

## НИЗКОФОНОВЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧНО-ГАЛЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ NaI(Tl)

<sup>1,2</sup>Пшуков А.М.\*

<sup>1</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

<sup>2</sup>Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН

\*pshukov1959@mail.ru

*В статье описаны разработка и создание сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе монокристалла NaI(Tl), диаметром и высотой 200×200 мм, с предельно низким собственным радиоактивным фоном, включая изготовление партии таких спектрометров. В работе исследованы их спектрометрические и фоновые характеристики, в том числе и в низкофоновых условиях подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории, расположенной в КБР.*

*Все составляющие части гамма-спектрометров отбирались с точки зрения содержания радиоактивных примесей, для чего использовался низкофоновый полупроводниковый детектор.*

**Ключевые слова:** гамма-спектрометр, собственный радиоактивный фон, сцинтиллятор, энергетическое разрешение, монокристалл NaI(Tl), детектор нейтрино.

## LOW-BACKGROUND SCINTILLATION GAMMA-RAY SPECTROMETER BASED ON ALKALINE HALIDE CRYSTALS NaI(Tl)

Pshukov A.M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kabardino-Balkarian State University

<sup>2</sup>Baksan Neutrino Observatory of the INR RAS

*The article describes the development and creation of a scintillation gamma-ray spectrometer based on a single crystal NaI(Tl), with a diameter and height of 200×200 mm, with an extremely low intrinsic radioactive background, including the manufacture of a batch of such spectrometers. In this work, their spectrometric and background characteristics are studied, including in low-background conditions of the underground laboratory of the Baksan Neutrino Observatory located in the CBD.*

*All components of gamma-ray spectrometers were selected from the point of view of the content of radioactive impurities, for which a low-background semiconductor detector was used.*

**Key words:** gamma-ray spectrometer, own radioactive background, scintillator, energy resolution, single crystal NaI(Tl), neutrino detector.

Одной из приоритетных задач современных направлений развития нейтринной физики, в частности, и в экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада, является создание новых жидких сцинтилляторов большой массы, загруженных металлами (In, Nd, Gd, Yb и др.) [1–6]. Наряду с этими детекторами представляют большой интерес и новые гибридные сцинтилляторы [7, 8], которые сочетают в себе преимущества как неорганических кристаллов, так и органических жидкостей, и могут одновременно обеспечивать большой световыход, высокую элементную нагрузку, хорошие возможности идентификации частиц, а также ультранизкое содержание радиоактивных примесей. Последнее требование является наиважнейшим при регистрации ультранизких количеств событий с участием нейтрино [9–12].

Среди твердотельных сцинтилляторов наиболее низким собственным фоном, с высокой эффективностью регистрации и лучшим энергетическим разрешением обладают детекторы на основе монокристаллов NaI(Tl).

В отличие от монокристаллов йодида цезия и германата висмута монокристаллы NaI(Tl) не имеют в своем составе таких радионуклидов как <sup>134</sup>Cs, <sup>135</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs или <sup>207</sup>Pb, поскольку в монокристаллах NaI (Tl) проводится целенаправленная очистка от естественных радионуклидов уранорадиевого и ториевого рядов, а также калия и рубидия.

## 1. Детекторы NaI(Tl). Конструкция. Изготовление

Детекторы NaI(Tl) были изготовлены из отобранных материалов с низким содержанием естественных радионуклидов. Корпус детектора и светозащитный кожух ФЭУ-171-1 выполнены из титанового сплава, выходное окно детектора из кварцевого стекла диаметром 160 и толщиной 15 мм, оптический отражатель монокристалла из фторопласта комкующегося, амортизатор колба ФЭУ из пенопласта, панель делителя ФЭУ из органического стекла, корпус предусилителя из электролитической меди. Планшайба фотокатода ФЭУ-171-1 выполнена из без калийного стекла с низким содержанием урана и тория.

Перед сборкой все компоненты детектора отбирались с точки зрения содержания радиоактивных примесей, для чего использовался низкофоновый германиевый полупроводниковый детектор (ППД) объемом 200 см<sup>3</sup>, который был установлен в подземной низкофоновой лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН.

Лаборатория, созданная под горой «Андырчи» (главный кавказский хребет, Баксанское ущелье) защищена горной породой, толщиной 1900 метров, что соответствует 4500 метров водного эквивалента, где величина глобальной интенсивности мюонов составляет:  $(3,03 \pm 0,10) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что практически в миллион раз меньше чем на поверхности земли и практически не влияет на результаты наших низкофоновых измерений. Данный германиевый полупроводниковый детектор позволяет зарегистрировать концентрацию урана и тория на уровне  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  грамм урана на грамм вещества.

Для наглядности на *рис. 1* приводится энергетический спектр фона образцов кристаллов NaI(Tl), измеренного на ППД. Образцы кристаллов NaI(Tl) малых размеров находились внутри пассивной защиты и окружали ППД.

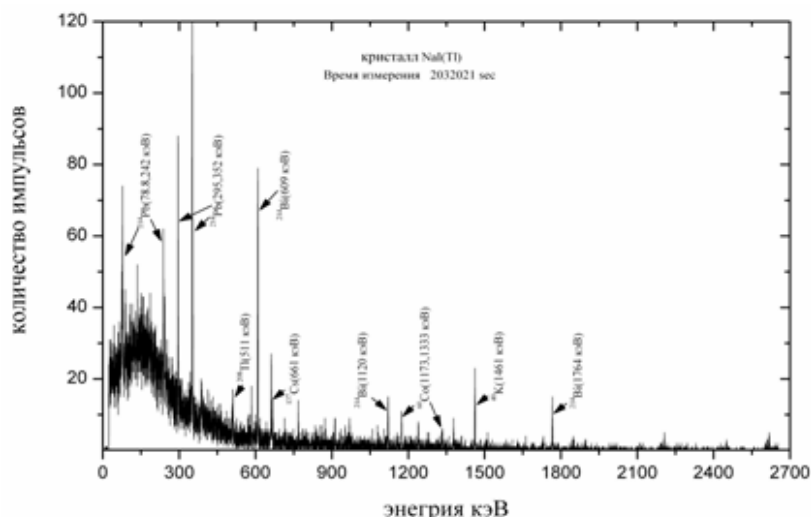


Рис. 1. Спектр фона кристалла NaI(Tl) измерения на ППД

Видимые на спектре небольшие пики от гамма-квантов в основном связаны с распадами ядер <sup>214</sup>Pb и <sup>214</sup>Bi, являющимися дочерними продуктами распада радона <sup>222</sup>Rn с периодом полураспада 3,8 дня, который содержится в том числе и в воздухе, окружающем детектор.

Ниже в табл. 1 приведены результаты измерения скорости счета ППД для отдельных энергетических пиков, соответствующих гамма-линиям распадов ядер ураноториевого ряда, в том числе <sup>40</sup>K и <sup>137</sup>Cs для образцов NaI(Tl).

Таблица 1

Результаты измерения фона кристалла NaI(Tl) на ППД за время 23,5 суток

| Нуклид            | Энергия (пик)<br>кэВ | Количество фоновых<br>событий ППД имп./сут. | Количество событий ППД<br>под пиком с NaI(Tl) имп./сут. | Ошибка 1 σ<br>имп./сут. |
|-------------------|----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|
| <sup>226</sup> Ra | 185,0                | 3,1                                         | 4,1                                                     | 2,1                     |
| <sup>214</sup> Pb | 295,3                | 24,6                                        | 17,4                                                    | 0,4                     |
| <sup>214</sup> Pb | 352                  | 37,9                                        | 26,5                                                    | 0,3                     |
| <sup>208</sup> Tl | 511                  | 11,4                                        | 4,8                                                     | 1,0                     |
| <sup>214</sup> Bi | 609                  | 30,5                                        | 20,6                                                    | 0,3                     |

|                           |      |      |     |     |
|---------------------------|------|------|-----|-----|
| $^{137}\text{Cs}$         | 661  | 3    | 5,2 | 0,8 |
| $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 766  | 2    | 3   | 1,6 |
| $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 1001 | 0,5  | 0,7 | 1,7 |
| $^{60}\text{Co}$          | 1332 | 2,8  | 2   | 1,1 |
| $^{214}\text{Bi}$         | 1764 | 11,5 | 4   | 0,5 |
| $^{40}\text{K}$           | 1461 | 21,3 | 6,8 | 0,4 |
| $^{207}\text{Bi}$         | 1770 | 0    | 0   | 3,4 |
| $^{214}\text{Bi}$         | 2206 | 3    | 1,3 | 0,9 |
| $^{208}\text{Tl}$         | 2614 | 7    | 0,3 | 9,2 |

Из таблицы видно, что практически скорость счета во всех энергетических пиках, соответствующих гамма-линиям распадов ураноториевого ряда и  $^{40}\text{K}$  сравнимы или меньше, чем при счете фона ППД.

Это говорит о том, что материал NaI(Tl) радиоактивно чище, чем бескислородная медь пассивной защиты.

Приведенные результаты измерения показывают, что на пределе чувствительности германиевого ППД содержание урана и тория в образцах NaI(Tl) не более  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  г/г.

## 2. Измерения рабочих характеристик детектора NaI(Tl) на поверхности в пассивной защите

Детекторы, собранные из очищенных и отобранных низкорadioактивных материалов, были подвержены спектрометрическим и фоновым испытаниям.

Измерительный тракт сцинтилляционного канала гамма-спектрометра состоял из детектора NaI(Tl), ФЭУ-171-1 с делителем напряжения и предусилителем, блоков низковольтного и высоковольтного питания фирмы ORTEC (США), 1024-канального амплитудного анализатора импульсов фирмы NORLAND (США).

С целью калибровки измерительного тракта сцинтилляционного гамма-спектрометра были изготовлены источники гамма-излучения на основе соединений, содержащих естественные радионуклиды калий-40, лантан-38 и торий-238. Активность радионуклидов в источниках не превышала  $10^3$ - $10^4$  Бк.

Для энергетической калибровки при измерении малых активностей использовались следующие гамма-линии: 788 и 1436 кэВ (лантан-138), 1461 кэВ (калий-40) и 583 и 2614 кэВ (торий-232).

Монокристалл NaI(Tl), диаметром и высотой 200×200 мм, имеет колодец по оси симметрии со стороны, противоположной выходному окну детектора диаметром 15 мм и глубиной 100 мм. Такая конструкция позволяет устанавливать внутри кристалла миниатюрный пропорциональный счетчик и проводить с высокой эффективностью 90–95 % измерения ультранизких активностей (например, распады  $^{71}\text{Ge}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  и других). Схема детектора NaI(Tl) показана на рис. 2.

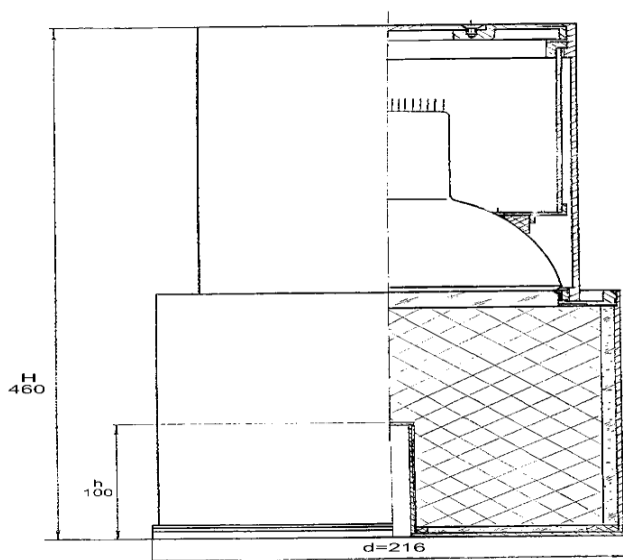


Рис. 2. Схема детектора NaI(Tl)

Толщина стенок корпуса детектора составляет 1 мм, стенок колодца 0,3 мм. Детектор NaI(Tl) может регистрировать гамма-кванты от 20 до 3000 кэВ.

Компоновка блока детектирования проводилась с использованием значения энергетического разрешения  $R_g$  детектора определяемое по стандартной методике, и для ФЭУ учитывалась величина световой чувствительности фотона  $\gamma_0$ .

В конечном итоге  $R_n$  заметно зависит от однородности спектрометрических параметров ФЭУ и среди инертных пар детектор ФЭУ с высокой и с низкой величиной  $\gamma_0$ , предпочтение отдавалось тем ФЭУ, у которых величины  $\gamma_0$  лежали в пределах 150–250 мкА/лм. При этом величины значения энергетического разрешения ФЭУ лежали в пределах от 7,8 до 8,8 %.

Отбор ФЭУ осуществлялся с использованием монокристалла NaI(Tl) с известными характеристиками. Энергетическое разрешение 8,4 % с детектором на основе монокристалла NaI(Tl) диаметром 150 мм и высотой 100 мм, СПО, с собственным разрешением 7,2 % и световым выходом 3,4 УЕСВ. Энергетический эквивалент собственных шумов 1,8 кэВ. Собственный радиоактивный фон фотоумножителя имп./с (в диапазоне от 100 кэВ до 3 МэВ). Габаритные размеры: диаметр 170 мм, рабочий диаметр фотокатода 150 мм, посадочная длина 160 мм, масса 750 г.

После подбора пар ФЭУ- детектора проводили измерения. Калибровка детектора источником  $^{137}\text{Cs}$  проводилась в разной геометрии ФЭУ-детектора. Поворот ФЭУ проводился на  $360^\circ$  с замерами энергетического разрешения через каждые  $90^\circ$ . В табл. 2 приведены величины  $R_n$  для некоторых пар ФЭУ-детектора.

Таблица 2

Величины  $R_n$  для некоторых пар ФЭУ-детектора

| Паспортные значения параметров |                     |              | $R_n$ , % в зависимости от угла поворота фотокатода ФЭУ на выходном окне детектора |            |             |             |
|--------------------------------|---------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
| Детектор<br>$R_g$ , %          | ФЭУ                 |              | $0^\circ$                                                                          | $90^\circ$ | $180^\circ$ | $270^\circ$ |
|                                | $\gamma_0$ , мкА/лм | $R_\phi$ , % |                                                                                    |            |             |             |
| 10,7                           | 150                 | 8,0          | 12,4                                                                               | 12,5       | 12,2        | 12,0        |
| 10,6                           | 250                 | 8,4          | 11,8                                                                               | 11,3       | 10,5        | 11,5        |
| 10,6                           | 200                 | 8,4          | 10,9                                                                               | 10,8       | 10,6        | 10,2        |
| 10,7                           | 180                 | 8,6          | 9,2                                                                                | 9,7        | 9,6         | 9,8         |
| 10,7                           | 190                 | 8,6          | 11,2                                                                               | 11,4       | 11,4        | 11,1        |
| 10,2                           | 250                 | 8,4          | 10,2                                                                               | 9,6        | 10,3        | 10,7        |

В связи с тем, что большая часть гамма-квантов поглощается в той половине, которая ближе к источнику, такой способ калибровки характеризует неоднородность светосбора детектора. Результаты с малым исключением хорошо согласуются (в рамках статистики), что говорит о хорошей однородности светосбора.

Калибровка детектора производилась различными источниками: точечные источники  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и распределенным источником гамма-квантов 1460 кэВ  $^{40}\text{K}$ . Активность радионуклидов в источниках не превышала  $10^5$  Бк.

Измерение энергетического разрешения  $R_k$  детектора NaI(Tl) при помощи распределенного источника гамма-излучения калия-40, помещенного в колодец, показывает, что его величина удовлетворительно совпадает с расчетной. В расчете использовалась величина  $R_n$ , измеренная на гамма-линии 662 кэВ и зависимость  $R_n$  от энергии по закону  $1/\text{SQRT}(E)$ . В табл. 3 приведены расчетные и экспериментальные значения  $R_p$  и  $R_s$  для некоторых пар ФЭУ-детектора.

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения  $R_p$  и  $R_z$  для некоторых пар ФЭУ-детектора

| Энергетическое разрешение по гамма-линии 662 кэВ, % | Энергетическое разрешение по гамма-линии калия-40 с энергией $E = 1460$ кэВ |           | Отношение пик долина по $^{60}\text{Co}$ |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|
| $R_n$                                               | $R_p$ , %                                                                   | $R_z$ , % | П/Д                                      |
| 10,5                                                | 7,0                                                                         | 6,5       | 2,3                                      |
| 10,2                                                | 6,8                                                                         | 5,7       | 2,5                                      |
| 11,4                                                | 7,6                                                                         | 7,2       | 1,9                                      |
| 10,2                                                | 6,8                                                                         | 6,1       | 2,5                                      |
| 12,2                                                | 8,1                                                                         | 7,6       | 1,6                                      |
| 10,9                                                | 7,3                                                                         | 6,8       | 2,4                                      |
| 10,4                                                | 6,9                                                                         | 7,3       | 2,3                                      |
| 10,6                                                | 6,7                                                                         | 7,4       | 2,3                                      |
| 10,3                                                | 6,8                                                                         | 7,9       | 2,4                                      |
| 10,7                                                | 7,9                                                                         | 8,2       | 2,2                                      |

С помощью источника  $^{60}\text{Co}$  измерено отношение между пиком и долиной  $R_{C_0}$  для нуклида кобальта-60 по формуле

$$R_{C_0} = N_{1.33}/N_{\min},$$

где  $N_{1.33}$  – число импульсов, соответствующее энергии 1330 кэВ,  $N_{\min}$  – минимальное число импульсов, зарегистрированное между фотопиками, соответствующим энергиям 1330 и 1170 кэВ.

Такие измерения обычно проводились при помещении радионуклида кобальта-60 активностью  $10^3$  Бк у входа в колодец детектора. Измерения проводились на поверхности в пассивной защите из свинца толщиной 20 см в режиме вычитания фона амплитудного анализатора (см. табл. 3).

На рис. 3 приведено значение  $R_{C_0}$  от энергетического разрешения  $R_n$ , измеренного по гамма-линии 662 кэВ цезия-137. С улучшением энергетического разрешения для гамма-квантов с энергией 662 кэВ увеличивается значение  $R_{C_0}$ .

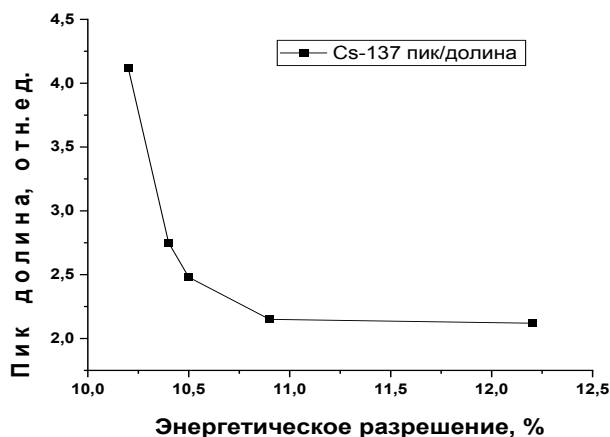


Рис. 3. Зависимость значения соотношения пик долина от энергетического разрешения

Величина  $R_{C_0}$  служит для оценки разрешающей способности детектора с колодцем.

Вывод: спектрометрические характеристики разработанных гамма-детекторов являются удовлетворительными.

### 3. Низкофоновые характеристики сцинтилляционного спектрометра на основе детектора NaI(Tl)

Измерения фоновых характеристик детектора NaI(Tl) проводились в специальных условиях подземной низкофоновой лабораторий БНО ИЯИ РАН.

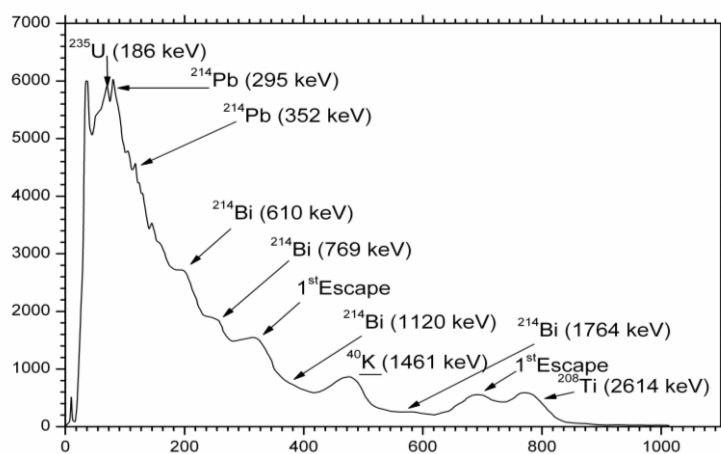


Рис. 4. Спектр фона гамма-спектрометра, полученный в течение двух месяцев измерения.

#### 3.1. Мюоны

В целях подавления фона, связанного с мюонами спектрометр помещается глубоко под землей. Чем больше высота защитного слоя (горной породы) тем меньше поток мюонов. Глобальная интенсивность мюонов на уровне моря составляет  $1,68 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Измерения фона проводились на глубине 4580 г.г.·см<sup>-2</sup>. Глобальный поток мюонов на этой глубине экранирования составляет примерно  $2,7 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

#### 3.2. Нейтроны

Поток нейтронов в месте измерения фона составляет около  $4 \cdot 10^{-6} \text{ (см}^2 \cdot \text{с)}$ .

#### 3.3. Радиоактивные изотопы воздуха

Воздух содержит радиоактивные изотопы, которые могут увеличить скорость счета общего фона, в случае если не принимать специальных мер по защите. Наиболее часто встречающимся в воздухе радиоактивным изотопом является <sup>222</sup>Rn, продукт распада <sup>238</sup>U, время полураспада составляет 3,8 суток. Внутренняя часть пассивной защиты, в котором находился детектор во время измерения фона, сконструирована таким образом, чтобы минимизировать количество окружающего воздуха. Активность <sup>222</sup>Rn в воздухе помещения составляет примерно в среднем 1,8 пК/л воздуха и зависит от скорости вентиляции воздуха.

На рис. 5 представлены энергетические спектры фонов одного из детекторов. Верхняя кривая – это спектр фона детектора в течение первого часа измерения в пассивной защите, нижняя на 11<sup>й</sup>-й час после закрытия защиты с продувкой азотом. По всей видимости продувка азотом внутренних полостей пассивной защиты полностью убирает радон, содержащийся в воздухе.

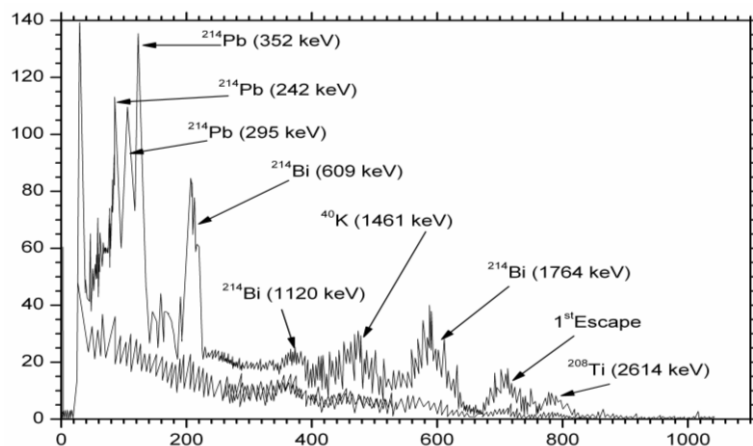


Рис. 5. Фон детектора

### **3.4. Внешнее гамма-излучение**

Детекторы размещались в пассивной защите, состоящих из материалов с низким содержанием радиоактивных элементов естественного происхождения ураноториевых рядов. Наружная часть была собрана из свинцовых кирпичей с общей толщиной 20 см с содержанием  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  на уровне  $10^{-9}$  гр/гр. вещества. Внутренняя часть состояла из электролитической меди толщиной 15 см с содержанием  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  на уровне  $10^{-11}$  гр/гр.

Эффективность такой пассивной защиты проверялась на специально изготовленном низкофоновом германиевом полупроводниковом детекторе. Результаты тестирования показали, что фон в такой защите (в области энергии от 17 до 2625 кэВ) подавляется в 800 раз. Только высокоэнергичные гамма-кванты имеют достаточно высокую проникающую способность для прохождения через защиту чтобы внести заметный вклад в скорость счета фона.

Для оценки вклада внешнего гамма-излучения можно использовать два основных типа гамма-квантов:

- а) гамма-кванты с энергией 1,46 МэВ от распада  $^{40}\text{K}$ ;
- б) гамма-кванты с энергией 2,61 МэВ из ряда  $^{232}\text{Th}$  (дочерний нуклид  $^{212}\text{Po}$ ).

При ожидаемом потоке гамма-квантов 5-7 квантов на  $\text{см}^2\cdot\text{с}$  энергией 1,46 МэВ и 3-5 квантов на  $\text{см}^2\cdot\text{с}$  с энергией 2,61 МэВ, от горной породы, в свинцовой защите толщиной 20 см поток гамма-квантов с энергией 1,46 МэВ. падает приблизительно в  $1\cdot 10^5$  раза, а с энергией 2,61 МэВ падает приблизительно в  $1\cdot 10^4$  раза.

### **3.5. Гамма-кванты от свинцовой защиты**

В применявшемся свинце верхний предел содержания примесей составили: уран  $^{238}\text{U} < 3\cdot 10^{-9}$  г/г.,  $^{232}\text{Th} < 1,2\cdot 10^{-8}$  г/г.  $^{40}\text{K} < 2\cdot 10^{-9}$  г/г.

### **3.6. Гамма-кванты от медной защиты**

В применявшейся меди марки МОП (бескислородная медь) содержание радиоактивных примесей в 14-16 раза ниже, чем в свинце.

## **Заключение**

Используя подземную экспериментальную установку в БНО ИЯИ РАН, удалось получить детекторы гамма излучения NaI(Tl) с хорошими спектрометрическими и фоновыми характеристиками. В особенности эффективно регистрируются гамма-кванты в диапазоне энергий от 10 до 3000 кэВ в условиях малой активности источника. Эффективность регистраций гамма-квантов с энергией 511 КэВ (например, от распадов позитронов) близка к 80-90 %. Хорошая геометрия измерения достигается за счет размещения образца (источника) внутрь колодца детектора.

Измерения собственного фона этих детекторов показало, что содержание в них радиоактивных примесей урана и тория сравнимы с их содержанием в меди пассивной защиты. Все усилия по подбору материалов с низким содержанием радиоактивных примесей привели к тому, что удалось получить кристалл с низким собственным фоном, порядка 0,2 события в секунду в диапазоне от 30-3000 кэВ, что вполне соответствует лучшим в мире детекторам.

Низкофоновые сцинтилляционные детекторы на основе щелочно-галлоидных кристаллов NaI(Tl) представляют большой интерес в качестве активной защиты миниатюрных пропорциональных счетчиков от фона окружающей среды, часто применяемых в экспериментах по регистрации ультрамалых активностей, например, распадов  $^{71}\text{Ge}$ ,  $^{37}\text{Ar}$  и других. Возможными областями применения разработанных детекторов являются спектрометрия ультранизкого радиоактивного излучения и поиск редких событий, например, безнейтринный двойной бета-распад, WIMP-ы и т. д.

## **Библиография**

1. Wurm M., Beacom J.F., Bezrukov L.B., Dasgupta B., Horiuchi S., Ciemniak C., VonFeilitzsch F., Göger-Neff M., Hellgartner D., Lewke T., Meindl Q., Möllenberg R., Oberauer L., Potzel W., Thorne F., Tippmann M., Winter J., Bick D., Hagner C., Lorenz S. Large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory for studies of natural neutrino fluxes for purposes of geo- and astrophysics // *Astropart. Phys.* 2012. V. 35. P. 685-697.

2. Барабанов И.Р., Новикова Г.Я., Синев В.В., Янович Е.А. Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО. // Препринт ИЯИ РАН. М., 2009. 14 с.

3. Пшуков А.М., Умеров Ш.И. Жидкий сцинтиллятор на основе синтина // Препринт ИЯИ РАН. М., 2019. 24 с.
4. Beamson G., Briggs D. High Resolution XPS of Organic Polymers // The Scienta. Wiley Interscience. 1992. N. 4. P. 318.
5. Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Вересникова А.В. Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО // Препринт ИЯИ РАН. М., 2016. 27 с.
6. Вересникова А.В., Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Гуренцов В.И., Синев В. В. Детектор большого объема // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2018. № 4. С. 49.
7. Winslow L. Simpson R. Characterizing Quantum-Dot-Doped Liquid Scintillator for Applications to Neutrino Detectors. // Preprint. 2012. N. 7. P. 13.
8. Sun J., Yang J., Lee J.I., Cho J.H., Kang M.S. Lead-free perovskite nanocrystals for light-emitting devices // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2018. N. 9. P 1573–1583.
9. Gavrin V.N., Pshukov A.M., Zatsepin G.T. Neutrino astrophysical potentialities of a large-mass modular detector based on large Activatid inorganic single crystals // Solar Physics. 1990. V. 128. P. 67–77.
10. Гаврин В.Н., Зацепин Г.Т., Пшуков А.М. О возможности сборного детектора большой массы на основе крупногабаритных активированных неорганических монокристаллов в нейтринной астрофизике // Препринт ИЯИ АН СССР. М., 1989. 15 с.
11. Пшуков А.М. Сцинтилляционные свойства активированных монокристаллов LiF // Препринт ИЯИ-РАН. М., 2004. 11 с.
12. Пшуков А.М. Сцинтилляторы на основе LiF, активированного окислами поливалентных металлов // Препринт ИЯИ РАН. М., 2011. 8 с.