

УДК 519.254 519.688

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СОСТАВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

С.Е. Радченко

Новосибирский государственный технический университет

Предложен вариант равномерно наиболее мощного несмещенного алгоритма обнаружения поглощения отдельных участков спектра на основе сравнения интенсивностей спектральных линий. Процедура синтеза алгоритма проведена в соответствии с положениями теории устойчивого обнаружения сигналов на основе выделения полных достаточных статистик для полезных и мешающих параметров в составе распределения вероятности выборочных данных. Эффективность предложенного алгоритма подтверждена результатами имитационного моделирования. Получены зависимости вероятности правильного обнаружения от степени поглощения спектральных линий при разных задаваемых уровнях вероятности ложной тревоги, а также разных объемах статистики, полученной в ходе эксперимента. Показано, что эффективность алгоритма возрастает по мере набора статистики в пределах анализируемых участков спектра. Также установлено, что появление фонового излучения приводит к ухудшению работы алгоритма: его мощность снижается по мере роста интенсивности фона. Реализация алгоритма во встраиваемых системах не требует значительных вычислительных ресурсов, что снижает требования к аппаратной части систем обнаружения. Одной из отличительных особенностей полученного алгоритма является возможность обеспечения автоматизированной работы систем обнаружения определенных веществ и устранения влияния человеческого фактора при принятии решений.

Ключевые слова: обработка сигналов, энергетический спектр, гамма-спектроскопия, спектральный анализ, вероятность ложной тревоги.

Введение

Среди актуальных задач современной науки важное место занимает проблема развития и совершенствования методов спектрального анализа. Относительно новое явление в области спектрального анализа представляет собой гамма-спектроскопия как средство бесконтактного определения химического состава объектов. Суть данного метода заключается в облучении исследуемого объекта гамма-квантами с широким энергетическим спектром. При прохождении через вещество объекта гамма-кванты определенных энергий могут подвергнуться резонансному поглощению атомами тех или иных веществ. К примеру, в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработана и изготовлена установка, позволяющая проводить эксперименты по обнаружению повышенного содержания азота в объектах [1]. Уникальной особенностью данной установки является способность генерировать гамма-кванты с энергиями до 10 МэВ. Это открывает принципиальную возможность обнаружения повышенного содержания азота, поскольку наличие последнего в составе объекта приводит к резонансному поглощению гамма-квантов с энергией 9,17 МэВ. В то же время в составе генерируемого энергетического спектра присутствует масса линий, неподверженных резонансному поглощению азотом. Среди таких линий наиболее интенсивной является линия 2,36 МэВ. Таким образом, сравнение интенсивностей указанных линий позволит сделать вывод о наличии либо отсутствии повышенного содержания азота в исследуемом объекте.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 14-07-31174-мол а).

Однако в силу особенностей установки непосредственный подсчет гамма-квантов (как наиболее очевидное решение) неприменим по ряду причин. Во-первых, в пик полного поглощения попадают не все кванты, поскольку часть из них вылетает за пределы коллиматора, оказавшись зарегистрированной в пределах пика single-escape [2]. Во-вторых, для отслеживания квантов применяется сцинтилляционный детектор, обладающий конечным быстродействием. В-третьих, преобразование сцинтилляционных вспышек в электрические сигналы осуществляет фотоэлектронный умножитель. Наконец, на протяжении всего спектра присутствует фоновое излучение. В совокупности это обуславливает статистический характер наблюдаемых данных. Пример получаемых спектров приведен на рис. 1.

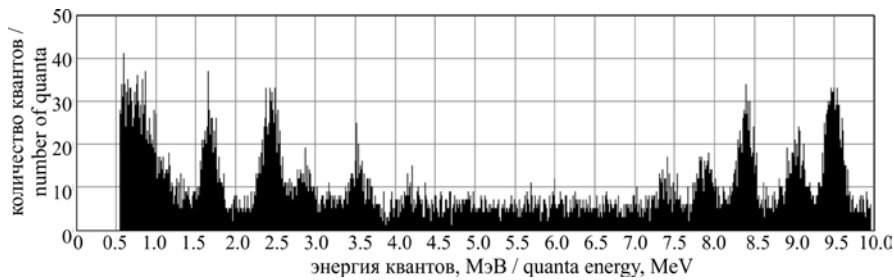


Рис. 1 – Спектр гамма-излучения, прошедшего через объект
Fig. 1 – The spectrum of gamma radiation passed through the object

Для преодоления указанных проблем предлагается применить подход, основанный на применении принципа несмещенности [7] для обеспечения устойчивого обнаружения заданного вещества.

1. Разработка алгоритма обнаружения

В соответствии с приведенными данными предлагается построить алгоритм на основе сравнения интенсивностей спектральных линий 2,36 МэВ и 9,17 МэВ.

Из экспериментальных данных следует сформировать две выборки: выборку $x = \{x_i, i = 1...n\}$, составленную из отсчетов энергетического спектра в области пика 2,36 МэВ, а также выборку $y = \{y_i, i = 1...n\}$, полученную путем взятия отсчетов спектра в области пика 9,17 МэВ. Для того чтобы избежать трудностей с математическим описанием различных энергий сравниваемых линий, предлагается рассматривать полученные выборочные векторы в одном диапазоне номеров отсчетов. Другими словами, после взятия отсчетов спектра обе выбранные линии переносятся таким образом, что имеют одно и то же значение энергии, соответствующее среднему отсчету каждой выборки (при симметричной аппроксимирующей функции).

Отсчеты представляют собой случайные величины, распределенные по закону Пуассона [3], интенсивность которых определяется формой спектральной линии. В ряде работ [2, 4, 5, 6] для описания формы линии применяется функция Гаусса [3]

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{(i \cdot \tau - E)^2}{2D}\right), \quad i = 1...n, \quad (1)$$

где D – параметр, определяющий ширину линии (определяется полосой пропускания регистрирующей системы), E – энергия спектральной линии, τ – шаг дис-

кретизации по энергии (определяется разрядностью применяемого аналого-цифрового преобразователя). Требуемый объем выборки n предлагается определить исходя из условия получения не менее 99,8 % площади под аппроксимирующей функцией (1). Значение интенсивности спектральной линии предлагается учесть при помощи масштабирующего коэффициента S .

Для описания формы спектральной линии 2,36 МэВ предлагается использовать выражение

$$S \cdot f(i), i = 1 \dots n,$$

где S определяет интенсивность линии. Форма линии 9,17 МэВ описывается следующим выражением:

$$\frac{1}{K} \cdot S \cdot f(i), i = 1 \dots n,$$

где коэффициент K определяет степень поглощения. При отсутствии поглощения $K = K_0$ (величина, известная для данного детектора). При поглощении гамма-квантов в пределах линии 9,17 МэВ данный коэффициент будет увеличиваться.

Таким образом, задачу обнаружения повышенного содержания азота можно сформулировать как задачу проверки сложных статистических гипотез относительно параметра K :

$$H_0 : K = K_0, 0 < S < \infty \text{ (поглощение квантов отсутствует)};$$

$$H_1 : K > K_0, 0 < S < \infty \text{ (поглощение квантов присутствует)}.$$

Согласуясь с вышеизложенными рассуждениями, плотность распределения вероятностей выборочного вектора $\mathbf{x}$ может быть записана как произведение плотностей распределения отсчетов, составляющих выборку:

$$\omega(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{x_i!} (S \cdot f(i))^{x_i} \cdot e^{-S \cdot f(i)} \right].$$

Аналогично плотность распределения вероятностей вектора $\mathbf{y}$ имеет следующий вид:

$$\omega(\mathbf{y}) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{y_i!} \left(\frac{S}{K} \cdot f(i) \right)^{y_i} \cdot e^{-\frac{S}{K} \cdot f(i)} \right].$$

Векторы $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$ статистически независимы, поэтому их совместное распределение равно произведению плотностей распределения векторов:

$$\begin{aligned} \omega(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = & \frac{1}{\prod_{i=1}^n x_i! y_i!} \exp \left(\sum_{i=1}^n x_i \ln(S \cdot f(i)) - \sum_{i=1}^n S \cdot f(i) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n y_i \ln\left(\frac{S}{K} \cdot f(i)\right) - \sum_{i=1}^n \frac{S}{K} \cdot f(i) \right). \end{aligned}$$

Нетрудно привести распределение к виду

$$\omega(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp\left(-S \sum_{i=1}^n f(i) - \frac{S}{K} \sum_{i=1}^n f(i)\right) \exp\left(\ln(S) \sum_{i=1}^n x_i + \ln\left(\frac{S}{K}\right) \sum_{i=1}^n y_i\right) \frac{\exp\left(\sum_{i=1}^n x_i \ln(f(i)) + \sum_{i=1}^n y_i \ln(f(i))\right)}{\prod_{i=1}^n x_i! y_i!}.$$

Если ввести обозначения $\theta_1 = \ln\left(\frac{1}{K}\right)$, $\theta_2 = \ln(S)$, $T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i$,

$V(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n y_i$, то выражение для ПРВ примет вид

$$\omega(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = K(\theta_1, \theta_2) \exp\{\theta_1 \cdot V(\mathbf{y}) + \theta_2 \cdot T(\mathbf{x}, \mathbf{y})\} \cdot H(\mathbf{x}, \mathbf{y}),$$

где

$$K(\theta_1, \theta_2) = \exp\left(-S \sum_{i=1}^n f(i) - \frac{S}{K} \sum_{i=1}^n f(i)\right),$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\exp\left(\sum_{i=1}^n x_i \ln(f(i)) + \sum_{i=1}^n y_i \ln(f(i))\right)}{\prod_{i=1}^n x_i! y_i!}.$$

Статистики $V(\mathbf{y})$ и $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ являются достаточными для параметров θ_1 и θ_2 [7], поэтому для отыскания алгоритма необходимо отыскать совместное распределение данных статистик.

Статистика $V(\mathbf{y})$ представляет собой сумму случайных пуассоновских величин и, следовательно [9], также является пуассоновской величиной:

$$\omega(V) = \frac{1}{V!} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{S}{K} \cdot f(i) + V \ln\left(\sum_{i=1}^n \frac{S}{K} \cdot f(i)\right)\right\}.$$

Поскольку выражение для статистики $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ содержит в своем составе статистику $V(\mathbf{y})$, предлагается ввести вспомогательную статистику $U(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n x_i$:

$$\omega(U) = \frac{1}{U!} \exp\left\{-\sum_{i=1}^n S \cdot f(i) + U \cdot \ln\left(\sum_{i=1}^n S \cdot f(i)\right)\right\}.$$

Совместное распределение статистик $V(\mathbf{y})$ и $U(\mathbf{x})$ будет равно произведению их ПРВ, поскольку они статистически независимы. С учетом того, что

$U(\mathbf{x}) = T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - V(\mathbf{y})$, искомое совместное распределение может быть выражено следующим образом [9]:

$$\omega(V, T) = \omega(V, U) \cdot |J|,$$

где $|J| = 1$ – якобиан преобразования $\omega(V, U) \rightarrow \omega(V, T)$.

Таким образом,

$$\begin{aligned} \omega(V, T) &= \frac{1}{(T-V)!V!} \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{S}{K} \cdot f(i) - \sum_{i=1}^n S \cdot f(i)\right) \times \\ &\times \exp\left(V \ln \sum_{i=1}^n \left(\frac{S}{K} \cdot f(i)\right) + (T-V) \ln \sum_{i=1}^n S \cdot f(i)\right) = \\ &= \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{S}{K} \cdot f(i) - \sum_{i=1}^n S \cdot f(i)\right) \exp(V \cdot \theta_1 + T \cdot \theta_2) \cdot \frac{\exp\left(T \ln \sum_{i=1}^n f(i)\right)}{(T-V)!V!}, \end{aligned}$$

где $\theta_1 = \ln(1/K)$, $\theta_2 = \ln(S)$ – полезный и мешающий параметры соответственно. Задача обнаружения азотсодержащего вещества может быть переформулирована как задача проверки сложных статистических гипотез относительно параметров полученного распределения:

$$H_0 : \lambda = \lambda_0, \quad 0 < \mu < \infty \text{ (поглощение квантов отсутствует)};$$

$$H_1 : \lambda < \lambda_0, \quad 0 < \mu < \infty \text{ (поглощение квантов присутствует)}.$$

Распределение $\omega(V, T)$ принадлежит экспоненциальному семейству и является полным [7], поэтому существует равномерно наиболее мощный несмещенный алгоритм с неймановской структурой, решающая функция которого имеет вид [8]

$$\varphi(V, T) = \begin{cases} 1, & V < C(T); \\ 0, & V \geq C(T). \end{cases}$$

Для нахождения пороговой константы $C(T)$ необходимо получить условное распределение $\omega(V | \lambda = \lambda_0, T)$ на границе $\lambda = \lambda_0$. Исходя из того, что статистика T имеет распределение Пуассона, соответствующее распределению суммы пуассоновских величин, функция $\omega(V, T)$ на границе $\lambda = \lambda_0$ примет вид

$$\begin{aligned} \omega(V | \lambda = \lambda_0, T) &= \frac{T!}{(T-V)!V!} \times \\ &\times \exp\left(V \ln\left(\frac{1}{K_0}\right) + T \ln(S) - T \ln(S) - T \ln\left(\frac{1}{K_0} + 1\right)\right); \\ \omega(V | \lambda = \lambda_0, T) &= \frac{T!}{(T-V)!V!} \exp\left(V \ln\left(\frac{1}{K_0}\right) - T \ln\left(\frac{1}{K_0} + 1\right)\right). \end{aligned}$$

Пороговая константа отыскивается из условия обеспечения заданного уровня α вероятности ложного обнаружения поглощения линии:

$$\int_0^{C(T)} \omega(V | \lambda = \lambda_0, T) dV = \alpha.$$

Учитывая дискретный характер статистик, уравнение для вычисления пороговых констант можно представить в следующем виде:

$$\sum_{V=0}^{C(T)} \omega(V | \lambda = \lambda_0, T) = \alpha.$$

Следует отметить, что вероятность ложного обнаружения поглощения спектральной линии в отсутствие фоновой составляющей не зависит от абсолютных значений интенсивности регистрируемых спектральных линий.

2. Моделирование алгоритма

Проверка работы алгоритма осуществлялась путем имитационного моделирования на ЭВМ. На первом этапе применялась модель идеализированного спектра, состоящего из нескольких спектральных линий и не обладающего фоновой составляющей. Для каждого значения соотношения интенсивностей пиков было проведено по 10 000 экспериментов, в которых определялась вероятность правильного обнаружения поглощения спектрального пика 9,17 МэВ. Пороговая константа рассчитана для уровня вероятности ложного обнаружения, равного $\alpha = 0,01$ при различных уровнях интенсивности λ_0 непоглощаемой линии спектра. Полученная зависимость вероятности правильного обнаружения от соотношения интенсивностей пиков приведена на рис. 2.

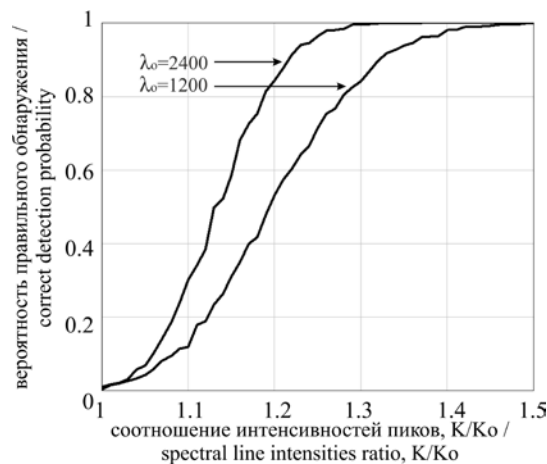


Рис. 2 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от соотношения интенсивностей пиков при отсутствии фона

Fig. 2 – The correct detection probability dependence of the peak intensities ratio in the absence of the background

Из рисунка видно, что в отсутствие фонового излучения вероятность правильного обнаружения поглощения линии зависит от значений интенсивностей линий

регистрируемого спектра. Например, для обеспечения вероятности правильного обнаружения, равной 0,9, при $\lambda_0 = 1200$ требуется соотношение $K/K_0 = 1,35$, при $\lambda_0 = 2400$ требуемое значение уменьшается до $K/K_0 = 1,22$.

Для оценки влияния фоновой составляющей на характеристики алгоритма в модель спектра был добавлен компонент, имитирующий фоновое излучение с интенсивностью, равной $\lambda_b = \lambda_0 \cdot B$, $B > 0$, и постоянной на протяжении всего спектра. Взаимодействие фона с основным спектром аддитивное. На рис. 3 приведены полученные при различных B зависимости вероятности правильного обнаружения от соотношения интенсивностей K/K_0 при $\lambda_0 = 1200$. Пороговая константа определялась численно для уровня вероятности ложной тревоги $\alpha = 0,01$ путем моделирования 10 000 энергетических спектров гамма-излучения, соответствующих отсутствию поглощения. Необходимость численного определения пороговой константы вызвана различием между заданным и полученным уровнями ложной тревоги, обусловленным появлением фоновое излучения.

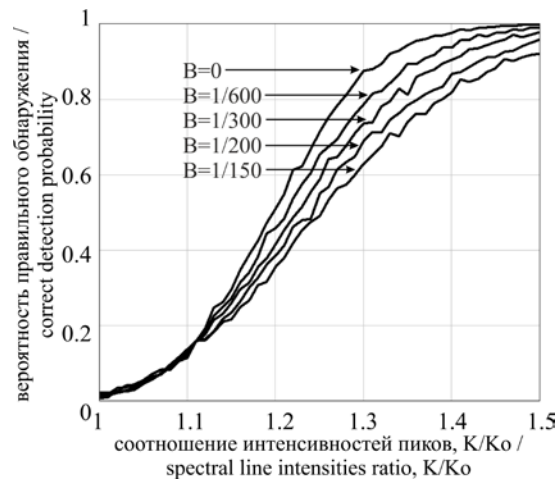


Рис. 3 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от соотношения интенсивностей пиков при наличии фона

Fig. 3 – The correct detection probability dependence of the peak intensities ratio in the presence of the background

Видно, что при $B \geq 1/150$ появление фоновой составляющей существенно ухудшает характеристики алгоритма. При $B \leq 1/300$ влиянием фона можно практически пренебречь.

Выводы

Предложен равномерно наиболее мощный несмещенный алгоритм обнаружения поглощения спектральных пиков в энергетическом спектре гамма-излучения, прошедшего через исследуемый объект в отсутствие фоновой составляющей. Синтез алгоритма проведен в соответствии с положениями теории устойчивого обнаружения сигналов на основе выделения полных достаточных статистик для полезных и мешающих параметров в составе распределения вероятности выборочных данных.

Проведено имитационное моделирование, показавшее эффективность алгоритма. Получены зависимости мощности алгоритма от соотношения интенсивностей спектральных линий при различных уровнях ложной тревоги. При появлении фоновой составляющей эффективность алгоритма снижается, однако для случая, когда интенсивность фоновой составляющей не превосходит 0,33 % интенсивности непоглощаемого спектрального пика (что соответствует практически важному случаю обнаружения поглощения линии 9,17 МэВ), его влиянием можно пренебречь.

Показано, что эффективность алгоритма зависит также и от объема измерительной информации: по мере набора статистики на участках спектра, представляющих интерес в контексте решаемой задачи, мощность алгоритма возрастает.

Решающая функция алгоритма позволяет реализовать его работу во встраиваемых системах любой сложности, обеспечивая автоматизированную работу систем обнаружения веществ и исследования состава объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays / A.S. Kuznetsov Yu.I. Belchenko, A.V. Burdakov, V.I. Davydenko, A.S. Donin, A.A. Ivanov, S.G. Konstantinov, A.S. Krivenko, A.M. Kudryavtsev, K.I. Mekler, A.L. Sanin, I.N. Sorokin, Yu.S. Sulyaev, S.Yu. Taskaev, V.V. Shirokov, Yu.I. Eidelman // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Vol. 606, iss. 3. – P. 238–242. – doi: 10.1016/j.nima.2009.04.030
2. **Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кэбин Э.И.** Частицы и ядра. Эксперимент. – М.: МАКС Пресс, 2013. – 252 с.
3. **Сквайрс Дж.** Практическая физика. – М.: Мир, 1971. – 246 с.
4. **Рарп Т.** On the response function of solid-state detectors, based on energetic electron transport processes // X-Ray Spectrometry. – 2003. – Vol. 32, iss. 6. – P. 458–469.
5. **Мучной Н.Ю.** Комптоновское рассеяние в прецизионных экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.20. – Новосибирск, 2011. – 216 с.
6. Метод определения параметров формы пика секторного масс-спектрометра / О.Н. Перегудов, В.А. Покровский, Ю.В. Рогольский, А.Н. Бугай // Масс-спектрометрия. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 43–48.
7. **Леман Э.** Проверка статистических гипотез / пер. с англ. Ю.В. Прохорова. – М.: Наука, 1979. – 408 с.
8. **Богданович В.А., Вострецов А.Г.** Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
9. **Кендалл М.Дж., Стьюарт А.** Теория распределений. – М.: Наука, 1966. – 588 с.
10. **Радченко С.Е.** Совместная оценка параметров спектральных линий энергетического спектра гамма-излучения // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск: СФУ, 2011. – С. 174–179.

STATISTICAL ALGORITHM FOR SINGLE SPECTRAL PEAK ABSORPTION DETECTION

Radchenko S.E.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The most powerful version of the algorithm for detecting single spectral peak absorption is proposed. The algorithm is based on the comparison of spectral peak intensities. The algorithm synthesis procedure has been carried out in compliance with the theory of stable signal detection based on the separation of complete sufficient statistics for useful and nuisance parameters in probability distribution of sample data. The efficiency of the proposed algorithm has been proved by numerical imitation modeling experiments. Numerous characteristics have been obtained

including different statistics volumes and false alarm levels. It has been shown that the algorithm efficiency rises in proportion to the collected statistics volume. It has been found out that the presence of background radiation results in the efficiency reduction and that the power of the algorithm decreases in proportion to the background intensity. It should be mentioned that the algorithm doesn't require any powerful computational resources so that it can be implemented almost in any microprocessor embedded system. One of the algorithm features is that it makes it possible to build a fully automated system for detecting various substances and to eliminate the influence of the so-called human factor while making decisions.

Keywords: signal processing; gamma spectrum; gamma-spectroscopy; spectral analysis; false alarm probability.

REFERENCES

1. Kuznetsov A.S., Belchenko Yu.I., Burdakov A.V., Davydenko V.I., Donin A.S., Ivanov A.A., Konstantinov S.G., Krivenko A.S., Kudryavtsev A.M., Mekler K.I., Sanin A.L., Sorokin I.N., Sulyaev Yu.S., Taskaev S.Yu., Shirokov V.V., Eidelman Yu.I. The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 606, iss. 3, pp. 238-242. doi: 10.1016/j.nima.2009.04.030.
2. Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Kebin E.I. *Chastitsy i yadra. Eksperiment* [Particle and the nucleus. Experiment]. Moscow, MAKS Press Publ., 2013. 252 p.
3. Squires G.L. *Practical Physics*. London, McGRAW-HILL Publ., 1968. 224 p. (Russ. ed.: Skvairs Dzh. *Prakticheskaya fizika*. Moscow, Mir Publ., 1971. 246 p.).
4. Papp T. On the response function of solid-state detectors, based on energetic electron transport processes. *X-Ray Spectrometry*, 2003, vol. 32, iss. 6, pp. 458-469. doi: 10.1002/xrs.672.
5. Muchnoi N.Yu. *Komptonovskoe rasseyaniye v pretsizionnykh eksperimentakh na elektron-pozitronnykh kollaidierakh*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Compton scattering in high-precision experiments at electron-positron colliders. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Novosibirsk, 2011. 216 p.
6. Peregudov O.N., Pokrovskii V.A., Rogul'skii Yu.V., Bugai A.N. Metod opredeleniya parametrov formy pika sektornogo mass-spektrometra [Method for the determination of peak shape parameters for sector mass-spectrometers]. *Mass-spektrometriya – Mass Spectrometry*, 2008, vol. 4, no. 1, pp. 43-48.
7. Lehmann E.L. *Testing Statistical Hypotheses*. New York, John Wiley and Sons Inc., 1959. 369 p. (Russ. ed.: Leman E. *Proverka statisticheskikh gipotez*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 408 p.).
8. Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G. *Teoriya ustoichivogo obnaruzheniya, razlicheniya i otsenivaniya signalov* [Theory of sustainable detection, distinction and Estimation System]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 320 p.
9. Kendall M.G., Stuart A. *The Advanced Theory of statistics. Vol. 1. Distribution theory*. London, Charles Griffin & Company Limited, 1961. 438 p. (Russ. ed.: Kendall M.Dzh., St'yuart A. *Teoriya raspredelenii*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 588 p.).
10. Radchenko S.E. Sovmestnaya otsenka parametrov spektral'nykh linii energeticheskogo spektra gamma-izlucheniya [Joint Evaluation of spectral line parameters of the energy spectrum of gamma radiation]. *Sovremennye problemy radioelektroniki* [Modern Problems of Radio Electronics]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2011, pp. 174-179.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Радченко Сергей Евгеньевич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры КТПС Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: применение теории устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов в условиях априорной неопределенности в задачах спектрального анализа и автоматизации физического эксперимента. Опубликовано 9 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20. Email: R1505@mail.ru).

Radchenko Sergey Evgenyevich (b. 1986), PhD (Eng.), research fellow of the Electronic Equipment Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the stochastic signal detection and the estimation theory applied to spectral analysis and experiment automation. He is the author of 9 scientific papers. (Address: 20, K.Marks Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia. Email: R1505@mail.ru).

Статья поступила 10 апреля 2014 г.
Received April 10, 2014

To Reference:

Radchenko S.E. Algoritm obnaruzheniya pogloshcheniya spektral'nykh linii v sostave energeticheskogo spektra gamma-izlucheniya [Statistical algorithm for single spectral peak absorption detection]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2014, no. 2-3 (23-24), pp. 81-90.