

ГАММА-ДЕТЕКТОРЫ В УСТАНОВКАХ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ВЗРЫВЧАТЫХ И НАРКОТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

*В. М. Быстрицкий, Е. В. Зубарев, А. В. Красноперов¹,
С. Ю. Пороховой, В. Л. Рапацкий, Ю. Н. Рогов, А. Б. Садовский,
А. В. Саламатин, Р. А. Салмин, В. М. Слепнев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Е. И. Андреев

ООО «Нейтронные технологии», Дубна, Россия

В Объединенном институте ядерных исследований разработаны и созданы γ -детекторы на основе кристаллов BGO, используемые в установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ (ВВ и НВ). Приведены основные характеристики и конструкция детекторов. Описан метод программной температурной стабилизации отклика γ -детектора, позволяющий эксплуатировать детектор в диапазоне температур от -20 до 50 °С.

Gamma-detectors intended for detectors of explosives and drugs were developed at the Joint Institute for Nuclear Research on the basis of the BGO crystals. The design and the main features of the detectors are discussed. A method for a program temperature stabilization of a γ -detector response is described. The method enables one to operate the detector in the temperature range from -20 to 50 °С.

PACS: 07.85.Fv; 29.40.-n; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) разработано и создано несколько экспериментальных установок [1–3] по обнаружению и идентификации скрытых взрывчатых и наркотических веществ, использующих метод меченых нейтронов (ММН). Элементный состав исследуемого объекта определяется из регистрации характеристического γ -излучения, испущенного в процессе неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах облучаемого образца $A(n, n')A$. Источником нейтронов с энергией 14,1 МэВ, образованных в бинарной реакции $t(d, n)\alpha$, служит нейтронный генератор ИНГ-27 [4].

Перечислим основные требования к детектору для регистрации характеристического γ -излучения. Он должен

— иметь высокую эффективность регистрации γ -квантов в диапазоне энергий от 1 до 10 МэВ;

¹E-mail: Alexei.Krasnoperov@jinr.ru

- иметь низкую чувствительность к нейтронному фону по отношению к эффективности регистрации γ -квантов;
- обеспечивать линейность отклика;
- иметь хорошее энергетическое и временное разрешение в указанном диапазоне энергий γ -квантов;
- быть радиационно стойким и обеспечивать стабильность параметров с течением времени.

В настоящее время для регистрации γ -излучения в указанном выше диапазоне энергий наиболее часто используются детекторы на основе неорганических сцинтилляторов.

1. СЦИНТИЛЛЯТОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ММН

Детальный обзор свойств неорганических сцинтилляторов, применяемых для регистрации γ -излучения в широком диапазоне энергий, опубликован в работах [5–7]. В настоящей работе рассмотрены свойства сцинтилляторов, нашедших свое применение в установках по обнаружению ВВ и НВ на основе метода меченых нейтронов. Основные характеристики этих сцинтилляторов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сцинтилляторов [9]

Свойства	Сцинтиллятор		
	NaI(Tl)	BGO	LaBr ₃ (Ce)
Плотность, г/см ³	3,67	7,13	5,29
Эффективный атомный номер Z	50	75	47
Радиационная длина, см	2,59	1,12	1,88
Время высвечивания, нс	245	300	20
Длина волны в максимуме спектра, нм	410	480	356
Относительный световыход, %	100	21	130
Коэффициент преломления	1,85	2,15	1,9
Температура плавления, °С	651	1050	788
Радиационная стойкость, Гр	10 ³	10 ³ –10 ⁴	> 3 · 10 ³ [8]
Гигроскопичность	Да	Нет	Да

1.1. Йодид натрия NaI(Tl). Йодид натрия, активированный таллием, — самый распространенный сцинтиллятор, применяемый для регистрации γ -излучения. Его отличительной особенностью является высокий световыход, определяющий относительное энергетическое разрешение (FWHM)¹ порядка 7% для пика полного поглощения γ -квантов с энергией 662 кэВ в кристаллах небольшого объема.

Благодаря хорошему энергетическому и временному разрешению, доступности и относительно дешевой γ -детекторы на основе NaI(Tl) активно применяются в ММН, в частности, в стационарных установках по досмотру крупногабаритных грузов [10, 11]. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов с энергией 4439 кэВ (по пику полного поглощения) от размеров кристалла приведена в работах [11, 12] (идентификация ВВ

¹Full Width at Half Maximum — полная ширина на половине максимума.

и НВ основана на анализе характеристического γ -излучения ядер углерода, азота и кислорода с энергиями 4439, 5100 и 6130 кэВ). Эффективность регистрации γ -квантов детектором с кристаллом NaI(Tl) размером $\varnothing 5'' \times 5''$ в 6,5 раз больше соответствующей величины для кристалла $\varnothing 3'' \times 3''$. К недостаткам кристалла NaI(Tl) следует отнести гигроскопичность и хрупкость, что ограничивает его применение в переносных досмотровых комплексах. По сравнению с другими сцинтилляторами одинакового объема, приведенными в табл. 1, кристалл NaI(Tl) обладает наименьшей эффективностью регистрации γ -квантов при более высокой чувствительности к нейтронному фону.

1.2. Бромид лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Характеристики γ -детекторов на основе кристалла бромида лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ для регистрации γ -излучения в установках с использованием ММН изучались в работах [13] и [14]. Данный кристалл обладает большим световыходом и лучшим энергетическим разрешением ($\sim 2,9\%$ на линии 662 кэВ [13]) по сравнению с кристаллом NaI(Tl). Малое время высвечивания кристалла (~ 20 нс) позволяет применять γ -детекторы на его основе в условиях высокой скорости счета зарегистрированных событий без существенного ухудшения энергетического разрешения. Временное разрешение системы (α - γ)-совпадений (в качестве α -детектора используется кремниевый детектор, а γ -детектор — на основе $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$) составляет $\sim 1,1$ нс.

Из-за высокой стоимости кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ γ -детекторы на их основе применяются, как правило, только в установках с одним каналом регистрации характеристического γ -излучения [14].

1.3. Германат висмута BGO. Благодаря высокой плотности и большому эффективному атомному номеру детекторы на основе кристалла германата висмута BGO обладают наибольшей эффективностью регистрации γ -квантов в сравнении с кристаллами,

Таблица 2. Эффективность регистрации (по пику полного поглощения) γ -квантов с энергиями 0,368, 1,33 и 6 МэВ в кристаллах NaI(Tl), $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и BGO по отношению к эффективности регистрации γ -квантов с $E_\gamma = 1,33$ МэВ в кристалле NaI(Tl) [13]

Кристалл	Энергия		
	368 кэВ	1,33 МэВ	6 МэВ
NaI(Tl) ($\varnothing 3'' \times 3''$)	2,822	1,000	0,259
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ($\varnothing 3'' \times 3''$)	2,941	1,362	0,457
BGO ($\varnothing 3'' \times 3''$)	3,587	2,514	1,363

перечисленными в табл. 1. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов (по пику полного поглощения) от энергии γ -квантов представлена в табл. 2 для трех кристаллов одинакового размера.

Временное разрешение кристалла BGO составляет $\sim 2,1$ нс для γ -квантов с энергиями ~ 1 МэВ. Разрешение улучшается с увеличением энергии и достигает 890 пс в области ~ 20 МэВ [22].

2. КОНСТРУКЦИЯ γ -ДЕТЕКТОРА

Гамма-детектор в сборе показан на рис. 1. Кристалл BGO [15–17], выращенный в ИНХ СО РАН, имеет форму цилиндра с размерами $\varnothing 76 \times 65$ мм. Сцинтилляционные вспышки регистрируются фотоэлектронным множителем (ФЭУ) R6233-100 [18] производства фирмы «Hamamatsu Photonics» с коэффициентом усиления $\sim 2,3 \cdot 10^5$ при

Рис. 1. Внешний вид γ -детектора

напряжении питания ~ 1000 В. Световой контакт между входным окном ФЭУ и торцом кристалла ВГО обеспечен оптически прозрачным эпоксидным клеем. Температура кристалла контролируется аналоговым температурным датчиком TMP36 [19]. ФЭУ с установленным на него делителем окружен пермалловым экраном. Детектор смонтирован внутри дюралевого корпуса с размерами $\varnothing 110 \times 260$ мм. Масса детектора составляет 3,5 кг.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ γ -ДЕТЕКТОРА

Линейность отклика детектора и его энергетическое разрешение в области энергий от 0,5 до 2,6 МэВ определялись по линиям γ -квантов изотопов стандартного набора ОСГИ. Ширина пиков полного поглощения γ -квантов (табл. 3) и положение их максимумов в амплитудном спектре определялись из аппроксимации пиков функцией Гаусса с линейным описанием фона. Измеренная зависимость отклика детектора от энергии γ -кванта описывается прямой линией с точностью не хуже чем 0,4 %.

Таблица 3. Изотопы и энергии γ -квантов (кэВ)

Изотоп								
^{228}Th	^{228}Th	^{137}Cs	^{54}Mn	^{60}Co	^{60}Co	^{40}K	^{60}Co	^{228}Th
511	583	662	835	1173	1332	1461	1173 + 1332	2615

На рис. 2, а, б приведены амплитудные спектры событий, зарегистрированных γ -детектором при облучении его источником ^{60}Co . Для энергий γ -квантов больше 2,6 МэВ линейность отклика проверялась непосредственно по энергетическим спектрам γ -квантов, образующихся при облучении быстрыми нейтронами образцов из чистого углерода и имитатора взрывчатки — меламина ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_3$). В интервале энергий от 2,6 до 6,1 МэВ отклонение от линейности не превышает 0,35 %.

Типичное относительное энергетическое разрешение γ -детектора на линии изотопа ^{137}Cs составило 9,8 % (рис. 3), а для γ -квантов с энергиями 1173 и 1332 кэВ

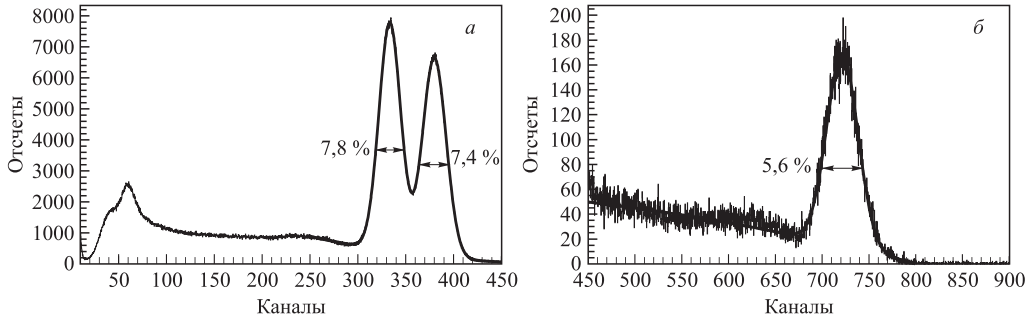


Рис. 2. Амплитудный спектр γ -квантов изотопа ^{60}Co . Пики полного поглощения γ -квантов с энергиями 1173 и 1332 кэВ (а) и пик, соответствующий одновременной регистрации этих γ -квантов с суммарным энерговыделением 2505 кэВ (б). Линией показан результат аппроксимации пиков функцией Гаусса с линейным описанием подложки

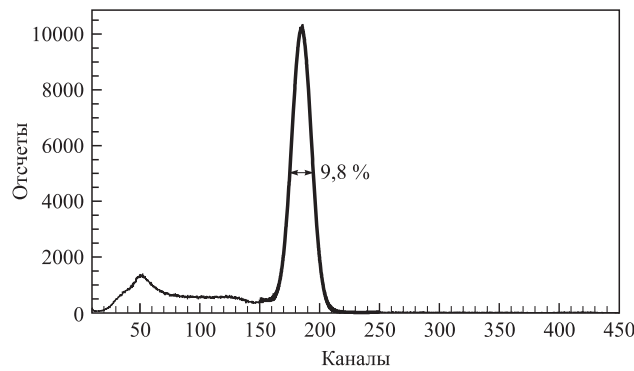


Рис. 3. Амплитудный спектр γ -квантов изотопа ^{137}Cs . Линией показан результат аппроксимации пика полного поглощения γ -квантов с энергией 662 кэВ функцией Гаусса с линейным описанием подложки

(пики ^{60}Co на рис. 2) — 7,8 и 7,4 % соответственно. Зависимость относительного энергетического разрешения от энергии γ -квантов E_γ показана на рис. 4. Она с хорошей точностью описывается выражением вида

$$\frac{\text{FWHM}}{E_\gamma} = \frac{A}{\sqrt{E_\gamma}} + B. \quad (1)$$

Амплитудное распределение событий, зарегистрированных γ -детектором при облучении образца углерода ^{12}C потоком быстрых нейтронов, приведено на рис. 5, а. Положение и ширина пиков с энергиями 4438 и 3927 кэВ (пик одиночного вылета γ -кванта с энергией 511 кэВ) определялись из их аппроксимации функциями Гаусса. Энергетическое разрешение γ -детектора на линии 4438 кэВ составляет 4,6 %.

Спектр временных интервалов между моментами регистрации сигналов γ -кванта характеристического излучения ядер углерода, измеренного в совпадениях с сигналом от

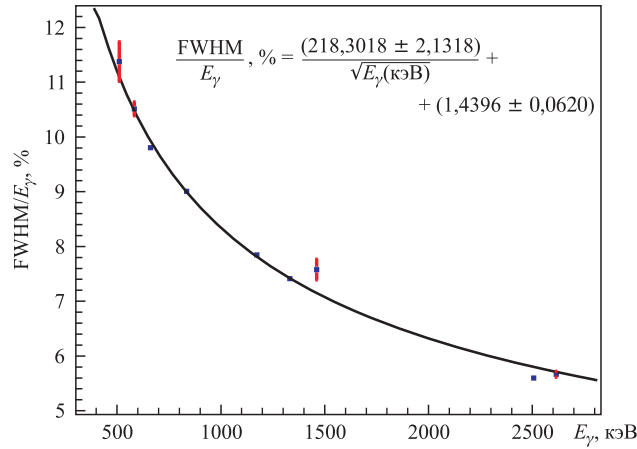


Рис. 4. Измеренное относительное энергетическое разрешение γ -детектора в зависимости от энергии γ -квантов (точки) и аппроксимация зависимости функцией вида (1) (линия)

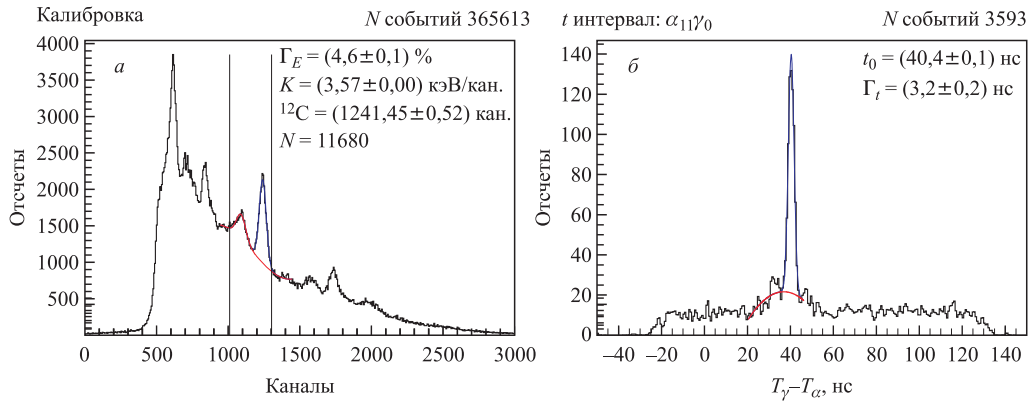


Рис. 5. *а*) Амплитудный спектр γ -квантов, зарегистрированных γ -детектором при облучении образца чистого углерода ^{12}C потоком нейтронов с энергией 14,1 МэВ. Вертикальными линиями отмечен интервал энергий от 3927 до 4438 кэВ. Положение и ширина пиков определялись из их аппроксимации функцией Гаусса с описанием фона полиномом второй степени. *б*) Спектр временных интервалов между моментами регистрации сигналов α - и γ -детекторов в указанном выше диапазоне энергий. Пик соответствует сигналам γ -квантов из образца углерода в совпадении с сигналами от α -детектора, а подложка — случайным совпадениям

α -детектора, показан на рис. 5, *б*. Типичное временное разрешение системы регистрации (α - γ)-совпадений составляет 3,2 нс.

4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ γ -ДЕТЕКТОРА

При эксплуатации γ -детекторов на основе кристаллов ВГО необходимо учитывать достаточно резкую зависимость световыхода и времени высвечивания кристалла от температуры. При изменении температуры кристалла от 0 до 40 °С время высвечивания

уменьшается от 400 до 200 нс, а световойход падает более чем в два раза [6]. Значение коэффициента изменения световыхода зависит от качества кристалла и лежит в интервале от 1 до 1,6 %/°С.

Стабилизация энергетической калибровки, зависящей от световыхода, может быть достигнута за счет термостатирования кристалла. Этот способ нашел свое применение в лабораторных измерениях и в экспериментах на ускорителях и реакторах с использованием крупногабаритных стационарных детектирующих систем. В частности, разработанная система охлаждения [20] электромагнитного калориметра эксперимента L3, проводившегося на ускорителе LEP (ЦЕРН, Женева), поддерживала температуру более чем 11000 кристаллов BGO в интервале от 17 до 18 °С в течение всего времени работы установки.

Применение устройств стабилизации температуры γ -детекторов в портативных и мобильных досмотровых системах по обнаружению ВВ и НВ практически невозможно из-за существенных ограничений данных систем как по размерам, так и по массе. Другим методом решения проблемы стабилизации энергетической калибровки канала регистрации γ -излучения является метод коррекции амплитудного отклика γ -детектора в зависимости от температуры кристалла BGO. Автоматическая система компенсации температурного изменения световыхода была реализована в установке PELAN [13]. Постоянство положения пика достигалось за счет изменения коэффициента усиления канала регистрирующей электроники в зависимости от температуры кристалла BGO с учетом измеренной температурной зависимости его световыхода [21]. Точность стабилизации отклика в этом методе составила 7% при изменении температуры в интервале от -5 до +45 °С.

В досмотровых системах, разработанных и созданных нами в Объединенном институте ядерных исследований, применен программный метод коррекции отклика γ -детектора. Этот метод прост в реализации и настройке, применим к большому количеству каналов регистрации и, за исключением системы измерения температуры кристаллов BGO, не требует дополнительной аппаратуры. Коррекция сигнала с γ -детектора основана на измерении зависимости амплитуды отклика от показания температурного датчика, установленного на кристалле BGO.

Данный метод применялся при оффлайн-обработке данных BGO-калориметров в экспериментах по физике частиц высоких энергий [23, 24]. Особенностью нашей реализации является то, что коррекция проводится в режиме реального времени.

Зависимость отклика γ -детектора от температуры изучалась в климатической камере в интервале температур от -20 до +55 °С. В качестве источников γ -квантов использовались стандартные источники ^{137}Cs и ^{60}Co . Длительность измерений составляла порядка 45 ч и включала в себя четыре последовательные фазы: охлаждение детектора до температуры -20 °С со скоростью 10 °С/ч, самопроизвольное нагревание до комнатной температуры, нагревание до +55 °С со скоростью 10 °С/ч и самопроизвольное остывание (рис. 6). Значение температуры кристалла и амплитудный спектр срабатываний γ -детектора фиксировались системой приема и анализа данных с периодом в 10 с. Как показано на рис. 6, при охлаждении кристалла BGO до -20 °С относительное смещение пика ^{60}Co от начального при комнатной температуре составляет +30%, нагревание кристалла до +50 °С, напротив, сдвигает пик в сторону малых амплитуд на 40%.

Коэффициент пересчета энергии γ -кванта в номер канала амплитудного спектра K_i восстанавливался по пикам ^{137}Cs и ^{60}Co для каждого интервала измерений i . Зависи-

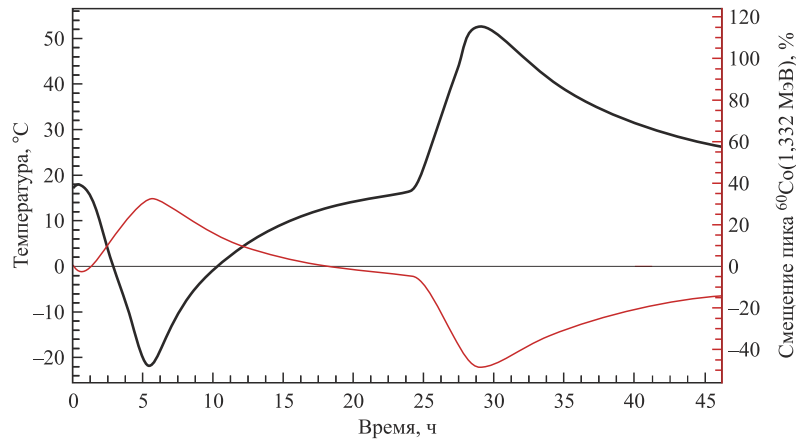


Рис. 6. Температура кристалла (жирная линия, шкала слева) и относительное смещение пика ^{60}Co (1,332 МэВ) (тонкая линия, шкала справа) в зависимости от времени с начала измерений

мость K_i от температуры T_i описывалась полиномом третьей степени вида

$$F(T) = N \left(1 + \sum_{n=1}^3 P_n T^n \right), \quad (2)$$

где P_n — коэффициенты полинома, а N — нормирующий множитель. Параметры полинома определялись из минимизации функционала:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(K_i - F(T_i))^2}{\delta K_i^2 + \delta F_i^2}, \quad (3)$$

где m — число измерений; δK_i — ошибка восстановления коэффициента, а δF_i — зависящая от температуры T_i и ошибки ее измерения δT_i вариация функции $F(T)$. Последовательность $F(T_i)$ описывает измерения K_i с точностью не хуже чем 4%, отклонение

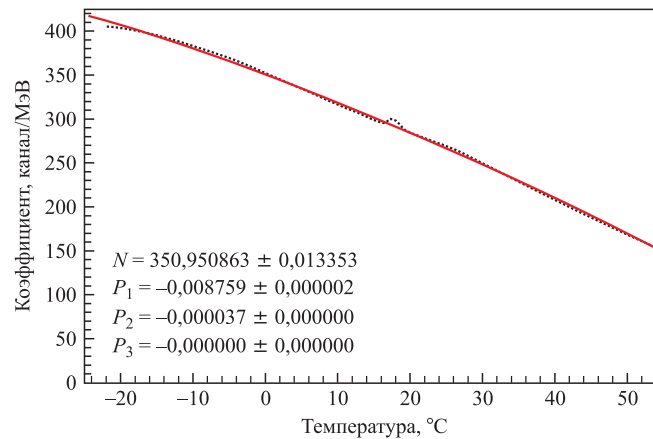


Рис. 7. Измеренная (точки) и параметризованная (линия) температурная зависимость коэффициента пересчета энергии в номер канала амплитудного спектра

максимально в моменты перехода от нагревания к охлаждению и наоборот, что объясняется неравномерностью температуры внутри массивного кристалла, в то время как температура T_i оценивается на границе кристалла.

Параметризованная температурная зависимость коэффициента пересчета энергии γ -кванта в номер канала спектра $F(T)$ показана на рис.7. Функция $F(T)$ описывает измеренную температурную зависимость $K(T)$, полученную из усреднения значений K_i по интервалу температур от $-0,25$ до $+0,25$ °C, с точностью не хуже чем 2%.

Масштабирование отклика γ -детектора на отношение $F(T_0)/F(T)$, где T — текущая измеренная температура кристалла, а T_0 — температура, задающая нормировку, ком-

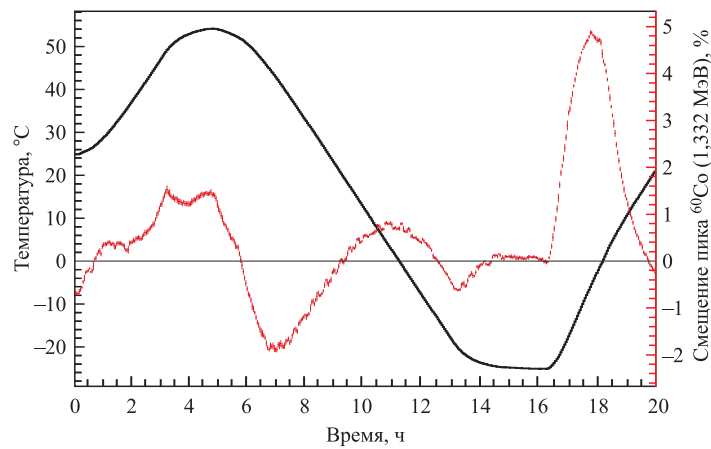


Рис. 8. Температура кристалла (жирная линия, шкала слева) и скорректированное отклонение положения пика ⁶⁰Co (1,332 МэВ) (тонкая линия, шкала справа) в зависимости от времени с начала измерения

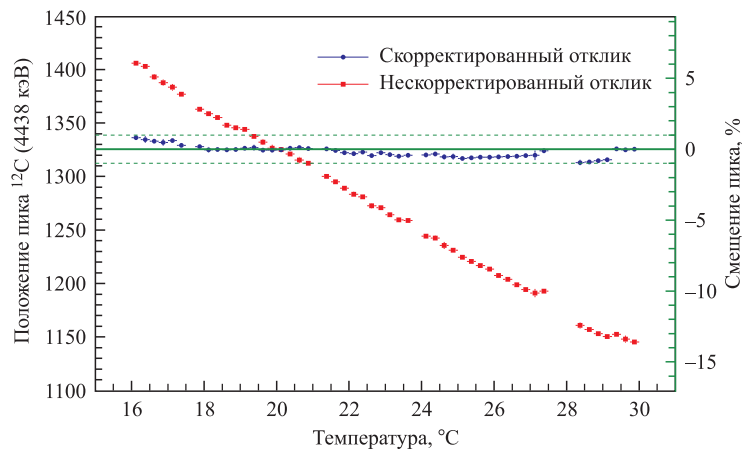


Рис. 9. Абсолютное (ось слева) и относительное (ось справа) положение пика ¹²C (4438 кэВ) в амплитудном спектре скорректированного и нескорректированного отклика γ -детектора в зависимости от температуры кристалла

пенсирует температурные изменения световыхода. Алгоритм коррекции был испытан в климатической камере с нормировкой на $T_0 = 20$ °С. Как показано на рис. 8, изменения отклика γ -детектора не превысили 2 % при охлаждении кристалла от +55 до –20 °С. Максимум отклонения составил 5 % в начале самопроизвольного нагрева кристалла до комнатной температуры после отключения охладителя камеры.

Результат работы программной стабилизации отклика γ -детектора в переносном досмотровом комплексе ДВИН-1 [3] показан на рис. 9. За 4 ч работы комплекса из-за тепловыделения работающих нейтронного генератора и регистрирующей электроники γ -детектор нагрелся от 16 до 30 °С. При изменении температуры кристалла на 14 °С относительное смещение пика углерода ^{12}C (4438 кэВ) в нескорректированном спектре составило 20 %, в то время как в скорректированных данных его отклонение от положения при температуре 20 °С не превышает ± 1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая эффективность регистрации γ -излучения, механическая прочность и радиационная стойкость кристаллов ВГО определили наш выбор в пользу данного сцинтиллятора при изготовлении γ -детекторов для установок по обнаружению и идентификации скрытых взрывчатых и наркотических веществ. Гамма-детектор на основе кристалла ВГО обладает хорошей линейностью отклика. Типичное энергетическое разрешение детектора на линии углерода 4438 кэВ составляет 4,6 % при временном разрешении системы регистрации (α - γ)-совпадений порядка 3,2 нс. Стабильность энергетической калибровки детектора в интервале температур от –20 до +50 °С обеспечивается разработанной нами программой температурной коррекции отклика γ -детектора. Данная коррекция применяется в настоящее время во всех созданных в ОИЯИ установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ и обеспечивает стабильность энергетической калибровки на уровне ± 1 %, достаточную для надежного обнаружения ВВ и НВ в рабочем температурном диапазоне.

Авторы признательны П. П. Реунову, Т. О. Руденко, А. И. Руденко и Г. А. Кононенко за помощь в изготовлении γ -детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bystritsky V. M. et al.* DViN — Stationary Setup for Identification of Explosives // Part. Nucl., Lett. 2008. V. 5, No. 5. P. 743–751.
2. *Быстрицкий В. М. и др.* Стационарный досмотровый комплекс ДВИН-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 6. С. 586.
3. *Сапожников М. Г.* Детектор взрывчатых веществ ДВИН-1 для нужд транспортной безопасности // Транспортная безопасность и технологии. 2012. № 2(29). С. 169.
4. *Bystritsky V. M. et al.* Portable Neutron Generator with 9-Section Silicon α -Detector. JINR Preprint E13-2006-36. Dubna, 2006.
5. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
6. *Globus M., Grinyov B., Jong Kyung Kim.* Inorganic Scintillators for Modern and Traditional Applications. Kharkov, 2005.

7. Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов. Сайт ВНИИА им. Н. Л. Духова: <http://www.vniia.ru/rgamo/literat/obzor/doc/obzorrus.pdf>.
8. *Normand S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572. P. 754–759.
9. *Beringer J. et al.* Particle Data Group // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 010001.
10. *Perot B. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 261. P. 295.
11. *Perret G. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2006. V. 41. P. 375.
12. *Gierlik M. et al.* // IEEE Trans. on Nucl. Science. 2006. V. 53, No. 3. P. 1737.
13. *Sullivan R.* An Advanced ESTCP PELAN System for Surface and Near-Surface UXO Discrimination. Final Report. 2007.
14. *Eleon C. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 629. P. 220–229.
15. *Borovlev Yu. A. et al.* // J. of Crystal Growth. 2001. V. 229, Iss. 1–4. P. 305–311.
16. *Vasiliev Ya. V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 533.
17. Сцинтилляционные кристаллы отогерманата висмута. Информация на сайте ИНХ им. А. В. Николаева СО РАН: <http://www.niic.nsc.ru/products/materials/bgo/>.
18. Photomultiplier tube R6233-100. Сайт Hamamatsu Photonics: <http://www.hamamatsu.com/us/en/R6233-100.html>.
19. TMP36. Техническое описание на англ. яз. Rev F, 11/2010. Информация на сайте Analog Devices: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/TMP35_36_37.pdf.
20. *Bosteels M., Weill R.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2003. V. 498. P. 165–189.
21. *Womble Phillip C. et al.* PELAN 2001: Current Status of the PELAN Explosives Detection System // Proc. of SPIE, «Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics III», Dec. 18, 2001. V. 4507. P. 226–231.
22. *Wender S. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1982. V. 197. P. 591–592.
23. *Karyotakis Y.* The L3 Electromagnetic Calorimeter // Proc. of «Calorimetry», Beijing, 1994. P. 27–35; Annecy Lab. Part. Phys. LAPP-EXP-95-002 9 p.; LAPP-EXP-95-002, C94-10-25.1.
24. *Isbert J. et al.* // Advances in Space Research. 2008. V. 42. P. 437–441.

Получено 14 марта 2013 г.