

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГАММА-ДЕТЕКТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ГЕНЕЗИСА

Представлены результаты сравнения измерительных характеристик детекторов классического коаксиального типа GMX-30190-P-S (кристалл 59×58 мм) и планарного GL2020R (кристалл 50×20 мм) при использовании их для  $\gamma$ -спектрометрического определения содержания радионуклидов чернобыльского генезиса в образцах окружающей среды. Показано, что применение планарных детекторов позволяет улучшить соотношение сигнал/фон, уменьшить минимально измеряемую активность, снизить время измерения образцов при сохранении статистической погрешности, улучшить идентификацию радионуклидов за счет повышенного разрешения и более высокой эффективности регистрации в низкоэнергетической области.

*Ключевые слова:* полупроводниковые детекторы,  $\gamma$ -спектрометр, радионуклиды чернобыльского генезиса,  $\gamma$ -спектр, комптоновское рассеяние.

### Вступление

Содержание отдельных радионуклидов в пробах окружающей среды, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, является динамической величиной и зависит от их периодов полураспада. Методом полупроводниковой  $\gamma$ -спектрометрии определяют содержание радионуклидов, распад которых сопровождается излучением  $\gamma$ -квантов. В настоящий момент по  $\gamma$ -излучению в основном идентифицируют и определяют активность техногенных радионуклидов (ТРН) чернобыльского генезиса  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , редко -  $^{155}\text{Eu}$  и  $^{134}\text{Cs}$ .

На рис. 1 представлена динамика относительного вклада основных ТРН чернобыльского генезиса в  $\gamma$ -активность образцов окружающей среды. Начало отсчета (1990 г.) связано с распадом основных короткоживущих радионуклидов, присутствующих в топливе 4-го блока ЧАЭС [1 - 3]. Из графика видно, что в начале 1990 г. вклад  $^{137}\text{Cs}$  в сумму  $\gamma$ -излучения составлял около 47 %. Остальную

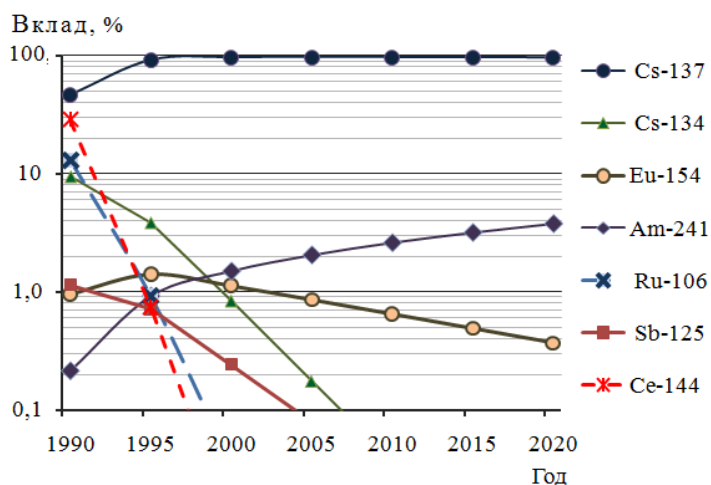


Рис. 1. Динамика вклада (%)  $\gamma$ -излучающих ТРН в активность аэрозолей приземного слоя воздуха в период 1990 – 2020 гг.

часть составляли  $^{144}\text{Ce}$  (133,5 кэВ) – 27 %,  $^{106}\text{Ru}$  (621,8 кэВ) – 13 %,  $^{134}\text{Cs}$  (604,7, 795,8 кэВ) – 9 %, а  $^{125}\text{Sb}$  (427,9, 600,6 кэВ) и  $^{154}\text{Eu}$  (123,1, 1274,5 кэВ) по 1 %. Доля  $^{241}\text{Am}$  (59,5 кэВ) была около 0,2 %. К 1995 г. за счет распада  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{106}\text{Ru}$  (доля которых стала менее 1 %) вклад  $^{137}\text{Cs}$  вырос до 92 %. После 2000 г. в образцах надежно и регулярно фиксировали  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{154}\text{Eu}$ . Доля  $^{137}\text{Cs}$  достигла максимума (97 %) в 2005 г. и начала постепенно снижаться. Вклад  $^{241}\text{Am}$  увеличивается за каждые 5 лет примерно на 0,6 %. В 2010 г. он был равен 2,6 %, а к 2050 г. будет составлять около 8 %. Рост  $^{241}\text{Am}$  обусловлен распадом  $^{241}\text{Pu}$ , накопленным в топливе за период кампании.

Следует отметить, что не все радионуклиды чернобыльского генезиса, присутствующие в радиоактивных образцах окружающей среды вблизи объекта «Укрытие», можно идентифицировать с помощью полупроводниковой  $\gamma$ -спектрометрии, поэтому при оценке концентрации трансурановых нуклидов (изотопов плутония  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ), как биологически наиболее радиационно-опасных, используют их соотношения с  $^{241}\text{Am}$  в базовом составе топлива 4-го энергоблока на момент измерений [1 - 3]. Это и обуславливает важность достоверного определения  $^{241}\text{Am}$  по  $\gamma$ -линии 59,5 кэВ.

Результаты и обсуждение

В ИПБ АЭС НАН Украины с 1996 г. определение содержания радионуклидов выполнялось на  $\gamma$ -спектрометрическом комплексе, состоящем из полупроводниковых детекторов высокого разрешения с бериллиевым окном и 8192-канального амплитудного анализатора импульсов Walklab (Selena). Сначала использовали детектор классического коаксиального типа GMX-30190-P-S (ORTEC) с кристаллом п-типа проводимости размером 59×58 мм с пониженным «мертвым слоем». Затем с 2008 г. заменили на более современный GL2020R (Canberra) с улучшенной геометрией и кристаллом р-типа 50×20 мм. Оба детектора имеют бериллиевые окна толщиной 500 мкм, что обеспечивает возможность эффективной регистрации низкоэнергетических фотонов. Измерительный диапазон охватывает интервал от 10 до 1400 кэВ, в пределах которого находятся практически все  $\gamma$ -линии контролируемых ТРН.

Материал кристаллов и технология их изготовления обеспечивают высокий уровень разрешения. Так, детектор GL2020R имеет разрешение 0,57 кэВ для энергии  $\gamma$ -квантов 122 кэВ ( $\gamma$ -линии  $^{57}\text{Co}$ ) и 1,2 кэВ – 661,6 кэВ ( $\gamma$ -линии  $^{137}\text{Cs}$ ), детектор GMX-30190-P-S – 0,97 кэВ для энергии  $\gamma$ -квантов 122 кэВ и 1,3 кэВ – 661,6 кэВ.

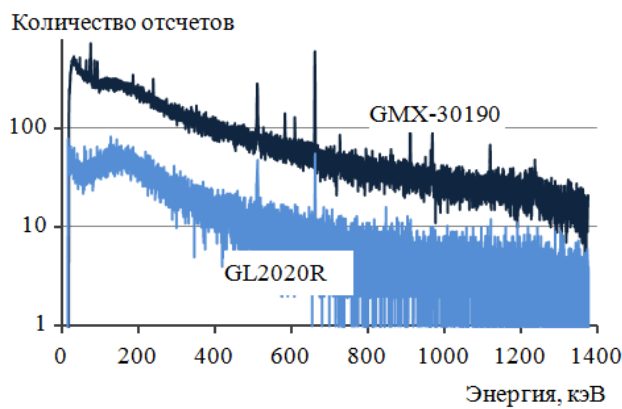


Рис. 2. Фоновые спектры в измерительной камере.

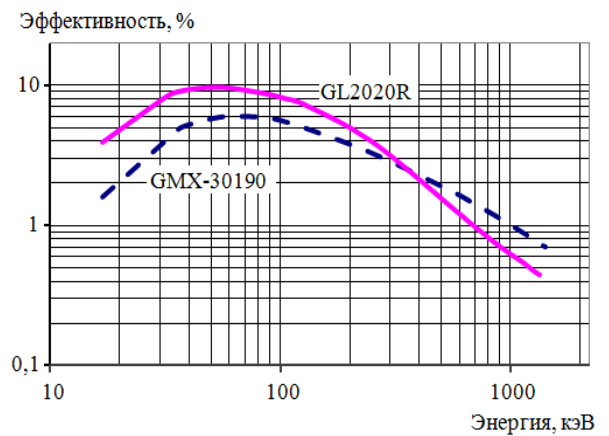


Рис. 3. Относительная эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов.

Для оценки измерительных возможностей детекторы сравнили по двум параметрам. Во-первых, по фоновым спектрам, регистрируемых детекторами (GMX-30190-P-S в 2001г., а GL2020R в 2013 г.) в измерительной камере за 60000 с. Они представлены на рис. 2. Видно, что по всему измерительному диапазону количество отсчетов в каналах при использовании GMX-30190-P-S выше, чем у GL2020R. Фоновый аппаратный спектр в измерительной камере определяется космическим излучением и содержанием естественных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  и др.) и ТРН в окружающей среде. Кроме того, он также зависит от ряда параметров, из которых постоянными остались: расположение  $\gamma$ -спектрометрического комплекса и качество защитного экрана, а изменились радиационный фон окружающей среды (уменьшился за счет распада ТРН), эффективность регистрации фотонов и конструктивные особенности детекторов. Анализ кривых эффективности регистрации фотонов детекторами для аттестуемой измерительной геометрии (рис. 3) показал, что кривая эффективности детектора GL2020R в низкоэнергетической области находится выше, чем у GMX-30190-P-S, но после 350 кэВ их положение меняется. Характер кривых в высокоэнергетической области объясняется просто. С ростом энергии излучения вероятность поглощения фотонов пропорциональна толщине поглощающего слоя. Толщина детектора GL2020R (20 мм) меньше приблизительно в 2,5 раза, чем GMX-30190-P-S (58 мм). Более высокая эффективность детектора GL2020R в низкоэнергетической части спектра, вероятнее всего, обусловлена конструктивными особенностями: пониженной толщиной «мертвого слоя» германия, меньшим уровнем шума предусилителя детектора, лучшим сбором зарядов, образующихся в кристалле при воздействии фотонного излучения, и др. Одновременно эти особенности обуславливают снижение величины регистрируемого фона в низкоэнергетической области спектра (см. рис. 2). В результате детектор GL2020R имеет более низкий уровень минимальной измеряемой активности (МИА). Например, МИА при 20 % погрешности для  $^{241}\text{Am}$  ( $\gamma$ -линия 59 кэВ) равна 0,15 Бк/пробу, для  $^{137}\text{Cs}$  ( $\gamma$ -линия 661,6 кэВ) – 0,54 Бк/пробу, для  $^{154}\text{Eu}$  ( $\gamma$ -линия 123 кэВ) –

0,2 Бк/пробу, ( $\gamma$ -линия 1274 кэВ) – 0,42 Бк/пробу [4], а при использовании детектора GMX-30190-P-S МИА для этих же  $\gamma$ -линий равна 0,72, 1,4, 0,71, 0,67 Бк/пробу соответственно.

Во-вторых, это калибровочные спектры, полученные при экспонировании образцового источника  $^{137}\text{Cs}$  (из набора ОСГИ) на расстоянии 10 см от торцевой поверхности детекторов, что позволяет оценить комптоновское рассеяние в кристаллах. Применение источника  $^{137}\text{Cs}$  обусловлено тем, что, как уже отмечалось, основной вклад (около 95 %) в  $\gamma$ -активность образцов, содержащих радионуклиды чернобыльского генезиса, вносит  $^{137}\text{Cs}$ , дочерний продукт которого  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  излучает  $\gamma$ -кванты с энергией 661,6 кэВ. При этом спектр  $\gamma$ -излучения, регистрируемый детектором в измерительной камере, состоит как из первичного (661,6 кэВ), так и рассеянного (комптоновского) излучения. Рассеяние происходит при взаимодействии  $\gamma$ -квантов (661,6 кэВ) с защитным экраном, с конструктивными материалами детектора и в самом образце.

В таблице приведены расчетные данные по энергии фотонов, образующихся в зависимости от угла и кратности рассеяния, рассчитанные по формуле

$$E_{\gamma} = \frac{E_0}{\left(1 + \frac{E_0}{mc^2} \cdot (1 - \cos(\theta))\right)},$$

где  $E_{\gamma}$  - энергия рассеянного фотона;  $E_0$  - энергия падающего фотона (661,6 кэВ);  $m$  - масса электрона;  $c$  - скорость света;  $\theta$  - угол рассеяния фотона.

**Энергии фотонов в зависимости от угла рассеяния  $\gamma$ -квантов с энергией 662 кэВ**

Угол рассеяния, град	Энергия фотонов, кэВ					
0	662	479	288	184	135	107
45	479	376	247	166	125	101
90	288	247	184	135	107	88
180	184	166	135	107	88	75

На рис. 4 представлены аппаратные спектры за один и тот же интервал времени, полученные при калибровке детекторов точечным источником  $^{137}\text{Cs}$ . Спектр детектора GMX-30190-P-S нормирован на коэффициент, учитывающий распад  $^{137}\text{Cs}$  на момент измерений на GL2020R. На аппаратном спектре, кроме пиков полного поглощения ( $\gamma$ -линия 661,6 кэВ)  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , отчетливо видны пики

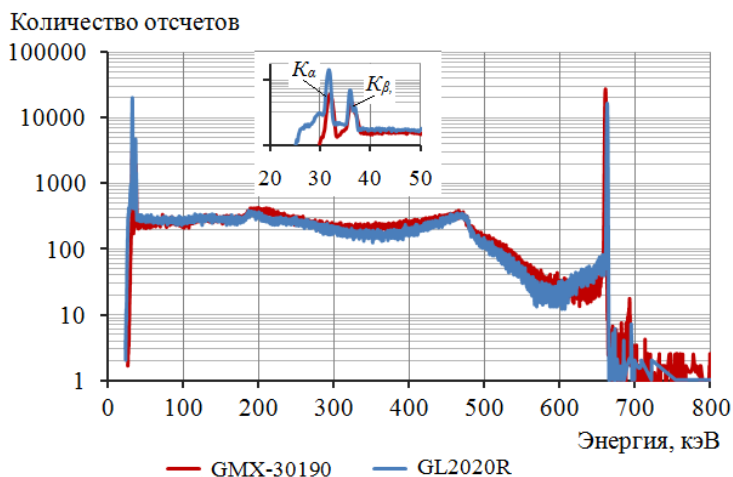


Рис. 4. Аппаратурные спектры калибровочного источника.

комптоновского рассеяния: прямого – 479 кэВ и обратного – 184 кэВ (см. рис. 4), а в низкоэнергетической области пики рентгеновского  $K$ -излучения бария ( $K_{\alpha 1, \alpha 2}$  - 31,8, 32,2 кэВ и  $K_{\beta 1, \beta 2}$  - 36,4, 37,2 кэВ). Кроме того, в области выше 661,6 кэВ количество отсчетов в спектре детектора GMX-30190-P-S гораздо выше за счет эффекта суммирования, чем в спектре GL2020R. Для количественной оценки визуально наблюдаемых различий в спектрах, рассчитали площади на отдельных энергетических участках. Результаты расчетов отношения площадей на отдельных участках аппаратных спектров детектора GL2020R к GMX-30190-P-S следующие: в диапазоне  $K_{\alpha 1, \alpha 2}$  – 4,4;  $K_{\beta 1, \beta 2}$  - 1,9; пика обратного рассеяния 174 –

194 кэВ – 0,92; в диапазоне 360 – 380 кэВ – 0,85; пика прямого рассеяния 470 – 490 кэВ – 1,08; фотопика (661,6 кэВ) – 0,57. Из анализа соотношений следует, что, во-первых, эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с 661,6 кэВ детектором GMX-30190-P-S примерно в два раза выше; во-вторых, в диапазоне комптоновского рассеяния количество регистрируемых фотонов детектором GL2020R незначительно меньше; в-третьих, в низкоэнергетической области в районе пиков  $K$ -излучения бария реги-

страция фотонов детектором GL2020R существенно выше, что очень важно при идентификации  $^{241}\text{Am}$  (59,5 кэВ).

Применение данного подхода при выборе полупроводниковых детекторов для  $\gamma$ -спектрометрических измерений образцов, отобранных на пунктах контроля радиационной обстановки вблизи объектов ядерного цикла в условиях повышенной загрязненности местности  $^{137}\text{Cs}$ , позволит повысить эффективность мониторинга воздействия на окружающую среду, так как при нормальной работе АЭС в воздух могут поступать только радиоактивные благородные газы. Но по мере накопления микродефектов в конструкционных материалах и в результате протечек теплоносителя в вентиляционной системе начинают появляться радиоактивные аэрозоли продуктов деления, наибольшее количество которых возникает при прогорании твэлов. Например, состав  $\gamma$ -излучающих нуклидов с вкладом не менее 1 % в газоаэрозольные выбросы на ЮУАЭС с реакторами ВВЭР в 1999 - 2005 гг. по данным, приведенным в [5], таков:  $^{131}\text{I}$  (364,5 кэВ) – 20 %,  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 кэВ) – 2 %,  $^{134}\text{Cs}$  (604,7, 795,4 кэВ) – 1 %,  $^{60}\text{Co}$  (1173,2, 1332,5 кэВ) – 6 %,  $^{58}\text{Co}$  (810,7 кэВ) – 2 %,  $^{51}\text{Cr}$  (320,1 кэВ) – 6 %,  $^{54}\text{Mn}$  (834,8 кэВ) – 1 %. Практически все  $\gamma$ -линии этих радионуклидов лежат в измерительном диапазоне, в котором предпочтительней использовать планарный полупроводниковый детектор типа GL2020R.

### Выводы

Применение планарного полупроводникового детектора улучшенной геометрии при определении содержания радионуклидов позволило улучшить соотношение сигнал/фон, уменьшить МИА радионуклидов, снизить время измерения образцов при сохранении статистической погрешности, улучшить идентификацию радионуклидов за счет повышенного разрешения и более высокой эффективности регистрации в низкоэнергетической области.

Кроме того, существует экономическая целесообразность при выборе планарных полупроводниковых детекторов, так как они дешевле коаксиальных (при равных конструкторских особенностях) за счет меньшего объема кристалла из сверхчистого германия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А.* Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС (Отчет) / ИБРАЭ АН СССР. – Инв. № 52/11-20. – М., 1991.
2. *Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др.* Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС. Краткий справочник. – Москва, 1990. – 21 с. – (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; 5268/3).
3. *Боровой А.А.* Состояние безопасности объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Подпроект № 3 «Ядерное топливо и радиоактивные отходы», по специальному соглашению IPSN и GRS с РНЦ. – М., 1998. – 26 с.
4. *Методика* выполнения измерений на гамма-спектрометре с полупроводниковым планарным детектором (СТП 17.01:2010) / ОЯРБ ИПБ АЭС НАН Украины. – Чернобыль, 2010. – 16 с.
5. *Григорьева Л.И., Томилин Ю.А.* Дозовая нагрузка на человека на территории вблизи АЭС // Техногенна безпека. – 2010. – Т. 139, вип. 126. – С. 10 – 21.

### О. К. Калиновський

*Інститут проблем безпеки НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*

### ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ГАММА-ДЕТЕКТОРА ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ВМІСТУ РАДІОНУКЛІДІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО ГЕНЕЗИСУ

Представлено результати порівняння вимірвальних характеристик детекторів класичного коаксіального типу GMX-30190-PS (кристал 59×58 мм) і планарного GL2020R (кристал 50×20 мм) при використанні їх для  $\gamma$ -спектрометричного визначення вмісту радіонуклідів чорнобильського генезису в зразках доквілля. Показано, що застосування планарних детекторів дає змогу поліпшити співвідношення сигнал/фон, зменшити мінімальну вимірювану активність, знизити час вимірювання зразків при збереженні статистичної похибки, поліпшити ідентифікацію радіонуклідів за рахунок підвищеного дозволу і більш високої ефективності реєстрації в низкоенергетичній області.

*Ключові слова:* напівпровідникові детектори,  $\gamma$ -спектрометр, радіонукліди чорнобильського генезису,  $\gamma$ -спектр, комптонівське розсіювання.

**OPTIMAL CHOICE OF SEMICONDUCTOR GAMMA DETECTOR FOR DETERMINING  
RADIONUCLIDE CONTENT GENESIS OF CHERNOBYL**

The results of comparing the measurement characteristics of the classical detectors coaxial type GMX-30190-PS (crystal 59×58 mm) and a planar GL2020R (crystal 50×20 mm) when used for  $\gamma$ -spectrometric determination of radionuclides Chernobyl genesis in environmental samples. It is shown that the use of planar detectors can improve the signal/background, minimum detectable activity reduce, reduce the time of measurement of samples while maintaining the statistical error, to improve the identification of radionuclides due to the increased resolution and higher detection efficiency at low energies.

*Keywords:* semiconductor detectors,  $\gamma$ -spectrometer Chernobyl radionuclides genesis,  $\gamma$ -spectrum, Compton scattering.

REFERENCES

1. *Borovoi A.A., Dovbenko A.A., Smoljankina M.V., Stroganov A.A.* Determination of nuclear-physical characteristics of the fuel of the 4th unit Chernobyl (Report)/ IBRAE USSR. - Inv. № 52 / 11-20. – Moskva, 1991. (Rus).
2. *Begichev S.N., Borovoi A.A., Burlakov E.V. and others.* Fuel 4 reactor Chernobyl Unit. Reference guide. - Moscow, 1990 - 21 p. - (Preprint. / Inst of Atomic Energy. Kurchatov, 5268/3). (Rus).
3. *Borovoi A.A.* Security Status "Shelter" Chornobyl NPP. Subproject № 3 «Nuclear fuel and radioactive waste", by special agreement IPSN and GRS with the RRC. – Moskva, 1998. – 26 p. (Rus).
4. *Methods of measurement in a gamma spectrometer with planar semiconductor detector (STP 17.01: 2010) / IPS NPP NAS – Chernobyl, 2010. - 16 p. (Rus).*
5. *Grigorieva L.I., Tomilin Y.A.* Radiation dose per person in the territory near NPPs // *Technogenna bezpeka.* – 2010. – Т. 139. – Iss. 126. – P. 10 - 21. (Rus).

Надійшла 05.08.2014

Received 05.08.2014