

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 538.958

**Характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора
на основе большого кристалла NaI(Tl) для измерения активности радона в воздухе**

**Мартин Батарбиевич Масаев¹, Тимур Мухамедович Байсиев², Аслан-Гирей Мартинович Масаев³,
Альберт Мусаевич Гангапшев⁴, Алексей Петрович Савинцев⁵**

^{1,2,3,4,5} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия;

⁴ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹ masmartin@mail.ru

² konnerdon@gmail.com

³ aslangeri.masaev.00@mail.ru

⁴ gangapsh@list.ru

⁵ savinal@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) с колодцем для количественного метода определения концентрации радона в воздухе по гамма-спектрам дочерних продуктов свинца и висмута. Предлагается методика улучшения энергетического разрешения детектора за счет применения одного ФЭУ-173 с установкой светоотражающего кольца на окно кристалла NaI(Tl) вместо трех ФЭУ-110, что позволяет увеличить эффективность светосбора, повышая в конечном итоге точность количественного метода.

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада, сцинтилляционный детектор, светоотражающее кольцо, ФЭУ-173, светосбор, энергетическое разрешение, гамма-спектр

Для цитирования: Масаев М. Б., Байсиев Т. М., Масаев А. М., Гангапшев А. М., Савинцев А. П. Характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) для измерения активности радона в воздухе // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 25–29.

PHYSICS

Original article

Scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal for measurement characteristics of a modified ring the activity of radon in air

Martin B. Masaev¹, Timur M. Baysiev², Aslan-Girey M. Masaev³, Albert M. Gangapshiev⁴, Alexei P. Savintsev⁵

^{1,2,3,4,5} Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia;

⁴ Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ masmartin@mail.ru

⁴ gangapsh@list.ru

⁵ savinal@mail.ru

² konnerdon@gmail.com

³ aslangeri.masaev.00@mail.ru

Abstract. The characteristics of a modified scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal with a well for a quantitative method of determining the concentration of radon in the air by measuring the gamma spectra of daughter products lead and bismuth are considered in the paper. A technique is proposed to improve the energy resolution of the detector by using one FEU-173 with the installed reflective ring on the window of the NaI(Tl) crystal instead of using of the three FEU-110. Such modification makes it possible to increase the efficiency of light collection, ultimately increasing the accuracy of the quantitative method.

Keywords: radon, daughter decay products, scintillation detector, reflective ring, FEU-173, light collection, energy resolution, gamma spectrum

For citation: Masaev M. B., Baysiev T. M., Masaev A. M., Gangapshev A. M., Savintsev A. P. Characteristics of a modified scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal for measuring the activity of radon in air // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):26–29.

Введение

Природный радон (^{222}Rn) представляет собой бесцветный, не имеющий запаха инертный газ. Он образуется в процессе радиоактивного распада природных радиоактивных элементов, которые содержатся в небольших количествах в горных породах, и постоянно поступает из земной коры в водную и воздушную среду [1–6].

Контроль за поступлением и концентрацией радона-222 и его дочерних продуктов распада (ДПР) в атмосферном воздухе имеет большое значение для решения важных задач метеорологии, сельского хозяйства, экологии и т. д. Так, в метеорологии радон-222 используется как маркер динамики воздушных масс и облачных систем.

Применяемые в настоящее время методы определения содержания радона-222 в воздухе с помощью электроосаждения его α -активных ДПР на поверхностно-барьерные проводниковые детекторы имеют ряд неустраняемых недостатков, связанных с малым измеряемым объемом (что снижает точность), необходимостью тщательной осушки и очистки исследуемого воздуха от аэрозолей.

Указанные недостатки можно преодолеть с помощью предлагаемого в данной работе другого количественного метода определения содержания концентрации радона по γ -линиям дочерних продуктов ^{214}Pb , ^{214}Bi , собранных на аэрозольном фильтре.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что гамма-активные ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi , являясь атомами металлов, с высокой вероятностью захватываются аэрозолями воздуха, концентрация которых (в городском воздухе до 10^5 см^{-3}) достаточна для этого. При этом γ -спектр ^{214}Pb и ^{214}Bi измеряется с помощью модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) с колодцем.

Таким образом, наличие самих аэрозолей и влажность, влияющая на размер улавливаемых фильтром аэрозолей, только увеличивают точность метода.

Можно справедливо утверждать, что данный метод дополняет существующие методы определения содержания радона-222.

Цель исследования: повышение точности количественного метода определения содержания радона в воздухе по гамма линиям ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi путем улучшения энергетического разрешения детектора из кристалла NaI(Tl) большого размера за счет применения нового ФЭУ-173 со светоотражающим кольцом, что позволяет значительно увеличить эффективность светосбора.

Задача работы: модификация системы светосбора сцинтилляционного детектора из большого кристалла NaI(Tl).

В целях улучшения характеристик сцинтилляционного спектрометра БДЭГ-12 была выполнена модификация системы светосбора путем замены трех ФЭУ-110 на один ФЭУ-173 (рисунок 1).

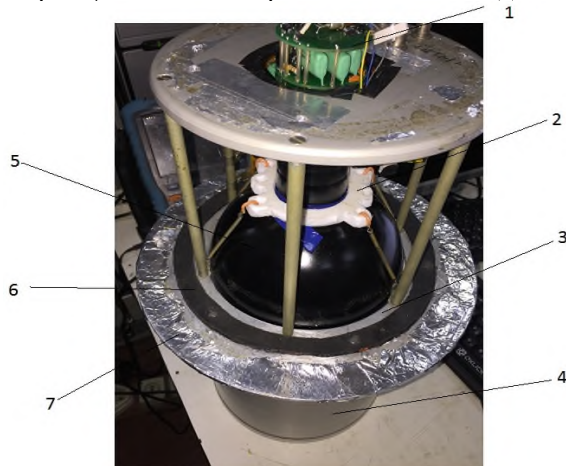


Рисунок 1 – Модификация большого NaI (Tl) детектора с установкой ФЭУ-173, делителя с предусилителем и встроенным высоковольтным блоком и светоотражающего кольца: 1 – делитель для ФЭУ 173, включающий предусилитель и высоковольтный блок; 2 – система фиксации ФЭУ-173 на окне большого NaI кристалла; 3 – светоотражающее кольцо; 4 – большой кристалл NaI(Tl) $20 \times 20 \text{ см}^2$ с колодцем в защитном кожухе; 5 – ФЭУ-173; 6 – светонепроницаемая уплотняющая прокладка для верхнего кожуха детектора; 7 – металлический конструктив для установки пассивной защиты из свинца

Мы ожидаем улучшение разрешения по энергии с 20 до 9 %, поскольку ФЭУ-173 имеет более высокую спектральную (410 нм), анодную, световую чувствительность $5 \cdot 10^{-2} \text{ А/Вт}$, 10 А/Лм , 10^{-4} А/Лм ,

соответственно. В целях оптимизации обработки аналогового сигнала, который раньше формировался от делителей трех ФЭУ-110, подававших на каждый фотокатод высокое напряжение порядка 1 кВ, на новом ФЭУ-173 использован более современный блок питания усиления БПУ-173 (рисунок 2), позволяющий дополнительно ввести предварительный каскад усиления первичного сигнала и формировать непосредственно нужное напряжение питания ФЭУ-173 (рисунок 3).

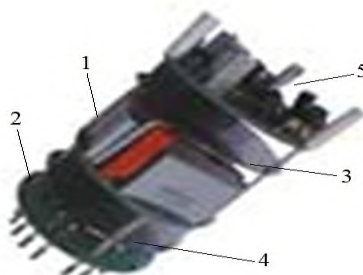


Рисунок 2 – Состав БПУ-173: 1 – рецзионный регулируемый высоковольтный блок питания (ПРВБП); 2 – делитель напряжения для ФЭУ; 3 – усилитель аналогового сигнала; 4 – интегральный дискриминатор; 5 – формирователь импульса логического сигнала



Рисунок 3 – Общий вид ФЭУ-173

С целью исключения потерь полезных событий при светосборе, ввиду разного диаметра окна (200 мм) большого кристалла NaI(Tl) и окна ФЭУ-173 диаметром 170 мм, было выполнено сопряжение окон с установкой кольца из светоотражающего материала. Внешний диаметр кольца составляет 20 см, а внутренний – 17 см.

Выполнение измерений и обсуждение результатов

Калибровочный спектр, набранный на большом кристалле NaI(Tl), с оснасткой из трех ФЭУ-110 от источника ^{226}Ra представлен на *рисунке 4*. На спектре видны γ -линии: ^{214}Pb – 0,352 МэВ (1); а также ^{214}Bi – 0,609 МэВ (2) и 1,764 МэВ (3). Линии же ^{214}Bi : 1,12-1,238 МэВ, 1,4 МэВ и 2,12 МэВ не проявились из-за невысокого разрешения по энергии. Величину разрешения по ширине пиков 609 и 1764 кэВ на полувысоте находим по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{K_0} 100 \%,$$

где ΔE – ширина пика на полувысоте, K_0 – центр тяжести пика.

В анализируемом спектре пик 1 в ~70 канале соответствует энергии 0,352 МэВ, в пике 2 (609 кэВ) разрешение ε составляет 19 %, а в пике 3 (1768 кэВ) разрешение составило 20 %, соответственно. Очевидно, разрешение ФЭУ-110 в МэВ-ной области, где вклад фона минимален, не позволяет проводить точный количественный анализ.

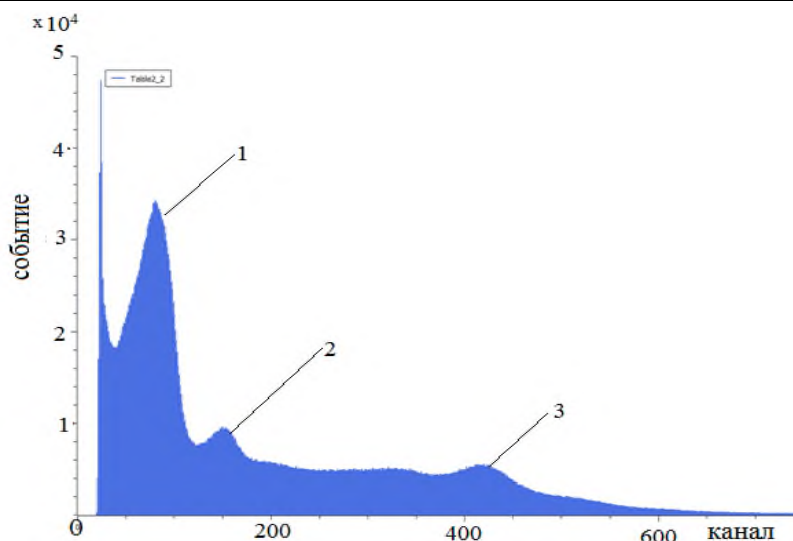


Рисунок 4 – Гамма спектр источника ^{226}Ra . 5 минутная экспозиция набрана кристалле NaI с ФЭУ-110, указаны гамма-линии дочерних продуктов ^{222}Rn : ^{214}Pb – 0,352 МэВ (1); ^{214}Bi : – 0,609 МэВ (2), 1,764 МэВ (3)

На *рисунке 5* представлен новый гамма спектр источника ^{226}Ra . Пятиминутная экспозиция набрана на модифицированном сцинтилляционном детекторе с ФЭУ-173, с модернизированным делителем и светоотражающим кольцом. Результаты оценки энергетического разрешения модифицированного детектора по ширине пиков 609 и 1764 КэВ представлены на *рисунке 5*.

В результате улучшения разрешения по энергии проявились линии ^{214}Bi : 1,12, 1,138, 1,4 МэВ, а также слабо, но проявилась линия 2,12 МэВ.

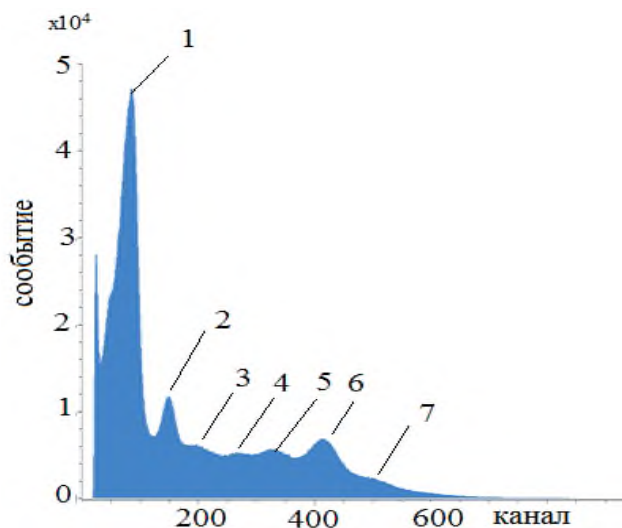


Рисунок 5 – Гамма-спектр, набранный на большом кристалле NaI(Tl) с модифицированным светосбором. Стрелками указаны гамма-линии дочерних продуктов ^{222}Rn . ^{214}Pb : 1 – 0,352 МэВ; ^{214}Bi : 2 – 0,609 МэВ, 3 – 1,12 МэВ, 4 – 1,238 МэВ, 5 – 1,4 МэВ, 6 – 1,764 МэВ, 7 – 2,12 МэВ

По результатам анализа спектра определено энергетическое разрешение детектора: для линии 609 кэВ разрешение составляет 12 %, и для линии 1764 кэВ разрешение составило также 12 %.

Выводы

На большом кристалле NaI(Tl) выполнена замена трех ФЭУ-110 на ФЭУ 173. Для устранения потерь в процессе светосбора на ФЭУ-173 на окне сцинтиблока NaI(Tl) было установлено светоотражающее кольцо.

Представлен гамма-спектр ДПР радона-222 от источника радия-226, набранный на большом кристалле NaI с тремя ФЭУ-110 до модификации светосбора. Разрешение по энергии линиям ^{214}Bi : 0,609, 1,4, 1,764 МэВ составляет 18–20 %.

Представлен гамма-спектр ДПР радона-222 от источника радия-226, набранный на большом кристалле NaI с ФЭУ-173 после модификации. Обозначены основные гамма линии ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi : 0,352, 0,609, 1,12, 1,4, 1,764 МэВ.

Сравнительный анализ показал, что разрешение по энергии в самом ярком (47 %) пике полного поглощения 0,609 МэВ значительно выше и соответствует ~12 %.

Библиография

1. Уткин В.И., Юрков. А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Доклады РАН. 1998. Т. 358, № 5. С. 675–680.
2. Pomansky A.A., Severny S.A., Trifonov E.P. Radium and radon content in different materials // Atomnaya Energiya. 1969. V. 27. P. 36–38.
3. Бекман И.Н., Хасков М.А., Пасека В.И., Панаркина Л. Е., Рязанцев Г.Б. Вариации радиационного поля в северной части Азовского моря // Вестник МГУ, Сер. Химия. 2003. Т. 44, № 2. С. 140–148.
4. Tsvetkova T., Nevisky I., Nevisky V. Measurements of soil radon in South Russia for seismological application: some results // Radiation Measurements. 2012. V. 47, N 4. P. 281–291.
5. Nevisky I., Tsvetkova T., Neviskyaya E. Measurements of radon in ground waters of the Western Caucasus for seismological application // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. V. 149. P. 19–35.
6. Гаврилюк Ю.М., Гангапшев А.М., Гежаев А.М., Казалов В.В., Кузьминов В.В., Хоконов А.Х., Этезов Р.А. Вариации содержания ^{222}Rn в наземных и подземных условиях // Физика Земли. 2024. № 6. С. 80–92.