

Д.В. Арефьева, В.Б. Фирсанов, С.В. Ярмийчук, А.В. Петушок

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины, Санкт-Петербург

Контактное лицо: Дарья Владимировна Арефьева, e-mail: dasha86@inbox.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка способа градуировки сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения с применением метода Монте-Карло.

Материал и методы: Объектом исследования являлся спектрометр гамма-излучения, предназначенный для измерения энергетического распределения (спектра) и определения активности гамма-излучающих радионуклидов. Экспериментальные исследования проведены с набором образцовых мер активности специального назначения с радионуклидами ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{60}Co и ^{137}Cs , равномерно осажденными на ионообменную смолу. Градуировку спектрометра осуществляли с применением программы MCC 3D (Monte Carlo Calculations 3D), моделирование аппаратного спектра выполняли с применением программы MCA (MultiChannel Analyzer).

Результаты: Сравнение экспериментальных и смоделированных спектров проводили в следующих энергетических интервалах: интервал, соответствующий суммарному пику полного поглощения (ППП) для гамма-линий энергий 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ для ^{60}Co и ППП для гамма-линии энергии 661,7 кэВ для ^{137}Cs ; интервалы, отвечающие комптоновскому рассеянию в диапазоне углов (30–60)°, (60–90)° и (90–180)° (для ^{60}Co рассматривалась средняя энергия гамма-излучения, равная 1252,9 кэВ); интервал, соответствующий многократному рассеянию гамма-квантов с энергией выше 100 кэВ. Установлено, что наибольшее отклонение смоделированного спектра от экспериментального составляет 12 % для интервала, соответствующего многократному рассеянию, что указывает на возможность идентичности спектров. Проверку данного предположения проводили для каждого энергетического интервала, используя критерий согласия Пирсона. Получено максимальное значение χ^2 , равное 6,6 для энергетического интервала, отвечающего комптоновскому рассеянию в диапазоне углов (60–90)°, что говорит о приемлемости гипотезы об идентичности экспериментальных и смоделированных спектров.

Валидация предложенного метода показала, что расхождение между расчетным и паспортным значениями активности образца составило не более 13 %, что свидетельствует о возможности использования метода для градуировки гамма-спектрометра. Рассчитаны зависимости эффективности регистрации гамма-излучения в ППП от плотности счетного образца с использованием смоделированных аппаратных спектров единичной активности.

Заключение: Предложенный метод позволяет проводить градуировку спектрометра для вычисления удельной активности в образцах при различных плотностях и энергиях с применением спектрометрического оборудования, оснащенного неорганическими сцинтилляционными кристаллами.

Ключевые слова: гамма-спектрометр, метод Монте-Карло, градуировка, радиационная безопасность

Для цитирования: Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Ярмийчук С.В., Петушок А.В. Применение метода Монте-Карло для градуировки сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 3. С. 108–116. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-108-116

D.V. Arefyeva, V.B. Firsanov, S.V. Yarmiychuk, A.V. Petushok

Application of the Monte-Carlo Method for Calibration of a Gamma-ray Scintillation Spectrometer

Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine, St. Petersburg, Russia

Contact person: D.V. Arefyeva, e-mail: dasha86@inbox.ru

ABSTRACT

Purpose: To develop a method for calibration of a gamma-ray scintillation spectrometer using the Monte Carlo method.

Material and methods: The subject of the study was a gamma-ray spectrometer designed to measure the energy distribution (spectrum) and determine the activity of gamma-emitting radionuclides. Experimental studies were carried out with a set of exemplary measures of special-purpose activity with radionuclides ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{60}Co and ^{137}Cs uniformly deposited on an ion exchange resin. Calibration of the spectrometer was carried out using the MCC 3D program (Monte Carlo Calculations 3D), modeling of the hardware spectrum was performed using the MCA program (MultiChannel Analyzer).

Results: The comparison of experimental and simulated spectra was carried out in the following energy intervals: the interval corresponding to the total peak of total absorption (PTA) for gamma energy lines 1173.2 keV and 1332.5 keV for ^{60}Co and PTA for gamma energy line 661.7 keV for ^{137}Cs ; intervals corresponding to Compton scattering in the angle range (30–60)°, (60–90)° and (90–180)° (for the ^{60}Co , the average gamma radiation energy of 1252.9 keV was considered); the interval corresponding to multiple scattering with an energy above 100 keV. It was found that the largest deviation of the simulated spectrum from the experimental one is 12 % for the interval corresponding to multiple scattering, which indicates the possibility of spectrum identity. This assumption was verified for each energy interval using the Pearson consensus criterion. A maximum value of χ^2 equal to 6.6 was obtained for the energy interval corresponding to Compton scattering in the angle range (60–90)°, which indicates the acceptability of the hypothesis of the identity of the experimental and simulated spectra. Validation of the proposed method showed that the discrepancy between the calculated and passport activity of the sample was no more than 13 %, which indicates the possibility of using the method for calibration of the gamma spectrometer. The dependences of the efficiency of registration in the PTA on the density of the counting sample are calculated using simulated hardware spectra of single activity.

Conclusion: The proposed method makes it possible to calibrate the spectrometer to calculate the specific activity in samples at various densities and energies using spectrometric equipment equipped with inorganic scintillation crystals.

Keywords: *gamma-ray spectrometer, Monte Carlo method, calibration, radiation safety*

For citation: Arefyeva DV, Firsanov VB, Yarmiychuk SV, Petushok AV. Application of the Monte-Carlo Method for Calibration of a Gamma-ray Scintillation Spectrometer. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(3):108–116. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-108-116

Введение

При проведении рутинных инструментальных исследований гамма-спектрометрические методы определения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционных детекторов на основе NaI(Tl) и CsI(Tl) являются экономически выгодными, простыми в использовании и надёжными способами определения удельной (объёмной) активности радионуклидов в пробах окружающей среды. Для определения активности радионуклида в образце необходимо проведение предварительной градуировки спектрометра по зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от энергии гамма-излучения в заданной геометрии измерения с применением стандартных образцов с известными значениями активности радионуклидов и плотности.

Однако в случае возникновения радиационной аварии (или инцидента), при которой может произойти выброс большого разнообразия радионуклидов, нет возможности изготовить образцовые меры для всего спектра этих радионуклидов. Кроме того, сцинтилляционные детекторы на основе NaI(Tl) и CsI(Tl) обладают низким энергетическим разрешением, что ограничивает возможность их использования в расшифровке сложных спектров из-за взаимного наложения гамма-линий.

С определенной точностью данная задача может быть решена при оптимальном сочетании как приборных методов градуировки спектрометра, так и методов математического моделирования с применением метода Монте-Карло. В настоящее время существует несколько программных продуктов, позволяющих моделировать системы переноса излучения с помощью метода Монте-Карло: MCNP (Monte-Carlo N-Particle Transport) [1], FLUKA Particle Transport Code [2], PENELOPE [3], GEANT4 [4]. Данные программы широко применяются как отечественными, так и зарубежными специалистами. Например, в работе [5] проведена градуировка детектора NaI(Tl) с помощью MCNP для определения уровней естественной радиоактивности (^{232}Th , ^{238}U и ^{40}K) в полевых условиях, полученные результаты показали хорошую сопоставимость. В работе [6] также с использованием MCNP (версия 4C) проведено моделирование цилиндрического и сферического детекторов NaI(Tl). Анализ соотношения между смоделированными и экспериментальными значениями эффективности регистрации гамма-излучения показал, что программе MCNP4C можно использовать для моделирования функций отклика данных сцинтилляторов. Каждый из этих программных продуктов имеет ряд преимуществ и недостатков, а также свою специфику построения имитационной модели (ее геометрию и физическую составляющую), однако в рассмотренных исследованиях проводится сравнение экспериментальных и смоделированных спектров только по эффективности регистрации гамма-излучения в ППП. В данной статье предлагается способ сравнения спектров не только в ППП, но и в областях комптоновского рассеяния, а также в области многократного рассеяния с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 .

Целью исследования является разработка способа градуировки спектрометра гамма-излучений с применением метода Монте-Карло.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведены спектрометрические исследования образцовых мер активности специального назначения;
- разработана имитационная модель измерительного комплекса в используемой геометрии измерения и проведено моделирование аппаратных спектров;
- проведена оценка идентичности экспериментальных и смоделированных спектров с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 ;
- проведена валидация разработанной имитационной модели;
- рассчитаны зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от плотности счетного образца с использованием смоделированных аппаратных спектров единичной активности;
- получены зависимости коэффициентов линейной аппроксимации от энергии гамма-излучения.

Материал и методы исследования

Объектом исследования являлся спектрометр гамма-излучений МКГБ-01 «РАДЭК» (Россия, ООО «НТЦ «РАДЭК»), предназначенный для измерения энергетического распределения (спектра) и определения активности гамма-излучающих радионуклидов. Спектрометр состоит из защитной камеры (рис. 1) и размещенного в ней одного блока детектирования на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) диаметром 80 мм и высотой 80 мм.

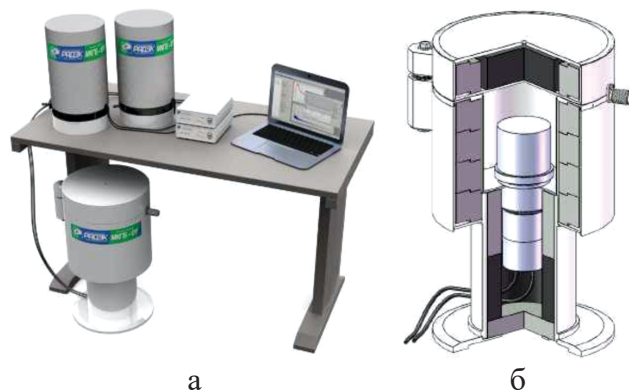


Рис. 1. Спектрометр альфа-, бета- и гамма-излучения МКГБ-01 «РАДЭК» (в сборе) (а), защитная камера для блока детектирования гамма-излучения (в разрезе) (б)

Fig. 1. The alpha, beta and gamma radiation spectrometer MKGB-01 «RADEK» assembled (a), a view of the protective camera in the section for the gamma radiation detection unit (b)

Экспериментальные исследования проведены с набором образцовых мер активности специального назначения (ОМАСН) с радионуклидами ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{60}Co и ^{137}Cs , равномерно осажденными на ионообменную смолу. ОМАСН представляют собой сосуды в форме усе-

ченного конуса объемом 250 мл и плотностью 1,0 г/см³. С ⁶⁰Со и ¹³⁷Cs проведены серии из шести, а с ²⁴¹Am и ¹⁵²Eu серии из трех измерений соответственно.

Градуировку спектрометра гамма-излучения осуществляли с применением программы MCC 3D (Monte-Carlo Calculations 3D), позволяющей проводить симуляцию прохождения излучения через вещество методом Монте-Карло. Моделирование аппаратного спектра выполняли с применением программы для визуализации и обработки расчетных спектров MCA (MultiChannel Analyzer), входящей в пакет MCC 3D [7].

Результаты и обсуждение

Для математического моделирования процесса переноса гамма-излучающих радионуклидов в образце в геометрии измерения «250 мл» с применением программы MCC 3D разработана имитационная модель измерительного комплекса, включающая модель спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» – камера фоновой защиты с блоком детектирования, а также модель ОМАСН – сосуд в форме усеченного конуса объемом 250 мл и плотностью 1,0 г/см³ (рис. 2).

Блок детектирования на основе кристалла NaI(Tl) смоделирован с учетом спектрометрических параметров и геометрических размеров составляющих его частей [8], а также Технических условий [9]. Он включает: кристалл NaI(Tl) диаметром 80 мм и высотой 80 мм, отражатель света из MgO, алюминиевый корпус кристалла, фотозлектронный умножитель и корпус детектора.

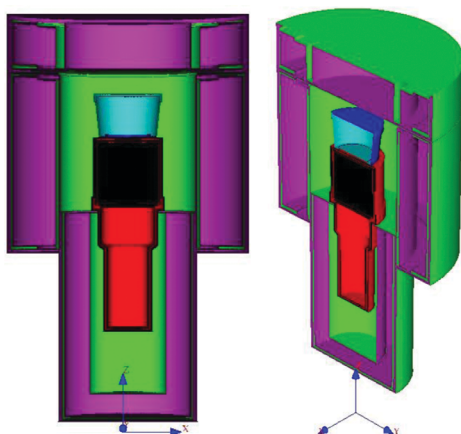


Рис. 2. Имитационная модель измерительного комплекса (сиреневый – низкофоновая защитная камера, черный – сцинтилляционный кристалл, красный – корпус детектора, голубой – ОМАСН)

Fig. 2. Simulation model of the measuring complex (lilac – low-background protective camera, black – scintillation crystal, red – detector housing, blue – OMASN)

В результате моделирования процесса переноса гамма-излучения получены функции отклика спектрометра, в которых не учитывается форма и энергетическое разрешение спектрометра. Для получения аппаратного спектра в программе MCA предусмотрен ввод нескольких параметров, влияющих на разрешение и форму смоделированного спектра: E_e – энергия на один электрон (эВ/электрон), B – неоднородность детектора и Φ – фактор Фано [10]. Проведенные исследования с «точечными» источниками типа ОСГИ с радионуклидами ¹⁵²Eu, ²²Na, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs позволили получить зависимость фактора Фано от энергии гамма-излучения, при которой смоделированный спектр максимально приближен к экспериментальному (при двух других постоянных па-

раметрах $E_e = 1000$ эВ/эл и $B = 1 \times 10^{-5}$). Зависимость фактора Фано от энергии гамма-излучения аппроксимируется степенной функцией (формула 1):

$$\Phi = 0,0354 \times E^{0,4194} \quad (1)$$

где Φ – фактор Фано, отн. ед.; E – энергия гамма-излучения, кэВ.

Таким образом, схема моделирования аппаратного спектра какого-либо радионуклида состоит в моделировании его основных гамма-линий (с квантовым выходом более 1 %) с учетом фактора Фано для каждой энергии гамма-излучения и последующем их поканальном суммировании.

В качестве примера на рис. 3 представлены смоделированные спектры отдельных гамма-линий ¹⁵²Eu, а на рис. 4 – суммарный смоделированный спектр радионуклида ¹⁵²Eu (а) и смоделированный спектр ²⁴¹Am (б) в сравнении с экспериментальными аппаратными спектрами.

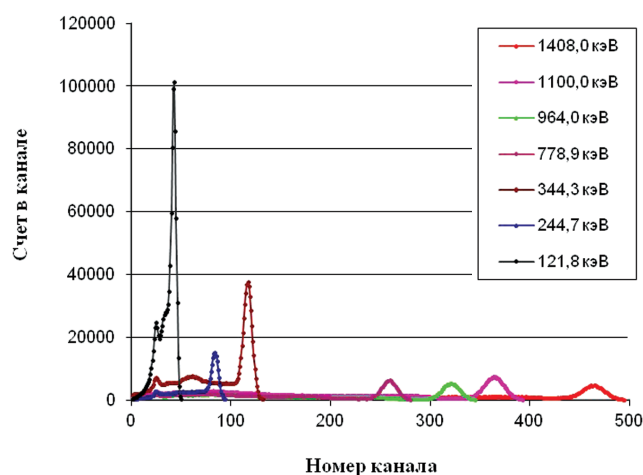


Рис. 3. Смоделированные спектры основных гамма-линий ¹⁵²Eu

Fig. 3. Simulated spectra of the main gamma lines of ¹⁵²Eu

Отклонение смоделированного спектра от экспериментального составило:

- для ¹⁵²Eu – 17,0 % (в энергетическом интервале от 100 до 2000 кэВ);
- для ²⁴¹Am – 8,0 % (в ППП).

Так как процесс моделирования является статистическим, для оценки идентичности спектров было смоделировано по шесть аппаратных спектров с ¹³⁷Cs и ⁶⁰Со. Для указанных радионуклидов на рис. 5 представлено по одному экспериментальному и смоделированному спектру.

Сравнение экспериментальных и смоделированных спектров проводили в следующих энергетических интервалах:

- интервал, соответствующий суммарному ППП для гамма-линий с энергией 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ для ⁶⁰Со и ППП для гамма-линии с энергией 661,7 кэВ для ¹³⁷Cs;
- интервалы, отвечающие комптоновскому рассеянию в диапазоне углов (30–60)°, (60–90)° и (90–180)° (для ⁶⁰Со рассматривалась средняя энергия гамма-излучения, равная 1252,9 кэВ);
- интервал, соответствующий многократному рассеянию с энергией выше 100 кэВ.

Для каждого i -го измерения (спектра) и выбранного интервала рассчитывали среднее значение коэффициен-

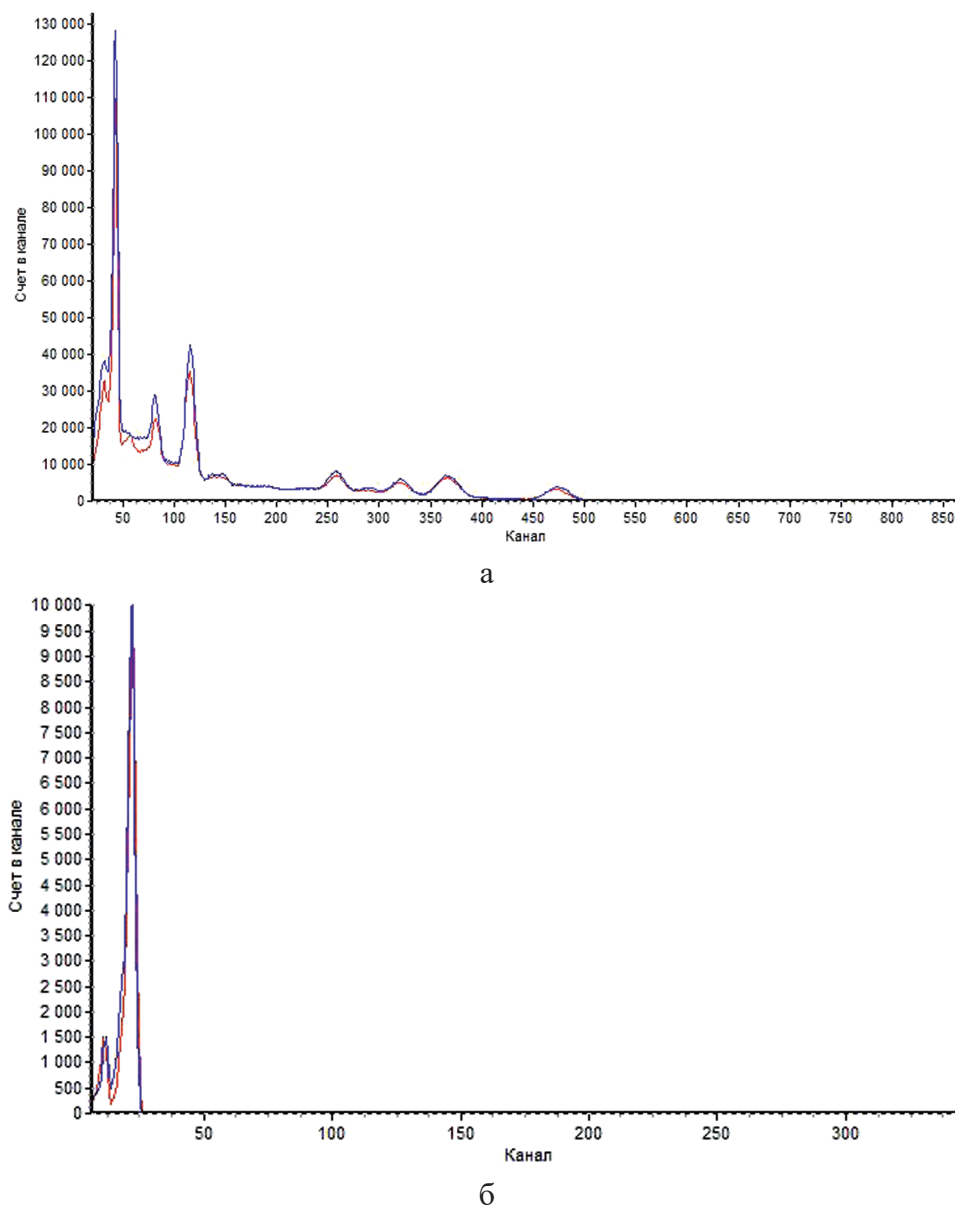


Рис. 4. Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения от ОМАСН с ^{152}Eu (а) и ^{241}Am (б)
 Fig. 4. Experimental minus background (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra from OMASN with ^{152}Eu (a) and ^{241}Am (б)

та $\overline{K_{\text{ЭР}}}$ (отн. ед.), учитывающего значение активности радионуклидов $A_{\text{э}}$ (Бк), число реализуемых событий при моделировании $A_{\text{м}} = 1 \times 10^7$ (расп./с), отношение скоростей счета от экспериментальных спектров за вычетом фона и отношение скоростей счета от смоделированных спектров для каждого радионуклида:

$$\overline{K_{\text{ЭР}}} = \frac{A_{\text{м}}}{m \times A_{\text{э}}} \times \sum_{i=1}^{m=12} \frac{n_{\text{э}} - \overline{n_{\text{ф}}}}{n_{\text{им}}}, \quad (2)$$

где $n_{\text{э}}$, $n_{\text{им}}$, $\overline{n_{\text{ф}}}$ – скорости счета от экспериментального, смоделированного спектров и средняя (по результатам трех измерений) скорость счета фона, соответственно, с^{-1} .

Проведенные результаты расчета коэффициентов $\overline{K_{\text{ЭР}}}$ в выбранных энергетических интервалах показали, что наибольшее отклонение смоделированного спектра от экспериментального составляет 12 % для интервала, соответствующего многократному рассеянию, что указывает на возможность признания идентичности спектров. Проверку этого предположения проводили для каждого энергетического интервала, используя критерий

согласия Пирсона χ^2 [11], который позволяет проверить значимость расхождения эмпирических (наблюдаемых) и теоретических (ожидаемых) значений. Результаты расчета значений коэффициентов $\overline{K_{\text{ЭР}}}$ и χ^2 для каждого энергетического интервала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициентов $\overline{K_{\text{ЭР}}}$ и χ^2 в выбранных энергетических интервалах
 The results of calculating the coefficients and χ^2 in the selected energy intervals

Энергетический интервал	Значение коэффициента $\overline{K_{\text{ЭР}}}$, отн. ед.	Значение коэффициента χ^2 , отн. ед.
Пик полного поглощения	0,999	0,25
(30–60)°	1,008	6,22
(60–90)°	1,059	6,60
(90–180)°	1,029	1,79
Многократное рассеяние	0,988	1,75

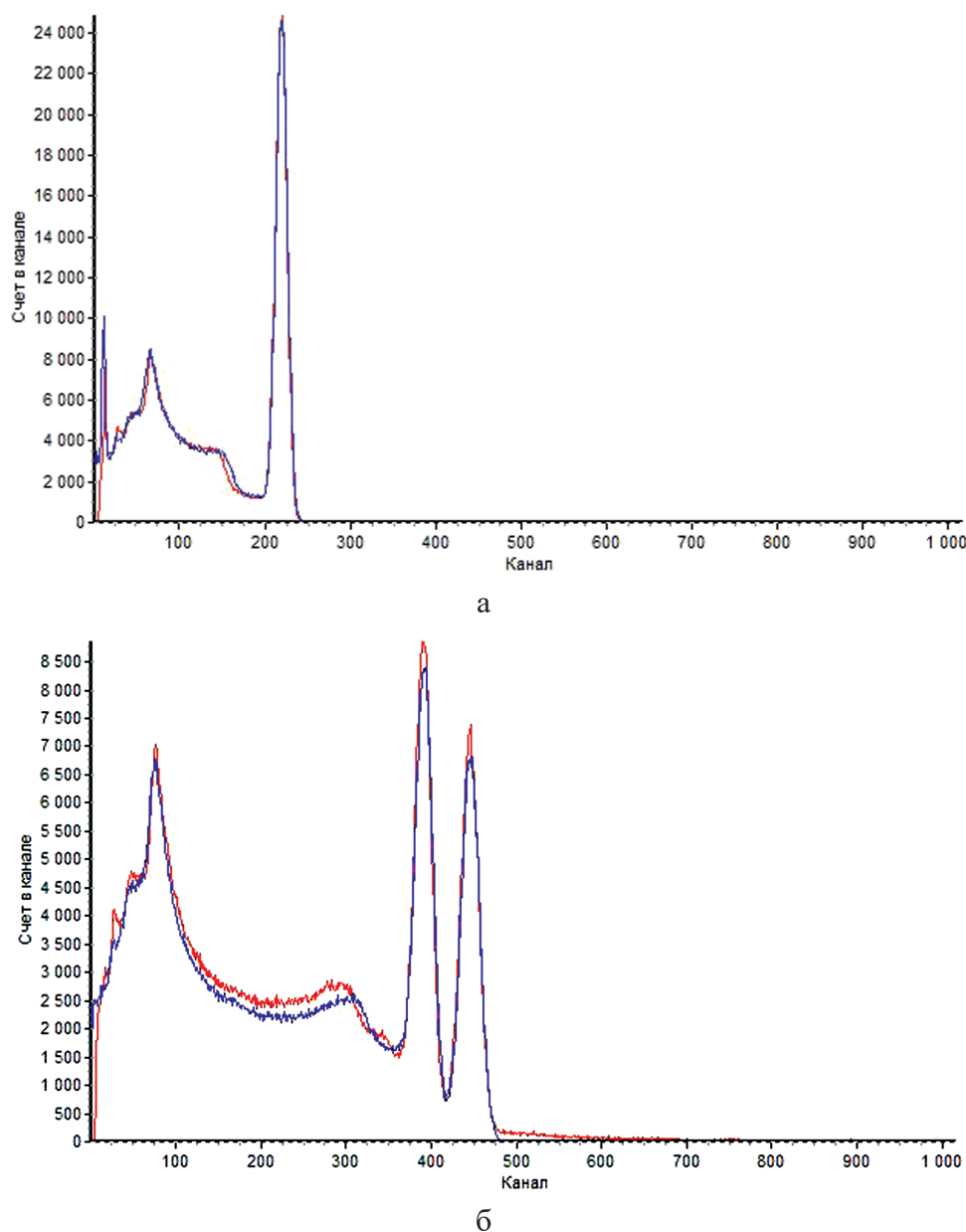


Рис. 5. Экспериментальный за вычетом фона (красный) и смоделированный (синий) спектры гамма-излучения от OMASN с ^{137}Cs (а) и ^{60}Co (б)
 Fig. 5. Experimental minus background (red) and simulated (blue) gamma-ray spectra from OMASN with ^{137}Cs (a) and ^{60}Co (б)

Для числа степеней свободы $\nu = (2m - 1)$ и уровня значимости 0,05 критическое значение распределения χ^2 составляет 35,2 [11]. Из данных табл. 1 следует, что максимальное значение χ^2 составляет 6,6 для энергетического интервала, отвечающего комптоновскому рассеянию в диапазоне углов $(60-90)^\circ$, что говорит о приемлемости гипотезы об идентичности экспериментальных и смоделированных спектров. Расчет погрешности предполагаемого гипотетического значения $K_{\text{гр}}$, равного единице, означающего, что смоделированный спектр полностью совпадает с экспериментальным в каждом энергетическом интервале, показал, что смоделированный спектр гамма-излучения идентичен экспериментальному в пределах 21,0 % при вероятности $p = 0,90$.

На основании этого можно сделать вывод о возможности перехода к валидации предложенной методики градуировки с применением смоделированных аппаратных спектров для расчета активности радионуклидов.

Для этого использован счетный образец объемом 250 мл, заполненный «неизвестным» радиоактивным материалом, осажденным на ионообменную смолу, плотно-

стью $1,0 \text{ г/см}^3$, с последующим сравнением с паспортными значениями активности, измеренный в геометрии «250 мл» при расположении его вплотную к блоку детектирования.

На рис. 6 приведен аппаратный спектр от счетного образца, в котором были обнаружены ^{226}Ra , ^{133}Ba и ^{137}Cs .

Для расчета активности смоделированы аппаратные спектры этих радионуклидов. Для примера на рис. 7 приведен спектр от счетного образца за вычетом смоделированного спектра ^{226}Ra , обработка которого проведена матричным методом [12].

Результаты расчета значений активности ^{226}Ra , ^{133}Ba и ^{137}Cs в счетном образце и их паспортные значения приведены в табл. 2.

Согласно данным, представленным в табл. 2, расхождение в результатах расчета значений активности в образце не превышает 13 %, что говорит о хорошем совпадении результатов с паспортными значениями активности и, следовательно, о возможности применения метода градуировки спектрометров гамма-излучений с использованием программы имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации

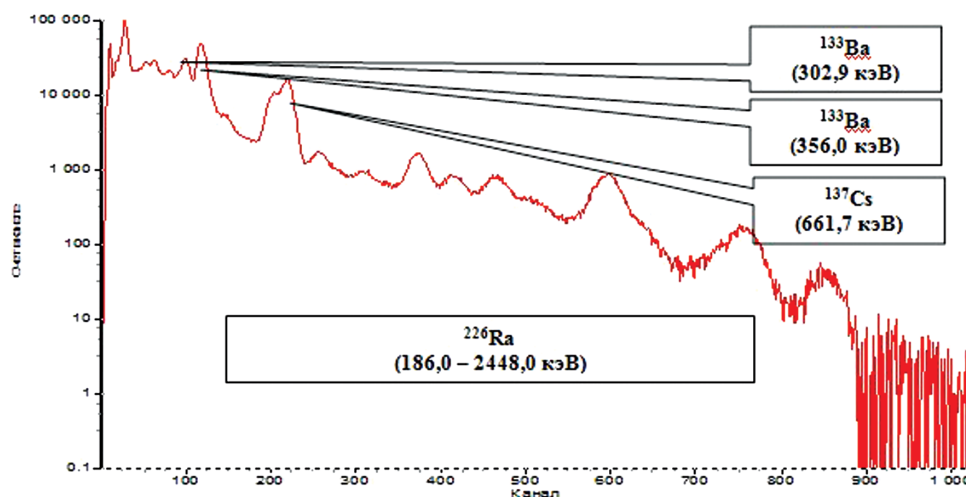


Рис. 6. Экспериментальный спектр от счетного образца за вычетом фона

Fig. 6. The experimental spectrum from the counting sample minus the background

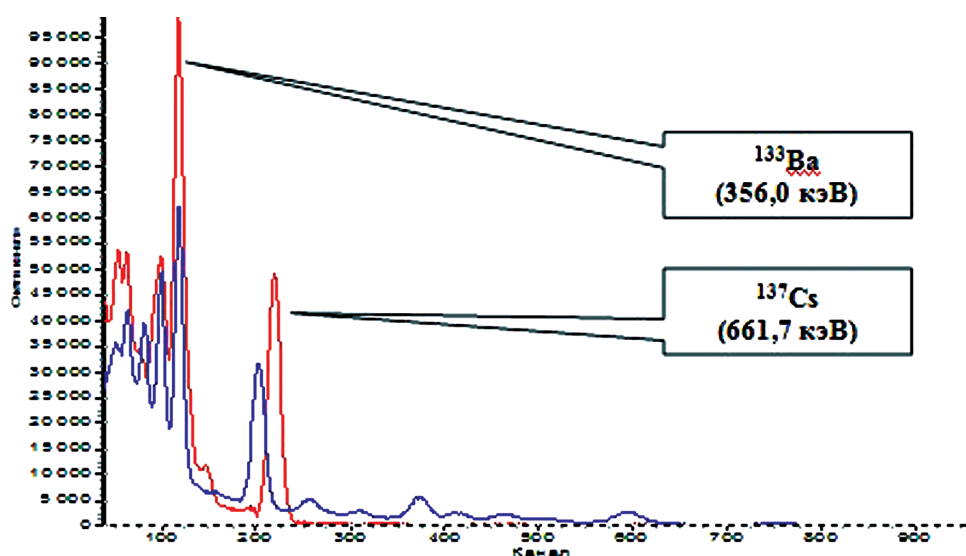
Рис. 7. Экспериментальный спектр от счетного образца за вычетом спектра ^{226}Ra (красный) и смоделированный аппаратный спектр радионуклида ^{226}Ra (синий)Fig. 7. The experimental spectrum from the counting sample minus the spectrum of ^{226}Ra (red) and the simulated instrumental spectrum of radionuclide ^{226}Ra (blue)

Таблица 2

Сравнение результатов расчета значений активности ^{226}Ra , ^{133}Ba и ^{137}Cs в счетном образце, полученных матричным методом, с паспортными значениями

Comparison of the results of calculating the activity of radionuclides ^{226}Ra , ^{133}Ba and ^{137}Cs in a counting sample obtained by the matrix method with passport values

Радионуклид	Активность, Бк		Отклонение паспортного значения от расчетного, %
	паспортное значение на дату измерения	расчетное значение	
^{226}Ra	2560	2740	7,0
^{137}Cs	2340	2530	8,1
^{133}Ba	2560	2890	12,8

ионизирующих излучений для обработки измеренных спектров, в частности, на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКГБ-01 «РАДЭК».

При первичной градуировке спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» в геометрии измерения «250 мл» с применением ОМАСН с радионуклидами ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th различной плотности были получены значения чувствительности регистрации в следующих энергетических интервалах:

- от 100 до 150 кэВ для ^{57}Co ;
- от 612 до 709 кэВ для ^{137}Cs ;
- от 1385 до 1540 кэВ для ^{40}K ;
- от 1677 до 1846 кэВ для ^{226}Ra ;
- от 2500 до 2720 кэВ для ^{232}Th .

Для сравнения с экспериментальными данными были смоделированы аппаратные спектры этих радионуклидов с аналогичными значениями плотности ОМАСН. В табл. 3 приведены значения отклонения экспериментальной чувствительности регистрации и значений, рассчитанных из смоделированных спектров, которые как видно из табл. 3, не превышают 13 %.

Таким образом, полученные сравнительные значения чувствительности регистрации позволяют построить зависимости эффективностей регистрации от плотности счетного образца для различных энергий гамма-излучения с применением смоделированных аппаратных спектров. Программа МСС 3D позволяет смоделировать аппаратный спектр не только отдельного гамма-излучающего радионуклида, но и получить спектр гамма-излучения любой энергии и счетного образца любой плотности. Для получения зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от плотности счетного

Таблица 3

Сравнение значений чувствительности регистрации для радионуклидов ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th

Comparison of registration sensitivities for radionuclide ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th

Плотность ОМАСН, г/см ³	Чувствительность регистрации, имп./с·Бк		Отклонение, %
	эксперимент	модель	
Сравнение чувствительности регистрации для ⁵⁷ Co			
0,20	0,1145	0,1037	10,4
1,00	0,09937	0,08982	10,6
1,80	0,07937	0,07776	2,1
Сравнение чувствительности регистрации для ¹³⁷ Cs			
0,20	0,03436	0,03422	0,4
0,96	0,03084	0,03003	2,6
1,76	0,02705	0,02636	2,6
Сравнение чувствительности регистрации для ⁴⁰ K			
0,18	0,00216	0,00199	7,9
1,04	0,00195	0,00180	7,7
1,60	0,00174	0,00166	4,6
Сравнение чувствительности регистрации для ²²⁶ Ra			
0,204	0,00471	0,00412	12,5
1,096	0,00426	0,00378	11,3
1,860	0,00397	0,00348	12,3
Сравнение чувствительности регистрации для ²³² Th			
0,212	0,00388	0,00428	10,3
1,040	0,00371	0,00395	6,5
1,904	0,00358	0,00370	3,4

образца в геометрии измерения «250 мл» в энергетическом интервале от 100 до 3000 кэВ смоделированы аппаратные спектры отдельных гамма-линий с учетом 100 % квантового выхода и рассчитаны значения эффективности регистрации в ППП (рис. 8).

Полученные зависимости эффективности регистрации гамма-излучения хорошо аппроксимируются линейными функциями (величина достоверности аппроксимации R^2 [13] не менее 0,98):

$$\varepsilon = A + B \times \rho, \quad (4)$$

где ε – эффективность регистрации гамма-излучения в ППП, отн.ед., ρ – плотность счетного образца объемом 250 мл, г/см³, A , B – коэффициенты линейной аппроксимации.

На рис. 9 приведены зависимости коэффициентов линейной аппроксимации (A – синяя линия, B – красная линия) от энергии гамма-излучения, которые хорошо аппроксимируются степенной функцией и полиномом пятого порядка (формулы 5, 6). Величина достоверности аппроксимации R^2 не менее 0,96.

$$A = 3,425 \times E^{-0,701}, \quad (5)$$

$$B = 9,50 \times 10^{-19} \times E^5 - 9,37 \times 10^{-15} \times E^4 + 3,59 \times 10^{-11} \times E^3 - 6,75 \times 10^{-8} \times E^2 + 6,41 \times 10^{-5} \times E - 0,0277, \quad (6)$$

где E – энергия гамма-излучения, кэВ.

Таким образом, для любой энергии гамма-излучения возможно рассчитать коэффициенты линейной аппроксимации A и B , что позволяет впоследствии, учитывая плотность счетного образца, оценить эффективность регистрации в ППП.

Заключение

Основываясь на результатах, полученных в ходе настоящего исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная имитационная модель гамма-спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» с моделью счетного образца предоставляет возможность моделирования аппаратных спектров гамма-излучения в диапазоне энергий от 100 до 3000 кэВ с погрешностью, не превышающей 21,0 %, полученной путем сравнения экспериментальных и смоделированных спектров с применением критерия согласия Пирсона χ^2 .

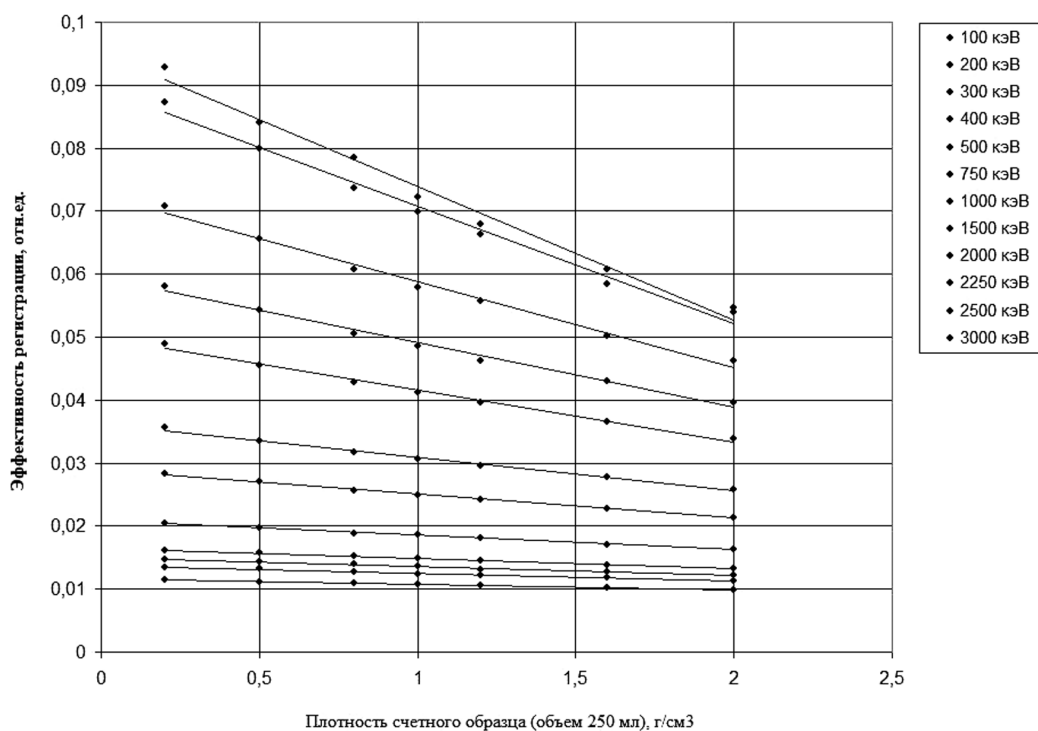


Рис. 8. Зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от плотности счетного образца для гамма-излучения различных энергий

Fig. 8. Dependences of the registration efficiency on the density of the counting sample for different gamma radiation energies

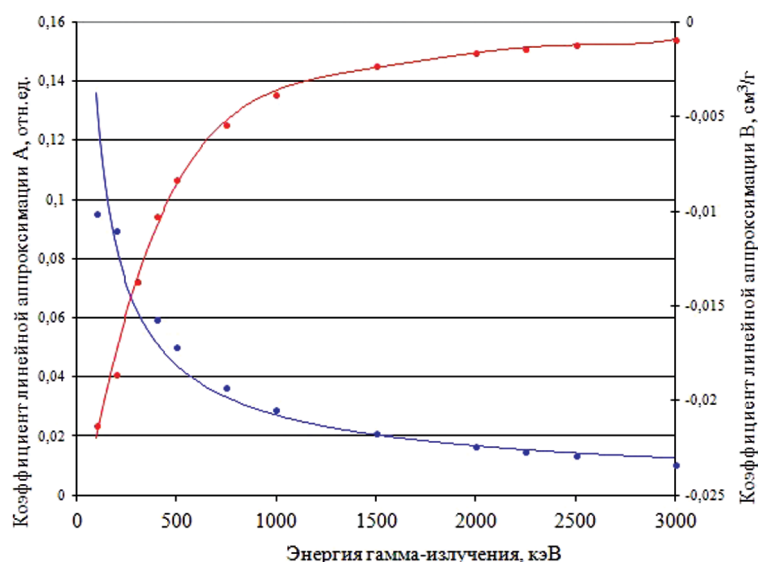


Рис. 9. Зависимости коэффициентов линейной аппроксимации A (синий) и B (красный) от энергии гамма-излучения

Fig. 9. The dependence of the coefficients of linear approximation A (blue) and B (red) on the energy of gamma radiation

2. Валидация предложенного метода градуировки сцинтилляционного спектрометра с применением математического моделирования показала, что расхождение результатов расчета активности в счетном образце радионуклидов не превышает 13,0 % по сравнению с паспортными значениями.
3. Предложенный метод может быть использован для градуировки спектрометров со сцинтилляционными блоками детектирования различных модификаций для различных геометрий измерения.
4. Полученные зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от плотности счетного об-

разца и зависимости коэффициентов линейной аппроксимации от энергии гамма-излучения позволяют рассчитать удельную активность в счетном образце для различных плотностей и энергий гамма-излучения.

5. Использование предлагаемого метода позволяет при проведении рутинных исследований проб с известным радионуклидным составом применять спектрометрическое оборудование на основе неорганических сцинтилляционных кристаллов вместо дорогостоящего оборудования с полупроводниковыми детекторами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Monte Carlo N-Particle Transport Code. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MCNP>.
2. Fluka Particle Transport Code. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/FLUKA>.
3. Penelope. A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport URL: <http://www.mcnpvised.com/visedtraining/penelope/penelope0.pdf>.
4. Уроки и обучающие примеры по Geant4. Электронный ресурс: <https://dev.asifmoda.com/geant4>. (дата обращения: 24.09.2024)
5. Cinelli G., Tositti L., Mostacci D., Bare J. Calibration with MCNP of NaI Detector for the Determination of Natural Radioactivity Levels in the Field // Journal of Environmental Radioactivity 2019. V.155. No.156. P. 31-37
6. Mouhti I., Elanigue A., Messous M.Y. Monte Carlo Modelling of a NaI(Tl) Scintillator Detectors Using MCNP Simulation Code // J. Mater. Environ. Sci. 2017. V.8. No.12. P. 4560-4565.
7. Багаев К.А., Козловский С.С., Новиков И.Э. Программа для имитационного трехмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений на базе развитого графического интерфейса // АНРИ. 2007. №4. С. 35-40.
8. Спектрометры-радиометры гамма-, бета- и альфа-излучения МКГБ-01 «РАДЭК»: Руководство по эксплуатации. СПб.: Научно технический центр РадЭК, 2012. 60 с.
9. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные на основе кристаллов натрия йодистого, активированного таллием: ТУ 2651-001-26083472-2015. Усолье-Сибирское: Кристалл. 2015. 10 с.
10. Капитонов М.И. Ядерная резонансная флуоресценция: Учебник. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова., 2018. 128 с.
11. Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куроч Д.Д. и др. Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования // Радиационная гигиена. 2020. Т.13. № 4. С. 93-100. doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100. EDN ZAAYGU.
12. Силантьев А.Н. Спектрометрический анализ радиоактивных проб внешней среды. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 185 с.
13. Малышева Т.А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций: Учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 33 с.

REFERENCES

1. Monte Carlo N-Particle Transport Code. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MCNP>.
2. Fluka Particle Transport Code. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/FLUKA>.
3. Penelope. A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport URL: <http://www.mcnpvised.com/visedtraining/penelope/penelope0.pdf>.
4. Lessons and Training Examples on Geant4. URL: <https://dev.asifmoda.com/geant4>.
5. Cinelli G., Tositti L., Mostacci D., Bare J. Calibration with MCNP of NaI Detector for the Determination of Natural Radioactivity Levels in the Field. Journal of Environmental Radioactivity. 2019;155;156:31-37.

6. Mouhti I., Elanique A., Messous M.Y. Monte Carlo Modelling of a NaI(Tl) Scintillator Detectors Using MCNP Simulation Code. *J. Mater. Environ. Sci.* 2017;8;12:4560-4565.
7. Bagayev K.A., Kozlovskiy S.S., Novikov I.E. Program for 3D Simulation Modeling of Detection and Registration Systems of Ionizing Radiation Based on a Developed Graphical Interface. *ANRI.* 2007;4:35-40 (In Russ.).
8. Spectrometers-Radiometers of Gamma, Beta and Alpha Radiation MKGB-01 "RADEK": Operation Manual. St. Petersburg, Nauchno Tekhnicheskiy Tsentr Radek Publ., 2012. 60 p. (In Russ.).
9. Scintillation Detectors of Ionizing Radiation Based on Sodium Iodide Crystals Activated by Thallium. TU 2651-001-26083472-2015. Usolye-Sibirskoye, Kristall, 2015. 10 p. (In Russ.).
10. Kapitonov M.I. *Yadernaya Rezonansnaya Fluorestsentsiya* = Nuclear Resonance Fluorescence. Textbook. Moscow, MGU im. M.V.Lomonosova Publ., 2018. 128 p. (In Russ.).
11. Aref'yeva D.V., Firsanov V.B., Kuruch D.D., et al. Calibration of a Gamma-Ray Scintillation Spectrometer Using the Mathematical Modeling Method. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene. 2020;13;4:93-100 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100. EDN ZAAYGU..
12. Silant'yev A.N. *Spektrometricheskii Analiz Radioaktivnykh Prob Vneshney Sredy* = Spectrometric Analysis of Radioactive Samples of the External Environment. Leningrad, Gidrometeorologicheskoye Izdatel'stvo Publ., 1969. 185 p. (In Russ.).
13. Malysheva T.A. *Chislennyye Metody i Komp'yuternoye Modelirovaniye. Laboratornyy Praktikum po Approksimatsii Funktsiy.* Tutorial. St. Petersburg, ITMO Publ., 2016. 33 p. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.02.2025. Принята к публикации: 25.03.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.02.2025. Accepted for publication: 25.03.2025.