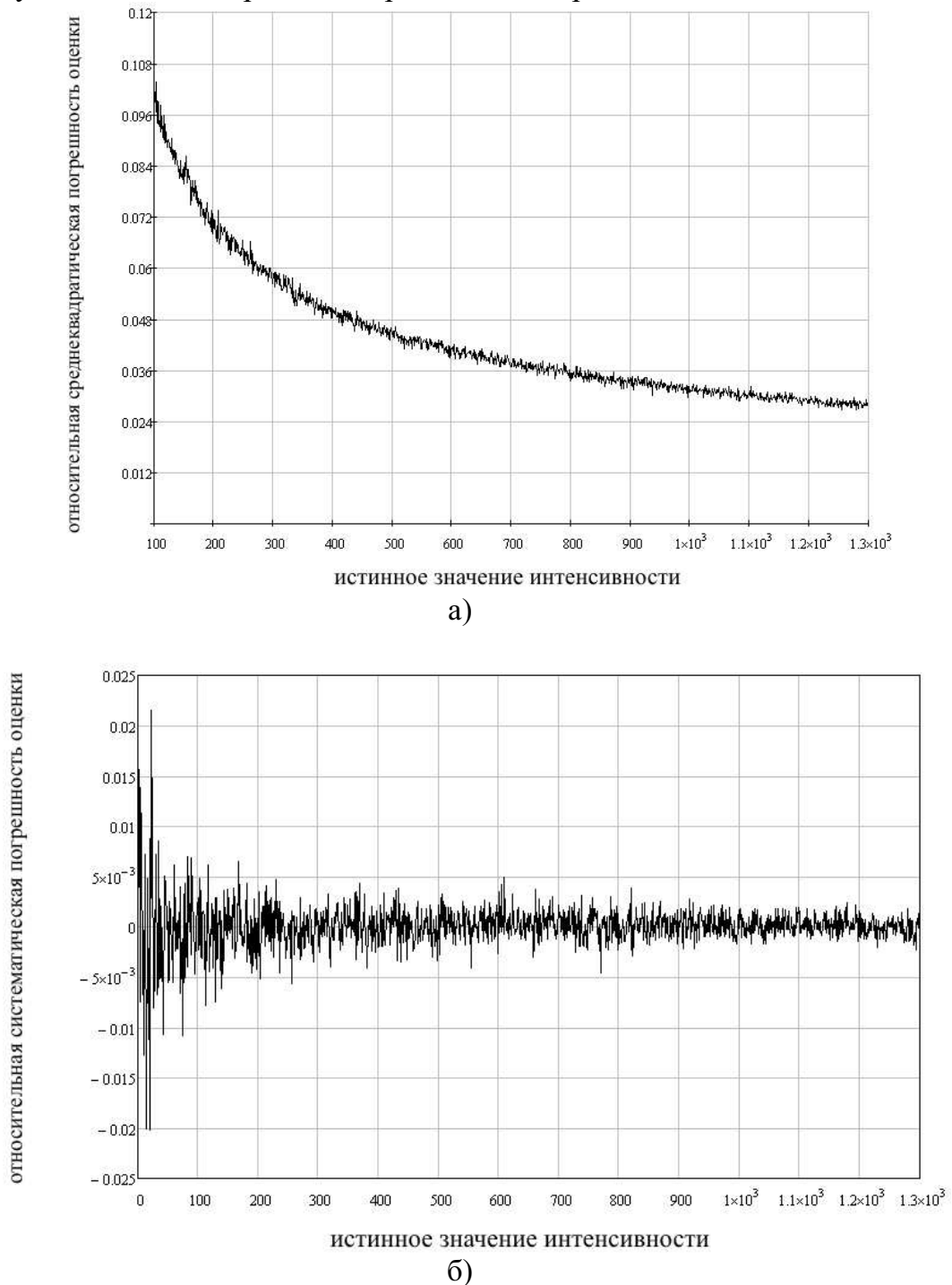
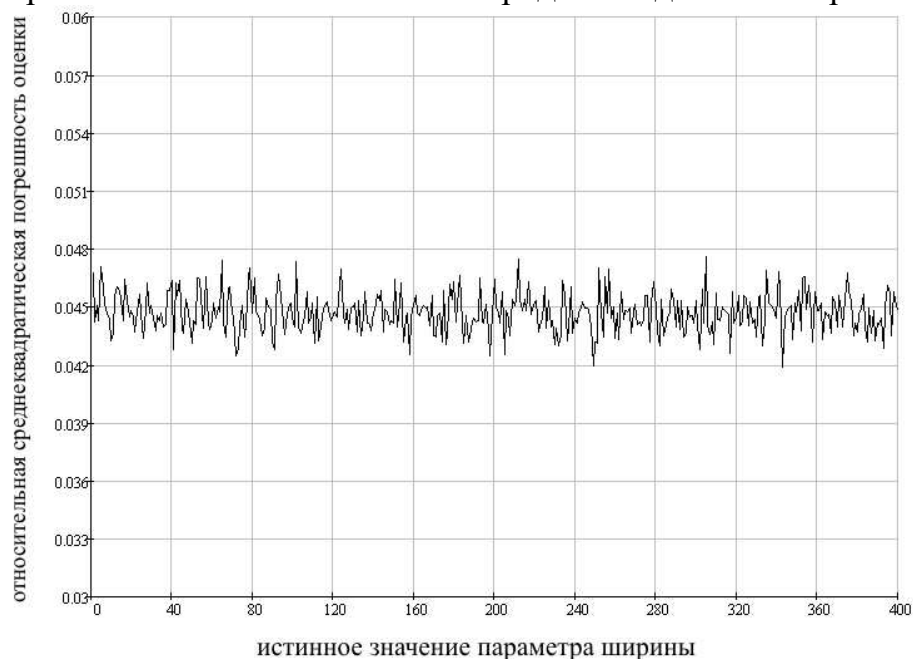


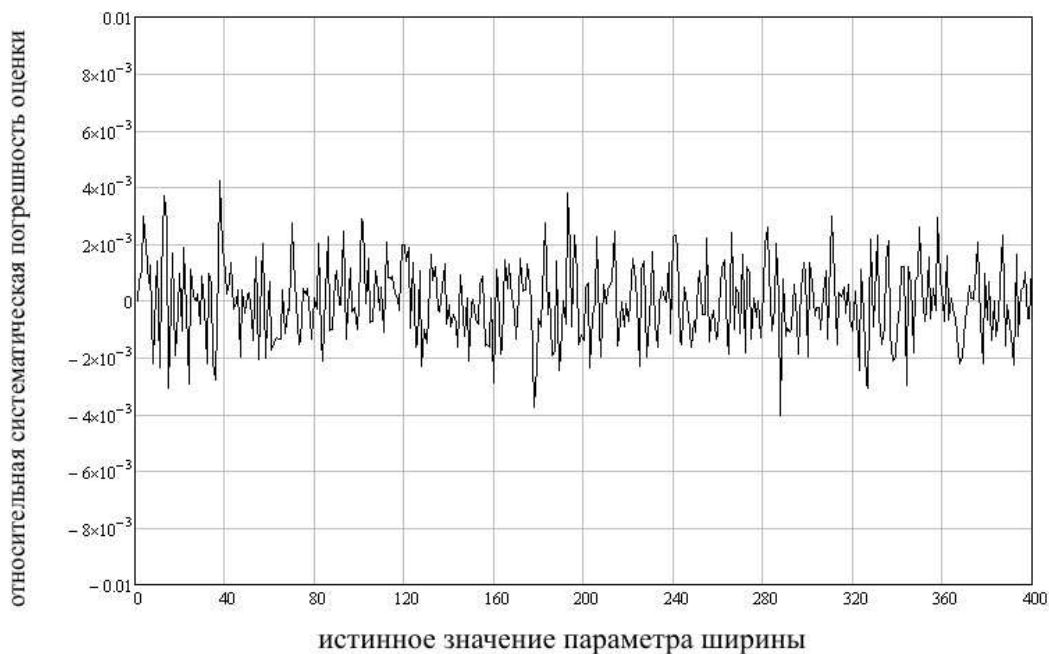
Рис. 9. Зависимость погрешности оценки интенсивности спектральной линии от истинного значения интенсивности
а) случайная составляющая; б) систематическая составляющая

Аналогичным образом было проведено моделирование работы алгоритма оценки ширины спектральной линии (рис. 10).

Анализ графиков позволил охарактеризовать полученную оценку интенсивности спектрального пика как состоятельную, поскольку СКО погрешности оценки убывает по мере роста количества зарегистрированных событий, а систематическая погрешность не превышает 3% и также стремится к нулю по мере роста количества событий в пределах одной спектральной линии.



а)



б)

Рис. 10. Зависимость погрешности оценки параметра ширины спектральной линии от истинного значения параметра

а) случайная составляющая; б) систематическая составляющая

Оценка параметра ширины спектральной линии признана несостоятельной, поскольку с ростом объема выборки погрешность оценивания

не стремится к нулю. Однако в тех случаях, когда требуемая погрешность оценки находится на уровне $\geq 5\%$, ее можно использовать для оценки ширины спектральной линии.

Пятая глава диссертации посвящена обсуждению практической реализуемости полученных алгоритмов обработки измерительной информации. Предложено два варианта реализации работы алгоритмов:

1. В состав досмотрового комплекса входит ЭВМ, осуществляющая управление комплексом. Модуль принятия решений (МПР) о наличии взрывоопасных грузов реализован в виде пользовательского приложения.

2. Независимо от конфигурации и организации системы управления комплексом, модуль принятия решений реализован в виде отдельного устройства.

Исходя из особенностей задачи обнаружения повышенных концентраций азота, сформулированы основные требования к программно-аппаратной реализации работы алгоритмов:

1. Интуитивно понятный интерфейс, который позволит осуществлять работу персоналу с минимальной подготовкой и начальными знаниями в области программного обеспечения.

2. Возможность применения разных алгоритмов обнаружения.

3. Минимальное участие оператора. По возможности, задача оператора должна сводиться к выбору способа обнаружения и непосредственному запуску работы алгоритма.

4. Максимально возможный уровень защищенности от внешнего вмешательства в функционирование модуля.

5. Конструктивная надежность модуля, обеспечивающая устойчивость к неблагоприятным воздействиям.

6. Программная надежность, обеспечивающая максимально возможное время наработки на отказ.

Программная реализация МПР подразумевает наличие в составе досмотрового комплекса управляющей ЭВМ. Данная ЭВМ, помимо управления системой сканирования, служит средой для запуска и работы программы обработки измерительных данных. В предположении о наличии у ЭВМ среднестатистических на сегодняшний день аппаратных ресурсов, а также установленной ОС Windows XP, автором разработана программа, позволяющая выполнять обнаружение повышенного содержания азота по файлам спектров гамма-излучения.

Программа позволяет загружать до двух спектров, применяя один из алгоритмов на выбор: обнаружение по одной выборке либо контрастное обнаружение по двум выборкам, используя одну в качестве опорной. По итогам работы алгоритмов осуществляется текстовая индикация результатов обнаружения, а также производится оценка степени поглощения анализируемых спектральных пиков. Также к каждому загружаемому спектру возможно применение процедуры аппроксимации в равномерном ортонормированном базисе, что позволяет существенно упростить визуальный анализ спектрального состава излучения.

Вид основного окна программы приведен на рис. 11.



Рис. 11. Интерфейс программы обработки гамма-спектров

В итоге структурная схема обработки данных выглядит следующим образом (рис. 12).

Система генерации гамма-излучения СГ направляет поток гамма-квантов на анализируемый объект О. Система регистрации гамма-излучения СР, расположенная за объектом, имеющая в своем составе сцинтилляционный детектор и плату спектрометра, преобразует сцинтилляционные вспышки от гамма-квантов в электрические сигналы, а затем в кодовые последовательности.

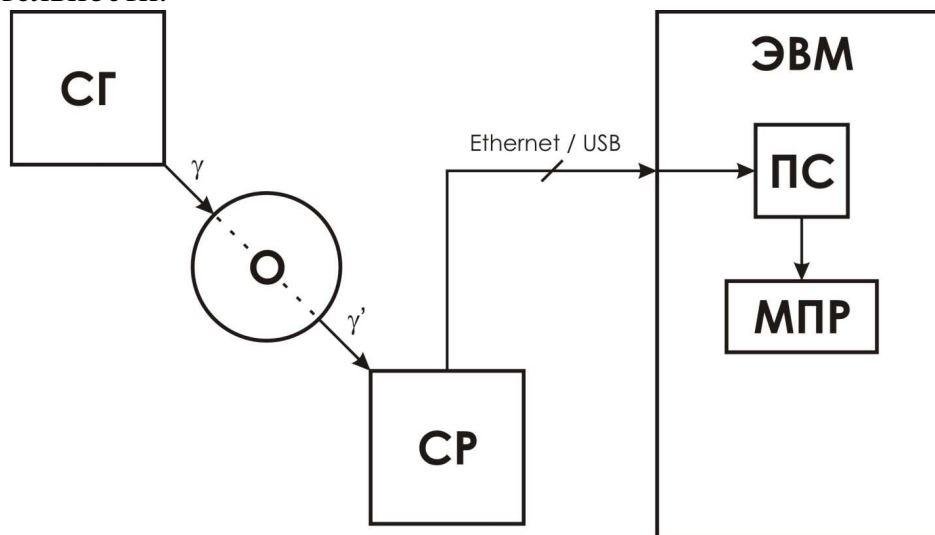


Рис. 12. Структурная схема обработки данных

Данные последовательности по интерфейсу ввода-вывода (Ethernet либо USB) передаются в ЭВМ, где программное обеспечение спектрометра ПС формирует файлы спектров в установленном формате. Данные файлы загружаются в программу обнаружения МПР (программно реализованный модуль принятия решений), которая по итогам их анализа реализует отображение на мониторе ЭВМ информации, соответствующей результатам обнаружения.

Аппаратная реализация МПР, несмотря на простоту программной реализации, имеет ряд важных преимуществ: особенности функционирования модуля не зависят от выбора системы управления комплексом, реализация модуля в виде закрытого устройства исключает возможность любого вмешательства в алгоритмы его функционирования, возможно свести влияние человеческого фактора к минимуму.

Таким образом, структурная схема обработки данных принимает вид:

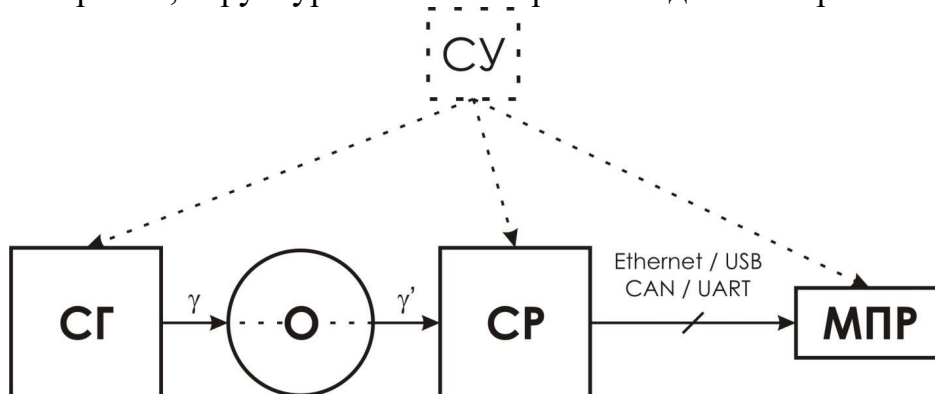


Рис. 13. Структурная схема обработки данных при аппаратной реализации МПР

С целью определения элементной базы сформулированы следующие основные требования к МПР:

1. Возможность работы от стандартной сети.
2. Возможность автономной работы от аккумулятора.
3. Ведение журнала событий с привязкой ко времени.
4. Возможность переноса журнала на съемный носитель.
5. Расширенная индикация режимов работы и результатов обнаружения.
6. Возможность работы в реальном времени.

Согласно приведенным требованиям произведен выбор элементов основных составляющих устройства, в частности, микроконтроллера. Было предложено использование архитектуры ARM Cortex M3 как одной из наиболее современных архитектур, оптимальных по соотношению цена – производительность. Показано, что применение микроконтроллера STM32F103RCT6 удовлетворяет всем требованиям к функциональности МПР.

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Предложен алгоритм представления энергетического спектра гамма-излучения в ортонормированном базисе. Подобное представление спектра позволяет аппроксимировать спектр в базисе функций, описывающих спектральные линии, отфильтровав шумовые составляющие.

2. Разработаны и исследованы алгоритмы обнаружения азотосодержащих веществ на основе поглощения энергетического пика 9.17МэВ во вторичном гамма-излучении объекта. Алгоритмы имеют достаточно высокую эффективность, позволяя регистрировать малозаметные изменения интенсивности отдельных спектральных пиков.

3. На основе применения следствий теоремы Лемана-Шеффе для оценок на основе полных достаточных статистик получены алгоритмы оценивания параметров интенсивности и ширины спектральных линий вторичного энергетического спектра гамма-излучения после прохождения через исследуемый объект.

4. Предложены варианты практической реализации полученных алгоритмов. Разработано пользовательское приложение для обработки гамма-спектров на ЭВМ. Произведен выбор и обоснование основных элементов для реализации модуля принятия решений в виде отдельного устройства.

Приложение содержит исходный код программы по обработке гамма-спектров на ЭВМ, а также акты внедрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из Перечня ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий

1. С. Е. Радченко. Метод обнаружения поглощения гамма-квантов при прохождении через азотосодержащее вещество / А. Г. Вострецов, А. В. Бурдаков, С. Е. Радченко, А. С. Кузнецов, Ю. С. Суляев // Автометрия, 2010. Т. 46. № 3. С. 22–29.

2. С. Е. Радченко. Контрастное обнаружение спектральных пиков при прохождении через вещество / С. Е. Радченко // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2011. №1. С. 127–136.

3. С. Е. Радченко. Аппроксимация энергетического спектра гамма-излучения в ортонормированном базисе / А. Г. Вострецов, С. Е. Радченко // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2011. № 4 (45). С. 3–11.

Доклады на международных конференциях

4. S.E. Radchenko. Statistical Algorithm for Detection of Gamma Ray Spectral Peak Absorption / A.G. Vostretsov, S.E. Radchenko // IFOST 2009. Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies. October 21–23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. Session 2. Information and Communication Technology.– P.82–86 [Статистический алгоритм обнаружения поглощения спектральных пиков гамма-излучения].

5. С. Е. Радченко. Методы и алгоритмы обнаружения азотосодержащих веществ / А. Г. Вострецов, С. Е. Радченко // Материалы VIII международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2010" в 7 томах. Том 4. Новосибирск, 22-24 сентября, 2010. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. С.162–166

6. С. Е. Радченко. Методика интерпретации энергетического спектра вторичного гамма-излучения на основе векторной аппроксимации / С.Е. Радченко // Материалы XI международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012" в 7 томах. Том 2. Новосибирск, 02-04 октября, 2012. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. С.37–41

7. S.E. Radchenko. Method of Gamma-Spectrum Interpretation Using Vectorial Approximation / A.G. Vostretsov, S.E. Radchenko // APEIE 2012. Proceedings of the 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, Volume 1, October 2–4, 2012, Novosibirsk, Russia. P.11–14 [Методика интерпретации спектра гамма-излучения на основе векторной аппроксимации].

Публикации в других изданиях

8. С. Е. Радченко. Совместная оценка параметров спектральных линий энергетического спектра гамма-излучения / С. Е. Радченко // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2011. С. 174 – 179.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630092, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 85. Подписано в печать 25.12.2012 г.