

А. И. СКРЫПНИК

Украина, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА CdZnTe- И TlBr-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СМЕШАННОГО БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Выполнено моделирование функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения ^{137}Cs и ^{90}Sr с помощью кода GEANT4. Получены спектры для случаев, когда перед детектором размещается бета-фильтр для поглощения электронов и без него. С помощью моделирования методом Монте-Карло найдена оптимальная толщина Al бета-фильтра для полного подавления конверсионных электронов в спектре ^{137}Cs . Также получена функция отклика TlBr-детектора на смешанный источник излучения ($^{137}\text{Cs}+^{90}\text{Sr}$).

Ключевые слова: код GEANT4, метод Монте-Карло, моделирование, CdZnTe- и TlBr-детекторы, источники излучения ^{137}Cs и ^{90}Sr , Al бета-фильтр.

С интенсивным развитием ядерной энергетики актуальной во всем мире остается задача радиационного мониторинга окружающей среды, основными источниками загрязнения которой являются радиоактивные выбросы на предприятиях по переработке отработавшего ядерного топлива, радиохимических заводах, авариях на АЭС и т. д. Радиоактивные элементы выбрасываются в атмосферу, попадают в почву и водные ресурсы, а в дальнейшем, соответственно, и в продукты питания. Поэтому очевидна потребность в высокоэффективных и относительно дешевых приборах идентификации радионуклидов на местности.

Значительная трудность определения концентрации радионуклидов на местности с помощью гамма-спектрометрического прибора вызвана присутствием различных видов излучения — как бета, так и гамма. Комптоновское рассеяние гамма-квантов ведет к размытию исходного спектра рассеяния радионуклидов и деградации фотопиков в экспериментально измеренных спектрах. В экспериментах по восстановлению спектра от сильного гамма-излучателя на фоне низкого уровня шума может использоваться стандартная методика, суть которой связана с поиском и идентификацией фотопиков измеренного спектра. Однако на практике в большинстве случаев интенсивность измеренного сигнала от радиоактивного источника либо практически равна интенсивности радиационного фона, либо сигнал подавляется маскирующим излучением (как бета, так и гамма), что приводит к необхо-

димости изучения смешанных источников радиоактивного излучения. В случаях регистрации бета-излучения применяются химические методы разделения нуклидов или методы, основанные на измерениях и анализе спектров [1]. Более эффективными являются методы деконволюции измеренного спектра, поскольку химические методы разделения не всегда позволяют выделить чистый изотоп [2]. Реализация алгоритма восстановления и разделения измеренного спектра требует наличия измеренных либо промоделированных функций отклика детектирующего устройства на каждый индивидуальный радионуклид, который входит в состав смеси радиоактивного источника. Исследование функций отклика является ключевым моментом в изучении и применении алгоритмов деконволюции.

Целью настоящей работы было получение и исследование функций отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения ^{137}Cs и ^{90}Sr и смешанного гамма-бета-излучения, а также поиск оптимальной толщины Al-фильтра для полного подавления конверсионных электронов в спектре ^{137}Cs .

Проверка модели

Функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов были получены с помощью моделирования прохождения гамма-квантов и электронов через детектор. Для этого использовался универсальный код GEANT4 версии 4.9.6 — набор библиотек для моделирования прохождения заряженных частиц, нейтронов и гамма-квантов через вещество [3]. Моделирование проводилось методом Монте-Карло с помощью разработанного программного кода, совмещенного с GEANT4 [4]. Эта работа разделена на две части. На первом этапе моделирования программа рассчитывает

Автор выражает свою благодарность А. В. Рыбке за предоставление экспериментальных данных и профессору М. А. Хажмурадову за его помощь в интерпретации полученных результатов.

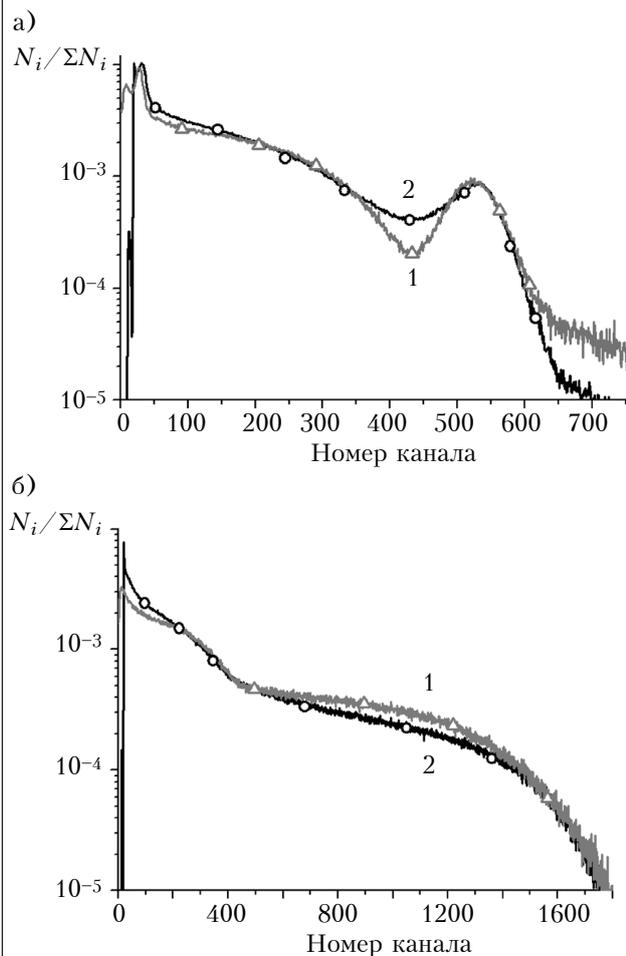


Рис. 1. Спектры ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б), полученные путем моделирования (1) и экспериментально (2)

энергию ионизации E_i , передаваемую детектору поглощенным гамма-квантом с начальной энергией E_γ . На втором этапе рассчитываются значения заряда, индуцированного на контактах детектора, для каждого проваимодействовавшего фотона. В целях получения результатов, наиболее согласующихся с реальным экспериментом, в данном программном коде учитываются статистические эффекты рождения электрон-позитронных пар внутри активного объема детектора и модификация амплитуды выходного импульса под влиянием шума электронной аппаратуры и захвата носителей заряда. Модель разработана таким образом, что дает пользователю возможность управлять ее входными параметрами [4].

На рис. 1 приведены результаты моделирования отклика CdZnTe-детектора на источники излучения ^{137}Cs и ^{90}Sr , а также спектры, полученные экспериментально во время настройки измерительного стенда в [5] (N_i — количество счетов в i -м канале, ΣN_i — суммарное количество счетов во всех каналах). Здесь видно, что приведенные данные хорошо согласуются между собой. Положение фотопика с энергией 661,7 кэВ на промоделированном спектре ^{137}Cs соответствует

экспериментальным данным. Наблюдаемые отличия спектров могут быть вызваны различными случайными факторами, но главная причина лежит, как и в [4], в упрощенном описании геометрии и химического состава элементов, рассеянных от измерительного стенда.

Моделирование функций отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов

Исследованы широкозонные полупроводниковые CdZnTe- и TlBr-детекторы, некоторые характеристики которых были изучены в [4, 6].

На рис. 2 показано распределение энергии, поглощенной в CdZnTe-детекторе размерами 6×6×3 мм, облученном ^{137}Cs . Интервал дискретизации ΔE равен 0,05 кэВ. Данные этого рисунка иллюстрируют комптоновскую долину и комптоновский край. Также на спектре хорошо виден фотопик с энергией 661,7 кэВ. Кроме того, поскольку не были использованы какие-либо фильтры, поглощающие электроны, на спектре присутствуют пики от конверсионных электронов с энергией 624 и 656 кэВ. Предполагается, что другие небольшие пики между комптоновским краем и фотопиком являются пиками утечки, которые соответствуют гамма-излучению из различных оболочек атомов Cd и Te.

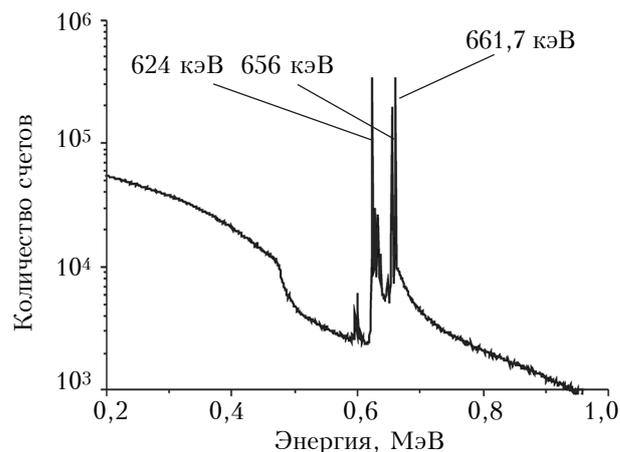


Рис. 2. Распределение энергии, поглощенной в CdZnTe-детекторе, облученном ^{137}Cs

При регистрации бета- и гамма-излучения широкозонными полупроводниковыми детекторами получают различные импульсы в зависимости от вида излучения. Для получения чистых гамма-спектров от источника ^{137}Cs (без вклада конверсионных электронов), которые необходимы при восстановлении и разделении спектров излучения, полученных от смешанных бета- и гамма-источников, перед детектором размещается поглощающий бета-фильтр. Нами было проведено компьютерное моделирование CdZnTe-детектора, облученного ^{137}Cs без использования бета-фильтра и с использованием Al-фильтра различной толщины (от 0,1 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм). Анализ результатов показал, что полностью подавить

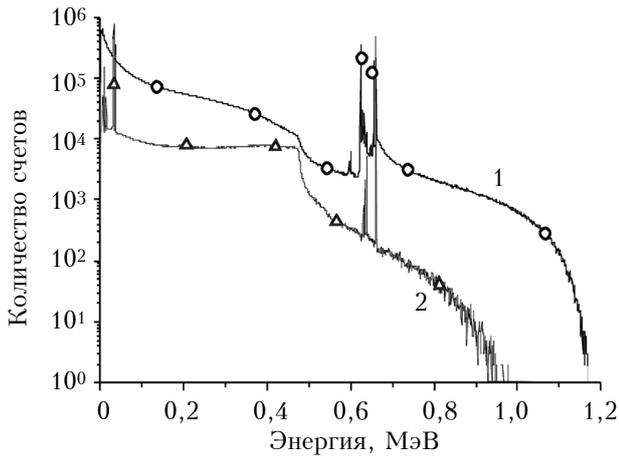


Рис. 3. Спектр энергии, поглощенной CdZnTe-детектором без фильтра (1) и при использовании Al бета-фильтра толщиной 0,5 мм (2) при облучении ^{137}Cs

конверсионные электроны можно с помощью Al-фильтра толщиной 0,5 мм (рис. 3).

Для определения влияния такого фильтра на вероятность рассеяния в фотопик при регистрации излучения источника ^{137}Cs был промоделирован отклик CdZnTe-детектора на монохроматическое гамма-излучение с энергией 661,7 кэВ. Результаты моделирования показали, что при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм вероятность рассеяния в фотопик на 0,99% меньше, чем при облучении без фильтра (рис. 4, а), т. е. исследуемый фильтр не влияет на высоту и форму фотопика с энергией 661,7 кэВ (рис. 4, б, где на оси абсцисс $E \times \text{CCE}$ — произведение энергии на эффективность сбора заряда).

На рис. 5 представлены функции отклика CdZnTe-детектора размером $6 \times 6 \times 3$ мм на излучение источников ^{137}Cs и ^{90}Sr с напряжением $U_b = 300$ В. Общий уровень шума в спектрометрической CdZnTe-системе был принят равным $300 e^-$ и темновой ток детектора 3 нА. Значения произведения

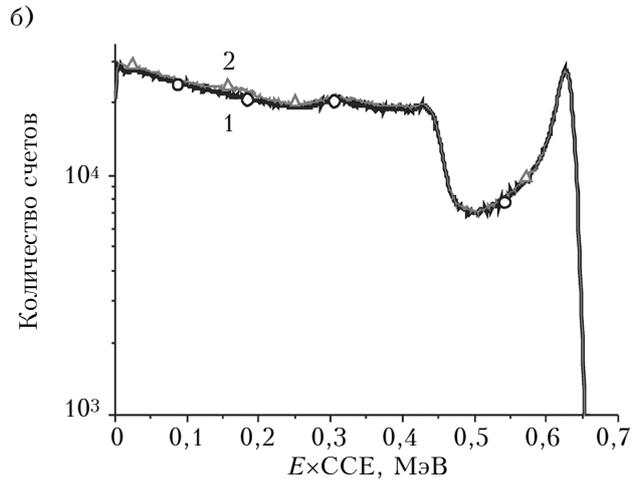
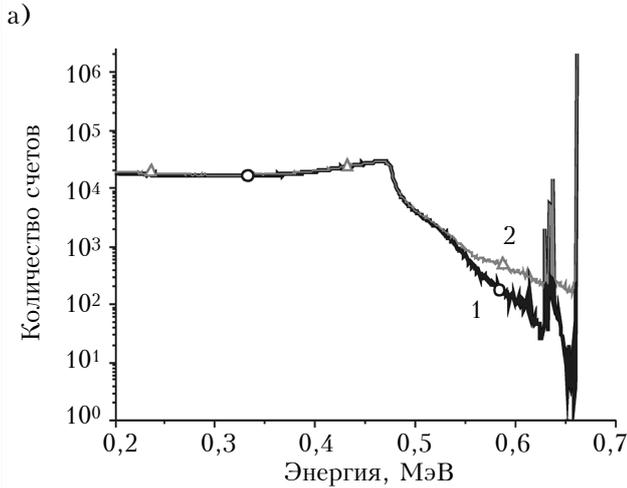


Рис. 4. Энергетические потери (а) и спектр (б) гамма-квантов с $E_\gamma = 0,662$ МэВ, полученные при облучении CdZnTe-детектора гамма-квантами с энергией 661,7 кэВ без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2)

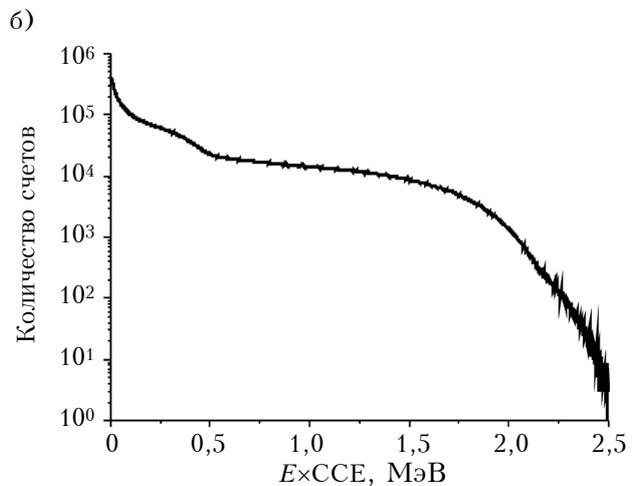
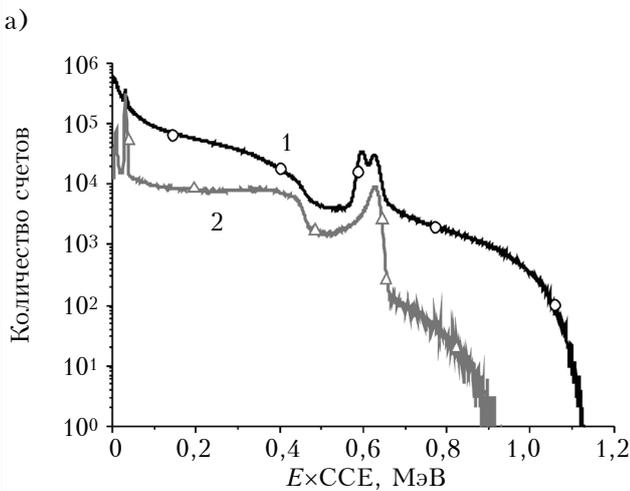


Рис. 5. Спектры энергии, поглощенной CdZnTe-детектором при облучении ^{137}Cs (а) без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2) и при облучении ^{90}Sr (б)

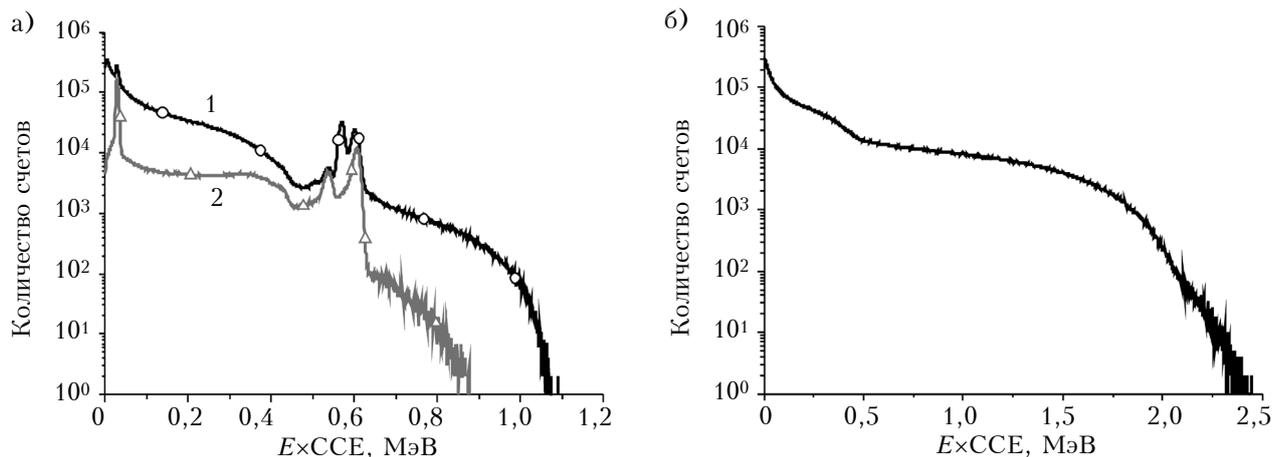


Рис. 6. Спектры энергии, поглощенной TlBr-детектором при облучении ^{137}Cs (а) без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2) и при облучении ^{90}Sr (б)

подвижности на время жизни для электронов $(\mu\tau)_e$ и для дырок $(\mu\tau)_h$ были установлены, соответственно, $3 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-4}$ см²/В. Кривая 1 на рис. 5, а, полученная без применения фильтра, содержит видимый фотопик с энергией 661,7 кэВ и пики от конверсионных электронов, которые накладываются друг на друга. Здесь видно, что вклад в них вносят пики утечки, однако из-за небольшой величины их невозможно различить на кривой спектра ^{137}Cs . Наложение пиков может привести к переоценке фотопика, однако, как подтверждают данные рис. 4, фотопики на кривых 1 и 2 рис. 5, а совпадают.

Еще одним перспективным полупроводниковым материалом для эффективной регистрации гамма-квантов является TlBr, однако информации об экспериментах по детектированию бета-излучения с его помощью на данный момент недостаточно. Описанные выше компьютерные эксперименты были проведены для TlBr-детектора размерами 2,7×2,7×2,0 мм (рис. 6). Напряжение U_b было выбрано 400 В, общий уровень шума в спектрометрической TlBr-системе — приблизительно 400 е⁻. Предполагалось, что темновой ток детектора составляет 4 нА. Для того чтобы

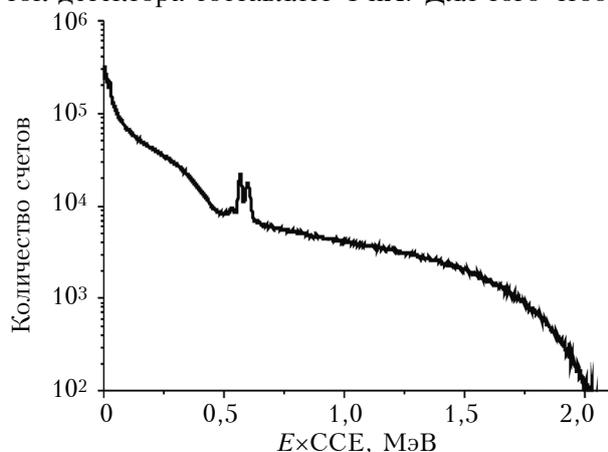


Рис. 7. Спектр энергии, поглощенной TlBr-детектором при смешанном облучении от ($^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$)-источника

получить достаточно видимые фотопики, были установлены значения $(\mu\tau)_e$ и $(\mu\tau)_h$, соответственно, $5 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ см²/В.

На рис. 7 представлены функции отклика TlBr-детектора на смешанное излучение от ($^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$)-источника.

Выводы

Таким образом, с помощью моделирования были получены и исследованы функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые являются самыми распространенными загрязнителями окружающей среды, причем одними из наиболее долгоживущих и опасных радионуклидов, встречающихся в почве. Исследования показали, что имеющиеся в функциях отклика пики от конверсионных электронов могут быть полностью подавлены Al бета-фильтром толщиной 0,5 мм. Применение фильтра в случае излучения ^{137}Cs приводит к уменьшению вероятности рассеяния в фотопик CdZnTe-детектором на 0,99%, TlBr-детектором — на 1,03%, а фотопик с энергией 661,7 кэВ уменьшается, соответственно, в три и в два раза.

Проведенное экспериментальное моделирование также указывает на то, что одинаковая модель детектора может применяться для детектирования как гамма- (^{137}Cs), так и бета-излучения (^{90}Sr). Следовательно, полупроводниковые CdZnTe- и TlBr-детекторы могут быть использованы для регистрации гамма/бета излучения от смешанных источников ($^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$).

Полученные функции отклика детекторов на индивидуальные и смешанный источники излучения послужат основой дальнейших исследований, направленных на поиск методик восстановления и разделения спектров излучения, полученных от смешанных источников.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nebelung C., Jähnigen P., Bernhard G. Simultaneous determination of beta nuclides by liquid scintillation spectrometry // Proc. of the Int. Conf. on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. — Davos, 2008. — P. 193–201.
2. Dobrin R. I., Pavelescu M., Dulama C. N., Toma Al. Measurement of multiple labeled samples by beta spectrum

unfolding // Rom. Journ. Phys. — 2011. — Vol. 56, N 1–2. — P. 93–102.

3. Agostinelli S. et al. Geant4: A simulation toolkit // Nuclear instruments and methods in physics research. Section A. — 2003. — Vol. 506, iss. 3. — P. 250–303. — DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

4. Zakharchenko A., Rybka A., Kutny V. et al. Transport properties and spectrometric performances of CdZnTe-gamma-ray detectors // Proc. of SPIE. — 2012. — Vol. 8507. — P. 85071I-1–7.

5. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А. и др. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппара-

туры космических аппаратов от ионизирующего излучения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. — 2013. — № 6. — С. 126–131.

6. Skrypnyk A., Zakharchenko A., Khazhmuradov M. Comparison of GEANT4 with EGSnrc for simulation of gamma-radiation detectors based on semi-insulating materials // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. — 2011. — Vol. 5, iss. 56. — P. 93–100.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.08 2014 г.

А. І. СКРИПНИК

Україна, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГУКУ CdZnTe- ТА TlBr-ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ЗМІШАНОГО БЕТА- ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконано моделювання функції відгуку CdZnTe- і TlBr-детекторів на індивідуальні джерела випромінювання ^{137}Cs та ^{90}Sr за допомогою коду GEANT4. Отримано спектри для випадків, коли перед детектором розміщується бета-фільтр для поглинання електронів і без нього. За допомогою моделювання методом Монте-Карло знайдено оптимальну товщину Al бета-фільтра для повного заглушення конверсійних електронів в спектрі ^{137}Cs . Також отримано функції відгуку TlBr-детектора на змішане джерело випромінювання ($^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$) з бета-фільтром і без нього.

Ключові слова: код GEANT4, метод Монте-Карло, моделювання, CdZnTe- і TlBr-детектори, джерела випромінювання ^{137}Cs та ^{90}Sr , Al бета-фільтр.

DOI: 10.15222/TKEA2015.1.17

UDC 539.1.074

А. І. СКРЫПНЫК

Ukraine, Kharkov, National Science Center
“Kharkov Institute of Physics and Technology”

E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

CdZnTe- AND TlBr-DETECTORS RESPONSE SIMULATION FOR REGISTRATION OF THE MIXED BETA- AND GAMMA-RADIATION

One of the approaches for reconstructing the spectra of the mixed beta- and gamma-radiation, produced by wide band-gap semiconductor detectors, and the subsequent identification of radionuclides that are comprised in the mixture composition is a method based on various methods of spectral deconvolution. The presence of the detector response functions for each individual source of radiation is a key point in the studying such techniques. The response of TlBr- and CdZnTe-detectors to gamma-rays from ^{90}Sr and ^{137}Cs was simulated by Monte-Carlo method via Geant4 package. The computer experiments were conducted with using a β -filter and without it. It was shown that optimal thickness of the Al β -filter required for complete suppressing the conversion electrons in the ^{137}Cs spectrum is 0.5 mm. The modification of 661.7 keV photopeaks with a using β -filter was investigated.

Keywords: GEANT4 code, Monte-Carlo method, simulation, CdZnTe- and TlBr-detectors, ^{137}Cs and ^{90}Sr radiation sources, Al β -filter.

REFERENCES

1. Nebelung C., Jähnigen P., Bernhard G. Simultaneous determination of beta nuclides by liquid scintillation spectrometry. Proc. of the Intern. Conference on Advances in liquid scintillation spectrometry, Davos, 2008, pp. 193-201.

2. Dobrin R. I., Pavelescu M., Dulama C. N., Toma A. Measurement of multiple labeled samples by beta spectrum unfolding. Rom. Journ. Phys., 2011, vol. 56, no 1-2, pp. 93-102.

3. Agostinelli S. et al. Geant4: A simulation toolkit. Nuclear instruments and methods in physics research. Section A, 2003, vol. 506, iss. 3, pp. 250-303, DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

4. Zakharchenko A., Rybka A., Kutny V., Skrypnyk A., Khazhmuradov M., Fochuk P., Bolotnikov A., James R.

Transport properties and spectrometric performances of CdZnTe-gamma-ray detectors. Proc. of SPIE, 2012, vol. 8507, pp. 85071I-1-7.

5. Dzhur E.A., Sanin A.F., Bozhko S.A., Andrianov A.Yu., Belous V.A., Rybka A.V., Zakharchenko A.A., Borisenko V.N., Zinov'ev A.M., Kuznetsov A.P., Plisak Yu.V. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aэrokosmicheskogo universiteta, 2013, no 6, pp. 126-131. (in Russian)

6. Skrypnyk A., Zakharchenko A., Khazhmuradov M. Comparison of GEANT4 with EGSnrc for simulation of gamma-radiation detectors based on semi-insulating materials. Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations, 2011, vol. 5, iss. 56, pp. 93-100.