

УДК 59.14.27

© Ю. А. Попов, И. В. Прозорова, А. А. Прозоров, 2020

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА HPGe НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ИЗ ОСОБО ЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Предметом исследования является методика (принципы) построения модели детектора гамма-излучения на основе кристалла из особо чистого германия. Для исследования по методу Монте-Карло созданы компьютерные модели двух разных по эффективности детекторов, имитирующие процесс регистрации гамма-излучения в объеме кристалла с учетом основных процессов, протекающих в кристалле детектора. Получены результаты сравнения расчетной эффективности отклика детекторов и их моделей, построенных по одной методике, но с разными входными параметрами. Установлена успешная с точки зрения эффективности регистрации схема построения модели детектора, определены геометрические параметры основных элементов детектора. Развитие такого подхода позволяет создавать модели детекторов на основе особо чистого германия с помощью стандартной процедуры. Результаты исследования будут полезны при разработке гамма-спектрометров или их калибровке перед началом использования.

Кл. сл.: детектор, гамма-спектрометр, спектрометрия, компьютерная модель, метод Монте-Карло

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня, несомненно, гамма-спектрометр относится к обязательной принадлежности любой лаборатории, занимающейся активационным анализом. Наиболее распространенным становится полупроводниковый спектрометр, который показывает отличные результаты. Однако внедрение полупроводниковых гамма-спектрометров в аналитическую практику привело к новым проблемам, которые необходимо решать для успешной реализации возможностей детектирования.

Для калибровки детектора необходимо получить кривые (функции) отклика, что затруднительно и требует большого количества гамма-излучателей, чтобы учесть весь интересующий нас диапазон энергии. Для калибровки перед измерениями объемных геометрий обычно используются несколько стандартных источников, поэтому требуется как минимум один стандартный источник для каждого варианта взаимного расположения источник—детектор. Метод Монте-Карло может быть использован для определения кривых отклика детектора, что делает измерения проще и удобнее. В данной работе представлено подробное описание процедуры моделирования и калибровки двух коаксиальных детекторов HPGe, и также представлена часть входного файла для кода MCNP. Сравнение смоделированных и экспериментальных данных показало очень хорошее согласие. Расхождения в основном связаны с эффек-

том нескорректированной суммы пиков в экспериментальных данных.

За небольшим исключением любой процесс неупругого ядерного взаимодействия или радиоактивного распада сопровождается испусканием γ -квантов. Это излучение обусловлено переходами между различными энергетическими уровнями возбужденного ядра, образовавшегося в результате ядерного взаимодействия или радиоактивного распада ядер предшественников. Поэтому испускаемое γ -излучение имеет строго определенное значение энергии и очень узкую естественную ширину линии. Хорошим моментом является также высокая проникающая способность γ -излучения, что позволяет проводить гамма-спектрометрический анализ с достаточно толстыми пробами. Особенно стоит отметить, что качественный и количественный анализы можно проводить за одно измерение.

Полупроводниковые германиевые детекторы широко используются для гамма-спектрометрии из-за высокого разрешения, которое позволяет различать γ -кванты близких энергий. Тем не менее экспериментальное определение кривых (функций) отклика детектора затруднено. Во-первых, требуется не один стандартный источник, а целый набор радиоизотопов. Во-вторых, существует так называемый эффект суммирования, который заключается в том, что если в ходе регистрации одного γ -кванта детектором будет зарегистрирован второй γ -квант, то на выходе спектрометра появится

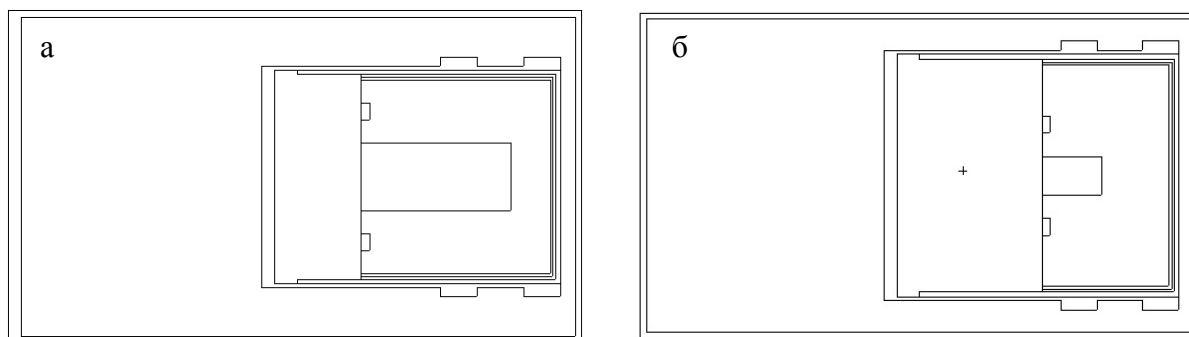


Рис. 1. Основная схема.

а — модель детектора GC1020, б — модель детектора GC1518

импульс, амплитуда которого будет соответствовать суммарной энергии, потерянной обоими γ -квантами, особенно когда источник излучения размещается близко к детектору. При этом эффект не зависит от активности источника. Все вышеперечисленные условия влияют на результаты и должны быть приняты во внимание при использовании полупроводниковых детекторов [1–4].

Мы предлагаем другой способ определения кривых (функций) отклика детектора с помощью метода Монте-Карло. Предложена усовершенствованная процедура, основанная на работах [5–10] и проверенная на детекторах фирмы Canberra с разрешением 10 и 20 %, которые имеются в лаборатории.

Данная методика моделирования представлена в связи с тем, что только часть данных о кристалле содержится в сертификатах, предоставляемых производителем, описывающих его основные характеристики и размеры. Обычно это: высота кристалла, его диаметр, радиус и расстояние между кристаллом и окном детектора, точнее расстояние от внешней поверхности кристалла до внутренней поверхности пластиковой крышки корпуса. Остальная часть информации о детекторе недоступна и должна быть определена в ходе моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛА

Самым важным шагом является моделирование самого кристалла детектора. Существует ряд производителей гамма-спектрометрических систем, но только три компании производят сами кристаллы из особо чистого германия: ORTEC, PGT и Canberra. Другие создатели детекторов используют кристаллы одного из этих производителей. При производстве кристалл германия шлифуют до идеально цилиндрической формы. Если кристалл детектора должен быть коаксиальным, то край на одном конце кристалла закругляют для улучшения сбора заряда; этот процесс называется

bulletization (придание кристаллу закругленной формы). На тыльной стороне кристалла создается омический контакт, с помощью легирования ионами бора, в результате в приповерхностной области образуется слой с низким удельным сопротивлением (p+ переход). На лицевой стороне кристалла напыляют литий, в результате диффузии лития образуется p- переход.

Моделирование кристалла детектора является критически важным шагом, потому что это именно та область, где будет учитываться вклад γ -квантов в процессе поглощения энергии. Процедура моделирования воспроизведена на двух разных моделях детектора: GC1020 и GC1518. Схема построения позволяет создать модель каждого детектора, не меняя описания ячеек, только задавая требуемые параметры в описании поверхностей.

Основная схема двух разных детекторов, которую мы должны воспроизвести в нашей математической модели, представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлен набор поверхностей первого порядка, использованных для моделирования непосредственно кристалла детектора как отдельной 3D-фигуры (ячейки). Математическое описание состоит из трех цилиндров (поверхности 3, 8 и 9) и четырех плоскостей (поверхности 1, 2, 10 и 11), скомплектованных вместе. Остальные фигуры (ячейки) системы и поверхности, их описывающие, рассмотрены ниже.

Ниже приведен сегмент исходного кода для входного файла MCNP относительно определения поверхностей для описания кристалла детектора:

```
1 pz height+base-Outer_Li-Inner_B
2 pz base
3 cz diameter/2-Outer_Li-Inner_B
...
```

При описании методики в данной статье следует условиться, что часть параметров задана как переменные. В процессе моделирования необходимо

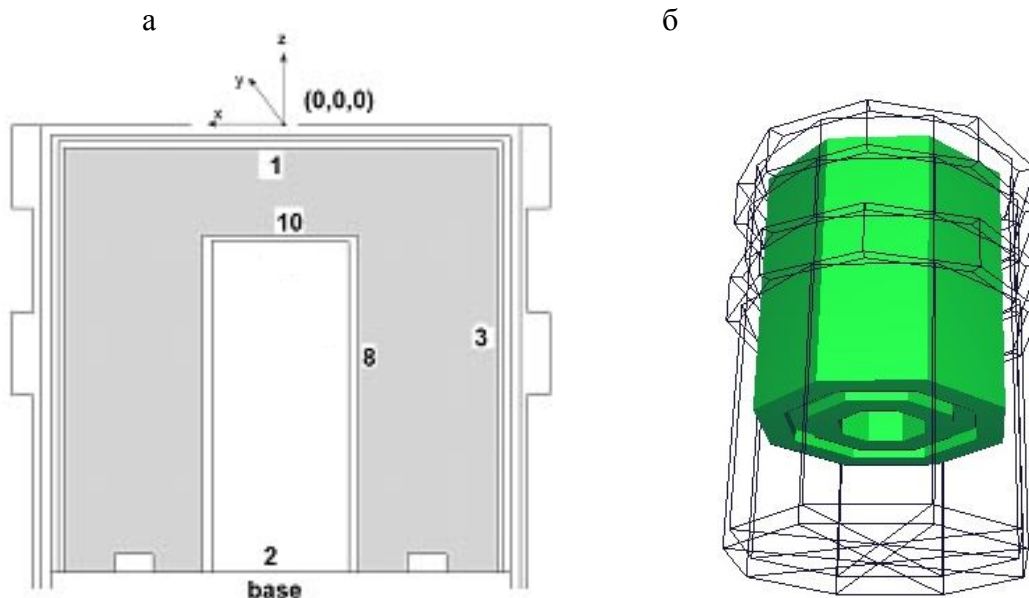


Рис. 2. Схематическое изображение геометрических форм для описания кристалла детектора. а — вертикальный разрез, б — 3D-модель; 3, 8 — цилиндрические поверхности с осью z ; 1, 2, 10 — плоские поверхности в плоскости (xy)

задать точные значения, соответствующие моделируемому детектору. В данном случае поверхности подобраны таким образом, чтобы внешняя плоскость корпуса детектора соответствовала уровню 0, а значение переменной *base* — основанию кристалла (рис 2, а). При моделировании кристалла необходимо задать следующие переменные: *height* — высота кристалла (сертификат), *diameter* — диаметр кристалла (сертификат), *Outer_Li* — толщина мертвого слоя (должна быть подобрана в ходе итерационных расчетов), *Inner_B* — толщина слоя из бора (должна быть подобрана в ходе итерационных расчетов).

Глубину отверстия для электрода детектора обозначим через переменную *hole_height*; если значение неизвестно, то его необходимо подбирать в ходе итерационных процессов при моделировании объема кристалла детектора, но оно должно быть явно меньше *height* и в среднем попадать в интервал от 50 до 90 % от высоты кристалла. Обозначим через переменную *hole_diameter* диаметр отверстия для электрода.

В дополнение к вышеперечисленным основным правилам и переменным необходимо обязательно учитывать так называемый мертвый слой (см. рис. 3), в котором электроны, получившиеся в результате взаимодействия фотонов, не собираются полностью из-за того, что происходит процесс

некогерентного рассеяния и напряженность электрического поля в этой области ниже рабочего уровня. Толщина мертвого слоя зависит от размера детектора, рабочего напряжения, времени эксплуатации. Следовательно, она должна быть определена для каждого детектора отдельно. Из-за высокого атомного номера германия существует большая вероятность взаимодействия фотонов в этой области, особенно для фотонов с низкой энергией, следовательно, мертвый слой должен быть точно определен [11, 12].

Ниже приведен сегмент исходного кода для входного файла MCNP5 [13, 14], задающий определения поверхностей для описания мертвого слоя кристалла:

```
4 pz height+base-Inner_B
5 cz diameter/2-Inner_B
6 cz diameter/2
7 pz height+base
```

и для описания борного слоя кристалла:

```
8 cz hole_diameter/2
9 cz hole_diameter/2-hole_depth
10 pz hole_height+base
11 pz hole_height+base - hole_depth
```

Для описания технологической выемки используются три переменные *hole_ring_in*, *hole_ring_out*, соответственно радиусы внутреннего и внешнего цилиндра, а переменная *ring_he* определяет глубину выемки:

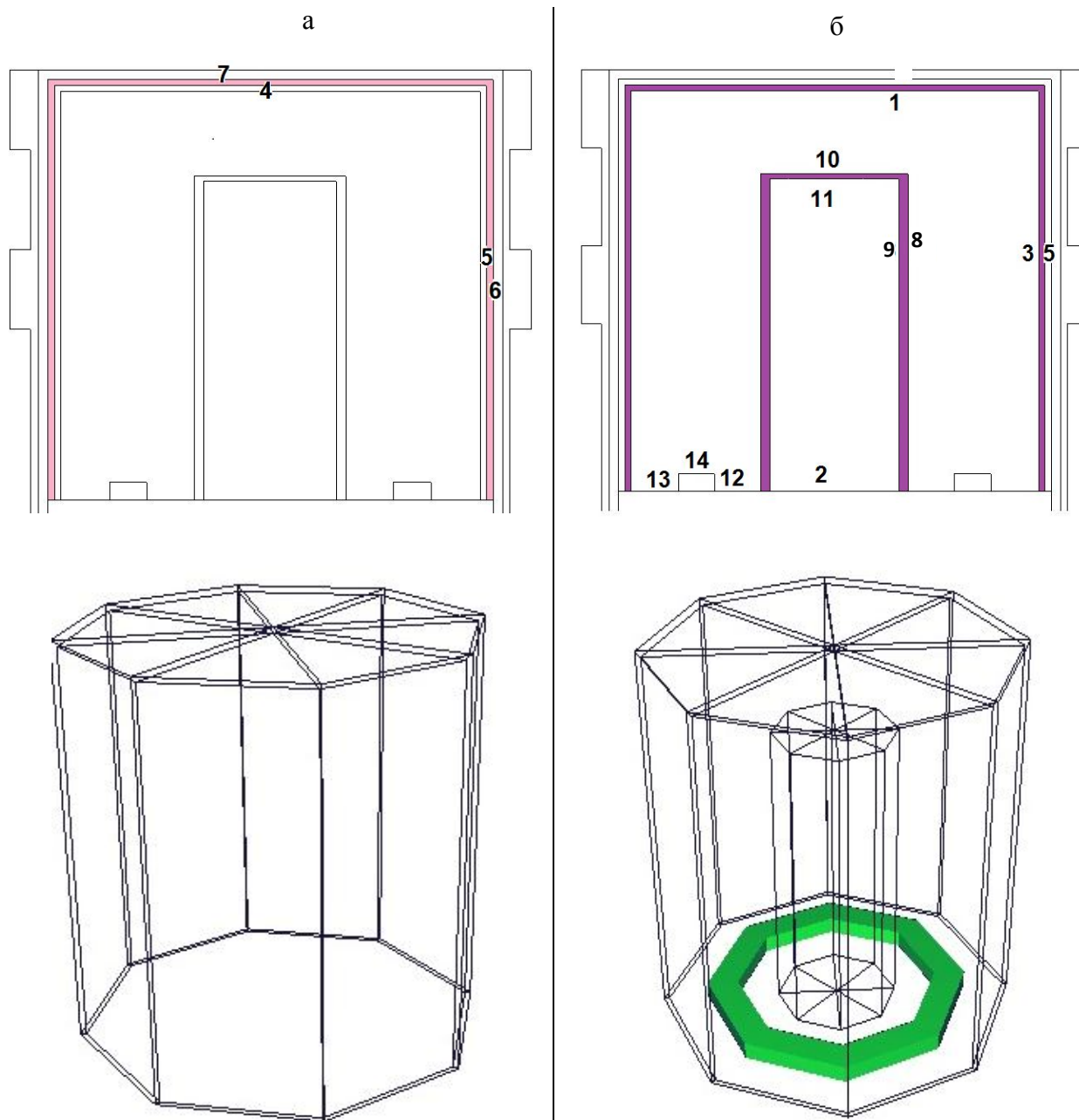


Рис. 3. Схематическое изображение элементов детектора, включаемых в описание MCNP5.
 а — мертвый слой детектора: поверхности 4, 7 (плоские), 5, 6 (цилиндрические); б — борный слой и технологическая выемка: цилиндры 3, 5, 8, 9, 12, 13, плоскости 1, 2, 4, 10, 11, 14

```
12  cz hole_ring_in/2
13  cz hole_ring_out/2
14  pz ring_he+base
```

Поверхности 4–11, возможно, потребуется подкорректировать в соответствии с результатами, полученными при измерениях точечных источников ^{152}Eu и ^{137}Cs по процедуре, описанной ниже.

КОРПУС ДЕТЕКТОРА И ДЕРЖАТЕЛЬ КРИСТАЛЛА

Корпус детектора включает в себя: держатель кристалла, алюминиевый корпус детектора, алюминиевое окно для предотвращения возможного повреждения кристалла. На рис. 4 показаны все детали держателя кристалла и корпуса детектора.

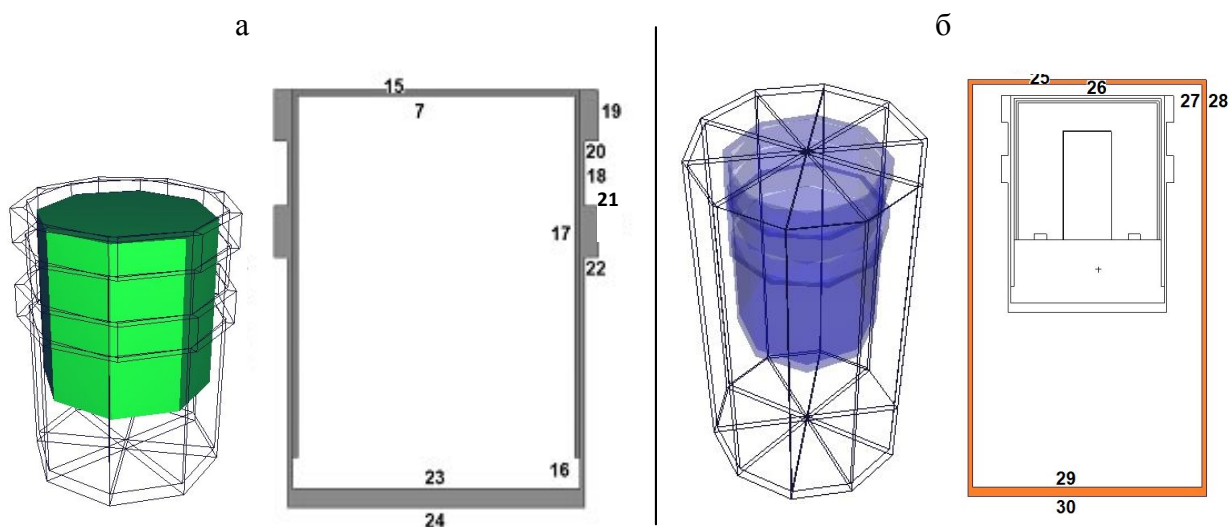


Рис. 4. Схематическое изображение держателя кристалла и корпуса детектора. а — держатель кристалла: 17, 18, 19 — цилиндрические поверхности с осью z , 7, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24 — плоские поверхности в плоскости (xy); б — корпус детектора: 27, 28 — цилиндрические поверхности с осью z , 25, 26, 29, 30 — плоские поверхности в плоскости (xy)

Табл. 1. Значения переменных, используемые в описании двух моделей детекторов

Переменная	Значение, см*	Примечание
Holder_di1	5.7	Внутренний диаметр держателя
Holder_di2	5.86	1 внешний диаметр держателя
Holder_di3	6.3	2 внешний диаметр держателя
Holder_he1	6.67	1 высота держателя
Holder_he2	6.98	2 высота держателя
HDPE_height	6.044	3 высота держателя
Holder_th1	0.1	1 толщина
Holder_th2	0.08	2 толщина
ring1	0.86	Высота первого кольца
ring2	1.94	Высота второго кольца
ring_he	0.2	Высота боковых колец держателя
casing_di	7.62	Диаметр корпуса
casing_he	13.244	Высота корпуса
casing_th	0.15	Толщина корпуса

* значения указаны в см из-за особенностей задания исходного файла

Перечислим переменные, которые потребуются для моделирования корпуса. Эти величины можно найти в описании к детектору или измерить непосредственно. Параметры, использованные нами для моделирования обоих детекторов, представлены в табл. 1.

Ниже приведен сегмент исходного кода MCNP5, содержащий определение поверхностей для описания деталей держателя:

```

15 pz height+base+Holder_th1
16 pz height+base-HDPE_height
17 cz Holder_di2/2-Holder_th2
18 cz Holder_di2/2
19 cz Holder_di3/2
20 pz height+base+Holder_th1-ring1
21 pz height+base+Holder_th1-ring2
22 pz height+base+Holder_th1-ring2-ring1
23 pz height+base+Holder_th1-Holder_he1
24 pz height+base+Holder_th1-Holder_he2

```

Сегмент исходного кода MCNP5 для корпуса:

```
25 pz 0
26 pz height+base+Holder_th1+DistanceFrom
   Window-casing_th
27 cz casing_di/2
28 cz casing_di/2-casing_th
29 pz -casing_he+casing_th
30 pz -casing_he-casing_th
```

Также для целей исследования должен быть смоделирован источник; ниже приведен пример задания источника ^{60}Co :

```
sdef erg=0.66165 par=2 pos 0 0 5
     axs 1 0 0 rad=d3 ext=d2
si3 0 0.15
si2 0.0 0.04
```

В целом источник фотонов моделировался с помощью задания объемного источника, расположенного вдоль оси детектора на расстоянии от 50 до 350 мм от окна детектора. Параметр, определяющий энергию фотонов источника (erg), принимал последовательно следующие значения: 121.78, 244.7, 344.28, 443.98, 778.9, 867.38, 964.13, 1112.1, 1407.99 кэВ. Пространство между источником и детектором заполнено воздухом.

В рамках работы были учтены особенности определения эффективности счета: были проведены две серии расчетов с тем отличием, что одна серия включала перенос вторичных электронов, а вторая серия не имела данной функции. Все расчеты были выполнены для $2 \cdot 10^7$ частиц. Отклик детектора смоделирован с помощью оценки по высоте импульса F8. Эта оценка обеспечивает учет распределения энергии импульсов, созданных в кристалле. Для удобства оценки и интерпретации последующих результатов эффективность счета детектора определялась в результате подсчета основной энергии фотопика. Все результаты расчетных оценок имели относительные погрешности от 0.015 до 0.09. Для сравнения с результатами моделирования были использованы источники ОСГИ ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co с известной активностью.

```
1 1 -5.323 (3 -5 2 -4 ):(-5 -4 1 )
2 2 -5.323 (-3 -1 10):(2 -10 8 -3 ) #9
3 3 -2.34 (9 -8 -11 2 ):(-8 -10 11)
4 0 -9 -11 2
5 4 -0.534 (4 -7 -5 -6):(5 -6 2 -7 )
6 5 -0.955 (-17 6 16 -15):(-15 7 -6)
8 0 (-16 23 -17):(-2 16 -6)
9 0 12 -13 -14 2
10 6 -2.702 (-18 17 24 -15):(-17 -23 24):(18 -15 20 -19):(18 -21 22 -19)
11 6 -2.702 (-27 28 -25 30):(-28 -25 26):(-28 30 -29)
12 0 (-26 15 -28):(19 -28 -15 2):(-19 18 -20 21):(-2 24 18 -28):(-22 2 -19 18):(-24 29 -28 )
13 7 -1.29e-3 (-32 -31 25):(-31 27 -25 30):(-31 33 -30 )
14 0 31:32:-33
```

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После первого подхода к моделированию были получены результаты, приведенные на рис. 5 и 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕРТВЫХ СЛОЕВ КРИСТАЛЛА

Для того, чтобы точно смоделировать детектор HPGe, необходимо знать толщину мертвого слоя кристалла. Размеры кристаллов, описанных выше, предоставляются производителем и остаются неизменными для конкретного детектора. С другой стороны, мертвый слой для каждой поверхности кристалла, возможно, придется корректировать в ходе расчетов. Для определения мертвого слоя на внешней поверхности кристалла был выполнен ряд измерений с использованием точечных источников ^{152}Eu в нескольких положениях как сверху, так и сбоку. После этого было выполнено моделирование обоих детекторов, точно повторяющее геометрию счета. Сравнивая результаты моделирования и экспериментальной эффективности, толщину мертвого слоя на входе MCNP корректировали соответствующим образом до уменьшения неопределенности ниже 4 %.

Для определения мертвого слоя на внутренних поверхностях проводились измерения в тех же положениях с точечным источником ^{137}Cs , который является более проникающим гамма-излучателем. Процесс моделирования был продолжен с целью уточнения мертвого слоя вокруг внутреннего отверстия кристалла. Фотоны низких энергий в основном взаимодействуют ближе к поверхности кристалла, поэтому некоторые вторичные электроны могут откладывать часть своей энергии в мертвом слое и не регистрироваться в основном объеме. В связи с чем электроны, как и фотоны, должны учитываться при моделировании.

ОПИСАНИЕ ВХОДНОГО КОДА ДЛЯ MCNP

Ниже представлена часть кода MCNP с описанием всех 14 ячеек, используемых при моделировании детекторов:

В данном случае корректировка моделей не производилась. Следует отметить, что на этом этапе отклонения расчетных значений от экспериментальных

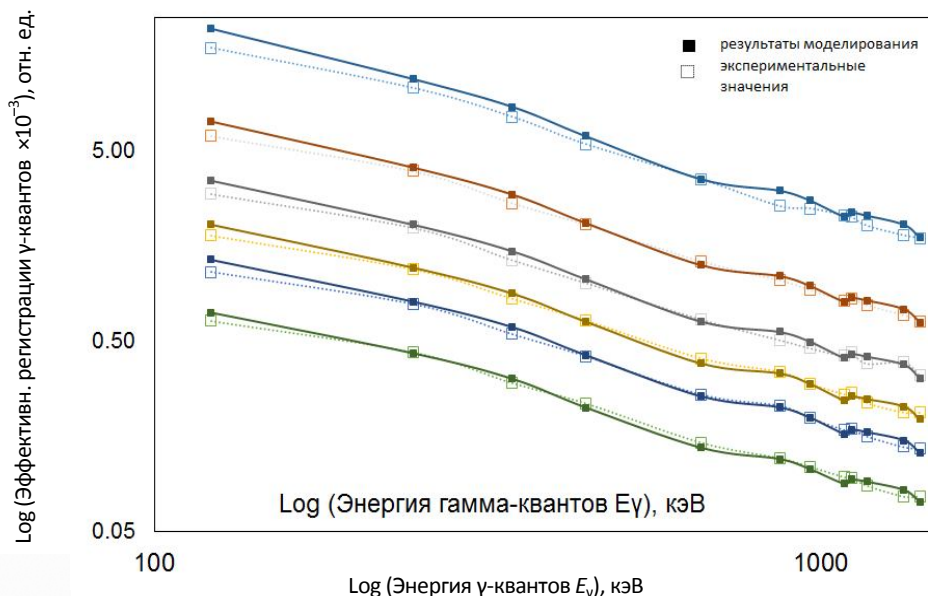


Рис. 5. Экспериментальные и смоделированные кривые (функции) отклика для детектора HPGe GP1020 на различных расстояниях источника

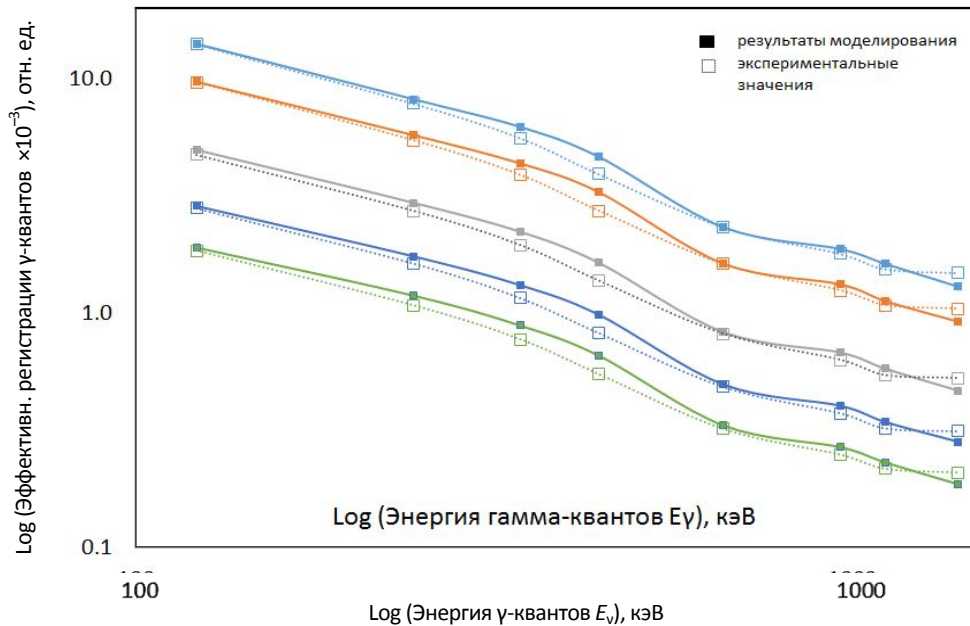


Рис. 6. Экспериментальные и смоделированные кривые (функции) отклика для детектора HPGe GP1518 на различных расстояниях источника

составили в среднем около 10 %. В табл. 2 и 3 представлены сравнения результатов эффективности для энергий ^{137}Cs и ^{60}Co , рассчитанных по скорректированным кривым для детектора HPGe GP1020 и GP1518.

В дальнейшем необходима итерационная процедура корректировки для того, чтобы различия между расчетными и экспериментальными значениями не превышали 4 %.

Методика моделирования подтверждена сравнением двух расчетных геометрий. Кривые эф-

фективности для обеих геометрий были определены экспериментально и путем моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе подробно описана процедура моделирования коаксиального детектора HPGe. Определение мертвого слоя путем измерения двух точечных источников делает возможным использование метода Монте-Карло для расчета отклика детектора.

Табл. 2. Сравнение результатов эффективности для энергий ^{137}Cs и ^{60}Co , рассчитанных по кривым эффективности для 20 % детектора HPGe GP1020

Энергия, кэВ	Эффективность		
	Эксперимент	Расчет	Отклонение, %
661.65	0.40565	0.38035	6.09
1172	0.23515	0.24750	-4.87
1332	0.21038	0.22625	-7.74

Табл. 3. Сравнение результатов эффективности для энергий ^{137}Cs и ^{60}Co , рассчитанных по кривым эффективности для 15 % детектора HPGe GP1518

Энергия, кэВ	Эффективность		
	Эксперимент	Расчет	Отклонение, %
661.65	0.49865	0.48595	2.4
1112.1	0.34516	0.3235	6.23
1407.99	0.28435	0.30445	-10.32

Использование моделирования методом Монте-Карло для расчета кривых (функций) отклика показывает эффективность и позволяет избежать проведения калибровки детектора с несколькими изотопами, экономя время, финансовые ресурсы и усилия.

В дополнение к этому кривые эффективности, рассчитанные методом Монте-Карло, в отличие от экспериментальных, не имеют эффекта суммирования пиков из-за отсутствия изотопов, которые испускают несколько гамма-квантов в одном событии распада.

В настоящее время некоторые производители предлагают детекторы и программное обеспечение для автоматической генерации кривых отклика методом Монте-Карло. Однако этот вариант предполагает затраты в тысячи долларов США, в отличие от которого представленная здесь процедура финансово очень привлекательна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knoll G.E.* Radiation detection and measurement, 3rd ed., NY: Wiley, 2000. 802 p.
2. *Rahman M.S., Cho G.* HPGe detector energy response function calculation up to 400 keV based on Monte Carlo code // Journal of scientific research. 2010. Vol. 2, is. 3. P. 479–483. DOI: 10.3329/jsr.v2i3.4668
3. *Lepy M.C., Plagnard J., Ferreux L.* Study of the response function of aHPGe detector for low-energy X-rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. 2003. Vol. 505, is. 1-2. P. 290–293. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01071-4
4. *Kojim Y., Ikuta T., Asai M., Taniguchi A., Shibata M., Yamamoto H., Kawade K.* Measurement of response functions of HPGe detectors for monoenergetic electrons and positrons in an energy range of 6.0-9.0 MeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. 1997. Vol. 126, is. 1-4. P. 419–422. DOI: 10.1016/S0168-583X(98)80002-5
5. *Conti C.C., Salinas I.C.P., Zylberberg H.A.* Detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP // Progress in Nuclear Energy. 2013. Vol. 66. P. 35–40. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.03.003
6. *Santo A.E.S., Wasserman F.G., Conti C.C.* HPGe well detector calibration procedure by MCNP5 Monte Carlo computer code // Ann. Nucl. Energy. 2012. Vol. 46. P. 213–217. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.03.037
7. *Nakamura T., Suzuki T.* Monte Carlo calculation of peak efficiencies of Ge(Li) and pure Ge detectors to voluminal sources and comparison with environmental radioactivity measurement // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1983. Vol. 205, is. 1-2. P. 211–218.
8. *Conti L.L., Bacnett L.A., Bertelli L., Lopes K.L.* Ge detectors calibration procedure at IRD/CNEN for in situ measurement // Proceedings of II International Symposium on Technologically Enhanced Natural Radiation (II TENR). Rio de Janeiro, 1999. P. 55–63. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/016/33016249.pdf?r=1&r=1
9. *Moreira M.C.F., de Carvalho Conti C., Schirru R.* A new NaI(Tl) four-detector layout for field contamination assessment using artificial neural networks and the Monte

- Carlo method for system calibration // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sec A. 2010. Vol. 621, is. 1-3. P. 302–309. DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.027
10. *Salgado C.M., Conti C.C., Becker P.H.* Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20-150 keV X-rays // Appl. Radiat. Isot. 2006. Vol. 64, is. 6. P. 700–705. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.12.011
 11. *Дирнли Дж., Нортрон Д.* Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М.: Мир, 1966. 311 с.
 12. *Портной А.Ю., Павлинский Г.В., Горбунов М.С., Сидорова Ю.И.* Об особенностях фона, обусловленных переносом и сбором электронов в Si-детекторе // Научное приборостроение. 2011. Т. 21, № 4. С. 145–150. URL: <http://iairas.ru/mag/2011/abst4.php#abst18>
 13. MCNP - A general Monte Carlo n-particle transport code. Version 5. Vol. I: Overview and theory. Los Alamos National Laboratory, 2003 (revised 2008). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf
 14. MCNP - A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 5. Vol. II: User's guide. Los Alamos National Laboratory. 2003 (revised 2008). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf

Институт атомной энергии Национального ядерного центра РК, г. Курчатов, Республика Казахстан

Контакты: *Прозорова Ирина Валентиновна*,
prozorova@nnc.kz

Материал поступил в редакцию 06.04.2020

SIMULATION TECHNIQUE OF MONTE-CARLO FOR AN HPGe DETECTOR BASED ON A CRYSTAL OF HIGHLY PURE GERMANIUM

Y. A. Popov, I. V. Prozorova, A. A. Prozorov

Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan, Kurchatov

The technique (principles) of constructing a model of a gamma-ray detector based on a crystal of highly pure germanium is considered. In order to implement the research using a unified (Monte-Carlo) method, computer models of two detectors with different efficiencies were created to describe the process of registering gamma radiation in the crystal volume, taking into account the main processes in the detector crystal. The results of comparing the designed and simulated response efficiency of detectors constructed by the same technique but with different input parameters are obtained. A successful detector model construction scheme was established from the point of view of registration efficiency; the geometric parameters of the main detector components were determined. The development of this approach allows creating detector models based on highly pure germanium using a standard procedure. The research results might be useful for the development of gamma spectrometers or their calibration before use.

Keywords: detector, gamma spectrometer, spectrometry, computer model, Monte Carlo method

REFERENCES

1. Knoll G.E. *Radiation detection and measurement*. 3rd ed., NY, Wiley, 2000. 802 p.
2. Rahman M.S., Cho G. HPGe detector energy response function calculation up to 400 keV based on Monte Carlo code. *Journal of scientific research*, 2010, vol. 2, is. 3, pp. 479–483. DOI: 10.3329/jsr.v2i3.4668
3. Lepy M.C, Plagnard J., Ferreux L. Study of the response function of aHPGe detector for low-energy X-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2003, vol. 505, is. 1-2, pp. 290–293. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01071-4
4. Kojim Y., Ikuta T., Asai M., Taniguchi A., Shibata M., Yamamoto H., Kawade K. Measurement of response functions of HPGe detectors for monoenergetic electrons and positrons in an energy range of 6.0-9.0 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B*, 1997, vol. 126, is. 1-4, pp. 419–422. DOI: 10.1016/S0168-583X(98)80002-5
5. Conti C.C., Salinas I.C.P., Zylberberg H.A. Detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP. *Progress in Nuclear Energy*, 2013, vol. 66, pp. 35–40. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.03.003
6. Santo A.E.S., Wasserman F.G., Conti C.C. HPGe well detector calibration procedure by MCNP5 Monte Carlo computer code. *Ann. Nucl. Energy*, 2012, vol. 46, pp. 213–217. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.03.037
7. Nakamura T., Suzuki T. Monte Carlo calculation of peak efficiencies of Ge(Li) and pure Ge detectors to voluminal sources and comparison with environmental radioactivity measurement. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1983, vol. 205, is. 1-2., pp. 211–218.
8. Conti L.L., Bacnett LA., Bertelli L., Lopes K.L. Ge detectors calibration procedure at IRD/CNEN for in situ measurement. *Proceedings of II International Symposium on Technologically Enhanced Natural Radiation (II TENR)*, Rio de Janeiro, 1999, pp. 55–63. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/016/33016249.pdf?r=1&r=1
9. Moreira M.C.F., de Carvalho Conti C., Schirru R. A new NaI(Tl) four-detector layout for field contamination assessment using artificial neural networks and the Monte Carlo method for system calibration. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sec A*, 2010, vol. 621, is. 1-3, pp. 302–309. DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.027
10. Salgado C.M., Conti C.C, Becker P.H. Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20-150 keV X-rays. *Appl. Radiat. Isot.*, 2006, vol. 64, is. 6, pp. 700–705. DOI: 10.1016/j.apradiso.2005.12.011
11. Dearnaley G., Northrop D.C. *Semiconductor counters for nuclear radiations*. E. & F.N. SPON LTD, London, 1964 (Russ. ed.: Dirnli G., Nortrop D. *Poluprovodnikovye schetchiki yadernych izlucheniy*. Moscow, Mir Publ., 1966, 311 p.).
12. Portnoy A.Yu., Pavlinsky G.V., Gorbunov M.S., Sidorova Yu.I. [Background properties of si detector, due to electron transport and charge yield]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2011, vol. 21, no. 4, pp. 145–150. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2011/abst4.php#abst18>

13. *MCNP - A general Monte Carlo n-particle transport code. Version 5. Vol. I: Overview and theory.* Los Alamos National Laboratory, 2003 (revised 2008). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf
14. *MCNP - A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 5. Vol. II: User's guide.* Los Alamos National Laboratory, 2003 (revised 2008). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf

Contacts: *Prozorova Irina Valentinovna*,
prozorova@nnc.kz

Article received by the editorial office on 06.04.2020