

Модифицированный метод коррекции аппаратурного спектра рентгеновского излучения для детектора на основе особо чистого германия

В статье рассматривается модифицированный метод коррекции аппаратурного спектра рентгеновского излучения для детектора на основе особо чистого германия (HPGe-детектор) в энергетическом интервале (10–300 кэВ). Метод использует матрицу отклика детектора, полученную методом Монте-Карло, что позволяет путем минимизации влияния функции отклика детектора приблизить внешний вид аппаратурного спектра излучения HPGe-детектора к истинной форме в соответствии с требованиями обновленного международного стандарта ISO 4037-1:2019. Основным отличием данного метода от аналогов является алгоритм дополнительной деконволюции скорректированного спектра, позволяющий получить на выходе гладкую кривую.

Ключевые слова:

Монте-Карло моделирование, коррекция спектра, HPGe-детектор.

**А.А.Загороднюк^{1,2}, Р.В.Лукашевич¹,
К.Г.Сеньковский¹, А.В.Новиченко¹**

¹ Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г.Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет, г.Минск, Республика Беларусь

В 2019 году был пересмотрен стандарт ISO 4037-1:2019 [1-3], регламентирующий требования к характеристикам и методам воспроизводства эталонных полей фотонного излучения, используемых для калибровки дозиметров. В общем случае основными характеристиками такого вида полей излучения, рекомендованными стандартом ISO, являются слой половинного ослабления и средняя энергия излучения. Для более точного определения этих характеристик обновленный стандарт рекомендует использовать спектр фотонного излучения.

Лучше всего для этих целей подходит спектрометр на основе детектора из особо чистого германия (HPGe-детектор). Благодаря своим характеристикам, а именно: высокой разрешающей способности (<1 кэВ для энергии излучения 661 кэВ) и высокой подвижности

основных носителей заряда, фото часть аппаратного спектра излучения для такого детектора по сравнению с детекторами других типов минимально отличается от истинного спектра излучения. Тем не менее, для наиболее точного расчета основных характеристик эталонного поля фотонного излучения аппаратный спектр излучения для HPGe-детектора должен быть подвергнут процедуре коррекции (unfolding of pulse height spectra) [2,3], чтобы быть максимально приближенным к истинному спектру.

Существует ряд алгоритмов [4-6], позволяющих произвести процедуру коррекции аппаратного спектра излучения в зависимости от типа используемого детектора. В основе данных алгоритмов коррекции лежит матрица отклика, характеризующая отклик детектора на воздействие излучения во всем измеряемом энергетическом диапазоне. Существенным недостатком этих алгоритмов является их чувствительность к входным данным, что может приводить к некорректному результату процедуры восстановления спектра. Для устранения недостатков стандартных алгоритмов коррекции авторами статьи был предложен модифицированный алгоритм.

В данной статье исследуется применимость модифицированного алгоритма коррекции спектра для HPGe-детектора в поле фотонного излучения, создаваемого рентгеновской трубкой, в энергетическом диапазоне 10–300 кэВ. В последующем скорректированный спектр используется для расчета характеристик качества излучения согласно стандарту ISO 4037-1-2019. Основным отличием этого алгоритма является построение матрицы отклика с максимально достижимой для заданного детектора точностью, и в последующей обработке скорректированного аппаратного спектра посредством процедуры деконволюции. Данная процедура учитывает энергетическое разрешение детектора и позволяет получить на выходе гладкую

кривую, максимально приближенную по форме к истинному спектру излучения.

Общее описание алгоритма коррекции аппаратного спектра

В самом общем виде алгоритм коррекции аппаратного спектра можно описать следующим образом.

1. Создание Монте-Карло модели HPGe-детектора, совпадающей по таким параметрам, как размер, форма, масса, конструкционные материалы, отклик на заданное воздействие с реальным детектором.

2. Создание матрицы отклика детектора, которая представляет собой набор энергетических аппаратных спектров (отклика детектора) на моноэнергетическое излучение с заданными характеристиками.

3. Предварительная коррекция спектра при помощи стандартного алгоритма [4], который можно описать уравнением (1):

$$T(E) = \frac{M(E) - \sum_{E'=E+1}^{E_{max}} R(E, E')T(E')}{R(E, E)}, \quad (1)$$

где $M(E)$ – аппаратный спектр; $T(E)$ – спектр после коррекции; $R(E, E')$ – элемент матрицы отклика детектора; $R(E, E)$ – диагональный элемент матрицы отклика детектора.

4. Обработка предварительно скорректированного спектра, которая заключается в деконволюции – разложении спектра по функциям Гаусса. Данная процедура позволяет учесть энергетическое разрешение детектора при восстановлении аппаратного спектра излучения в заданном энергетическом интервале, снизить чувствительность алгоритма к качеству входных данных и получить на выходе восстановленный спектр – гладкую кривую, приближенную по форме к истинному спектру излучения.

Для проверки работоспособности модифицированного алгоритма коррекции был использован HPGe-детектор Ortec GLP25300,

Табл.1. Основные характеристики детектора Ortec GLP25300.

Тип детектора	Полупроводниковый, HPGe
Рабочая площадь детектора	500 мм ²
Толщина чувствительной области детектора	13 мм
Входное окно	Ве (250 мкм)
Тип охлаждения	Жидкостное (жидкий азот)
Рабочая температура	-170 °С
Энергетический диапазон	5–400 кэВ
Энергетическое разрешение (полная ширина на полувысоте для заданной линии)	450 эВ для линии 59,5 кэВ (²⁴¹ Am) 550 эВ для линии 122 кэВ (⁵⁷ Co) 650 эВ для линии 165,8 кэВ (¹³⁹ Ce) 890 эВ для линии 391,7 кэВ (¹¹³ Sn)

используемый при измерении фотонного излучения в области до 400 кэВ. Основные характеристики детектора приведены в табл.1.

Создание Монте-Карло модели детектора

В качестве среды разработки модели детектора может быть использована программа Fluka [7], основными преимуществами которой является простота построения модели, широкий диапазон настройки входных данных и условно бесплатная модель распространения. Однако представленные далее рассуждения применимы ко всем программам Монте-Карло моделирования (Geant4, Penelope, MCNP, EGS и др.).

Для построения Монте-Карло модели детектора применяется стандартная итеративная схема, реализуемая в три этапа. Изначально создается программная модель детектора,

описывающая геометрию и материалы детектора согласно спецификациям производителя (рис.1).

Исходные параметры детектора, не указанные в спецификациях (толщина контакта анода, толщина мертвого слоя) выбираются исходя из общих предположений и анализа аналогичных моделей, представленных в ряде публикаций [8,9]. Так как на

аппаратурный спектр влияют также факторы, связанные с процессами генерации сигнала в самом детекторе и его последующей обработки электронными устройствами, то, помимо задания геометрии и материалов, в модель дополнительно вносится математическое описание этих факторов. Данная процедура позволяет максимально приблизить вид модельного спектра к измеренному аппаратурному спектру.

Основным фактором, влияющим на вид аппаратурного спектра излучения для HPGe-детектора, является его энергетическое разрешение. Математическая модель данного фактора в общем виде учитывается путем свертки модельного спектра с функцией Гаусса с заданными параметрами.

В данной статье в качестве такой функции была выбрана форма, описываемая уравнением (2):

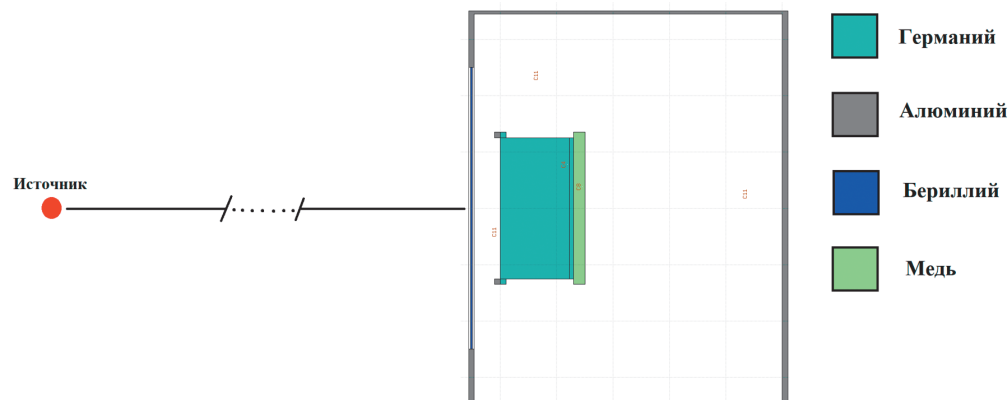


Рис.1. Монте-Карло модель детектора с указанием конструктивных материалов.

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

где a , b , c – константы, получаемые путем анализа измеренного спектра; E_0 – энергия пика полного поглощения; E – энергия (значение из заданного энергетического диапазона).

Функция данного вида имеет под собой прочное теоретическое обоснование и успешно используется в ряде программных продуктов [10].

Всего существует два варианта свертки модельного спектра с функцией Гаусса.

1. Свертка конечного модельного спектра, полученного после завершения моделирования. В данном случае напрямую используется формула (2). При таком подходе моделирование взаимодействия излучения с детектором может быть выполнено в любой программе моделирования методом Монте-Карло.

2. Свертка спектра с функцией непосредственно в процессе моделирования, когда данная математическая процедура выполняется в каждом акте энерговыделения в активном объеме детектора. Для данного случая функция свертки должна быть программно встроена в среду моделирования (как в слу-

Табл.2. Измеренные значения FWHM в зависимости от энергии пика.

Энергия, кэВ	FWHM, эВ
5,8	290
14,4	330
59,5	450
122	550
136	560
165,8	650
391,7	890

чае с программой MCNP [9], где процесс свертки с функцией Гаусса контролируется путем задания трех параметров – a , b , c – в формуле (2)), либо среда моделирования должна давать доступ к процессу моделирования посредством возможности подключения пользовательских модулей. Такой вариант также может быть реализован в программе Fluka при условии использования пользовательских подпрограмм. Для этого варианта прямое использование формулы (2) может быть затруднительно и требует внесения ряда изменений. Корректное описание свертки спектра с функцией Гаусса в процессе моделирования может быть описано алгоритмом Бокса-Мюллера (Box-Muller algorithm), кото-

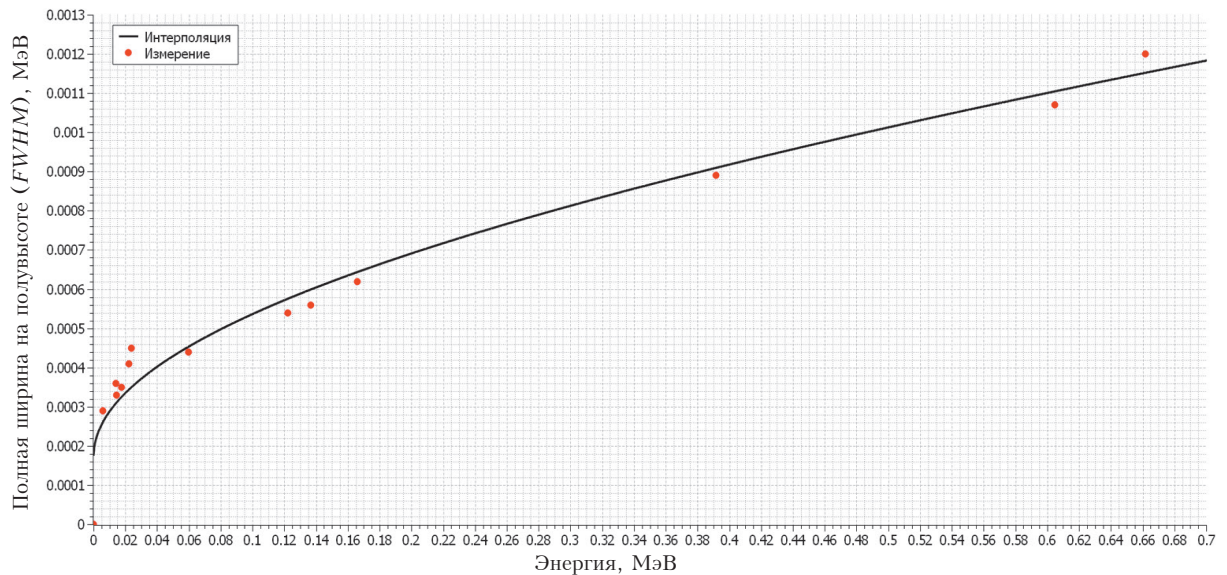


Рис.2. Интерполяция зависимости полной ширины на полувысоте от энергии для детектора Ortec GLP25300 согласно уравнению (4).

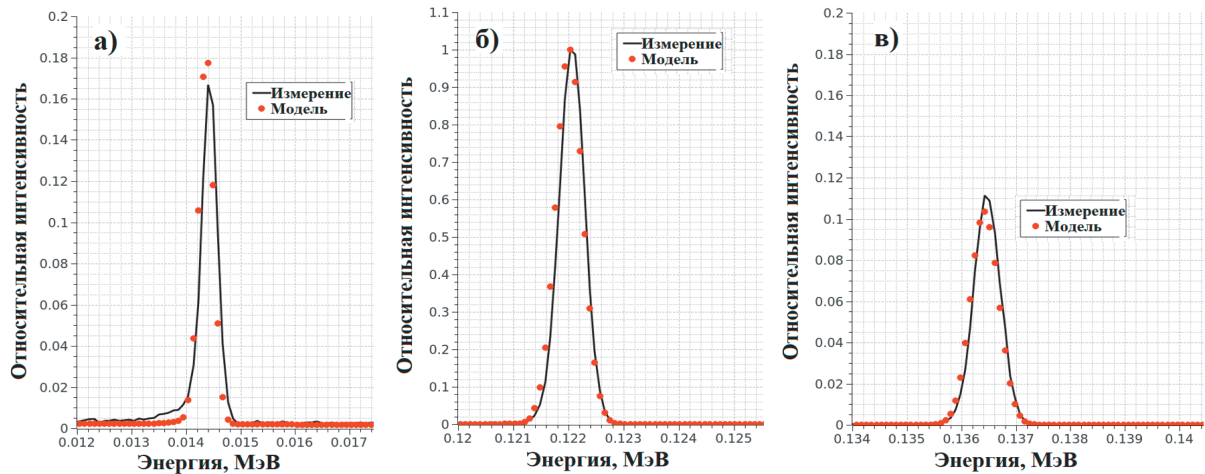


Рис. 3. Результаты сопоставления модельного спектра ^{57}Co с измеренным спектром HPGe-детектора: а) область пика 14,4 кэВ; б) область пика 122 кэВ; в) область пика 136 кэВ.

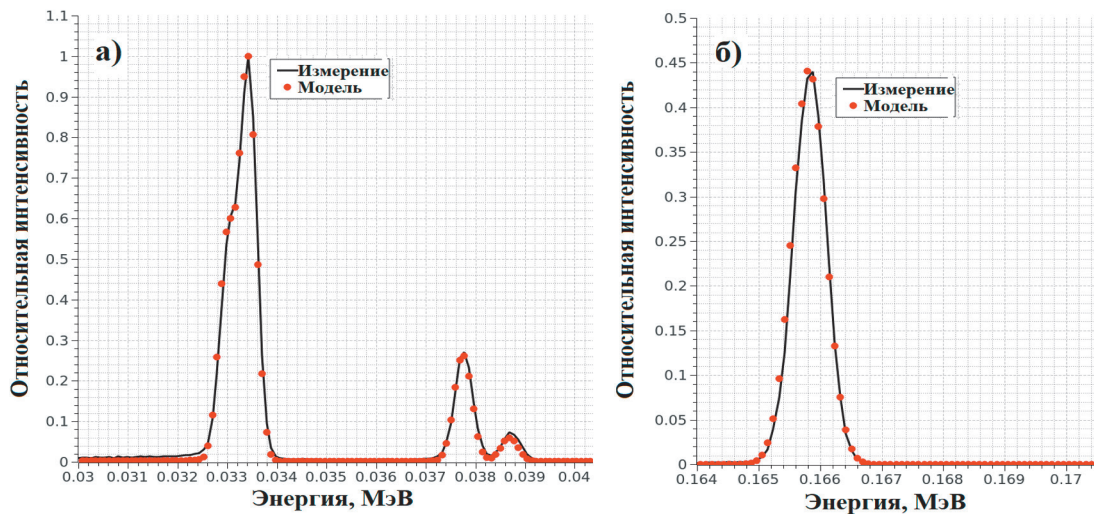


Рис. 4. Результаты сопоставления модельного спектра ^{139}Ce с измеренным спектром HPGe-детектора: а) область пиков 33,0 кэВ, 33,5 кэВ, 37,7 кэВ, 38,7 кэВ; б) область пика 165,9 кэВ.

рый, применительно к заданной модели, имеет следующий вид:

$$E = E' + \frac{a + b\sqrt{E' + cE'^2}}{2\sqrt{2\text{Ln}2}} \cdot \sin(2\pi\zeta_1) \sqrt{-2\text{Ln}\zeta_2}, \quad (3)$$

где E' – истинная энергия, выделяемая при взаимодействии частицы с детектором; E – энергия в выходном модельном спектре; a, b, c – константы, получаемые путем анализа измеренного спектра; ζ_1, ζ_2 – случайные независимые величины, равномерно распределенные в интервале $[0; 1)$.

Константы a, b, c находятся исходя из предположения, что полная ширина пика в изме-

ренном энергетическом спектре на полувысоте описывается уравнением (4):

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2}, \quad (4)$$

где a, b, c – искомые константы; E – энергия центроида пика.

После построения начальной модели на реальном детекторе в заданной геометрии измеряется излучение ряда выбранных радионуклидов, спектр которых хорошо известен и расположен в исследуемом энергетическом диапазоне. Этот этап необходим для нахождения констант (a, b, c) из формулы (4). Результаты измерения полной ширины на полувысоте

пика ($FWHM$) для ряда нуклидов представлены в табл.2. По заданным значениям была построена интерполяция согласно формуле (4), из которой были определены коэффициенты a , b , c .

Результат интерполяции показан на рис.2. Значения, найденные из интерполяции ($a = 0,00010124453$, $b = 0,001395739$, $c = -0,5279330202$), имеют хорошее согласие с рядом публикаций [8,9], в которых производилось построение Монте-Карло модели HPGe детектора.

Далее происходит сопоставление результатов реальных измерений с данными моделирования. Ряд неизвестных параметров (толщина мертвого слоя, размер кристалла) подгоняются до полного совпадения модельного спектра с аппаратурным. После нескольких итераций было обнаружено удовлетворительное согласие между модельным и аппаратурным спектрами при толщине мертвого слоя, равной 10 мкм и толщине анодного контакта, равной 1 мкм. Результаты сопоставления модельных спектров излучения с аппаратурными для выбранных нуклидов представлены на рис. 3, 4.

Анализируя сопоставление модельных и аппаратурных спектров, можно сделать вывод о хорошем согласии Монте-Карло модели и реального детектора. Следует отметить, что все выше приведенные спектры лежат в области энергий до 200 кэВ, а граничная энергия рассматриваемого в данной статье диапазона составляет 300 кэВ. Однако HPGe-детектор имеет линейную энергетическую шкалу. В кривой эффективности регистрации детектора, как и в функции (4), в рассматриваемом диапазоне отсутствуют экстремальные точки. Это позволяет предположить, что построенная модель будет адекватно описывать реальный отклик детектора в рассматриваемом энергетическом интервале.

Создание матрицы отклика HPGe детектора

Основным элементом алгоритма коррекции аппаратурного спектра излучения является матрица отклика. Под откликом детектора понимается аппаратурный спектр, полученный путем облучения детектора моноэнергетическим фотонным излучением с заданной энергией. Количество элементов в строке равно количеству каналов детектора в рассматриваемом энергетическом интервале (рис.5). Количество строк, равное количеству моноэнергетических линий, которыми будет облучаться детектор, выбирается исходя из предполагаемой точности алгоритма коррекции. При составлении матрицы отклика рассматривался интервал (10–370 кэВ) с 4096 каналами, один энергетический канал равен 90 эВ. Данный интервал был выбран для того, чтобы матрица отклика была квадратной. Для набора необходимого количества функций отклика для матрицы модель детектора последовательно облучалась моноэнергетическим излучением с энергией, соответствующей заданному каналу детектора при известной энергетической калибровке. Всего было смоделировано 4096 функций отклика (по количеству каналов).

Начальные параметры были выбраны исходя из вычислительных возможностей, погрешности расчета единичной модели и

$$R(E, E') = \begin{matrix} & \text{Отклик детектора} & & \text{Шаг матрицы} \\ \begin{pmatrix} E11 & \dots & E1n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ En1 & \dots & Enn \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Рис.5. Иллюстрация матрицы отклика HPGe детектора: строка представляет отклик детектора на воздействие моноэнергетического излучения с заданной энергией E ; столбец – набор линий моноэнергетического излучения, которыми последовательно облучается детектор (шаг матрицы).

временных затрат на создание матрицы. При заданных параметрах размер матрицы составляет 4096×4096 элементов, объем занимаемого дискового пространства равен 200 МБ. Время создания матрицы составило примерно 160 часов. Относительная погрешность расчета для пика полного поглощения в каждом случае составила менее 2%. Для уменьшения времени генерирования матрицы необходимо либо увеличить шаг между двумя последовательными моноэнергетическими линиями, которыми облучается детектор, либо уменьшить количество разыгрываемых историй при единичном моделировании. Однако это может привести к ухудшению качества получаемого спектра.

Процедура обработки скорректированного спектра

Основным отличием модифицированного алгоритма коррекции, используемого в данной статье, от стандартных алгоритмов, приведенных в ряде других работ [4,6], является дополнительный этап деконволюции скорректированного спектра с учетом энергетического

разрешения детектора. Суть данного этапа заключается в предположении, что аппаратный спектр является результатом суммы функций Гаусса, описывающих отклик детектора на единичное моноэнергетическое воздействие (рис.6).

Опираясь на данное предположение, во время этого этапа происходит разложение скорректированного спектра на сумму функций Гаусса с учетом их полной ширины на полувысоте для моноэнергетического излучения, воздействующего на детектор в заданном энергетическом интервале. После разложения идет отбор пиков для каждой найденной функции. Получившийся набор максимальных значений, учитывающий перекрытие функций в области пика, и, как следствие, увеличивающий их высоту, представляет собой гладкую кривую, максимально приближенную по форме к истинному спектру. Эта процедура позволяет получить на выходе восстановленный спектр, который по форме максимально приближен к истинному спектру излучения. Основным преимуществом процедуры,

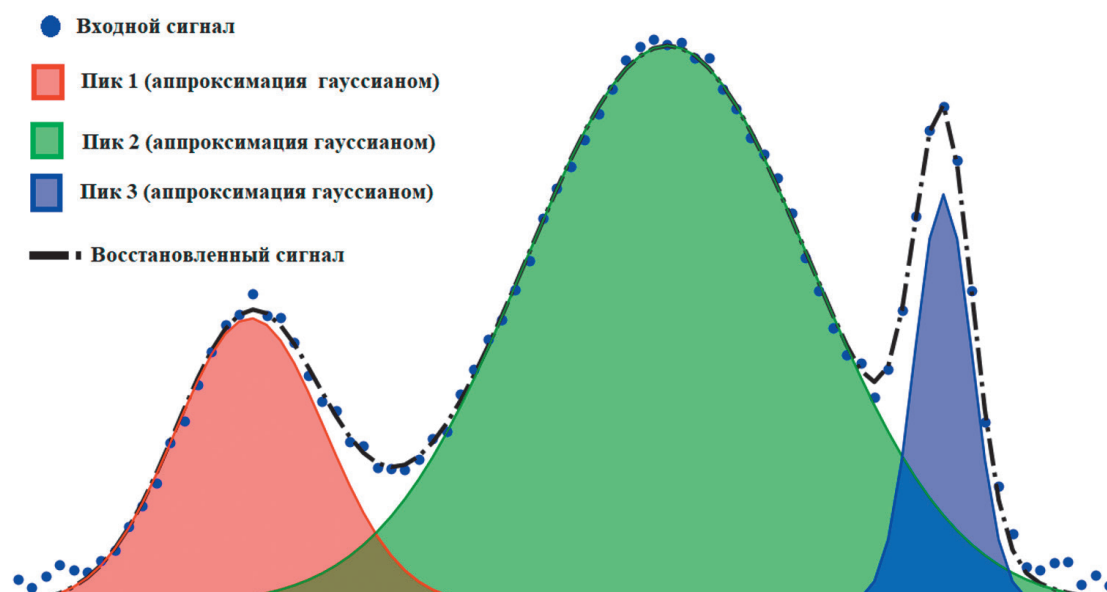


Рис.6. Иллюстрация работы алгоритма деконволюции: входной сигнал (предварительно восстановленный аппаратный сигнал) раскладывается на сумму кривых Гаусса (Пик1, Пик2, Пик3), каждая из которых характеризуется собственным значением полной ширины на полувысоте и пиковым значением.

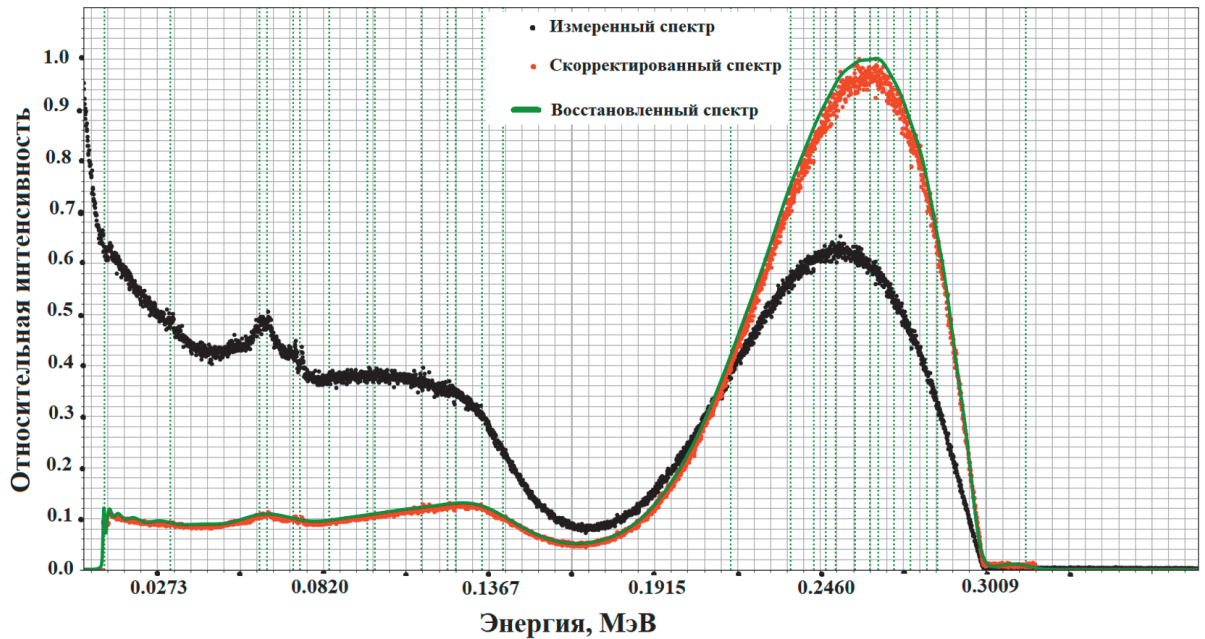


Рис.7. Пример использования алгоритма коррекции спектра при интенсивном потоке ионизирующего излучения: черный – измеренный спектр; красный – спектр, восстановленный стандартным алгоритмом [4]; зеленый – спектр, восстановленный модифицированным алгоритмом.

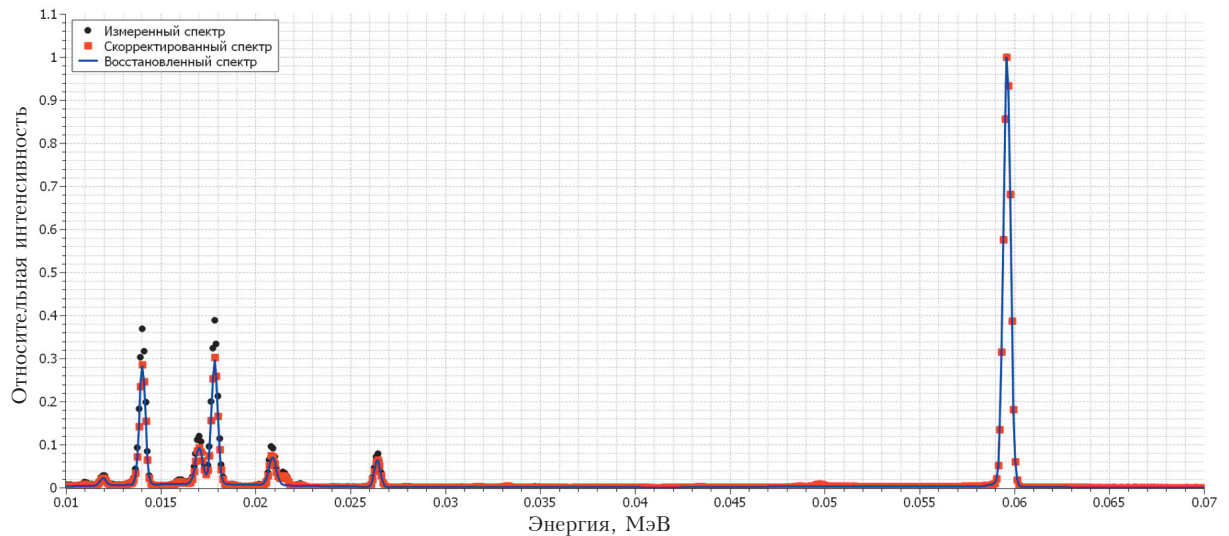


Рис.8-1. Скорректированный спектр ^{241}At – измеренный, скорректированный и восстановленный спектр.

как будет показано далее, является устойчивой алгоритма к входным данным – измеренному аппаратурному спектру. При реальных измерениях в поле фотонного излучения, в особенности при работе в поле излучения рентгеновской трубки, на детектор падает интенсивный поток фотонов в широком энергетическом интервале. Это приводит к ряду

нежелательных явлений. Например, при высокой загрузке в энергетической области, расположенной правее измеряемого спектра, появляется дополнительный сигнал из-за наложения, а сам аппаратурный спектр может содержать большое количество локальных точек перегиба. Далее, в силу особенностей формы кривой эффективности HPGe-детектора, сигнал от фо-

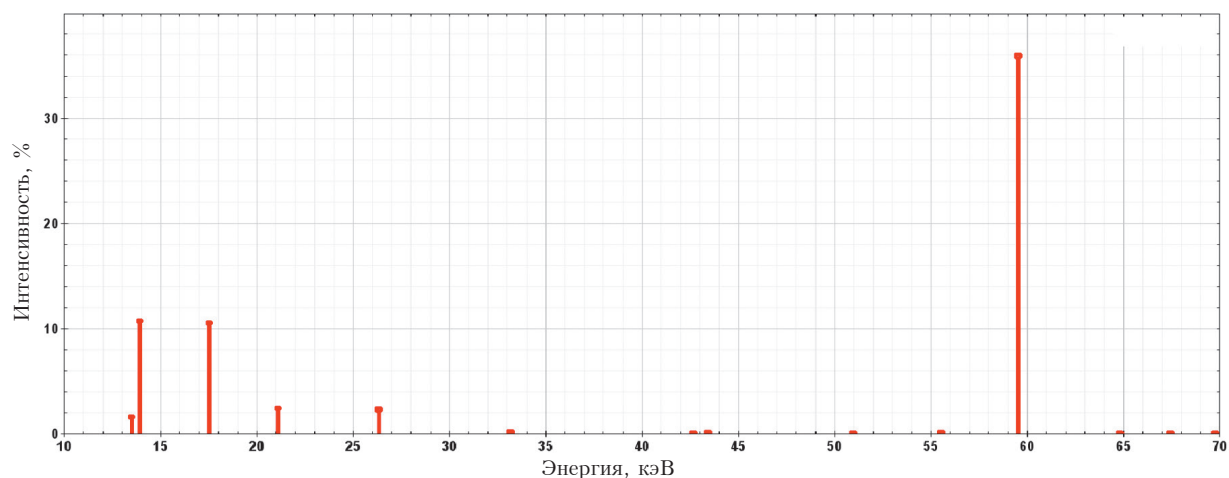


Рис.8-2. Скорректированный спектр ^{241}Am – истинный спектр излучения согласно библиотеке ENDF VIII.0.

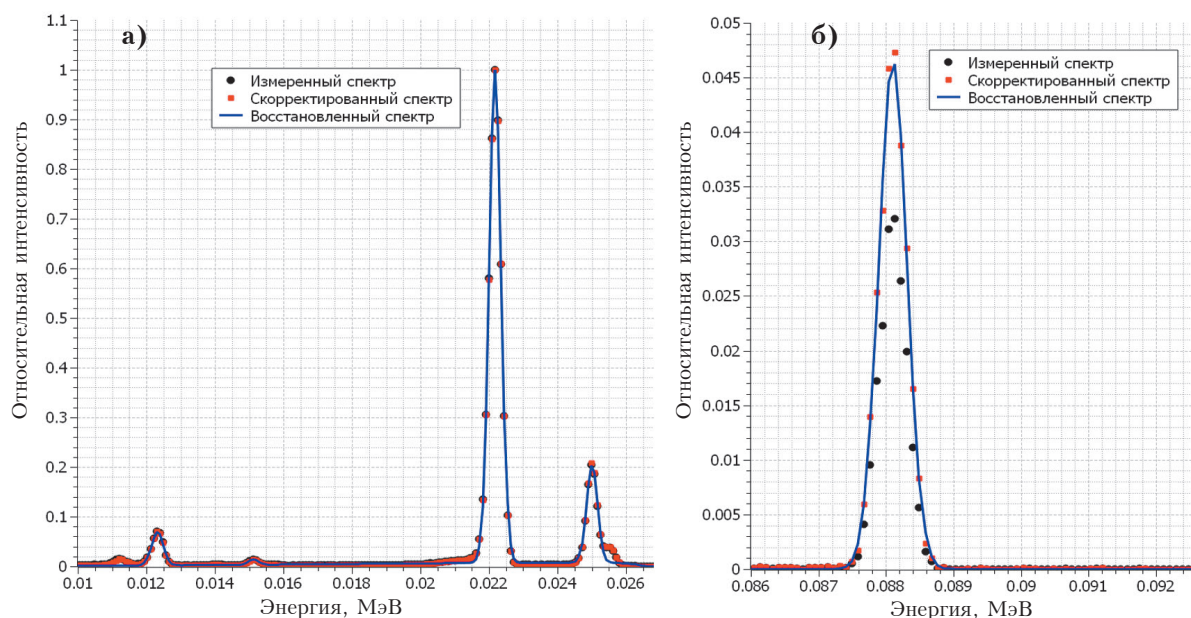


Рис.9. Скорректированный спектр ^{109}Cd : а) область пиков 21,9 кэВ, 22,1 кэВ и 24,9 кэВ; б) область пика 88,0 кэВ.

тонов в низкоэнергетической области будет непропорционально выше сигнала, создаваемого высокоэнергетическими фотонами. Если такой аппаратный спектр попытаться восстановить стандартным алгоритмом коррекции [4], на выходе может получиться сложно интерпретируемая кривая. На рис.7 представлен спектр излучения, полученный на рентгеновской трубке с напряжением 300 кВ для N-серии (согласно стандарту ISO [1,2]). Можно наблюдать, что восстановленный стандартным алгоритмом

[4] спектр (красный цвет) имеет разброс в области максимума пика. Это усложняет интерпретацию выходного спектра, в то время как улучшенный алгоритм коррекции позволяет получить гладкую кривую (зеленый цвет).

Проверка алгоритма коррекции спектра на радионуклидных источниках

Проверка работоспособности алгоритма была произведена с использованием спектров радионуклидных источников путем их коррек-

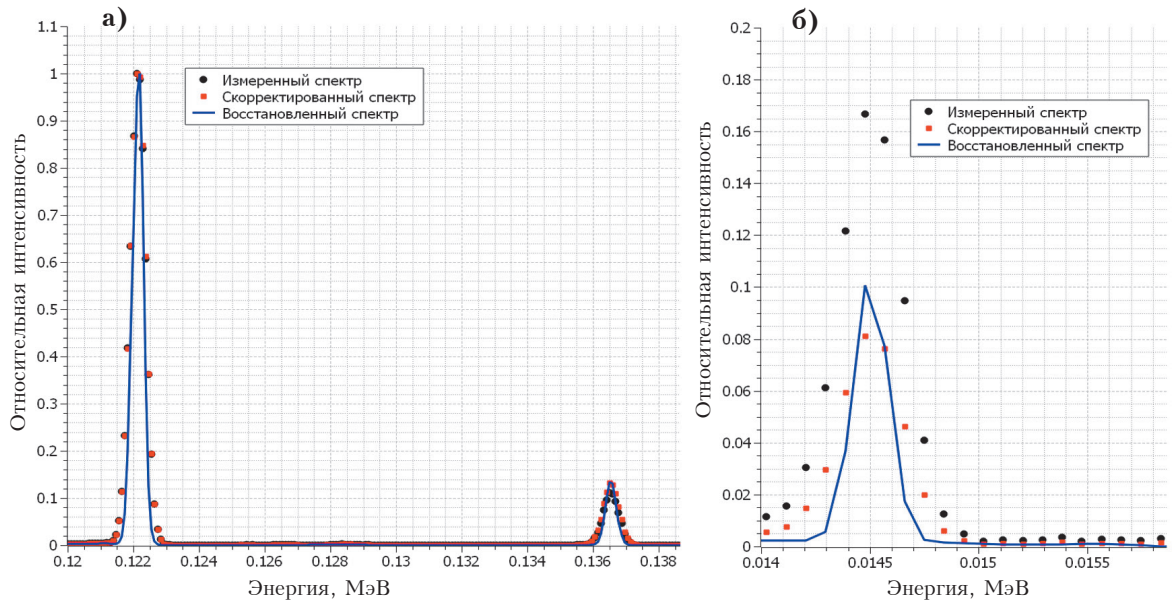


Рис.10. Скорректированный спектр ^{57}Co : а) область пиков 122 кэВ и 136 кэВ; б) область пика 14,4 кэВ.

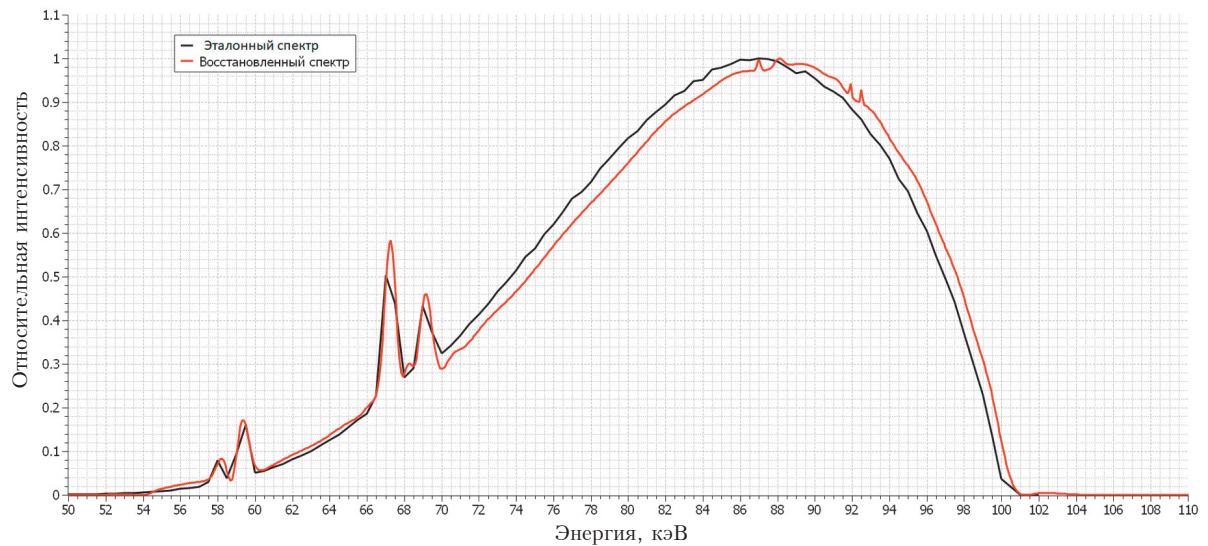


Рис.11. Результат коррекции спектра N-серии (N100).

ции и последующим сравнением с истинными спектрами. Результаты коррекции спектров представлены на рис.8-10.

На рис.8 видно отличие аппаратного спектра излучения для детектора из особо чистого германия от истинного спектра излучения радионуклида, которое проявляется в относительной высоте пиков. Данное различие обусловлено профилем кривой эффективности

регистрации. Этот пример наглядно показывает необходимость применения коррекции спектра при измерениях полей фотонного излучения, энергия которых лежит в широком диапазоне.

Результаты коррекции спектров излучения радионуклидов хорошо согласуются с их истинными спектрами, полученными на основании библиотеки ENDFVIII (сравнивается как форма пика, так и относительное соотношение

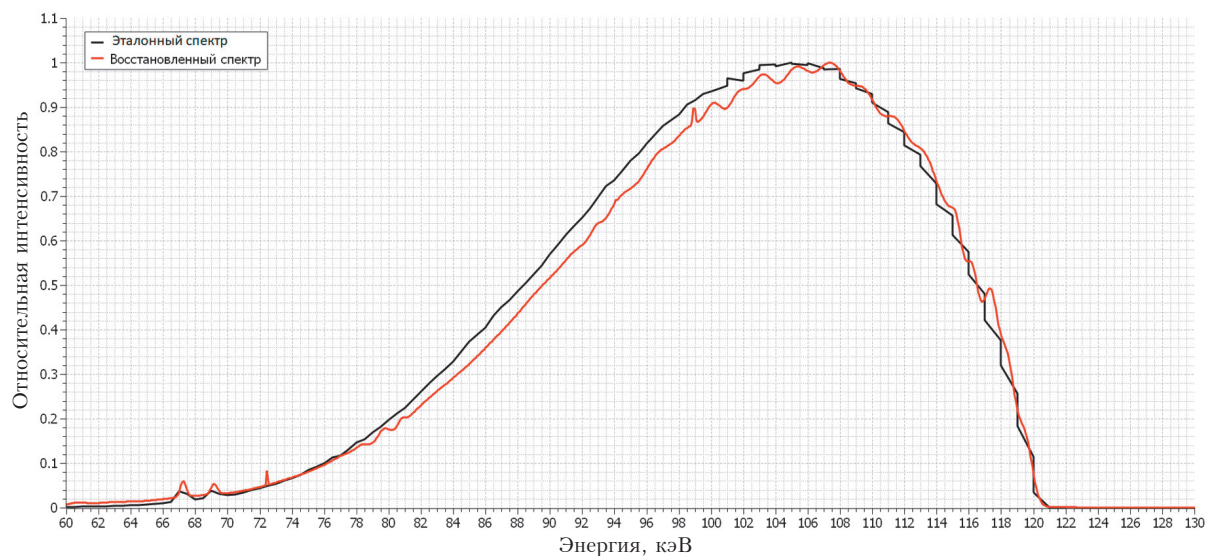


Рис.12. Результат коррекции спектра N-серии (N120).

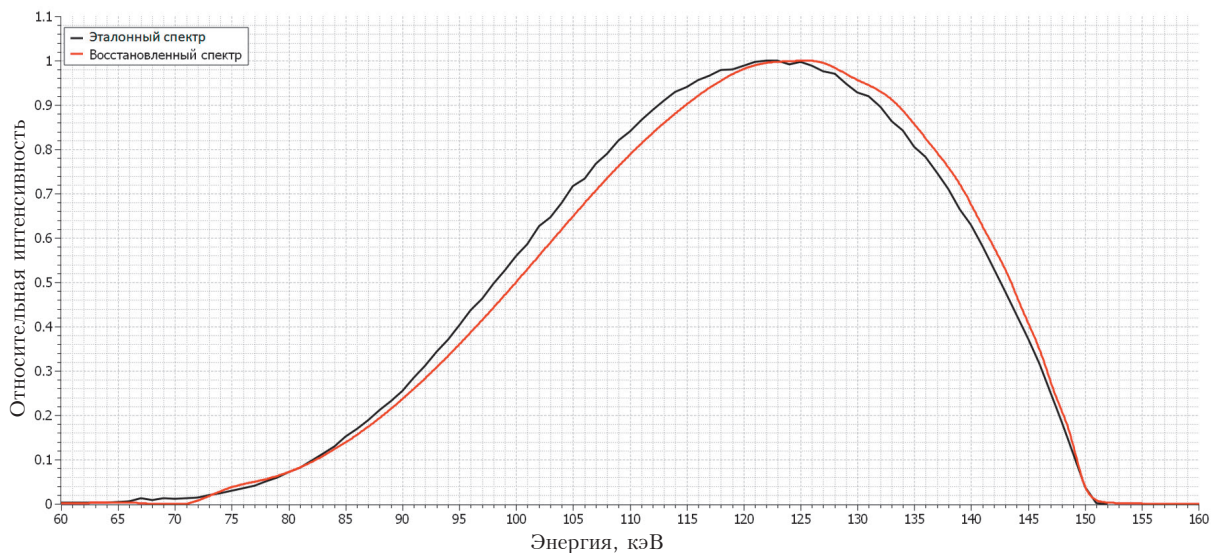


Рис.13. Результат коррекции спектра N-серии (N150).

высот пиков в спектре выбранного радионуклида). Практическая польза от применения дополнительного этапа деконволюции хорошо заметна на рис.10 для пика 14,4 кэВ: высота скорректированного пика ниже, чем высота пика после этапа деконволюции, дополнительный этап обработки позволяет восстановить высоту пика до его исходного значения.

Применение улучшенного алгоритма коррекции спектра для расчета характеристик качества излучения

Для проверки работоспособности улучшенного алгоритма коррекции при расчете величин качества излучения использовалась N-серия спектров излучения (согласно стандарту ISO [2,3]), измеренных при помощи выше описанного детектора из особо чистого германия, полученных на установке УПР-АТ300, разработанной и выпускаемой

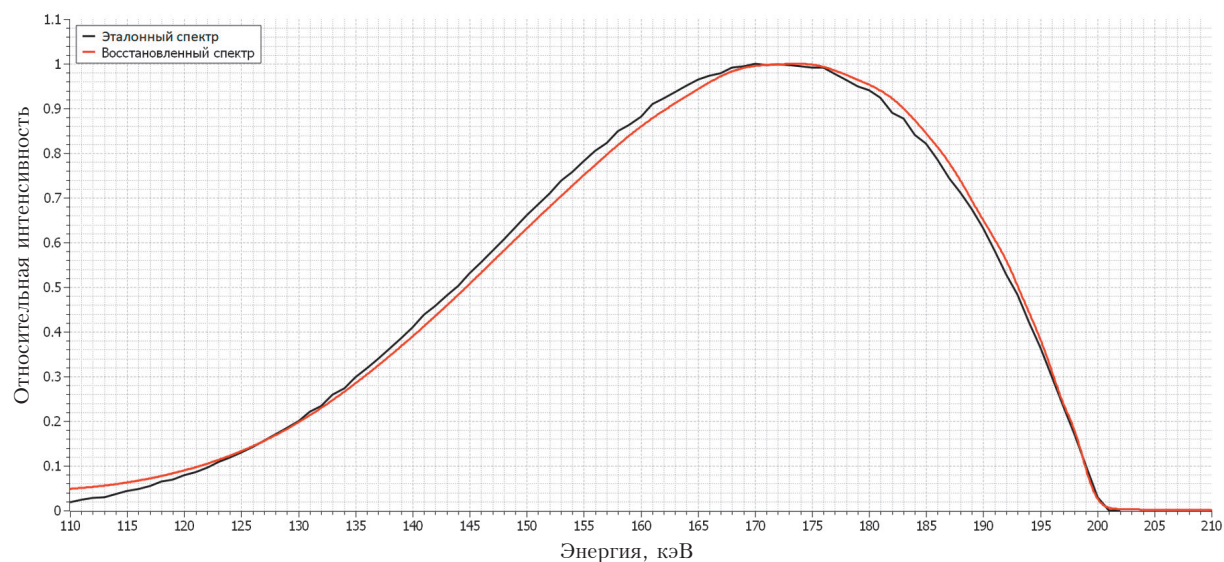


Рис.14. Результат коррекции спектра N-серии (N200).

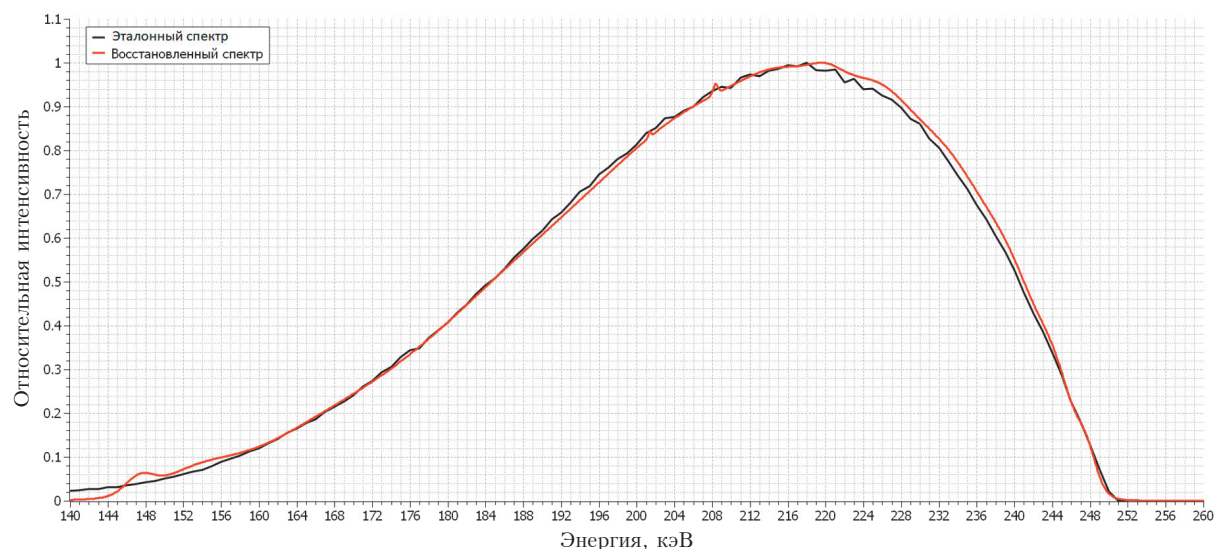


Рис.15. Результат коррекции спектра N-серии (N250).

предприятием «АТОМТЕХ». Корректность функционирования алгоритма проверялась путем сопоставления восстановленных спектров с эталонными спектрами РТВ [1], на основе которых рассчитывались величины в соответствии с требованиями стандарта ISO [2,3]. При помощи восстановленных спектров были рассчитаны характеристики качества излучения (слой половинного ослабления, средняя энергия излучения), которые также сравнивались с параметрами, приведенными в стандарте ISO [2,3]. Результаты коррекции

спектров представлены на рис.11-16. Результаты расчета слоя половинного ослабления и средней энергии приведены в табл.3.

Прямое сравнение восстановленного и эталонного спектров показывает, что разработанный нами модифицированный алгоритм коррекции позволяет максимально приблизить форму измеренного спектра к эталонному виду (matched field согласно стандарту ISO [2]). Небольшие отклонения в форме и положении максимума могут быть связаны как с погрешностями численного моделиро-

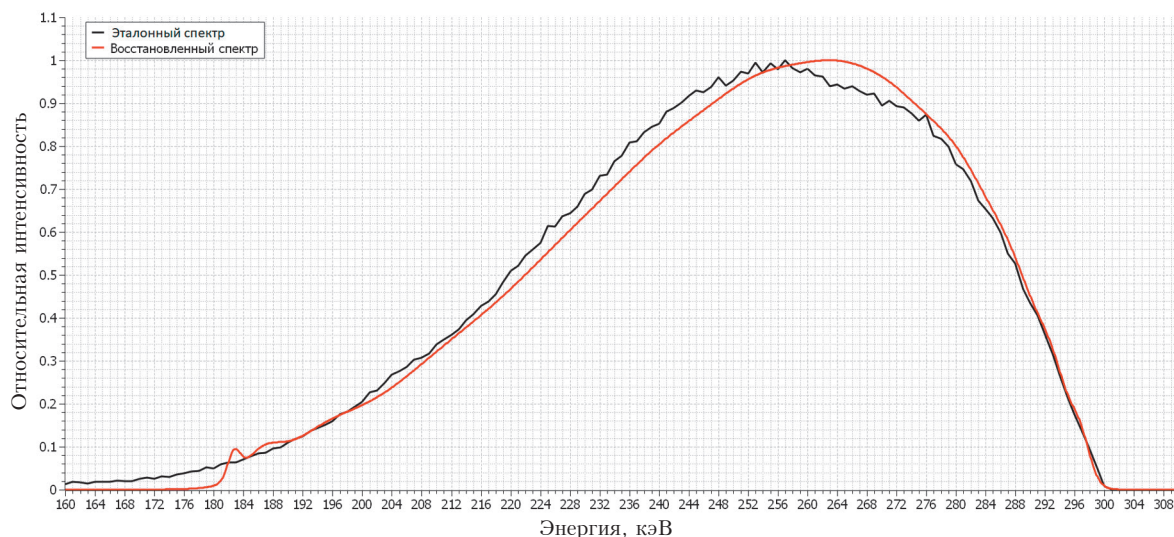


Рис.16. Результат коррекции спектра N-серии (N300).

Табл.3. Сопоставление результатов расчета с табличными данными.

Номер N-серии	Стандарт ISO		Модифицированный алгоритм	
	<E>, кэВ	СПО, мм	<E>, кэВ	СПО, мм
N40	33,3	2,65	33,4	2,56 Al
N80	65,2	0,58	65,2	0,58 Cu
N100	83,3	1,09 Cu	83,8	1,12 Cu
N120	100	1,67 Cu	101	1,67 Cu
N150	118	2,3 Cu	118	2,3 Cu
N200	165	3,92 Cu	165	3,9 Cu
N250	207	5,1 Cu	208	5,0 Cu
N300	248	5,94 Cu	251	5,93 Cu

вания, так и с отличием в параметрах поля рентгеновского излучения, рассматриваемого в статье, и эталонного поля. Данные различия могут быть обусловлены различными техническими характеристиками установок генерирования полей рентгеновского излучения, такими как: точность выставления напряжения на рентгеновской трубке, чистота материалов используемых фильтров, а также различными весовыми коэффициентами, закладываемыми в модель (относительно стандарта ISO [2,3]). Результаты сравнения расчетных величин с данными из стандарта ISO [2] показывают, что различие между ними не превышает 1,5%

для средней энергии излучения и 3,5% для слоя половинного ослабления, что является убедительным аргументом в пользу применимости разработанного нами алгоритма.

Выводы

Результаты коррекции аппаратурных спектров рентгеновского излучения, полученных для детектора из особо чистого германия, имеют хорошее согласие при их прямом сопоставлении с эталонными спектрами. Характеристики качества излучения, рассчитанные при помощи этих скорректированных спектров, имеют хорошее согласие с параметрами качеств излучения, приведенными в стандарте ISO [2]. Таким образом, нами разработан и успешно применяется на предприятии «АТОМТЕХ» механизм восстановления аппаратурных спектров фотонного излучения на эталонной рентгеновской установке в соответствии с современными рекомендациями международного стандарта ISO [1-3].

Отклонения рассчитанных при помощи модифицированного алгоритма величин от эталонных значений могут быть связаны с допущениями как в компьютерной Монте-Карло модели детектора, так и в математическом

алгоритме последующего восстановления. Основными ограничениями применимости алгоритма является невозможность задания полной ширины на полувысоте для каждой кривой Гаусса, на которые раскладывается предварительно скорректированный спектр во время процедуры деконволюции (данный параметр задается для всего интервала), а также время, затрачиваемое на процедуру коррекции, которое имеет нелинейную зависимость от начальных условий (рассматриваемый энергетический диапазон, входные значения для процедуры деконволюции).

Областью применения модифицированного алгоритма коррекции является оценка соответствия полей фотонного излучения, генерируемых рентгеновской трубкой, стандарту ISO [2]. В отличие от аналогов данный алгоритм позволяет работать с реальными спектрами, содержащими шумы, и получать на выходе однозначно интерпретируемый результат.

В ряде случаев (расчет радиационной защиты, изучение проникающей способности излучения), вместо того чтобы полностью моделировать рентгеновскую установку, ее можно заменить условным источником с заданным спектром. В качестве входного спектра модели используется аппаратный спектр, измеренный HPGe-детектором на реальной установке, и восстановленный модифицированным алгоритмом. При таком подходе происходит существенная экономия вычислительных и временных ресурсов, затрачиваемых на моделирование без потери в точности расчета.

В дальнейшем планируется улучшить рассматриваемый алгоритм путем распараллеливания процесса вычисления. Это позволит сократить время коррекции, повысить точность расчета и в перспективе внедрить данный алгоритм в детектирующих устройствах для оперативной оценки полей фотонного излучения.

Литература

1. U. Ankerhold, «Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data – ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic qualities, unfiltered X-ray spectra» *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB-Bericht Dos 34, 2000.*
2. ISO 4037-1: 2019 radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods.
3. ISO 4037-1: 2019 radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV.
4. S. Miyajima. «CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy», *Medical Physics.*, vol. 29, no. 7, pp. 1421-1429, 2002.
5. Загороднюк А.А. Лукашевич Р.В. Сеньковский К.Г. Новиченко А.В. Усовершенствованный алгоритм коррекции аппаратного спектра CdTe детектора // Нелинейная динамика и приложения: труды XXVII Международного семинара. 2020. № 26. С. 445-458.
6. F. Li, Z. Gu, Li Ge, H. Li, X. Tang, X. Lang, B. Hu, «Review of recent gamma spectrum unfolding algorithms and their application», *Results in Physics.*, vol. 13, pp. 1-12, 2019.
7. B.J. Giuseppe, B.K. Till, C.A. Francesco, W.C. Pik, E.Q. Salvatore, F.O. Alberto, F.M. Alfredo «Overview of the FLUKA code», *Annals of Nuclear Energy.*, vol. 82, no. 1, pp. 10-18, 2015.
8. Загороднюк А.А., Корнеев С.В. Моделирование спектров стандартных образцов урана U₃O₈ SRM-969, измеренных при помощи полупроводникового германиевого детектора // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2017. № 3. С. 92-100.

9. J. Atanackovic, G. H. Kramer, M. Hogue, «Monte Carlo model of HPGe detectors used in routine lung counting», *Applied Radiation and Isotopes.*, vol. 79, pp. 94-102, 2013.
10. *MCNP – A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code.*
Technical Report LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2005.

A Modified Method for Correcting Instrumental Spectrum of High Purity Germanium Detector

Zaharadniuk Aliaksei^{1,2}, Lukashevich Roman¹, Syankovsky Konstantin¹, Novichenko Aleksandr¹

¹ Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Minsk, Belarus

² Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper considers an improved method for correcting the instrumental spectrum of a high purity germanium detector (HPGe detector) in the energy range (10–300 keV). The method uses a detector response matrix obtained by the Monte Carlo method, which allows to bring the appearance of the instrumental spectrum of the HPGe detector closer to its true shape by minimizing the influence of the detector response function. The main difference of this method from analogs is the additional deconvolution algorithm of the corrected spectrum, which makes it possible to obtain a smooth curve at the output.

Key words: Monte-Carlo modelling, spectrum correction, HPGe detector.

А.А.Загороднюк^{1,2} (инж.), Р.В.Лукашевич¹ (нач.сект.), К.Г.Сеньковский¹ (зам.нач.сект.),
А.В.Новиченко¹ (инж.).

¹ Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г.Минск, Республика Беларусь.

² Белорусский государственный университет, г.Минск, Республика Беларусь.

Контакты: тел. +37529-171-13-72; e-mail: fiz.zagorodnAA@gmail.com.