

УДК 539.16.08 : 539.121.6 : 541.12.012 : 543.082 : 519.254

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИХ ЧЕРЕЗ АЗОТОСОДЕРЖАЩЕЕ ВЕЩЕСТВО*

А. Г. Вострецов¹, А. В. Бурдаков², С. Е. Радченко¹,
А. С. Кузнецов², Ю. С. Суляев²

¹ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru

² Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

Предложен алгоритм обнаружения поглощения спектральных пиков во вторичном излучении объекта, содержащего соединения азота. Алгоритм основан на применении статистического принципа инвариантности и обладает свойствами автоматической подстройки под параметры сигнально-помеховой обстановки. Проведена проверка работы алгоритма методом имитационного моделирования, а также показано его применение к реальным спектрам вторичного излучения. Рассматриваемый алгоритм совместно с аппаратной частью эксперимента позволяет реализовать принципиально новый метод автоматического обнаружения азотосодержащих веществ в исследуемом объекте.

Ключевые слова: энергетический спектр, спектральный анализ, вторичное гамма-излучение, поглощение, обработка результатов измерений.

Введение. Известно, что ядра многих химических элементов обладают свойством резонансного поглощения γ -излучения [1–3]. Это свойство широко используется в рентгеноструктурном анализе материалов и при обнаружении тех или иных примесей в составе вещества. В частности, таким свойством обладают ядра атомов азота, которые способны резонансно поглощать γ -кванты с энергией 9,1724 МэВ, причём ширина пика поглощения составляет всего 125 эВ. Предлагаемый метод обнаружения азотосодержащих веществ основан на сравнении величин резонансного и нерезонансного поглощений при прохождении γ -излучения через вещество. Схема эксперимента показана на рис. 1. Для генерации γ -квантов с резонансной энергией используется обратная поглощению ядерная реакция $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$, когда ускоренным до 1,75 МэВ пучком протонов бомбардируется мишень, обогащённая изотопом ^{13}C , при этом образуются возбуждённые ядра ^{14}N , излучающие в полёте γ -кванты с энергией 9,17 МэВ. Из-за влияния эффекта Доплера резонансной энергией обладают только те γ -кванты, угол вылета которых составляет $80,7 \pm 0,1^\circ$ к оси пучка протонов.

Исследуемый объект и сцинтилляционный детектор γ -квантов находятся за коллиматорами, задерживающими все γ -кванты, угол вылета которых отличается от резонансного. В спектре γ -квантов, регистрируемых детектором, кроме пика с энергией 9,17 МэВ находятся пики с меньшей энергией, так как возбуждённое ядро азота имеет несколько уровней и снятие возбуждения может происходить каскадным образом. Гамма-излучение

*Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)».

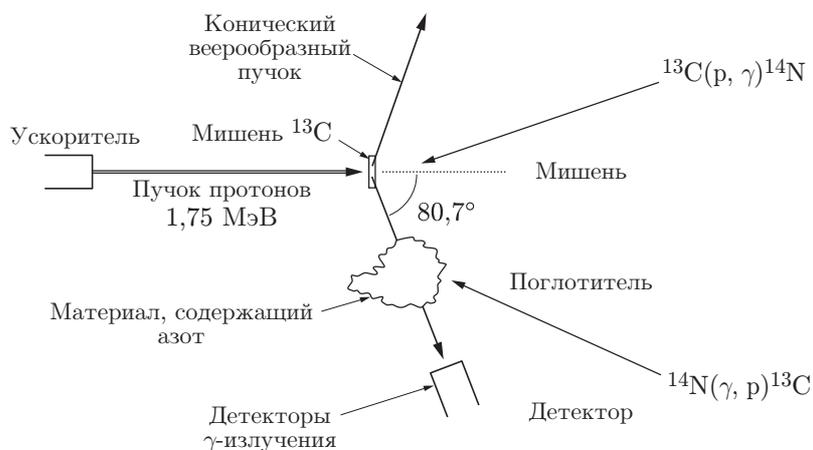


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента по обнаружению азотосодержащего вещества в исследуемом объекте

возникает также при возбуждении ещё пяти резонансов с каскадным распадом. В бомбардируемой протонами мишени присутствует изотоп ^{12}C , дающий в аналогичной реакции интенсивную линию 2,36 МэВ. Таким образом, регистрация сложного спектра позволяет определять степень резонансного поглощения с помощью одного детектора путём сравнения скоростей счёта событий в резонансном и одном из нерезонансных пиков.

При малой концентрации азота степень поглощения будет небольшой, что затрудняет задачу обнаружения. Кроме того, в спектре регистрируемого излучения могут быть помеховые составляющие, обусловленные фоновым излучением и присутствием ложных пиков. Уровень фона, уровни спектральных компонент зависят от состава исследуемого вещества и, как правило, являются априорно неопределёнными.

Немалую роль в решении задачи обнаружения играет применяемый алгоритм обработки наблюдаемых данных. Разработка алгоритма, устойчивого к изменениям свойств исследуемого спектра, позволит реализовать автоматическую процедуру принятия решений, исключая человеческий фактор и необходимость привлечения специально обученного персонала. Всё это делает актуальной задачу разработки помехоустойчивых алгоритмов обнаружения поглощения γ -квантов заданной энергии при прохождении через вещество, пригодных для реализации в автоматическом режиме и обеспечивающих устойчивость характеристик обнаружения в условиях изменяющегося спектрального состава регистрируемого излучения.

В данной работе предлагается решение такой задачи применительно к определению азотосодержащих веществ на основе выявления поглощения спектральной составляющей γ -квантов в области пика 9,17 МэВ.

Структура детектора. Конфигурация эксперимента задаётся выбором типа детектора, который должен иметь максимальную чувствительность в области энергии γ -квантов до 10 МэВ. Используемый в эксперименте сцинтилляционный детектор на основе тяжёлого кристалла ортогерманата висмута (BGO) диаметром 80 мм и длиной 100 мм поглощает около 80 % излучения, и не менее половины этого количества попадает в пик полного поглощения. Достигнутое амплитудное разрешение детектора для энергии 9,17 МэВ составляет 2,9 %, и оно не позволяет выделять резонансные γ -кванты на фоне нерезонансных. Эта задача возложена на коллиматор, установленный точно под углом 80,7° к оси протонного пучка, ширина щели которого соответствует ширине пика резонансного поглощения. Коллиматор и детектор в свинцовой защите установлены на гониометре, способном поворачиваться вокруг оси γ -образующей мишени с точностью $\sim 0,1^\circ$.

Спектральный анализ сцинтилляционных импульсов γ -детекторов осуществляется с помощью быстродействующего спектрометрического АЦП. Особенностью таких АЦП является нулевое «мёртвое» время и высокая скорость преобразования сцинтилляционных импульсов — до $4 \cdot 10^5$ имп./с. Программное обеспечение позволяет наблюдать за набором спектра в реальном времени, сохранять набранные и выводить на экран уже имеющиеся спектры, задавать время экспозиции.

Алгоритм обнаружения поглощения γ -квантов. Исследуемый объект облучается сложным спектром, в котором кроме резонансных γ -квантов с энергией 9,17 МэВ присутствуют характерные для изотопов углерода пики с энергиями 8,06; 3,39; 2,36 МэВ. Детектор регистрирует весь спектр γ -квантов, прошедших через исследуемый объект, при этом коэффициенты поглощения квантов разных энергий зависят от атомных номеров элементов, составляющих объект.

Применительно к задаче обнаружения интерес представляют два спектральных пика: 2,36 и 9,17 МэВ. Первый пик практически не поглощается атомами азота, в то время как второй подвергается резонансному поглощению, степень которого будет зависеть от концентрации азота. Эта особенность позволяет использовать метод контраста и сформулировать задачу обнаружения азотосодержащего вещества как задачу обнаружения поглощения квантов с энергией 9,17 МэВ на основе сравнения с уровнем пика 2,36 МэВ.

Поскольку детектор γ -излучения обладает конечным разрешением, аппроксимируем энергетические пики гауссовыми кривыми, ширина которых зависит от разрешающей способности детектора, а площадь — от уровня энергетического пика (числа зарегистрированных γ -квантов данной энергии). Применение в детекторе фотоэлектронного умножителя приводит к тому, что значения отсчётов энергетического спектра представляют собой независимые случайные величины, распределённые по закону Пуассона и имеющие интенсивность, пропорциональную числу зарегистрированных квантов этой энергии [4, 5].

Из наблюдаемых на выходе детектора данных образуем два выборочных вектора, составленные из отсчётов в областях энергетических пиков 2,36 и 9,17 МэВ: $\mathbf{x} = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$ и $\mathbf{y} = \{y_i, i = 1, \dots, n\}$. Вследствие конечной разрешающей способности детектора формы пиков обусловлены его характеристиками и являются приблизительно одинаковыми, различаются они лишь площадью пиков. В соответствии с этим для аналитического описания энергетического пика 2,36 МэВ будем использовать функцию $KSf(i)$, а для энергетического пика 9,17 МэВ — функцию $Sf(i)$, где $f(i), i = 1, \dots, n$, — нормированная гауссова функция с единичной площадью; S и KS — площади соответствующих пиков; K — коэффициент отношения интенсивностей пиков. Число отсчётов n выбрано таким образом, чтобы площадь под аппроксимирующей функцией $f(i)$ между крайними отсчётами в пределах пика была не меньше 99 %. В отсутствие поглощения γ -излучения коэффициент отношения интенсивностей пиков известен [6] и выражается как $K = K_0$. При наличии в пробе азотосодержащего вещества часть γ -квантов с энергией 9,17 МэВ поглотится, в результате площадь соответствующего спектрального пика уменьшится, а коэффициент отношения интенсивностей пиков K возрастет. Учитывая, что каждый отсчёт на выходе детектора представляет собой пуассоновскую случайную величину со значением интенсивности, равным соответствующему отсчёту аппроксимирующей функции $Sf(i)$ или $KSf(i)$, и все отсчёты являются статистически независимыми, совместное распределение вероятностей составной выборки (x, y) можно представить в следующем виде:

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

Таким образом, задачу обнаружения присутствия азотосодержащего вещества можно сформулировать как задачу проверки сложных статистических гипотез относительно параметра K распределения (1):

$$\begin{aligned} H_0: K = K_0, 0 < S < \infty \quad (\text{поглощение } \gamma\text{-квантов отсутствует}); \\ H_1: K > K_0, 0 < S < \infty \quad (\text{поглощение } \gamma\text{-квантов присутствует}). \end{aligned} \quad (2)$$

Структура распределения вероятностей (1) не позволяет напрямую осуществить синтез алгоритма обнаружения. Поэтому, полагая $x_i \gg 1, y_i \gg 1$ и обозначив $X_i = 2\sqrt{x_i + 1}, Y_i = 2\sqrt{K_0}\sqrt{y_i + 1}, i = 1, \dots, n$, воспользуемся гауссовой аппроксимацией распределения векторов $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_n\}$ и $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_n\}$ [7]:

$$w(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^n \left(\frac{1}{\sqrt{K_0}}\right)^n \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - 2\sqrt{KSf(i)})^2 + \frac{1}{K_0} \sum_{i=1}^n (Y_i - 2\sqrt{K_0Sf(i)})^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

Данное распределение и задача (2) симметричны относительно группы аддитивных преобразований

$$\mathbf{G} = \{g: X_i \rightarrow X_i + b_i; Y_i \rightarrow Y_i + b_i, \quad b_i \in [0, \infty), \quad i = 1, \dots, n\}.$$

Этой группе соответствует произвольное изменение компонент спектра (например, за счёт фонового излучения), при котором величина $\sqrt{J_{Y_i}} - \sqrt{J_{X_i}}$ (J_{Y_i} и J_{X_i} — интенсивности i -х компонент спектров в области пиков 2,36 и 9,17 МэВ соответственно) остаётся постоянной. Максимальным инвариантом такой группы будет статистика [8] $\mathbf{Z} = \{Z_1, \dots, Z_n\}, Z_i = Y_i - X_i, i = 1, \dots, n$, с распределением вероятностей

$$\begin{aligned} w(\mathbf{Z}) &= \left[\frac{1}{2\pi(1+K_0)} \right]^{n/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1+K_0)} \sum_{i=1}^n [Z_i - (\sqrt{KS} - \sqrt{K_0S})\sqrt{f(i)}]^2 \right\} = \\ &= \left[\frac{1}{2\pi(1+K_0)} \right]^{n/2} \exp \left\{ -\frac{\theta^2(1+K_0)}{2} \sum_{i=1}^n f(i) \right\} \times \\ &\times \exp \left\{ \theta \sum_{i=1}^n Z_i \sqrt{f(i)} \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{\sum_{i=1}^n Z_i^2}{2(1+K_0)} \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\theta = \frac{\sqrt{KS} - \sqrt{K_0S}}{1+K_0}$. Таким образом, задачу (2) обнаружения поглощения γ -квантов в спектральной области 9,17 МэВ можно сформулировать как задачу проверки статистических гипотез относительно параметра θ распределения (4):

$$\begin{aligned} H_0: \theta = 0 \quad (\text{поглощение } \gamma\text{-квантов отсутствует}); \\ H_1: \theta > 0 \quad (\text{поглощение } \gamma\text{-квантов присутствует}). \end{aligned} \quad (5)$$

Распределение (4) принадлежит однопараметрическому экспоненциальному семейству, обладает монотонным отношением правдоподобия, поэтому существует [9] равномерно наиболее мощный алгоритм решения задачи (5)

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n Z_i \sqrt{f(i)} > C, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

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

$$C = t_{1-\alpha} \sqrt{(1 + K_0) \sum_{i=1}^n f(i)}, \quad (7)$$

где $t_{1-\alpha}$ — квантиль порядка $1 - \alpha$ стандартного нормального распределения.

Выразив статистику \mathbf{Z} через исходные наблюдения, можно получить следующее выражение для алгоритма:

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n (\sqrt{x_i + 1} - K_0 \sqrt{y_i + 1}) f(i) > C/2, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

Исследование эффективности алгоритма обнаружения проводилось методом компьютерного моделирования. На первом этапе моделировались отсчёты энергетических спектров на выходе детектора в области пиков 2,36 и 9,17 МэВ. Каждый отсчёт представлял собой случайную величину, распределённую по закону Пуассона со значением интенсивности, определяемым аппроксимирующими пики функциями $K_0 S f(i)$ и $S f(i)$ при моделировании пиков в отсутствие поглощения γ -излучения и функциями $K S f(i)$ и $S f(i)$

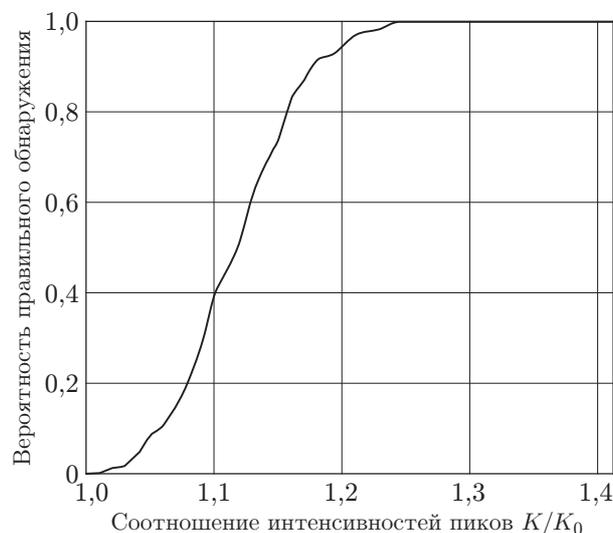


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от степени поглощения γ -квантов

при его наличии (значения K_0 и S принимались равными 1,1230 и 1280 в соответствии с результатами измерений реального спектра).

На втором этапе проходили статистические испытания алгоритма (4) и по их результатам строились зависимости вероятности правильного принятия решения о наличии поглощения от степени поглощения γ -квантов, характеризуемой отношением K/K_0 . Для каждого значения K/K_0 проводилась 1000 опытов, вероятность ложного принятия решения α при вычислении пороговой константы C в алгоритме (4) принималась равной 0,01. Результаты испытаний представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что вероятность ложного обнаружения ($K/K_0 = 1$) не превосходит заданного значения $\alpha = 0,01$, а уверенное обнаружение происходит при $K/K_0 = 1,2$ (вероятность составляет величину около 0,95).

Третий этап — это статистические испытания алгоритма на модели спектра, учитывающей побочные пики и фоновое излучение, присущие реальному спектру (рис. 3). На рис. 3, *a* показана реализация реального спектра, регистрируемого на выходе детектора, на рис. 3, *b* — аппроксимирующая функция интенсивностей спектральных пиков, на рис. 3, *c* — полученная в соответствии с ней модель спектра.

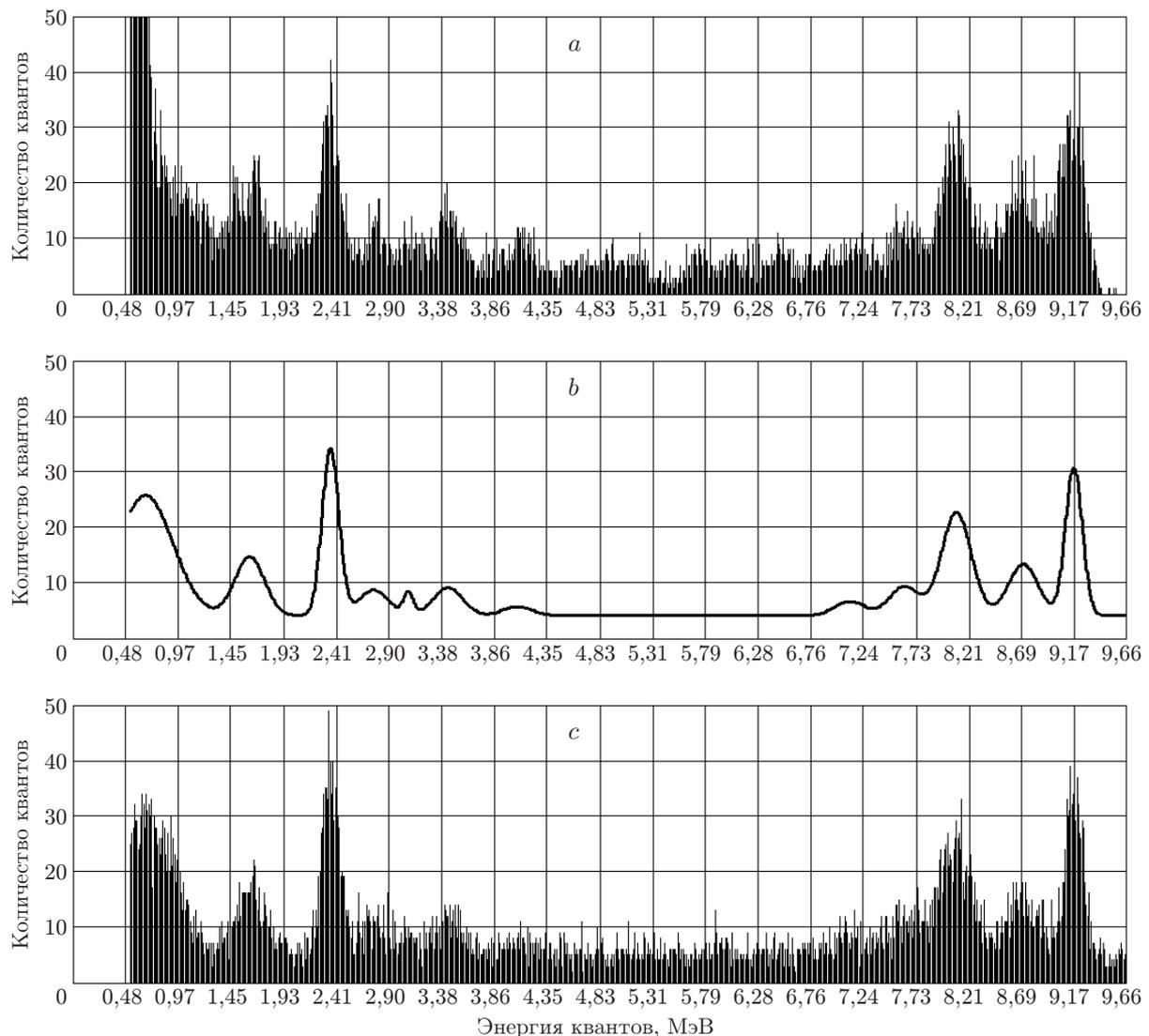


Рис. 3. Моделирование полного спектра γ -излучения на выходе детектора

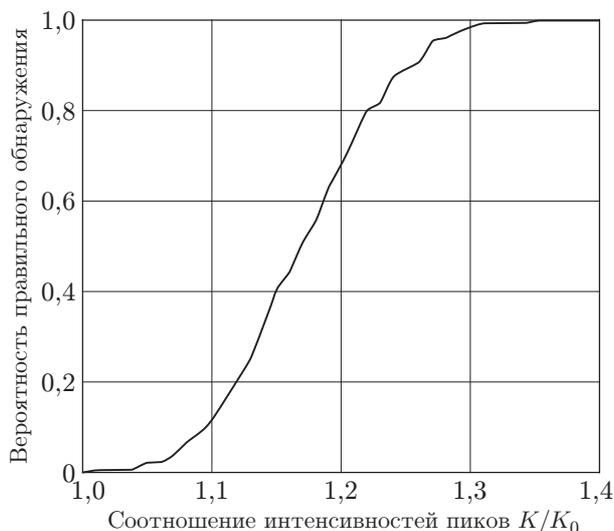


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения поглощения γ -квантов от интенсивности поглощения при моделировании полного спектра

Результаты статистических испытаний алгоритма обнаружения с использованием данной модели приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что наличие фонового излучения и побочных спектральных пиков изменяет характеристики алгоритма: уменьшаются до 0,002 вероятность ложного обнаружения α при пороговой константе C , вычисленной исходя из вероятности $\alpha = 0,01$, и вероятность правильного обнаружения. Принятие правильного решения с вероятностью 0,95 происходит при $K/K_0 = 1,3$, а не при $K/K_0 = 1,2$,

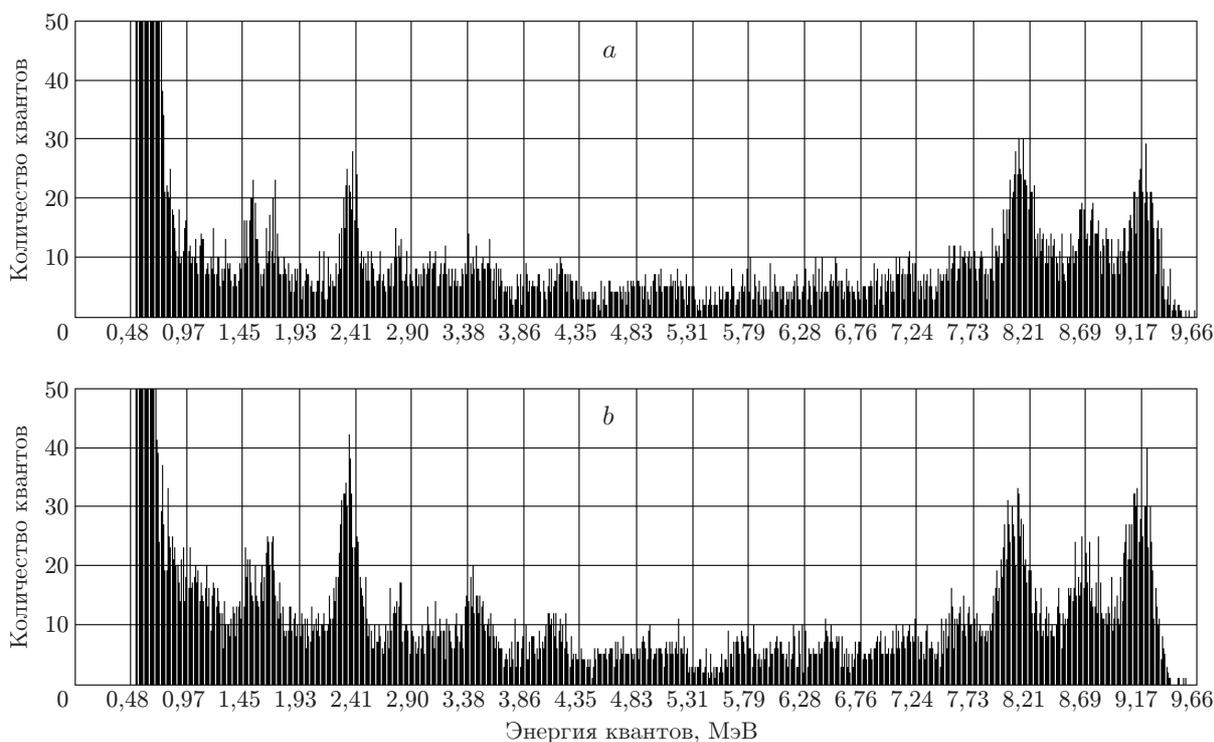


Рис. 5. Примеры реальных спектров вторичного излучения: *a* — без поглощения, *b* — с поглощением

как это было ранее. Тем не менее работу алгоритма можно считать эффективной и в данном случае.

В заключение был проведён натурный эксперимент (рис. 5) по проверке алгоритма для обнаружения азотосодержащего вещества (меламина). Применение разработанного алгоритма позволило обеспечить устойчивое обнаружение присутствия азотосодержащего вещества, хотя визуальное обнаружение весьма затруднено.

Заключение. В представленной работе предложен алгоритм обнаружения поглощения спектрального пика 9,17 МэВ в спектре вторичного излучения исследуемого объекта, обеспечивающий заданный уровень вероятности ложного обнаружения при любых значениях интенсивностей спектральных линий исследуемого вещества и фонового излучения и максимизирующий при этом вероятность правильного обнаружения. Решающая функция алгоритма имеет одинаковую структуру независимо от регистрируемого спектра, что позволяет реализовать автоматизированную работу алгоритма.

Методом имитационного моделирования на ЭВМ проведён анализ работы алгоритма как при отсутствии фонового излучения на всей протяжённости спектра, так и с учётом фоновой составляющей. На основе моделирования и натурального эксперимента показано, что, несмотря на ухудшение характеристик алгоритма, вызванное наличием фона, в целом эффективность его работы сохраняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vartsky D., Goldberg M. B., Engler G. et al.** The total width of the 9.17 MeV level in ^{14}N // Nuclear Phys. A. 1989. **505**, Is. 2. P. 328–336.
2. **Morgado R. E., Cappiello C. C., Dugan M. P. et al.** The effects of proton-beam quality on the production of gamma rays for nuclear resonance absorption in nitrogen // Proc. SPIE. 1993. **2092**. P. 507–513.
3. **Hannah S. S., Meyer-Schützmeister L.** Resonant absorption by the 9.17-MeV level in ^{14}N // Phys. Rev. 1959. **115**, N 4. P. 986–989.
4. **Gillespie A. B.** Signal, noise and resolution in nuclear counters. London: Pergamon Press, 1953. 155 p.
5. **Davies O. L.** Statistical methods in research and production. London: Oliver and Boyd, 1957. 396 p.
6. **Kuznetsov A. S., Belchenko Yu. I., Burdakov A. V. et al.** The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Research A. 2009. **606**, N 3. P. 238–242.
7. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1974. Кн. 1. 656 с.
8. **Богданович В. А., Вострецов А. Г.** Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. М.: Физматлит, 2004. 320 с.
9. **Леман Э.** Проверка статистических гипотез: Пер. с англ. М.: Наука, 1979. 408 с.

Поступила в редакцию 29 декабря 2009 г.