

УДК 539.1.08:539.16.08

ОЦЕНКА ВКЛАДА РАССЕЯННОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОКАЗАНИЯ ДОЗИМЕТРА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В НИЗКОФОНОВОЙ КАМЕРЕ

А. А. ЗАГОРОДНЮК¹⁾, Р. В. ЛУКАШЕВИЧ¹⁾

¹⁾Атомтех, ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

С помощью моделирования Монте-Карло оценен вклад ионизирующего гамма-излучения, рассеянного на конструкционных материалах, в суммарную мощность дозы при измерениях в низкофоновой камере. В компьютерной программе *Fluka* создана модель низкофоновой камеры и размещенных в ней сцинтилляционного дозиметрического блока детектирования БДКГ-05К и точечного источника гамма-излучения с радионуклидом ¹³⁷Cs. Доля рассеянного излучения рассчитана путем сравнения модельных показаний прибора при измерении мощности дозы внутри низкофоновой камеры с модельными показаниями прибора при измерении мощности дозы в вакууме (в последнем случае рассеянное излучение отсутствует). Моделирование выполнено для двух положений прибора относительно источника (на расстоянии 30 и 100 см). Установлено, что максимальный вклад рассеянного излучения в мощность дозы достигает 38 %. Для минимизации вклада рассеянного излучения в мощность дозы использована конструкция в виде коллиматора, внутри которого располагается источник. Дополнительно исследована зависимость мощности дозы, формируемой рассеянным излучением, от конструктивных особенностей коллиматора. Показано, что использование коллиматора позволяет снизить вклад рассеянного излучения до 3 %. Цель работы – оценка доли рассеянного излучения и расчет оптимальной конструкции коллиматора, при которой вклад рассеянного излучения в суммарную мощность дозы будет минимальным.

Ключевые слова: моделирование Монте-Карло; *Fluka*; низкофоновая камера; ионизирующее излучение; дозиметрия; рассеянное излучение.

Образец цитирования:

Загороднюк АА, Лукашевич РВ. Оценка вклада рассеянного ионизирующего излучения в показания дозиметра при измерениях в низкофоновой камере. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;1:98–108. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-98-108>

For citation:

Zaharadniuk AA, Lukashevich RV. Estimation of the contribution of scattered ionising radiation to the dosimeter readings during measurements inside a low-background chamber. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2022;1:98–108. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-98-108>

Авторы:

Алексей Александрович Загороднюк – инженер 2-й категории сектора дозиметрии.

Роман Васильевич Лукашевич – начальник сектора дозиметрии.

Authors:

Aleksei A. Zaharadniuk, engineer of the 2nd category at the dosimetry sector.

fiz.zagorodnaa@gmail.com

Roman V. Lukashevich, head of the dosimetry sector.

lukashevich@atomtex.com

ESTIMATION OF THE CONTRIBUTION OF SCATTERED IONISING RADIATION TO THE DOSIMETER READINGS DURING MEASUREMENTS INSIDE A LOW-BACKGROUND CHAMBER

A. A. ZAHARADNIUK^a, R. V. LUKASHEVICH^a

^aAtomtex, 5 Hikala Street, Minsk 220005, Belarus

Corresponding author: A. A. Zaharadniuk (fiz.zagorodnaa@gmail.com)

The article evaluates the contribution of ionising gamma radiation scattered by structural materials when measuring the dose rate in a low-background chamber. The contribution of scattered radiation to the total dose rate was estimated using Monte Carlo simulations. A model of a low-background camera and a BDKG-05K dosimeter was created in the computer program *Fluka*. In addition, a model of a point source of ^{137}Cs gamma radiation was placed in the low-background chamber. The fraction of scattered radiation was calculated by comparing the dosimeter readings when measuring the dose rate inside the low-background chamber with the reference model (the dosimeter model is placed together with the source in a vacuum, as a result, scattered radiation is completely absent). The calculation was carried out for two positions of the dosimeter relative to the source (30 and 100 cm). It was found that the contribution of scattered radiation to the dose rate reaches 38 % (distance from the source to the detector is 100 cm). To minimise the contribution of scattered radiation to the readings of the dosimeter, a design in the form of a collimator, inside which the source is located, was considered. Additionally, the work investigated the dependence of the dose rate formed by the scattered radiation on the design features of the collimator. It was found that the use of a collimator makes it possible to reduce the contribution of scattered radiation to 3 %. The aim of the work was to calculate the optimal design of the collimator, in which the contribution of scattered radiation to the total dose rate will be minimal. The results of the work will be used to create a prototype of a low-background camera and an optimised collimator.

Keywords: Monte Carlo modelling; *Fluka*; low-background chamber; ionising radiation; dosimetry; scattering radiation.

Введение

В настоящее время измерение полей ионизирующего излучения, формирующих низкие и сверхнизкие мощности дозы (МД), является актуальной и востребованной задачей в таких областях науки и техники, как радиационный мониторинг, ядерная и радиационная безопасность, метрология и др. [1]. Для измерения МД в подобных околофоновых радиационных полях необходимо использовать высокочувствительные дозиметры (например, с детекторами на основе неорганических скинтилляторов).

У дозиметра нижняя граница измерения МД в заданной точке в основном определяется МД, формируемой фоновым излучением. Под фоновым излучением подразумевается излучение, создаваемое любыми источниками ионизирующего излучения, отличными от измеряемого образца (или источника). Типичными источниками фонового излучения являются:

- 1) естественные радионуклиды, распределенные в почве и стройматериалах (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) [2];
- 2) космическое излучение, представленное на поверхности планеты потоком протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов [3];
- 3) промышленные и техногенные радионуклиды, попавшие в атмосферу в результате испытания ядерного оружия либо аварий на ядерных объектах (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{60}Co).

Для обеспечения измерений низкоактивных образцов, а также калибровки дозиметров в диапазонах МД ниже фоновых значений используются подземные низкофоновые лаборатории, расположенные в соляных шахтах (лаборатория UDO II PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) в Германии и лаборатория IFIN-HH (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară «Horia Hulubei») в Румынии) [4]. Однако измерения и калибровки по МД в околофоновых полях фотонного излучения в таких лабораториях ограничены их расположением, что создает определенные сложности при проведении периодических измерений. Альтернативным решением данной задачи может быть применение низкофоновых защитных камер. Типичная низкофоновая камера, как правило, представляет собой полость, окруженную слоем конструкционного материала, основное предназначение которого – снижение интенсивности внешнего ионизирующего излучения в целях минимизации его влияния на дозиметр, находящийся внутри данной камеры. Путем подбора конструкционных материалов и толщины стенки можно добиться того, чтобы МД фонового излучения внутри камеры не превышала 2 нЗв/ч.

В процессе проведения измерений в низкофоновой камере, помимо излучения, приходящего непосредственно от источника (излучение в прямом пучке), на детектор попадает излучение, рассеянное

на конструкционных материалах стенок. Интенсивность и спектр рассеянного излучения при заданных характеристиках источника сильно зависят как от материалов стенок, так и от геометрии самой камеры. Рассеянное излучение является нежелательным ввиду того, что оно искажает показания дозиметра, внося существенную погрешность в результат измерения. Одним из возможных способов минимизации влияния рассеянного излучения на показания прибора при измерениях МД в низкофоновой камере выступает использование дополнительного устройства – коллиматора, позволяющего существенно снизить интенсивность излучения вне прямого пучка.

Основной целью данной работы являлись оценка вклада рассеянного излучения при измерениях МД, создаваемой точечным источником ^{137}Cs , в низкофоновой камере большого размера (внутренний объем камеры – $0,83 \text{ м}^3$) и расчет оптимальной конструкции коллиматора, позволяющей минимизировать этот вклад. Результаты работы будут использованы при создании опытного образца рабочего эталона 3-го разряда, предназначенного для поверки, калибровки и исследований дозиметрических средств измерений по МД в диапазоне $0,03\text{--}0,30 \text{ мкЗв/ч}$ в соответствии с поверочной схемой¹.

Методика исследования

Оценка вклада рассеянного излучения была проведена с помощью моделирования Монте-Карло путем создания компьютерной модели низкофоновой камеры в программе *Fluka*² (версия 4.1.1) [5]. Данная программа является кодом Монте-Карло широкого профиля, позволяющим моделировать взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. В общем виде алгоритм расчета вклада рассеянного излучения в значение МД может быть представлен следующей последовательностью действий:

- 1) создание и верификация компьютерной модели детектора, т. е. построение компьютерной модели Монте-Карло и ее сравнение с реальным прибором;
- 2) расчет референсных значений МД, формируемой точечным источником ионизирующего излучения, расположенным на заданном расстоянии относительно переднего края модели дозиметра (прибор и источник размещены в вакууме, следовательно, в такой модели полностью отсутствует рассеянное излучение);
- 3) создание модели низкофоновой камеры и расчет значений МД, формируемой точечным источником внутри камеры в той же геометрии, которая использовалась в п. 2;
- 4) создание модели коллиматора и расчет МД внутри низкофоновой камеры при размещении источника излучения внутри коллиматора в геометрии, используемой в п. 2, а также определение оптимальной конструкции коллиматора путем варьирования его параметров.

Создание и верификация компьютерной модели детектора

В качестве основы для построения компьютерной модели детектора использовался блок детектирования БДКГ-05К, разработанный и произведенный предприятием «Атомтех» (детектор – сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) размером $40 \times 40 \text{ мм}$; количество каналов АЦП – 1024, диапазон энергий – от 40 кэВ до 3 МэВ, диапазон измерения МД – от 100 нЗв/ч до 50 мкЗв/ч , предел основной относительной погрешности измерения МД – 7 %).

Создание и верификация модели (рис. 1) происходили согласно алгоритму, описанному в работах [6; 7].

Шаг 1. Реальный прибор, работающий в спектрометрическом режиме, последовательно облучался излучением набора радионуклидов с известным спектром. В качестве опорных радионуклидов в эксперименте использовались следующие источники гамма-излучения: ^{241}Am , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{113}Sn , ^{88}Y , ^{65}Zn . В результате измерений был получен набор аппаратурных спектров прибора.

Шаг 2. Путем анализа параметров пиков полного поглощения аппаратурных спектров строилась кривая зависимости полной ширины пика на полувысоте от положения центроиды этого пика на энергетической шкале. Далее кривая аппроксимировалась следующей формулой в целях определения необходимых констант [7; 8; 9, р. 2-106]:

$$FWHM_i = a + b\sqrt{E_i + cE_i^2}, \quad (1)$$

где $FWHM_i$ – полная ширина на полувысоте i -го пика полного поглощения; a , b , c – определяемые константы; E_i – энергия центроиды i -го пика полного поглощения.

¹Государственная поверочная схема для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений : утв. Федер. агентством по техн. регулированию и метрологии. М. : Росстандарт, 2020. 13 с.

²Fluka-4 manual [Electronic resource]. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/fluka.html> (date of access: 03.08.2021).

Шаг 3. Компьютерная модель прибора, разработанная в программе *Fluka*, последовательно облучалась при тех же условиях, при которых происходил набор аппаратных спектров в шаге 1. Результатом данного расчета является набор модельных спектров. Далее модельные спектры сворачивались с функцией, описываемой уравнением [9, р. 2-106]:

$$F(E) = Ce^{-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}(E - E_0)}{a + b\sqrt{E + cE^2}}\right)^2},$$

где a , b , c – константы, определяемые из уравнения (1); E_0 – энергия центроиды пика полного поглощения; E – энергия (значение из заданного энергетического диапазона); C – нормировочная константа.

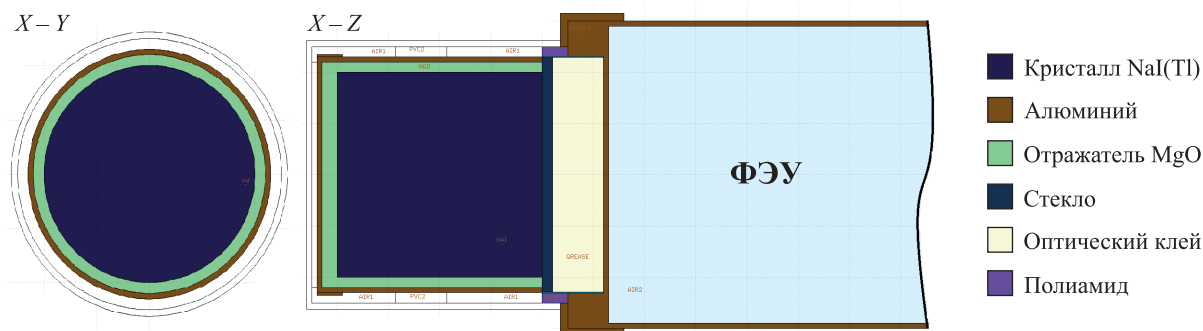


Рис. 1. Модель детектора БДКГ-05К с указанием основных конструкционных материалов

Fig. 1. Model of the BDKG-05K detector with main construction materials

Верификация модели была произведена путем сопоставления аппаратного спектра, полученного при измерении излучения радионуклида ^{137}Cs , с модельным спектром (рис. 2). Результат сопоставления показал, что модель адекватно описывает поведение реального прибора и может быть использована для дальнейших расчетов.

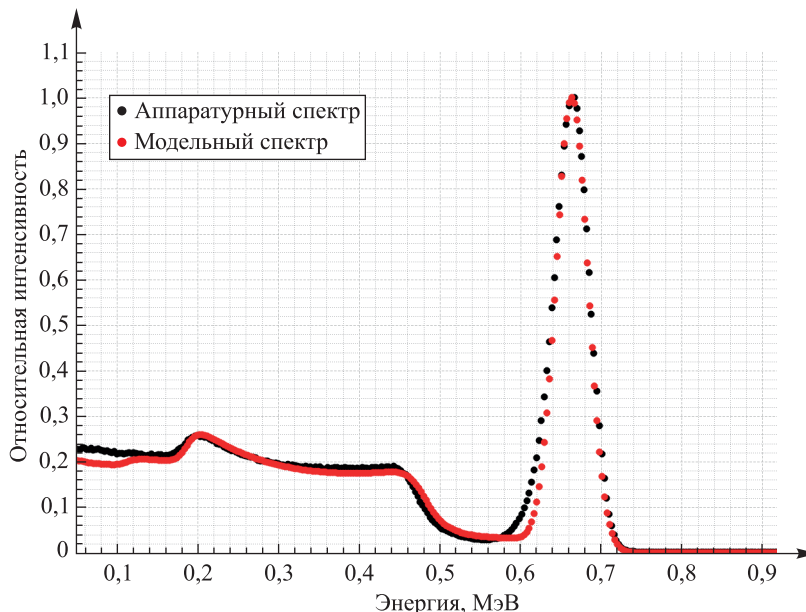


Рис. 2. Сравнение аппаратного и модельного спектров для радионуклида ^{137}Cs

Fig. 2. Comparison of measured and modelled spectra of ^{137}Cs radionuclide

Расчет референсных значений МД

Референсные значения МД, создаваемой полем излучения точечного источника ^{137}Cs , определялись путем расчета компьютерной модели, в которой прибор расположен в вакууме на заданном расстоянии относительно источника. При таких начальных условиях в модели полностью отсутствует рассеянное излучение, что позволяет использовать результаты расчета в качестве истинного значения МД, формируемой этим источником.

Метод Монте-Карло позволяет рассчитывать характеристики поля ионизирующего излучения и результат его взаимодействия с веществом. В данной работе программа вычисляла спектр излучения, поглощенного в активном объеме прибора. Для того чтобы смоделировать режим измерения МД реального дозиметра, над модельным спектром был проведен ряд математических преобразований:

- 1) модельный спектр нормировался на активность реального источника излучения;
- 2) нормированный модельный спектр разбивался на энергетические интервалы, соответствующие энергетическим окнам реального прибора, работающего в режиме измерения МД;
- 3) для каждого энергетического интервала определялось суммарное количество попавших в него импульсов. Результирующая МД (D) вычислялась по формуле [10]

$$D = \sum_i n_i \cdot a_i,$$

где n_i – суммарное количество импульсов в i -м энергетическом интервале; a_i – коэффициент перевода количества импульсов в МД.

Дополнительно МД рассчитывалась аналитически для случая точечного источника с заданной активностью при отсутствии рассеянного излучения [11, р. 25, 69]:

$$D = \sum_i \Phi_i \cdot E_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i,$$

где Φ_i – плотность потока в i -м энергетическом интервале; E_i – средняя энергия фотонов в i -м энергетическом интервале; $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i$ – массовый коэффициент передачи энергии в i -м энергетическом интервале.

Создание модели низкофоновой камеры

Рассматриваемая в данной работе низкофоновая камера представляет собой параллелепипед размером $1476 \times 765 \times 750$ мм, окруженный несколькими слоями конструкционных материалов (рис. 3). Внешний слой толщиной 3 см выполнен из полиэтилена и предназначен для поглощения внешнего нейтронного излучения. Промежуточный слой толщиной 10 см изготовлен из свинца и служит для поглощения внешнего гамма-излучения. Внутренний слой толщиной 1 см выполнен из стали и предназначен для поглощения характеристического излучения свинца и рассеянного излучения из промежуточного слоя.

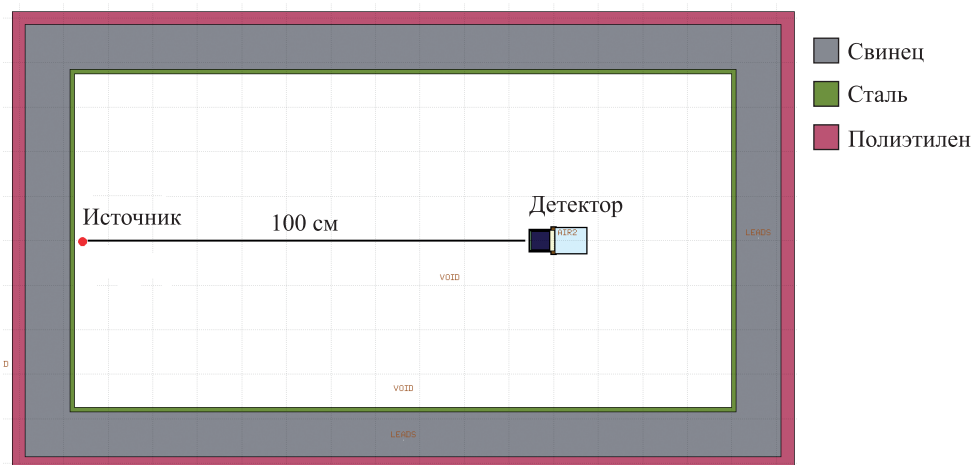


Рис. 3. Модель низкофоновой камеры с указанием конструкционных материалов для случая, когда расстояние между источником и детектором равно 100 см

Fig. 3. Low-background chamber model with construction materials for the case when the distance between the source and the detector is 100 cm

Внутри низкофоновой камеры возле одной из стенок располагается точечный источник ^{137}Cs . На заданном расстоянии от источника (в работе рассматриваются два стандартных расстояния – 30 и 100 см) находится детектор. Расположение источника возле стенки связано с условиями эксплуатации, а именно с необходимостью размещения детекторов различного размера и соединительных кабелей для приборов внутри камеры. Модель рассчитывает МД, генерируемую источником в точке расположения прибора. Доля МД, формируемая рассеянным излучением, определяется как превышение показаний дозиметра над референсным значением.

Ввиду отсутствия дополнительных узлов, ограничивающих поле излучения источника, количество рассеянного излучения, приходящееся на прибор при заданной геометрии его расположения, будет максимальным.

Создание модели коллиматора

Введение в конструкцию низкофоновой камеры дополнительного узла – коллиматора – необходимо для ограничения вклада излучения, рассеянного от конструкционных материалов стенок камеры.

Конструктивно коллиматор представляет собой полость, окруженную свинцом толщиной 6 см, внутри которой расположен точечный источник фотонного излучения. Предварительный аналитический расчет показал, что данной толщины достаточно, чтобы ослабить излучение радионуклида ^{137}Cs по МД в 1000 раз (с учетом фактора накопления). В одной из стенок коллиматора имеется отверстие, формирующее пространственный профиль поля прямого пучка (рис. 4). В работе исследовалась зависимость количества вторичного излучения, приходящего на детектор, от конструктивных особенностей коллиматора, а именно угла полураствора диафрагмы α и расстояния от точечного источника до передней стенки коллиматора L . Количество разыгранных историй для каждой модели Монте-Карло составляло 5 млрд. Варьируемые характеристики коллиматора для каждой модели представлены в табл. 1.

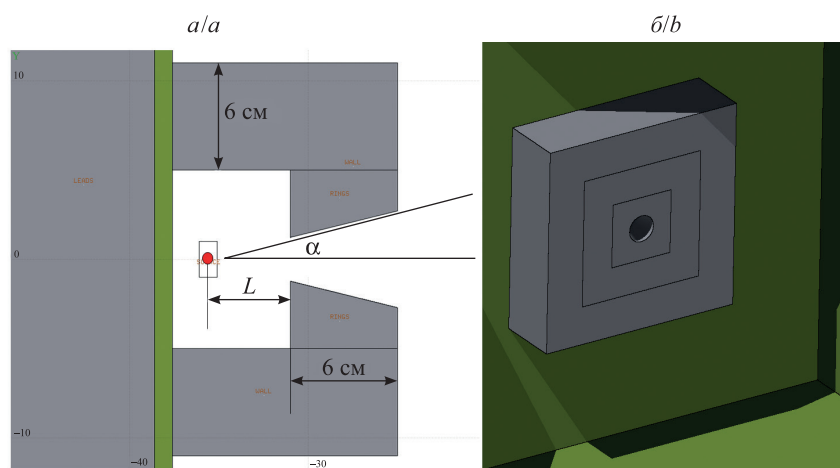


Рис. 4. Конструктивная схема коллиматора с размещенным внутри него точечным источником (буквами обозначены варьируемые в модели параметры: α – угол полураствора диафрагмы; L – расстояние между источником и диафрагмой) (а) и трехмерная модель коллиматора, прикрепленная к стенке низкофоновой камеры (б)

Fig. 4. Collimator principle scheme with point source inside (the letters on the figure stands for variable parameters: α – diaphragm half-angle; L – distance between source and diaphragm) (a) and three-dimensional model of the collimator, placed on the wall of the chamber (b)

Таблица 1

Параметры коллиматора, варьируемые в моделях

Table 1

Collimator variable parameters

Модель	Расстояние между источником и диафрагмой (L), см	Толщина диафрагмы (D), см	Угол полураствора диафрагмы (α)*, град
Модель 1	1,9	6	11,76
Модель 2	1,9	6	18,43
Модель 3	0,6	6	13,89
Модель 4	2,6	6	13,89
Модель 5	4,6	6	13,89
Модель 6	1,9	6	13,89

*Угол полураствора 11,76° соответствует диаметру поля 12,5 см (41,0 см) на расстоянии 30 см (100 см), угол полураствора 13,89° – диаметру поля 14,8 см (49,0 см) на расстоянии 30 см (100 см), угол полураствора 18,43° – диаметру поля 20,0 см (66,6 см) на расстоянии 30 см (100 см).

Дополнительно были рассмотрены две модели:

- модель точечного источника без коллиматора (модель А) (полагается, что при данной геометрии количество вторичного рассеянного излучения будет максимальным);
- модель точечного источника в вакууме вне низкофоновой камеры (референсная модель Р) (полагается, что при данной геометрии рассеянное излучение отсутствует).

На основании расчета моделей и последующего анализа результатов делается вывод о зависимости интенсивности рассеянного излучения от параметров коллиматора, а также определяется его оптимальная конструкция.

Оценка МД фонового излучения

Предварительная оценка МД внутри низкофоновой камеры, обусловленной внешним фоновым излучением, создаваемым в основном мюонной компонентой, была произведена путем прямых измерений [4] согласно следующей методике:

- для оценки собственного фона прибора детектор на основе блока детектирования БДКГ-05К размещался в низкофоновой лаборатории IFIN-HH в Румынии. Расположение данной лаборатории в соляной шахте и дополнительная свинцовая защита вокруг детектора позволяют пренебречь вкладом внешнего фонового излучения в показания прибора. В отсутствие других источников излучения при такой конфигурации эксперимента прибор измеряет исключительно собственный фон, обусловленный содержанием радионуклида ^{40}K в стекле фотоэлектронного умножителя детектора;

- далее прибор размещался внутри низкофоновой камеры, по составу и толщине защиты аналогичной камере, рассматриваемой в данной работе, но меньшего размера (внутренний объем камеры – $0,125\text{ м}^3$). Мощность дозы, измеряемая детектором внутри этой низкофоновой камеры, состоит из двух компонент – компоненты, обусловленной внешним фоновым излучением, и компоненты, обусловленной собственным фоновым излучением прибора;

- МД внутри низкофоновой камеры, создаваемая внешним фоновым излучением, определялась путем вычитания МД, обусловленной собственным фоновым излучением прибора, из МД, измеренной внутри низкофоновой камеры.

Согласно результатам измерения МД, обусловленная собственным фоном прибора, составляет $1,36 \pm 0,11\text{ нЗв/ч}$; МД, измеренная внутри низкофоновой камеры, – $3,64 \pm 0,51\text{ нЗв/ч}$; МД, создаваемая внешним фоновым излучением, – $2,28 \pm 0,62\text{ нЗв/ч}$.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета приведены в табл. 2–5. В табл. 2 и 3 представлены результаты для всех моделей с указанием погрешностей, выраженных в процентном отношении к расчетным значениям. В табл. 4 и 5 приведены результаты расчета относительного отклонения МД от референсного значения в зависимости от варьируемых параметров. Для наглядности данные табл. 4 и 5 представлены графически на рис. 5 и 6.

Таблица 2

Результаты расчета для расстояния
между источником и детектором 100 см

Table 2

Calculation results for distance between source and detector 100 cm

Модель	Полная МД, Зв/ч	Референсная МД (модель Р), Зв/ч	МД рассеянного излучения, Зв/ч	Доля МД рассеянного излучения, %	Погрешность расчета, %
100 кБк ^{137}Cs					
Модель А	$1,095\text{E}-08$	$7,926\text{E}-09$	$3,041\text{E}-09$	38,111	0,701
Модель 1	$8,153\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$2,313\text{E}-10$	2,861	0,521
Модель 2	$8,380\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$4,605\text{E}-10$	5,721	0,541
Модель 3	$8,427\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$5,083\text{E}-10$	6,316	0,533
Модель 4	$8,160\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$2,461\text{E}-10$	2,945	0,525
Модель 5	$8,120\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$2,088\text{E}-10$	2,448	0,526
Модель 6	$8,205\text{E}-09$	$7,926\text{E}-09$	$2,842\text{E}-10$	3,516	0,525

Таблица 3

Результаты расчета для расстояния между источником и детектором 30 см

Table 3

Calculation results for distance between source and detector 30 cm

Модель	Полная МД, Зв/ч	Референсная МД (модель Р), Зв/ч	МД рассеянного излучения, Зв/ч	Доля МД рассеянного излучения, %	Погрешность расчета, %
100 кБк ^{137}Cs					
Модель А	9,022E-08	7,946E-08	1,087E-08	13,547	0,192
Модель 1	8,180E-08	7,946E-08	2,341E-09	2,947	0,162
Модель 2	8,265E-08	7,946E-08	3,207E-09	4,018	0,164
Модель 3	8,434E-08	7,946E-08	4,877E-09	6,138	0,165
Модель 4	8,178E-08	7,946E-08	2,323E-09	2,923	0,162
Модель 5	8,149E-08	7,946E-08	2,030E-09	2,555	0,163
Модель 6	8,213E-08	7,946E-08	2,673E-09	3,363	0,163

Таблица 4

Зависимость количества рассеянного излучения от размера поля (параметр α) при расстоянии между источником и диафрагмой $L = 1,9$ см

Table 4

Scattering radiation versus field size dependence (parameter α) at a distance between source and diaphragm $L = 1.9$ cm

Модель	Количество рассеянного излучения, %		
	$\alpha = 11,76^\circ$	$\alpha = 13,89^\circ$	$\alpha = 18,43^\circ$
Расстояние между источником и детектором 100 см			
Модель 1	2,861	—	—
Модель 2	—	—	5,721
Модель 6	—	3,516	—
Расстояние между источником и детектором 30 см			
Модель 1	2,947	—	—
Модель 2	—	—	4,018
Модель 6	—	3,363	—

Таблица 5

Зависимость количества рассеянного излучения от расстояния между источником и диафрагмой (параметр L) при угле полураствора диафрагмы $\alpha = 13,89^\circ$

Table 5

Scattering radiation versus distance between source and diaphragm (parameter L) at half angle of the diaphragm $\alpha = 13.89^\circ$

Модель	Количество рассеянного излучения, %			
	$L = 0,6$ см	$L = 1,9$ см	$L = 2,6$ см	$L = 4,6$ см
Расстояние между источником и детектором 100 см				
Модель 3	6,316	—	—	—
Модель 4	—	—	2,945	—
Модель 5	—	—	—	2,448
Модель 6	—	3,516	—	—
Расстояние между источником и детектором 30 см				
Модель 3	6,138	—	—	—
Модель 4	—	—	2,923	—

Окончание табл. 5
Ending table 5

Модель	Количество рассеянного излучения, %			
	$L = 0,6$ см	$L = 1,9$ см	$L = 2,6$ см	$L = 4,6$ см
Модель 5	—	—	—	2,555
Модель 6	—	3,363	—	—

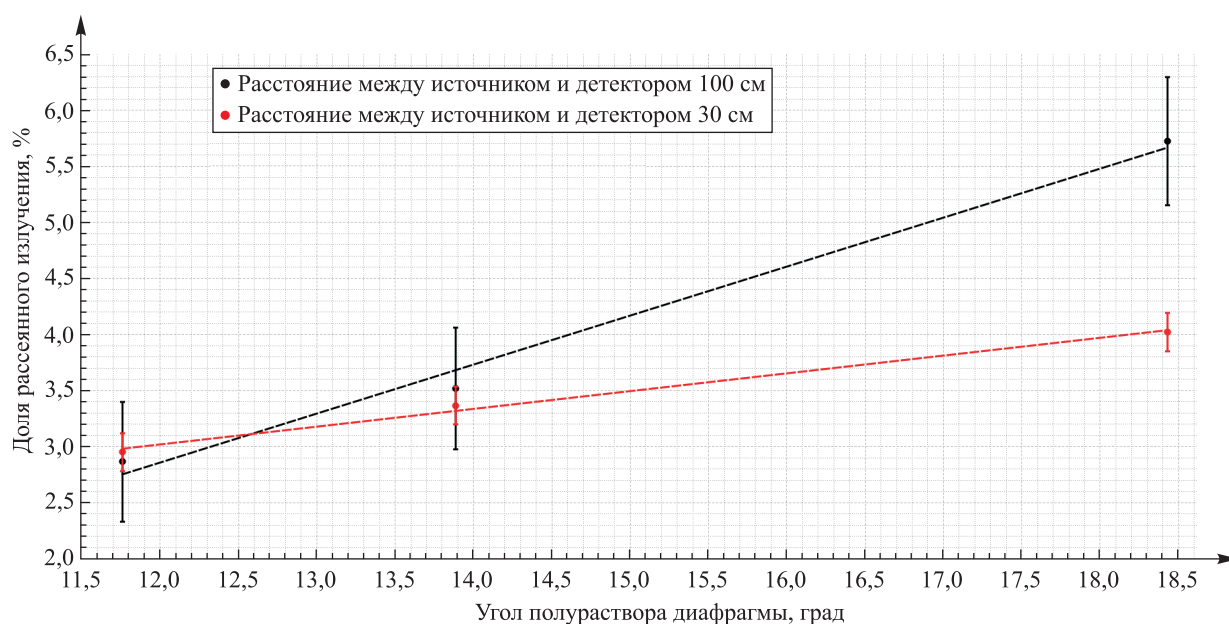


Рис. 5. Зависимость количества рассеянного излучения от угла полураствора диафрагмы

Fig. 5. Scattering radiation versus field size dependence

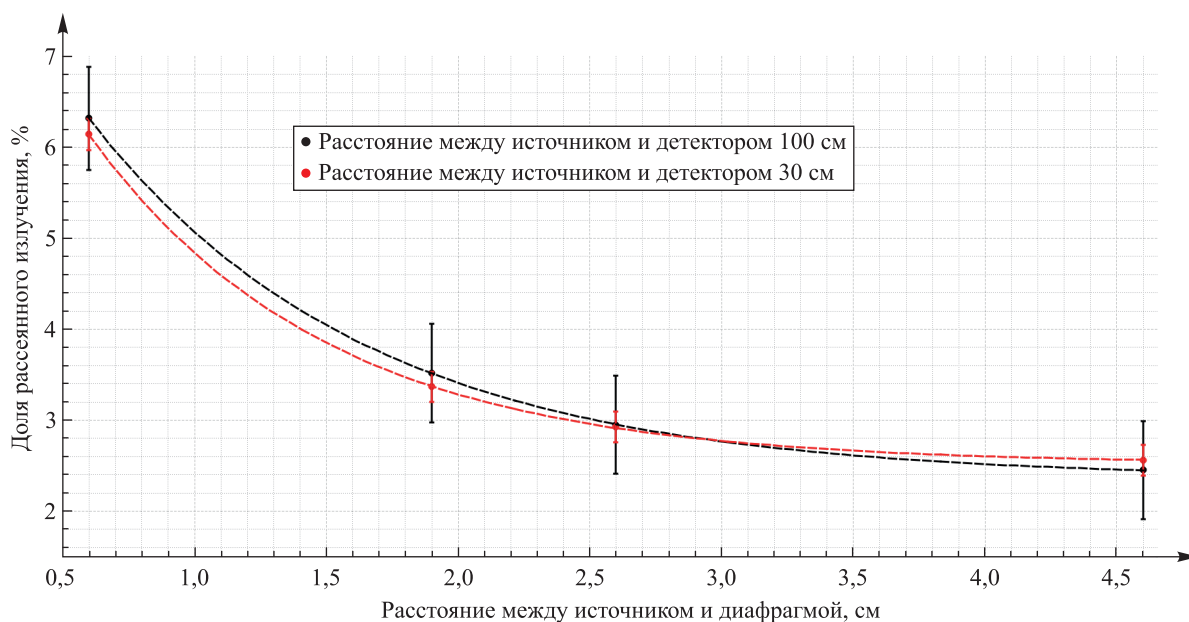


Рис. 6. Зависимость количества рассеянного излучения от расстояния между источником и диафрагмой

Fig. 6. Scattering radiation versus distance between source and diaphragm

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод, что количество рассеянного излучения внутри низкофоновой камеры сильно зависит от расстояния между источником и детектором при условии измерения МД без дополнительных узлов, ограничивающих поле излучения источника. Однако добавление коллиматора в конструкцию низкофоновой камеры позволяет существенно снизить количество рассеянного излучения, приходящего на детектор. Так, в случае отсутствия коллиматора максимальное количество рассеянного излучения составляет 38 % (модель А при расстоянии между источником и детектором 100 см) и 13,5 % (модель А при расстоянии между источником и детектором 30 см) относительно референсного значения. Согласно результатам моделирования при использовании источника с активностью 100 кБк вклад рассеянного излучения внутри низкофоновой камеры сопоставим с вкладом внешнего фонового излучения (для расстояния между источником и детектором 30 см) либо же превосходит его (для расстояния между источником и детектором 100 см).

Применение коллиматора при измерениях МД позволяет снизить вклад рассеянного излучения до 2,5 % для обеих геометрий измерения и тем самым уменьшить зависимость относительного количества рассеянного излучения, попадающего в детектор, от расстояния между источником и детектором (см. табл. 2 и 3, модель 5).

Согласно результатам расчета при использовании коллиматора и источника с активностью 100 кБк вклад рассеянного излучения меньше вклада внешнего фонового излучения (для расстояния между источником и детектором 30 см) или примерно равен ему (для расстояния между источником и детектором 100 см).

При использовании коллиматора вклад рассеянного излучения в МД сильно зависит от расстояния между точечным источником и внутренней поверхностью диафрагмы (см. табл. 5). Исходя из анализа зависимости, представленной на рис. 6, можно сделать вывод, что с ростом этого расстояния интенсивность рассеянного излучения падает по экспоненте.

При увеличении угла полураствора отверстия диафрагмы вклад рассеянного излучения в МД возрастает (см. табл. 4). Это можно объяснить ростом площади внутренней поверхности защитной камеры, на которую приходит излучение прямого пучка. Как следствие, увеличивается телесный угол, занимаемый данной площадью относительно детектора. Это предположение подтверждается более крутой зависимостью вклада рассеянного излучения в МД от угла раствора для расстояния между источником и детектором, равного 100 см, по сравнению с таковой для расстояния между источником и детектором, равного 30 см. При некотором значении угла раствора диафрагмы излучение прямого пучка начинает падать на боковые стенки камеры, что приводит к еще большему увеличению количества рассеянного излучения, приходящего на детектор, поэтому при проведении измерений в низкофоновой камере рекомендуется выбирать диафрагму с минимально возможным углом раствора.

Результаты моделирования показывают, что наиболее оптимальной конструкцией с точки зрения минимизации количества рассеянного излучения обладает коллиматор с удлиненным профилем и толщиной стенок 6 см (модель 5). Дальнейшее увеличение длины коллиматора (для увеличения расстояния между источником и диафрагмой L) является сложноисполнимым ввиду значительного роста массы такой конструкции. Ограничение, накладываемое на минимальный угол полураствора диафрагмы, обусловлено требованием к минимальному размеру поля излучения в поперечнике: при калибровке приборов активная часть детектора должна полностью располагаться внутри поля прямого пучка (при расположении детектора как торцевой, так и боковой поверхностью перпендикулярно оси прямого пучка).

Библиографические ссылки

1. Hassan NM, Kim YJ, Jang J, Chang BU, Chae JS. Comparative study of precise measurements of natural radionuclides and radiation dose using *in situ* and laboratory γ -ray spectroscopy techniques. *Scientific Reports*. 2018;8(1):14115. DOI: 10.1038/s41598-018-32220-9.
2. Shahbazi-Gahrouei D, Gholami M, Setayandeh S. A review on natural background radiation. *Advanced Biomedical Research*. 2013;2(3):65. DOI: 10.4103/2277-9175.115821.
3. Cinelli G, Gruber V, De Felice L, Bossew P, Hernandez-Ceballos MA, Tollefsen T, et al. European annual cosmic-ray dose: estimation of population exposure. *Journal of Maps*. 2017;13(2):812–821. DOI: 10.1080/17445647.2017.1384934.
4. Lukashevich R, Verhusha Y, Guзов V, Kozemyakin V. Application scintillation comparators for calibration low intense gamma radiation fields by dose rate in the range of 0.03–0.1 μ Sv/h. In: Korzhik M, Gektin A, editors. *Engineering of scintillation materials and radiation technologies. Selected articles of ISMART2018*. Cham: Springer; 2019. p. 221–235 (Springer proceedings in physics; volume 227). DOI: 10.1007/978-3-030-21970-3_16.
5. Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, Chin PW, Esposito LS, Fassò A, et al. Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;82:10–18. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.11.007.
6. Загороднюк АА, Лукашевич РВ, Сеньковский КГ, Новиченко АВ. Модифицированный метод коррекции аппаратурного спектра детектора на основе особо чистого германия. *АНПИ*. 2020;4:14–28. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-14-28.

7. Salgado CM, Brandão LEB, Schirru R, Pereira CMNA, Conti CC. Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNP-X code. *Progress in Nuclear Energy*. 2012;59:19–25. DOI: 10.1016/j.pnucene.2012.03.006.
8. Загороднюк АА, Корнеев СВ. Разработка компьютерной модели германиевого детектора и получение модельных спектров стандартных образцов урана U_3O_8 SRM-969. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2017;3:92–100.
9. X-5 Monte Carlo Team. *MCNP – a general Monte Carlo N-particle transport code, version 5. Volume 1. Overview and theory* [Internet]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory; 2003 April 24 [cited 2021 August 3]. Report No. LA-UR-03-1987. Available from: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf.
10. Лукашевич РВ, Фоков ГА. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования. *Приборы и методы измерений*. 2017;8(3):246–253. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253.
11. Attix FH. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Weinheim: Wiley-VCH; 1986. 624 p. DOI: 10.1002/9783527617135.

References

1. Hassan NM, Kim YJ, Jang J, Chang BU, Chae JS. Comparative study of precise measurements of natural radionuclides and radiation dose using *in situ* and laboratory γ -ray spectroscopy techniques. *Scientific Reports*. 2018;8(1):14115. DOI: 10.1038/s41598-018-32220-9.
2. Shahbazi-Gahrouei D, Gholami M, Setayandeh S. A review on natural background radiation. *Advanced Biomedical Research*. 2013;2(3):65. DOI: 10.4103/2277-9175.115821.
3. Cinelli G, Gruber V, De Felice L, Bossew P, Hernandez-Ceballos MA, Tollefsen T, et al. European annual cosmic-ray dose: estimation of population exposure. *Journal of Maps*. 2017;13(2):812–821. DOI: 10.1080/17445647.2017.1384934.
4. Lukashevich R, Verhusha Y, Guzov V, Kozemyakin V. Application scintillation comparators for calibration low intense gamma radiation fields by dose rate in the range of 0.03–0.1 μ Sv/h. In: Korzhik M, Gektin A, editors. *Engineering of scintillation materials and radiation technologies. Selected articles of ISMART2018*. Cham: Springer; 2019. p. 221–235 (Springer proceedings in physics; volume 227). DOI: 10.1007/978-3-030-21970-3_16.
5. Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, Chin PW, Esposito LS, Fassò A, et al. Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;82:10–18. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.11.007.
6. Zaharadniuk AA, Lukashevich RV, Syankovsky KG, Novichenko AV. A modified method for correcting instrumental spectrum of high purity germanium detector. *ANRI*. 2020;4:14–28. Russian. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-14-28.
7. Salgado CM, Brandão LEB, Schirru R, Pereira CMNA, Conti CC. Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with MCNP-X code. *Progress in Nuclear Energy*. 2012;59:19–25. DOI: 10.1016/j.pnucene.2012.03.006.
8. Zaharadniuk AA, Korneyev SV. Development of a germanium detector computer model and obtaining model spectra of standard uranium U_3O_8 SRM-969 samples. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017;3:92–100. Russian.
9. X-5 Monte Carlo Team. *MCNP – a general Monte Carlo N-particle transport code, version 5. Volume 1. Overview and theory* [Internet]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory; 2003 April 24 [cited 2021 August 3]. Report No. LA-UR-03-1987. Available from: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf.
10. Lukashevich RV, Fokov GA. Application of the spectrometric method for calculating the dose rate for creating calibration highly sensitive instruments based on scintillation detection units. *Devices and Methods of Measurements*. 2017;8(3):246–253. Russian. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253.
11. Attix FH. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Weinheim: Wiley-VCH; 1986. 624 p. DOI: 10.1002/9783527617135.

Получена 07.09.2021 / исправлена 20.09.2021 / принята 04.10.2021.
Received 07.09.2021 / revised 20.09.2021 / accepted 04.10.2021.