

УДК 539.1.074

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА ИЗ ОСОБО ЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ

Алейников Юрий Владимирович<sup>1</sup>,  
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич<sup>1</sup>,  
Popov@nnc.kz

Прозорова Ирина Валентиновна<sup>1</sup>,  
Prozorova@nnc.kz

Прозоров Александр Андреевич<sup>2</sup>,  
prozorov\_a\_a@mail.ru

<sup>1</sup> Институт атомной энергии НЯЦ РК,  
Казахстан, 711100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы.** Одной из важнейших современных проблем геоэкологии является разработка методов и средств контроля радиационного фона естественного и техногенного происхождения на основе высокоточных портативных полупроводниковых детекторов. Известные способы расчета таких детекторов по методу Монте-Карло широко применяются в области радиационной безопасности: радиационная защита, расчеты ядерных реакторов, экранирование и моделирование детекторов, проводятся расчеты радиационных параметров полей источников ионизирующего излучения. Программа MCNP, реализующая метод Монте-Карло, является инструментом моделирования для переноса излучения, в основном в тех случаях, когда измерения затруднены или практически не выполнимы. В данной работе программа MCNP использовалась для моделирования детектора из особо чистого германия Ge (Li) и методики по улучшению определения функции отклика для данного типа детектора. Результаты, полученные при моделировании, являются достаточно точными, имеют хорошие совпадения между модельными и экспериментальными данными.

**Цель работы:** моделирование детектора из особо чистого германия Ge (Li) типа GC1020 для решения задач оценки эффективности регистрации излучения.

**Методы исследования:** построение и корректировка геометрической и физической модели детектора; проведение вариантов расчетов по определению эффективности регистрации детектором моноэнергетического гамма-излучения с помощью программы MCNP5.

**Результаты.** Моделирование детектора из особо чистого германия с помощью метода Монте-Карло важно для получения эффективности регистрации в случае образцов с нестандартной геометрией и при больших выборках, когда эффективность сложно оценить экспериментально. В работе представлены расчеты эффективности полупроводникового детектора, широко используемого в нашей лаборатории для различных образцов, которые были выполнены для геометрии с точечным источником, и затем параметры детектора были оптимизированы с 5 % погрешностью между MCNP и экспериментальной эффективностью на различных расстояниях от детектора. Оптимизированная геометрия детектора затем была подтверждена эффективным переносом в другие геометрии.

### Ключевые слова:

Источник, эффективность регистрации гамма-излучения, полупроводниковый детектор, моделирование по методу Монте-Карло, оптимизация геометрии детектора.

### Введение

Чистый германий обладает высокой эффективностью регистрации гамма-излучения. Рабочий диапазон регистрируемых коаксиальным германиевым детектором энергий составляет от 40 кэВ до 10 МэВ. Для детектора характерно высокое энергетическое разрешение и хорошая форма пика. Калибровка детектора по эффективности регистрации гамма-квантов обычно выполняется при помощи моноэнергетических источников гамма-излучения, например, таких как: <sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>203</sup>Hg, <sup>51</sup>Cr, <sup>137</sup>Cs и <sup>65</sup>Zn из набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСИ). С появлением детекторов с высоким разрешением предпочтение зачастую отдается источникам, из-

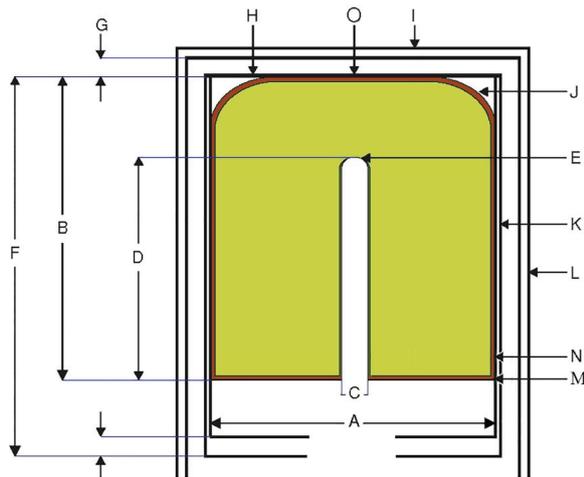
лучающим несколько гамма-линий, таким как: <sup>133</sup>Ba, <sup>152</sup>Eu и <sup>228</sup>Th, поскольку они охватывают широкий диапазон энергий и имеют продолжительный срок службы. Но зачастую эти источники испускают гамма-излучение в каскаде, и для образцов, близко расположенных к детектору, появляются неточности в калибровке из-за суммирования пиков.

Эти трудности можно обойти при помощи метода Монте-Карло, используя программу MCNP. Это мощный инструмент для моделирования отклика детектора, и он применим к различным материалам и источникам. Метод особенно удобен для оценки эффективности в случаях, когда проведение экспериментальных измерений не представля-

ется возможным или затруднено, как, например, в случае крупногабаритных образцов или образцов с нестандартной геометрией: твэлы сложной формы, образцы из природных материалов и контейнеры с радиоактивными отходами, когда невозможно использовать стандартные калибровочные источники. Таким образом, метод Монте-Карло все чаще применяются для моделирования систем «радиоактивный источник – детектор», в том числе источников, имеющих несколько гамма-линий. Так как моделирование представляет собой независимую схему радиоактивного распада, то, следовательно, оно свободно от каких-либо совпадений из-за суммирования пиков и может быть использовано для калибровки детектора на малых расстояниях.

### Экспериментальные исследования

В работе использовался полупроводниковый детектор из особо чистого германия типа GC1020 [1, 2]. Относительная эффективность регистрации детектора составляет 10 %. На рис. 1 изображена схема детектора. В табл. 1 приведены линейные параметры детектора. Толщина литиевого покрытия кристалла составляет 700 мкм (на схеме не приведено).



**Рис. 1.** Схема германиевого детектора: А) диаметр кристалла; В) высота кристалла; С) диаметр отверстия; D) глубина отверстия; Е) толщина внутреннего борного покрытия технологического отверстия; F) высота кронштейна; G) вакуумное пространство; H) толщина алюминиевого окошка; I) толщина окошка крышки детектора; J) толщина мертвого слоя на скосе кристалла; K) толщина стенки кронштейна; L) толщина стенки крышки детектора; M) толщина нижнего мертвого слоя; N) толщина бокового мертвого слоя; O) толщина верхнего мертвого слоя

**Fig. 1.** Schematic geometry of the germanium detector: A) diameter of the crystal; B) height of the crystal; C) hole diameter; D) hole depth; E) thickness of the internal coating of boron technological hole; F) height of the bracket; G) vacuum space; H) thickness of the aluminum window; I) thickness of the end cap window; J) thickness of the dead layer on the bevel of the crystal; K) thickness of the mount cup; L) thickness of the end cap; M) thickness of the bottom of the dead layer; N) thickness of the side of the dead layer; O) thickness of the upper dead layer



**Рис. 2.** Кристалл из особо чистого германия

**Fig. 2.** Crystal of high purity germanium

**Таблица 1.** Линейные параметры детектора

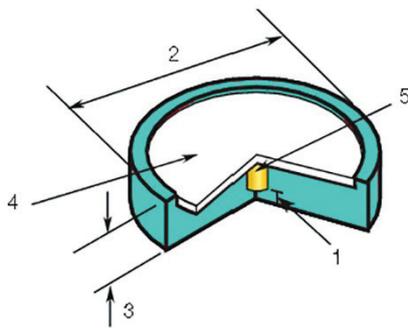
**Table 1.** Linear parameters of the detector

Буквенное обозначение Lettering	Параметр детектора Parameter of the detector	Значение, мм Value, mm
A	Диаметр кристалла Diameter of the crystal	47,0
B	Высота кристалла/Height of the crystal	45,5
C	Диаметр отверстия/Hole diameter	10
D*	Глубина отверстия/Hole depth	–
E	Толщина внутреннего борного покрытия технологического отверстия Thickness of the internal coating of boron technological hole	0,7
F	Высота кронштейна/Height of the bracket	52,8
G	Вакуумное пространство/Vacuum space	6,0
H	Толщина алюминиевого окошка Thickness of aluminum window	0,03
I	Толщина окошка крышки детектора Thickness of the end cap window	1,0
K	Толщина стенки кронштейна Thickness of the mount cup	1,0
L	Толщина стенки крышки детектора Thickness of the end cap	1,0
M*	Толщина нижнего мертвого слоя Thickness of the bottom of the dead layer	–
N*	Толщина бокового мертвого слоя Thickness of the side of the dead layer	–
O*	Толщина верхнего мертвого слоя Thickness of the upper dead layer	–
J*	Толщина мертвого слоя на скосе кристалла Thickness of the dead layer on the bevel of the crystal	–

\*Изменяемые параметры детектора.

\*Detector variables.

Калибровка по эффективности детектора проводилась при помощи точечных источников  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  из набора ОСГИ-3-2 в диапазоне энергий от 120 до 1408 кэВ. Погрешность определения активности источников составляет 3 % при доверительной вероятности 0,95. Характеристики источников приведены в табл. 2. Значения активности источников приведены на 10 апреля 2016 г. Геометрические параметры источника приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Геометрические параметры источника: 1) толщина окна (2,77 мм); 2) диаметр источника (25,4 мм); 3) высота источника (3,35 мм); 4) пластик; 5) активный элемент

**Fig. 3.** Source geometry: 1) window thickness (2,77 mm); 2) source diameter (25,4 mm); 3) height of source (3,35 mm); 4) plastic; 5) active element

При проведении измерений источники располагались на расстояниях 50, 100, 150, 200, 250 и 350 мм от торцевой крышки детектора.

**Таблица 2.** Характеристики калибровочных источников

**Table 2.** Features of calibration sources

Источник Source	Номер источника Number of source	Активность А, Бк Activity in Bq	Период полураспада $T_{1/2}$ , сут The half-life $T_{1/2}$ days
Cs-137	10656	42500	11005
Eu-152	10658	44200	4940
Co-60	4633	46900	1925

Все зарегистрированные спектры были проанализированы при помощи программной среды Genie-2000 [3]. Экспериментальные зависимости значений эффективности регистрации детектора от энергии гамма-квантов были построены в двойном логарифмическом масштабе и аппроксимированы полиномами четвертого порядка.

Эффективность регистрации гамма-квантов энергии  $E_\gamma$  рассчитывалась по формуле (1):

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{S_{\text{ППП}}}{t_{\text{ж}}} \frac{e^{\lambda t}}{pA}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ППП}}$  – площадь пика полного поглощения (ППП), отн. ед.;  $\lambda$  – постоянная распада,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время, прошедшее с момента аттестации источника;  $t_{\text{ж}}$  – «живое» время измерения, с;  $p$  – выход гамма-квантов на распад, отн. ед.;  $A$  – активность источника на момент аттестации, Бк.

### Моделирование методом Монте-Карло

Для моделирования отклика особо чистого германиевого детектора использовалась версия MCNP5 [4]. Программа отслеживает частицу от точки рождения до места ее полного поглощения. Учитываются все первичные и вторичные взаимодействия. Эффективность регистрации гамма-квантов при моделировании была задана с помощью оценки, в которой суммировались кванты, испытывающие полное поглощение в чувствительном объеме детектора. В геометрическую модель были включены все поглощающие материалы среды. Для уменьшения статистической погрешности расчетов были разыграны  $2 \cdot 10^8$  историй.

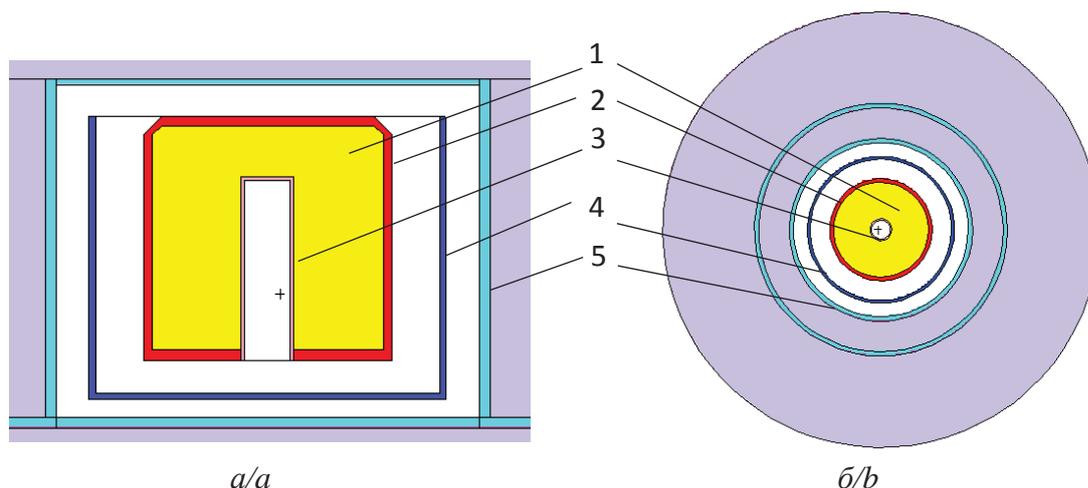
Проблема при моделировании состояла в том, что только некоторые данные (диаметр, высота кристалла и ширина вакуумного пространства) предоставлены официальным поставщиком гамма-спектрометра. Все остальные значения пришлось подбирать самостоятельно. Однако, согласно сведениям из литературы [5–18], часто возникает несоответствие между смоделированной и экспериментальной эффективностью. В первую очередь это связано с чувствительностью расчетов методом Монте-Карло к спецификациям геометрии детектора. Размеры, предоставленные изготовителем, соответствуют системе детектирования для комнатной температуры, а при низких температурах в механическом кронштейне кристалла возникают сжатия, что в свою очередь приводит к изменениям в конфигурации детектора. Кроме этого, существует неопределенность толщины нечувствительного (мертвого) слоя, расстояния от крышки детектора до кристалла и т. д.

Мы придерживались следующей методики при подборе параметров. Во-первых, данные, представленные поставщиком, не менялись. Во-вторых, было два вида параметров: неизменные – такие, значение которых не влияло на эффективность и поэтому они не менялись, и изменяемые параметры, значение которых варьировалось с некоторым шагом, обычно  $\pm 1$  мм. В-третьих, критерием удовлетворительной точности было не превышающее 5 % расхождение между рассчитанной в MCNP и экспериментальной эффективностью регистрации для различных расстояний «детектор – источник излучения».

### Результаты и обсуждение

Используя исходные данные о детекторе, с помощью программы MCNP5 была смоделирована система «моноэнергетический источник – германиевый детектор». На рис. 4 приведен один из вариантов модели детектора, построенный с помощью программы MCNP5.

Модели отличались геометрическими параметрами и толщиной мертвого слоя детектора. Для детектора обязательно нужно учитывать мертвый слой на поверхности кристалла – нечувствительный к гамма-квантам электропроводящий слой, служащий для создания электрического контакта



**Рис. 4.** Модель детектора, построенная с помощью программы MSNP5 (а) вертикальный разрез, (б) горизонтальный разрез: 1) кристалл из особо чистого германия; 2) мертвый слой; 3) контактный слой из бора; 4) алюминиевая стенка кронштейна; 5) стенка крышки детектора

**Fig. 4.** Detector model, built with the help of the MSNP5 program (a) vertical section (b) horizontal section: 1) crystal of high purity germanium; 2) dead layer; 3) contact layer of boron; 4) aluminum wall of mount cup; 5) wall of the end cap

с полупроводниковым кристаллом. В экспериментах с тяжелыми заряженными частицами толщина этого слоя имеет большое значение, так как в мертвом слое частица может потерять значительную часть своей энергии. Если частицы будут падать в детектор под разными углами, то их потери будут неодинаковыми, что приведет к ухудшению разрешения. Для всех вариантов модели детектора без «мертвого слоя» эффективность MSNP оказалась выше экспериментальных значений в среднем на 30 %, что указывает на необходимость задания мертвого слоя.

**Таблица 3.** Изменяемые параметры детектора (влияние радиуса кристалла)

**Table 3.** Variable parameters of the detector (effect of the crystal radius)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm	
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant
M	2	2
N*	2,5	1
O	2,2	2,2
J	2	2
D	34,8	34,8
Рассчитанный объем кристалла, см <sup>3</sup> Estimated volume of the crystal, cm <sup>3</sup>	60,0642	62,814

Для сравнения с имеющимися экспериментальными значениями [19] был задан источник с различными энергиями гамма-квантов. В ходе расчетов было выявлено влияние параметров кристалла детектора на результаты. Определялось, как изменение радиуса (через изменение толщины мертвого бокового слоя) влияет на угол наклона кривой эффективности. Исходные изменяемые параметры детектора приведены в табл. 3. Расстояние

до источника было задано равным 50 мм. Расчетные и экспериментальные значения эффективности регистрации представлены на рис. 5.

Анализ графиков показывает, что при увеличении радиуса детектора (уменьшении бокового мертвого слоя с 2,5 до 1 мм) расчетная кривая эффективности лучше совпадает с экспериментальной кривой, особенно для энергий от 121,73 до 661,65 кэВ. Можно сделать вывод, что радиус детектора в большей степени влияет на угол наклона кривой эффективности в области низких энергий.

На рис. 6 приведена схема, взятая из [20], на которой демонстрируется, как энергия гамма-квантов влияет на глубину проникновения в кристалл детектора.

Как показано на рис. 6, около 14 % гамма-квантов с энергией 185,7 кэВ поглощается в мертвом слое (900 мкм) детектора, в то время как для энергии 1001,03 кэВ поглощается до 9 % гамма-квантов в мертвом слое такой же толщины. До 9,4 мм глубины детектора (начало технологического отверстия детектора) поглощается уже 69 % от всех гамма-квантов с энергией 185,7 кэВ против 46 % для энергии 1001,03 кэВ.

Далее было определено, как влияет на эффективность изменение глубины технологического отверстия. Исходные изменяемые параметры детектора приведены в табл. 4. Расстояние до источника составило 250 мм. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

Анализ графиков показывает, что с увеличением глубины технологического отверстия с 24,3 до 39,5 мм угол наклона кривой эффективности заметно изменяется в области высоких энергий.

При выполнении математического моделирования были выполнены различные корректировки для лучшего приближения расчетных значений

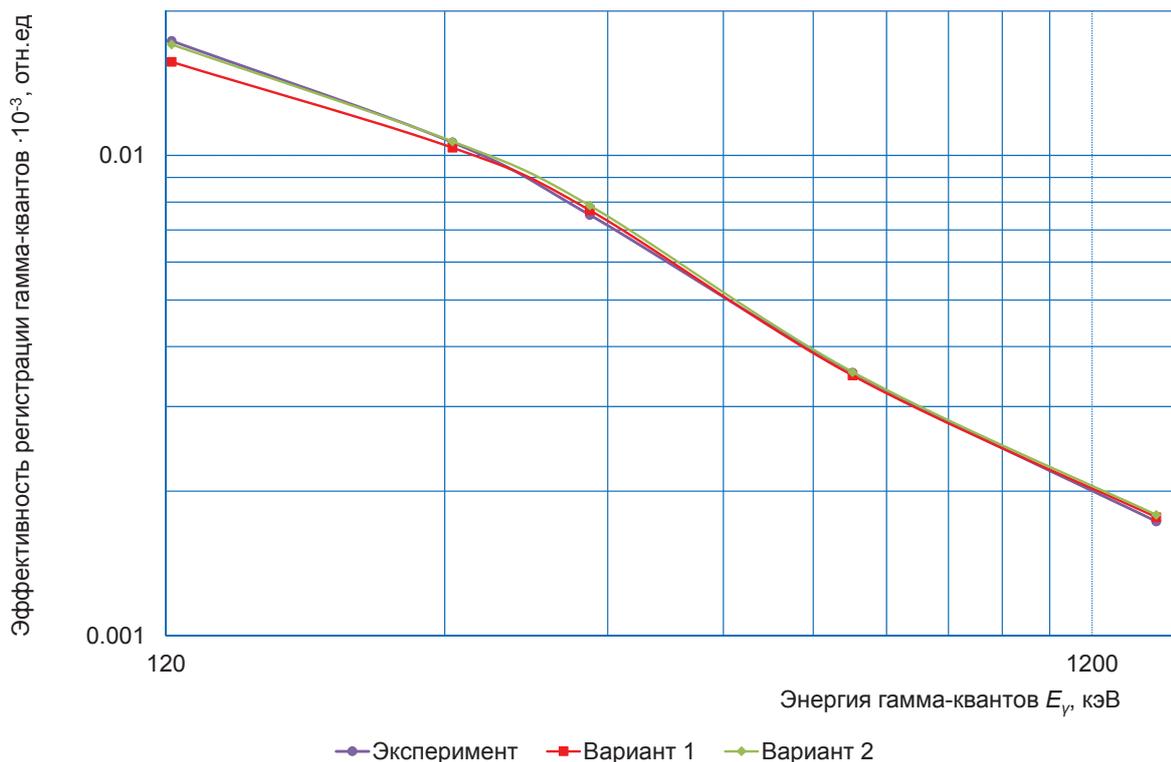


Рис. 5. Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов

Fig. 5. Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays

эффективности к экспериментальным значениям. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными значениями для различных расстояний от источника до детектора. Была задача добиться расхождения менее 5%. Параметры детектора приведены в табл. 5.

Таблица 4. Изменяемые параметры детектора (влияние глубины отверстия)

Table 4. Variable parameters of the detector (hole depth effect)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm		
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant	3 вариант 3 variant
M	2		
N	1,7		
O	1,7		
J	1,7		
D*	24,8	34,8	39,8
Рассчитанный объем кристалла, см <sup>3</sup> Estimated volume of the crystal, cm <sup>3</sup>	60,4614	59,676	59,2833

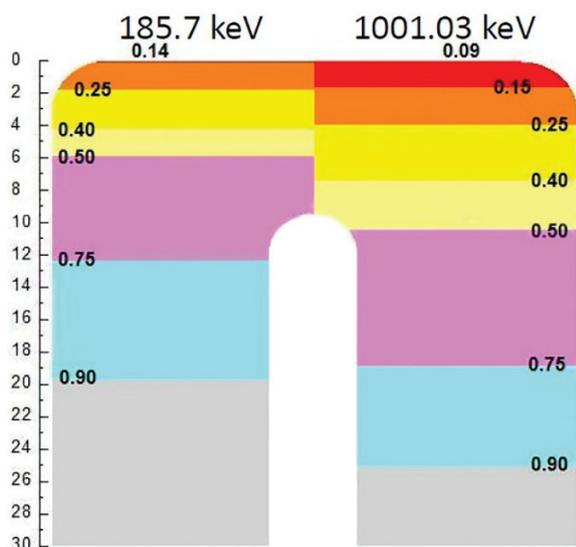


Рис. 6. Схема поглощения гамма-квантов на разных слоях в детекторе для энергии 185,7 кэВ (левая сторона) и 1001,03 кэВ (правая сторона)

Fig. 6. Scheme of absorption of gamma rays in different layers of the detector for energy 185,7 keV (left side) and 1001,03 keV (right side)

Далее по формуле (2) было рассчитано относительное отклонение расчетных и экспериментальных значений для каждой энергии:

$$R = |x_1 - x_2| / x_1 \times 100 \%, \quad (2)$$

где  $R$  – относительное отклонение;  $x_1$  – значение экспериментальной эффективности регистрации гамма-квантов;  $x_2$  – значение рассчитанной эффективности регистрации гамма-квантов.

В качестве примера в табл. 6 приведены результаты расчета эффективности и оценка точности моделирования для расстояния 200 мм от детектора.

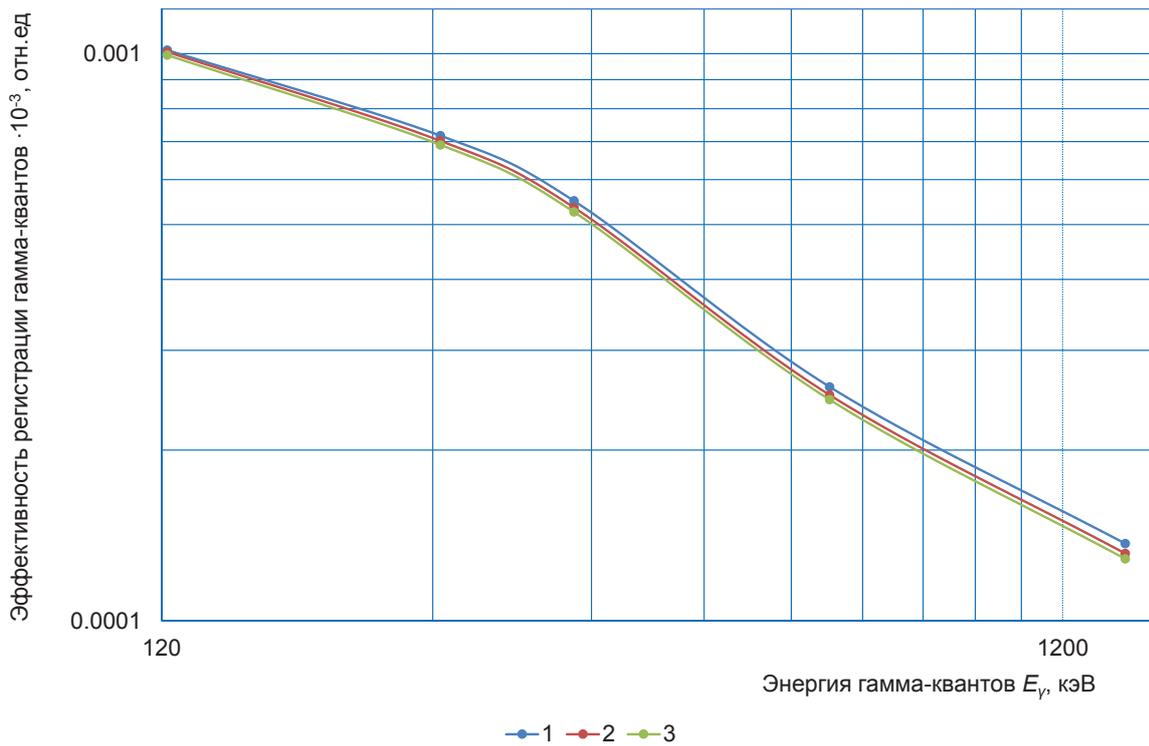


Рис. 7. Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов

Fig. 7. Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays

Таблица 5. Изменяемые параметры детектора (скорректированные данные)

Table 5. Variable parameters of the detector (adjusted data)

Буквенное обозначение Lettering	Значение, мм/Value, mm		
	1 вариант 1 variant	2 вариант 2 variant	3 вариант 3 variant
M	2		
N	1		
O	2,2		
J	1,7		
D*	34,3	24,3	39,3
Рассчитанный объем кристалла, см <sup>3</sup> Estimated volume of the crystal, cm <sup>3</sup>	62,52	63,68	62,50

Таблица 6. Сравнение значений эффективности регистрации гамма-квантов

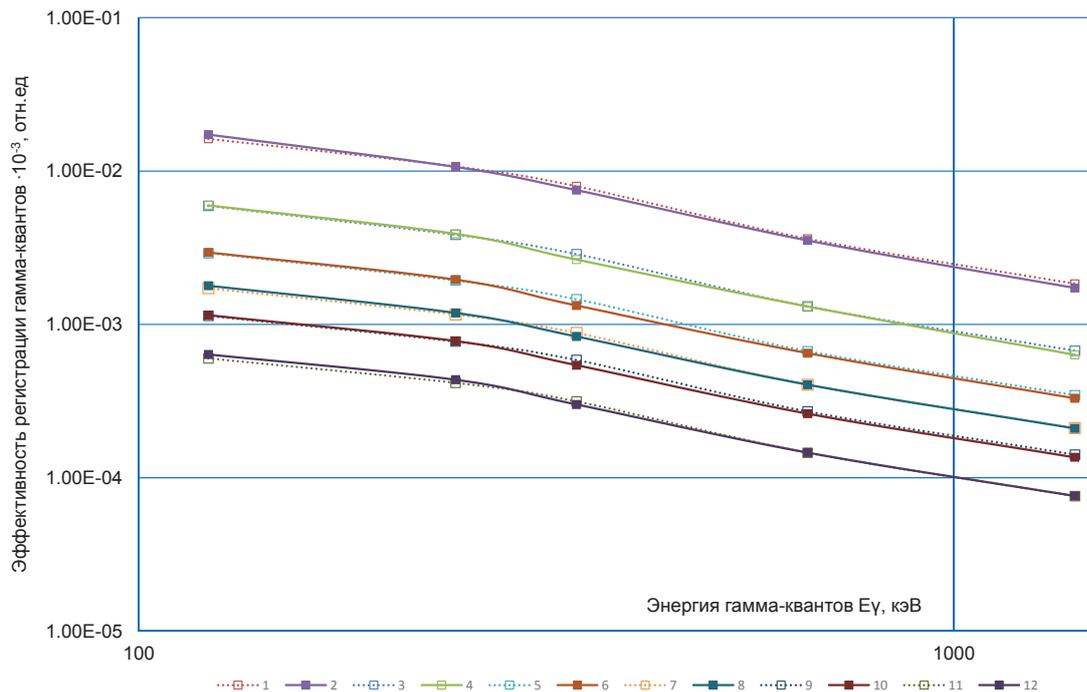
Table 6. Comparison of data on the effectiveness of gamma rays

Энергия гамма-кван- тов, E <sub>γ</sub> , кэВ Gamma ray energy E <sub>γ</sub> , keV	Эффективность регистрации гамма-квантов, ε·10 <sup>-3</sup> , отн. ед. Efficiency of detection of gamma rays, ε·10 <sup>-3</sup> , rel. un.				Относительная погрешность, % Relative error, %		
	Экспе- римент Experiment	Расчетные данные Calculated data			1	2	3
		1	2	3			
121,73	0,179	0,175	0,176	0,172	2,5	1,8	3,7
244,69	0,119	0,118	0,120	0,116	0,7	1,2	2,3
344,27	0,0835	0,090	0,092	0,088	7,3	10,3	5,5
661,65	0,0405	0,041	0,042	0,040	1,6	4,9	0,2
1407,95	0,021	0,021	0,022	0,021	2,3	7,0	0,2

В целом результаты расчетов для всех вариантов моделей достаточно близко повторяют экспериментальные значения. Анализируя графики расчетных и экспериментальных данных, можно отметить, что отклонения расчетных значений эффективности регистрации от экспериментальных в области наиболее важных энергий гамма-квантов для первого варианта не превышают 7,3 %, 10,3 % для второго варианта и 5,5 % для третьего варианта. Можно сделать вывод, что третий вариант расчетов лучше моделирует отклик детектора.

Такое различие может быть связано с тем, что в третьем варианте модели детектора увеличена глубина технологического отверстия, объем кристалла составляет 62,5 см<sup>3</sup>, что, вероятно, наиболее близко к реальному параметру. На рис. 8 для третьего варианта расчетов приведены графики расчетных и экспериментальных значений эффективности регистрации гамма-квантов, когда точечные источники располагались на расстояниях 50, 100, 150, 200, 250 и 350 мм от торцевой крышки детектора.

Можно сделать вывод, что для данного варианта лучше удастся воспроизвести экспериментальную эффективность регистрации при относительно больших расстояниях (от 200 до 350 мм) от источника до детектора. При небольших же расстояниях ( $d=50$  мм) расхождение более существенно и достигает приблизительно 10 %. Это говорит о том, что необходимо продолжить работу по совершенствованию модели детектора.



**Рис. 8.** Сравнение данных по эффективности регистрации гамма-квантов (мм): 1) расчет 50; 2) эксперимент 50; 3) расчет 100; 4) эксперимент 100; 5) расчет 150; 6) эксперимент 150; 7) расчет 200; 8) эксперимент 200; 9) расчет 250; 10) эксперимент 250; 11) расчет 350; 12) эксперимент 350

**Fig. 8.** Comparison of the data on the effectiveness of gamma rays (mm): 1) calculation 50; 2) experiment 50; 3) calculation 100; 4) experiment 100; 5) calculation 150; 6) experiment 150; 7) calculation 200; 8) experiment 200; 9) calculation 250; 10) experiment 250; 11) calculation 350; 12) experiment 350

### Заключение

Проведено моделирование полупроводникового детектора из ОЧГ с помощью метода Монте-Карло. В ходе проведенных расчетов выявлено влияние некоторых параметров кристалла детектора на результаты расчета эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий:

- радиус детектора в большей степени влияет на угол наклона кривой эффективности в области низких энергий;
- эффект «мертвого слоя» будет иметь большее значение для низкоэнергетических гамма-квантов, в то время как эффект глубины технологического отверстия будет иметь большее значение для гамма-квантов с энергией выше 1,0 МэВ;
- с увеличением глубины технологического отверстия угол наклона кривой эффективности

меняется в большей степени в области высоких энергий. Таким образом, можно сделать вывод о существенном влиянии геометрических параметров кристалла на эффективность регистрации детектора.

Изменяя геометрические размеры кристалла детектора, которые оказывают значительное влияние на эффективность детектора, можно добиться максимального совпадения расчетных и экспериментальных значений эффективности регистрации детектора. Использование метода Монте-Карло полезно при моделировании системы «источник–детектор» для случаев анализа радиоактивных поглощающих образцов с нестандартной геометрией, когда форма и плотность анализируемого образца и калибровочного источника различаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердотельные полупроводниковые детекторы. URL: [http://rad-stop.ru/25-tverdotelnyie-poluprovodnikovyye-detektoriy/#.WWWhcl\\_kROWk](http://rad-stop.ru/25-tverdotelnyie-poluprovodnikovyye-detektoriy/#.WWWhcl_kROWk) (дата обращения: 20.05.2017).
2. Germanium Detectors. User's Manual. Ge-USR 9/96. Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06450. URL: <http://www.canberra.com> (дата обращения: 15.05.2017).
3. Inspector Volume Two. Руководство пользователя спектрометрической системой Genie-PC: S404-USR. – 2014. – 271 с.
4. Briesmeister J.F. MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. – Los Alamos: LANL, 2000. – 319 p.
5. Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the Range of 40 keV to 1.46 MeV / E.E. Zadeh, S.A.H. Feghhi, E. Bayat, G.H. Roshani // Journal of Experimental Physics. – 2014. – Article ID 623683. – P. 4–5.
6. Validation of a NaI (Tl) detector's model developed with MCNP-X code / C.M. Salgado, L.E.B. Brandao, R. Schirru, C.M.N.A. Pereira, C.C. Conti // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – V. 59. – P. 19–25.
7. Hau I.D., Russ W.R., Bronson F. MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – V. 67. – P. 711–715.

8. Bosen J., Agren G., Johansson L.A. Detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2008. – V. 587. – P. 304–314.
9. Koleska M., Viererbl L., Marek M. Development of the MCNPX model for the portable HPGe detector // Radiation Physics and Chemistry. – 2014. – V. 104. – P. 351–354.
10. Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory/CDTN using a MCNP-gamma vision method / D.C. Vasconcelos, C. Pereira, S. Gallardo, Z. Rocha, T.O. Santos // 2011 International Nuclear Atlantic Conference. – MG, Brazil, 2011. – P. 17–24.
11. Hahin D., Unlii K. Modeling a gamma spectroscopy system and predicting spectra with Geant-4 // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2009. – V. 282. – № J. – P. 167–172.
12. Medhat M.E., Wang Y. Assessment of the suitability of Monte Carlo simulation for activity measurements of extended sources // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – V. 300. – № J. – P. 1005–1011.
13. Influence of the geometrical characteristics of an HPGe detector on its efficiency / M.J. Vargas, A.F. Timon, N.C. Diaz, D.P. Sanchez // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2002. – V. 253. – № 3. – P. 439–443.
14. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations / R. Britton, J. Burnett, A. Davies, P.H. Regan // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2013. – V. 295. – № J. – P. 2035–2041.
15. Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method / J. Rodenas, A. Pascual, I. Zarza, V. Serradell, J. Ortiz, L. Ballesteros // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. – 2003. – V. 496. – P. 390–399.
16. Novotny S., To D. Characterization of a high-purity germanium (HPGe) detector through Monte Carlo simulation and nonlinear least squares estimation // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2015. – V. 304. – P. 751–761.
17. Characterization of HPGe gamma spectrometers by GEANT4 Monte Carlo simulations / L. Szentmiklosi, T. Belgya, B. Maroti, Z. Kis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – V. 300. – P. 553–558.
18. Keyser R.M., Hensley W.K. Efficiency of germanium detectors as a function of energy and incident geometry: Comparison of measurements and calculations // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2005. – V. 264. – P. 259–264.
19. Калибровка спектрометра. Протокол 13–240–02/88784 от 06.06.2016. – Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, 2016. – 3 с.
20. Zidan W.I. Refining of a Mathematical Model for an HPGe Detector // Journal of Nuclear and Particle Physics. – 2015. – V. 5 (2). – P. 30–37.

*Поступила 29.05.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Алейников Ю.В.**, начальник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

**Попов Ю.А.**, заместитель начальника лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

**Прозорова И.В.**, начальник группы лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии НЯЦ РК.

**Прозоров А.А.**, студент Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 539.1.074

**MODELING SEMICONDUCTOR DETECTOR OF ESPECIALLY PURE GERMANIUM****Yury V. Aleynikov<sup>1</sup>,**  
aleynikov@nnc.kz**Yury A. Popov<sup>1</sup>,**  
Popov@nnc.kz**Irina V. Prozorova<sup>1</sup>,**  
Prozorova@nnc.kz**Alexandr A. Prozorov<sup>2</sup>,**  
prozorov\_a\_a@mail.ru<sup>1</sup> Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,  
10, Krasnoarmeyskaya Street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan.<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance of the work.** One of the major contemporary problems is the development of geo-ecology background radiation control methods and means of natural and technogenic origin on the basis of high-precision portable semiconductor detectors. The known methods for calculating such detectors by the Monte Carlo method is widely used in the field of radiation safety: radiation protection, calculations of nuclear reactors, screening and modeling of the detectors; the radiation parameters of the field of ionizing radiation sources are calculated. The MCNP program implementing the Monte Carlo method is a modeling tool for radiative transfer, mainly in those cases when the measurement are difficult or practically feasible. In the research the MCNP program was used for simulating the detector of high-purity germanium Ge (Li) and the method to improve the determination of the response function for this type of detector. The results obtained in the simulation are accurate enough, there is a good match between the model and the experimental data.

**The main aim** of the research is to develop the computational model GC1020 type germanium detector for solving assessment detector efficiency.

**Research methods:** construction and adjustment of the geometric and physical model of the detector; alternative calculations to determine the effectiveness of the registration detection monoenergetic gamma radiation using the MCNP5 program.

**Results.** Modeling the high-purity germanium detector using the Monte Carlo method is important for the efficiency of registration in the case of samples with irregular geometry, and for large samples, where it is difficult to assess the effectiveness experimentally. The paper introduces the calculation of the efficiency of a semiconductor detector which is widely used in our laboratory for various samples that were performed for the geometry of a point source; detector parameters were optimized with 5 % error between the MCNP and experimental performance at different distances from the detector. The optimized geometry of the detector was later confirmed by the effective transfer to other geometry.

**Key words:**

Source, efficiency of gamma radiation detection, semiconductor detector, simulation by the Monte Carlo method, optimization of a detector geometry.

**REFERENCES**

1. *Tverdotelnye poluprovodnikovye detektory* [Solid-state semiconductor detectors]. Available at: [http://rad-stop.ru/25-tverdotelnye-poluprovodnikovyye-detektory/#.WWWhl\\_kROWk](http://rad-stop.ru/25-tverdotelnye-poluprovodnikovyye-detektory/#.WWWhl_kROWk) (accessed 20 May 2017).
2. *Germanium Detectors. User's Manual. Ge-USR 9/96*. Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06450. Available at: <http://www.canberra.com> (accessed 15 May 2017).
3. *Inspector Volume Two. Spectrometric system user guide Genie-PC: S404-USR*. – 2014. – 271 p.
4. Briesmeister J.F. *MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Los Alamos, LANL Publ., 2000. 319 p.
5. Zadeh E.E., Feghhi S.A.H., Bayat E., Roshani G.H. Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the Range of 40keV to 1.46MeV. *Journal of Experimental Physics*, 2014, Article ID 623683, pp. 4–5.
6. Salgado C.M., Brandao L.E.B., Schirru R., Pereira C.M.N.A., Conti C.C. Validation of a NaI (Tl) detector's model developed with MCNP-X code. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 59, pp. 19–25.
7. Hau I.D., Russ W.R., Bronson F. MCNP HPGe detector benchmark with previously validated Cyltran model. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, vol. 67, pp. 711–715.
8. Boson J., Agren G., Johansson L.A. Detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2008, vol. 587, pp. 304–314.
9. Koleska M., Viererbl L., Marek M. Development of the MCNPX model for the portable HPGe detector. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 104, pp. 351–354.
10. Vasconcelos D.C., Pereira C., Gallardo S., Rocha Z., Santos T.O. Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory/CDTN using A MCNP-gamma vision method. *2011 International Nuclear Atlantic Conference*. MG, Brazil, 2011. pp. 17–24.
11. Hahin D., Unlii K. Modeling a gamma spectroscopy system and predicting spectra with Geant-4. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009, vol. 282, no. J, pp. 167–172.
12. Medhat M.E., Wang Y. Assessment of the suitability of Monte Carlo simulation for activity measurements of extended sources.

- Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 300, no. J, pp. 1005–1011.
13. Vargas M.J., Timon A.F., Diaz N.C., Sanchez D.P. Influence of the geometrical characteristics of an HpGe detector on its efficiency. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, vol. 253, no. 3, pp. 439–443.
  14. Britton R., Burnett J., Davies A., Regan P.H. Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, vol. 295, no. J, pp. 2035–2041.
  15. Rodenas J., Pascual A., Zarza L., Serradell V., Ortiz J., Ballesteros L. Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 2003, vol. 496, pp. 390–399.
  16. Novotny S., To D. Characterization of a high-purity germanium (HPGe) detector through Monte Carlo simulation and nonlinear least squares estimation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 304, pp. 751–761.
  17. Szentmiklosi L., Belgya T., Maroti B., Kis Z. Characterization of HPGe gamma spectrometers by GEANT4 Monte Carlo simulations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 300, pp. 553–558.
  18. Keyser R.M., Hensley W.K. Efficiency of germanium detectors as a function of energy and incident geometry: Comparison of measurements and calculations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, vol. 264, pp. 259–264.
  19. Kalibrovki spektrometra [Calibration of the spectrometer]. Protocol № 13–240–02/88784 from 06.06.2016. Branch IAE NNC RK, 2016. 3 p.
  20. Zidan W.I. Refining of a Mathematical Model for an HPGe Detector. *Journal of Nuclear and Particle Physics*, 2015, vol. 5 (2), pp. 30–37.

Received: 29 May 2017.

#### Information about the authors

**Yury V. Aleynikov**, head of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

**Yury A. Popov**, deputy head of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

**Irina V. Prozorova**, head of the group of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

**Alexandr A. Prozorov**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.