

Коррекция аппаратного спектра CdTe-детектора в области рентгеновского излучения с граничной энергией до 150 кэВ

В статье рассматривается улучшенный алгоритм коррекции аппаратного спектра CdTe-детектора в области рентгеновского излучения с граничной энергией < 150 кэВ. Минимизируя влияние функции отклика детектора, алгоритм позволяет восстановить аппаратный спектр, приблизив его к истинному виду. Особое внимание уделяется низкоэнергетической области с граничной энергией до 100 кэВ. Для данной области алгоритм позволяет производить коррекцию спектра с учетом различия между аналитической кривой эффективности и модельной кривой эффективности. Основной целью разработки улучшенного алгоритма является его применение для определения характеристик качества излучения рентгеновской установки.

Ключевые слова:

Монте-Карло моделирование, коррекция спектра, CdTe-детектор, FLUKA.

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

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

² Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Полупроводниковый детектор на основе теллурида кадмия нашел широкое применение в различных областях науки и техники, в которых требуется измерение гамма и рентгеновского ионизирующего излучения с высоким энергетическим разрешением.

Высокая плотность $\rho = 5,85$ г/см³ и высокий $Z_{eff} = 50$ теллурида кадмия позволяют детектору на его основе иметь практически стопроцентную эффективность регистрации фотонного излучения в диапазоне энергий до 60 кэВ. Из-за широкой запрещенной зоны, равной примерно 1,5 эВ, этот полупроводник обладает высокой рабочей температурой порядка 20°C [1], что позволяет проводить измерения при комнатной температуре

(в типичной конструкции кристалл теллурида кадмия размещен на подложке элемента Пельтье, который охлаждает его до температуры -60°C). Энергетическое разрешение для линии 122 кэВ, согласно спецификации прибора, составляет менее 1,5 кэВ (полная ширина пика на полувысоте) [2].

Однако CdTe-детектор имеет ряд особенностей, которые сильно влияют на его аппаратный спектр, а именно: неравномерный сбор заряда (обусловленный как высокой концентрацией дефектов кристалла, так и существенно различными подвижностями носителей заряда в полупроводнике (электронов и дырок)) [3], сильная зависимость характеристик детектора от напряжения смещения [2]. Все это приводит к тому, что внешний вид истинной кривой эффективности регистрации (рис.1) имеет довольно сложную форму, сильно отличающуюся от формы, рассчитанной аналитически.

Эти особенности существенно влияют на аппаратный спектр для CdTe-детектора (рис.2), что делает невозможным его прямое использование в ряде задач. Например, в за-

дачах, требующих определения соотношения высот пиков в спектре, являющихся характеристикой интенсивности излучения порождающих их моноэнергетических линий (как это делается при определении обогащения ядерного топлива). Особенно существенно отклонения аппаратного спектра от его истинного вида могут проявляться в области энергий 20–30 кэВ, где форма модельной кривой наиболее сильно отличается от ее аналитического вида. Данное отклонение, ввиду малых размеров детектора, в основном обусловлено пиками одиночного вылета K -характеристического излучения кадмия.

Одним из методов устранения влияния выше обозначенных особенностей на внешний вид аппаратного спектра является применение алгоритма коррекции. В настоящей работе был реализован улучшенный алгоритм коррекции, позволяющий свести искажения аппаратного спектра к минимуму. Особенностью данного алгоритма является возможность дополнительной коррекции отклонения модельной кривой эффективности от аналитической кривой эффективности для теллурида кадмия.

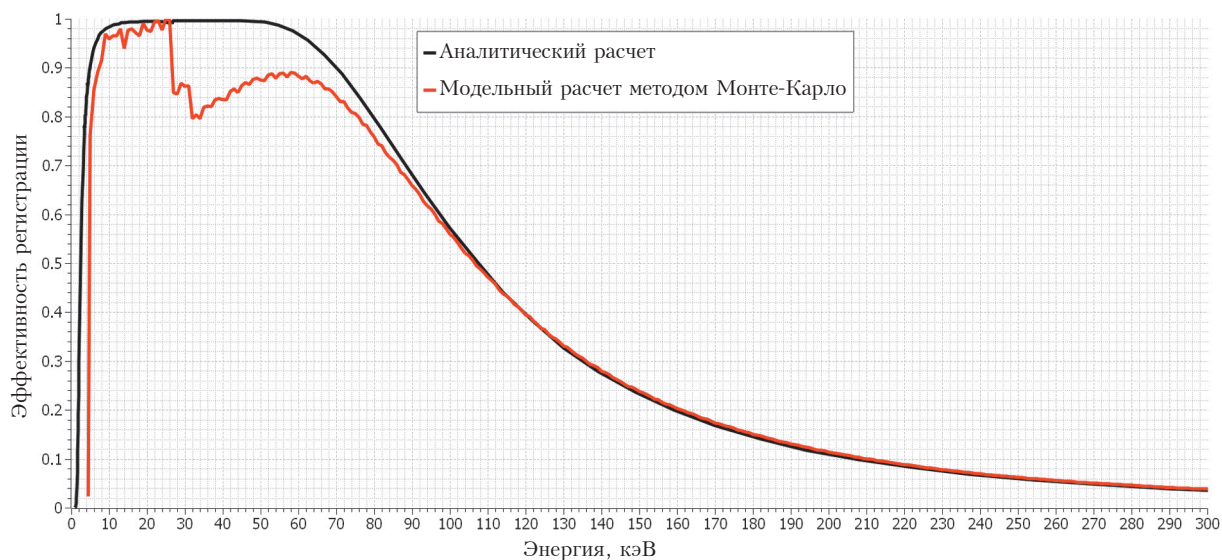


Рис.1. Кривая эффективности регистрации фотонного излучения CdTe-детектором в энергетическом диапазоне 0–300 кэВ (черный цвет — кривая, рассчитанная аналитически при помощи коэффициентов ослабления, красный цвет — модельная кривая, рассчитанная методом Монте-Карло).

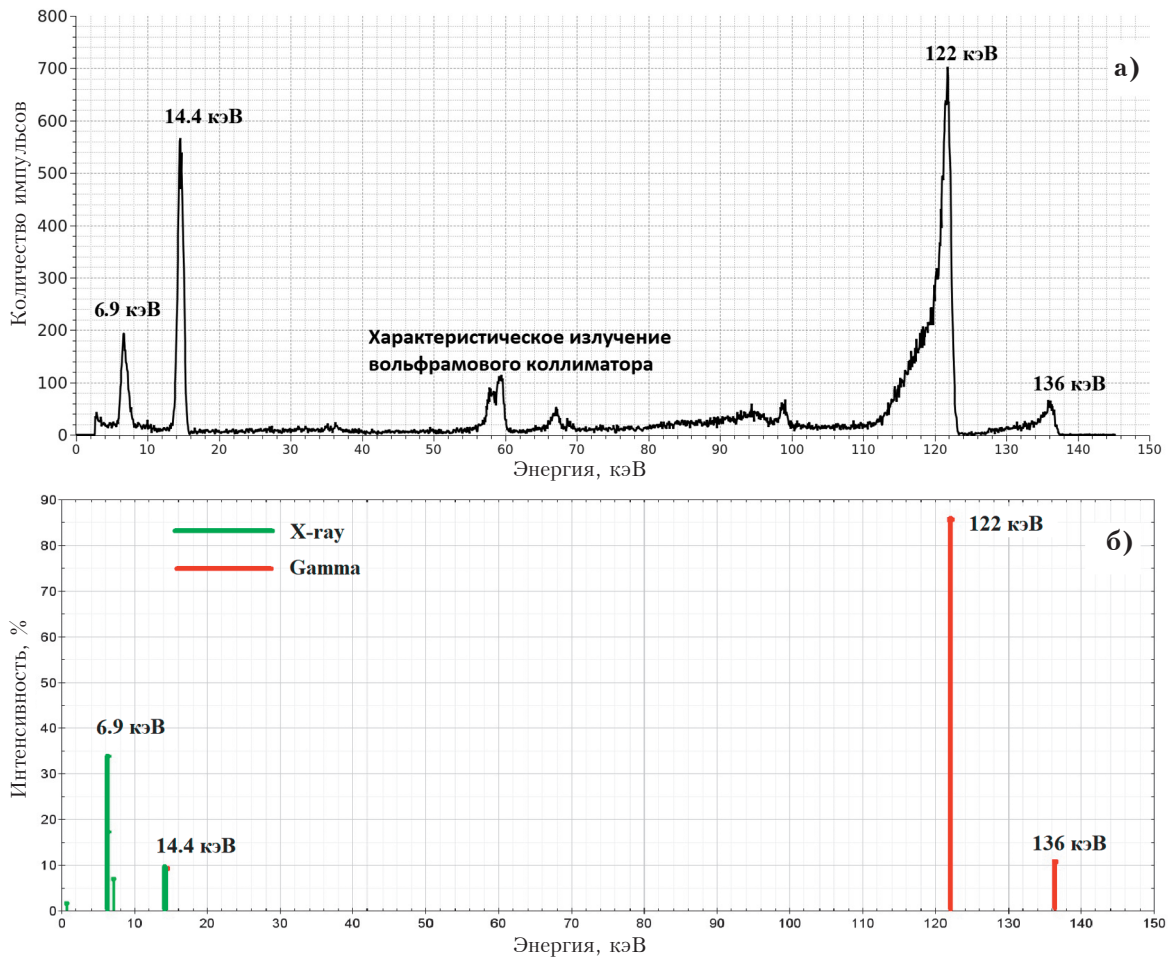


Рис.2. Сравнение аппаратного и расчетного спектра излучения нуклида ^{57}Co : а) аппаратный спектр, измеренный CdTe-детектором; б) расчетный спектр согласно библиотеке JENDL-2015.

Алгоритм коррекции аппаратного спектра

В работе выполнена коррекция аппаратного спектра для CdTe-детектора в энергетическом интервале 5 кэВ ÷ 150 кэВ, полученного путем измерения поля ионизирующего излучения, создаваемого различными источниками (нуклиды ^{57}Co , ^{241}Am , рентгеновская трубка с номинальным напряжением до 150 кВ). В общем виде схема коррекции аппаратного спектра выглядит следующим образом.

На первом этапе создается Монте-Карло модель CdTe-детектора.

На втором этапе при помощи Монте-Карло модели генерируется матрица отклика, представляющая собой набор функций отклика

детектора при его облучении моноэнергетическим излучением заданной энергии.

На третьем этапе спектр, измеренный при помощи CdTe-детектора, подвергается процедуре предварительной коррекции с использованием уравнения (1) [4]:

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

где $M(E)$ – измеренный спектр; $T(E)$ – спектр после коррекции; $R(E, E')$ – матрица отклика детектора.

На четвертом этапе предварительно скорректированный спектр проходит через процедуру деконволюции (разложение спектра по функциям Гаусса с заданной полной шири-

ной на полувысоте с последующим усреднением огибающей вершин).

Для измерения спектра излучения используется спектрометр с CdTe-детектором *X-123CdTe Complete X-Ray & Gamma Ray Spectrometer* фирмы *Amptek* [4]. Данный спектрометр обладает характеристиками, представленными в табл.1.

Для построения Монте-Карло модели детектора используется программа моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом *Fluka* версии 4.2.1 [5]. Основными преимуществами данной программы перед аналогами (*MCNP*, *Geant4*, *PENELOPE*) являются простота создания модели и описания всех необходимых физических констант, а также возможность непосредственной модификации процесса расчета при помощи написания пользовательских модулей.

Монте-Карло модель детектора

Создание Монте-Карло модели было выполнено в несколько этапов. На первом этапе при помощи CdTe-детектора был измерен опорный аппаратурный спектр от источника ионизирующего излучения. Общая схема

Табл.1. Основные характеристики спектрометра X-123CdTe.

Тип детектора	Полупроводниковый, CdTe
Площадь детектора	25 мм²
Толщина детектора	1 мм
Входное окно	Be (100 мкм)
Тип охлаждения	Элемент Пельтье
Рабочая температура	−60 °С
Энергетический диапазон	5–150 кэВ
Энергетическое разрешение (на линии 122 кэВ)	< 1,5 кэВ
Габариты прибора	150×55×25 мм

измерения спектра представлена рис.3. Чувствительный объем CdTe-детектора расположен в коллиматоре из вольфрама, расстояние между торцевой поверхностью детектора и источником составляет 50 см.

В качестве опорного источника ионизирующего излучения использовался ОСГИ-П ⁵⁷Со, так как данный нуклид имеет в своем спектре характерные линии (6,9 кэВ, 14,4 кэВ, 122 кэВ, 136 кэВ), которые практически полностью перекрывают весь интересующий диапазон энергий (5 кэВ ÷ 150 кэВ) и позволяют применить его для определения основных параметров модели. Дополнительно к основным

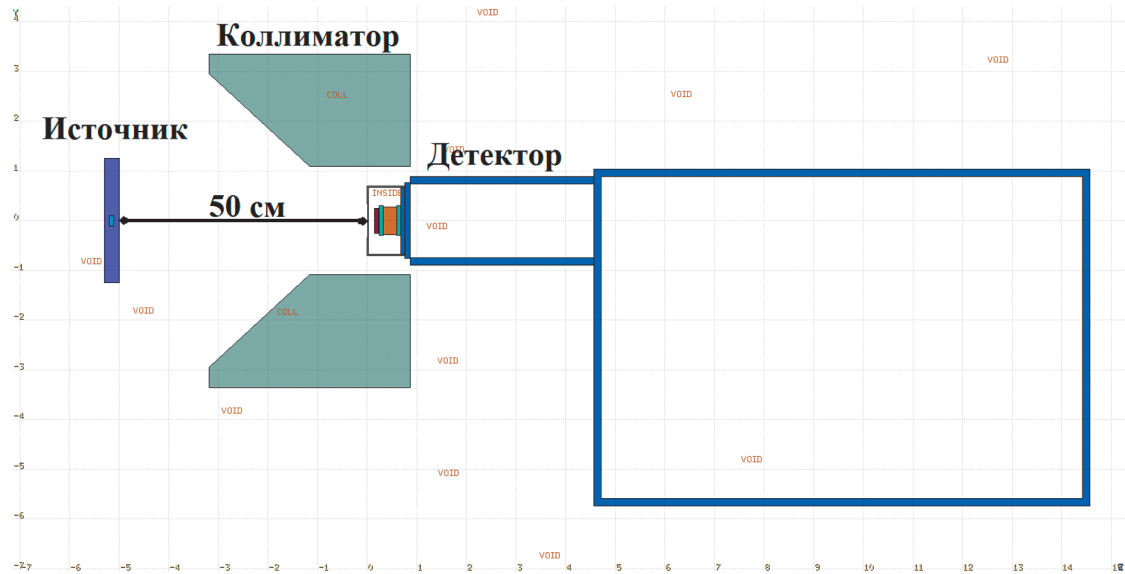


Рис.3. Схематическое изображение геометрии измерения спектра излучения радионуклидного источника ⁵⁷Со (источник в корпусе ОСГИ-П).

пикам ^{57}Co для первичной настройки модели были использованы пики характеристического излучения, обусловленные взаимодействием первичного излучения ^{57}Co с материалом коллиматора (57,8 кэВ, 59,3 кэВ).

На втором этапе в программе *Fluka* была построена модель геометрии опорного измерения с учетом особенностей влияния функции отклика на измеряемый спектр. Основные факторы, влияющие на форму аппаратного спектра, перечислены ниже. (Данные факторы не являются физическими в смысле физики взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, а являются совокупностью как взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, так и явлений, обусловленных электроникой и окружающей средой. Поэтому моделирование влияния данных факторов на аппаратный спектр детектора в общем случае сводится к заданию ряда аналитических выражений с параметрами, получаемыми из измеренного спектра).

1. Конечное энергетическое разрешение детектора (моделируется сверткой функции Гаусса со спектром энерговыделения в активном объеме детектора) [6]:

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

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

2. Неравномерный сбор носителей заряда (моделируется умножением энерговыделения в точке взаимодействия кванта излучения с веществом детектора на уравнение Хехта) [7]:

$$\lambda(Z) = \frac{v_h t_h}{L} \left(1 - e^{-\frac{z}{v_h t_h}}\right) + \frac{v_e t_e}{L} \left(1 - e^{-\frac{-(z-L)}{v_e t_e}}\right), \quad (3)$$

где L – толщина детектора; $v_h t_h$ – средняя длина пробега дырки в полупроводнике; $v_e t_e$ – средняя длина пробега электрона в полупроводнике; z – координата взаимодействия фотона с полупроводником.

3. Вероятность потери заряда на дефекте кристалла (моделируется умножением энерговыделения в точке взаимодействия кванта излучения с веществом детектора на функцию Гото) [8]:

$$\varepsilon(Z) = 1 - (1 - RC)e^{\frac{\nu Z}{D}}, \quad (4)$$

D – коэффициент диффузии; ν – скорость насыщения (максимальная скорость носителей

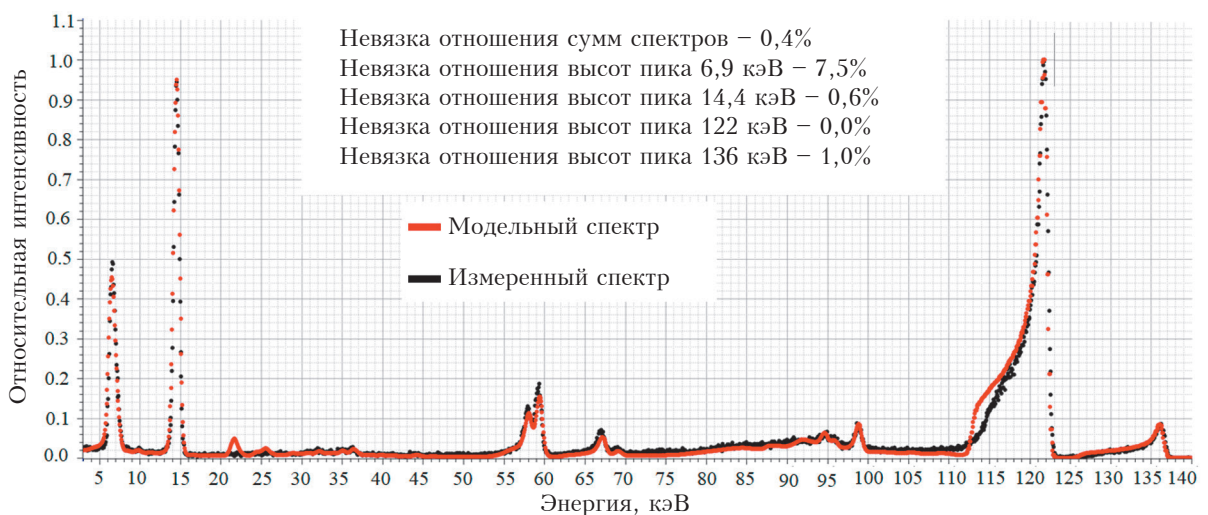


Рис.4. Сравнение модельного и измеренного спектра ^{57}Co с указанием отношения пиков полного поглощения (для возможности количественной оценки совпадения спектров).

заряда в полупроводнике); RC – коэффициент отражения.

На третьем этапе происходит корректировка первоначальных значений (входных параметров), задаваемых в модели, путем их подбора до необходимого уровня совпадения измеренного и смоделированного спектра. Так как модель CdTe-детектора в общем случае имеет большое число входных параметров, то конечные величины после подбора могут иметь значения отличные от первоначальных [9] (в таком случае можно воспринимать модель как черный ящик, который дает удовлетворительный результат в заданном энергетическом диапазоне). Результат сопоставления измеренного и модельного спектра после корректировки входных параметров (рис.4) показывает хорошее совпадение между модельным и измеренным спектром, что свидетельствует об адекватности соответствия модели детектора реальному детектору. Входные параметры, используемые при моделировании, представлены в табл.2. В дальнейшем входные параметры будут использованы в модели детектора для построения матрицы отклика.

Табл.2. Входные параметры модели CdTe-детектора.

Параметр	Значение
Уравнение Хехта	
λ_e , см	0,78
λ_h , см	12,5
Уширение Гаусса	
a , МэВ	0,24
b , МэВ ⁻¹	0,0046
c , МэВ ⁻²	0,0000069
Уравнение Гото	
D/v , мкм	0,2
RC	0,2
Геометрические параметры	
Толщина платинового контакта, мкм	15
Толщина мертвого слоя, мкм	10

Создание матрицы отклика CdTe-детектора

Следующим этапом алгоритма коррекции аппаратного спектра является создание матрицы отклика детектора. Матрица отклика представляет собой двумерную таблицу, каждый ряд которой является откликом модели

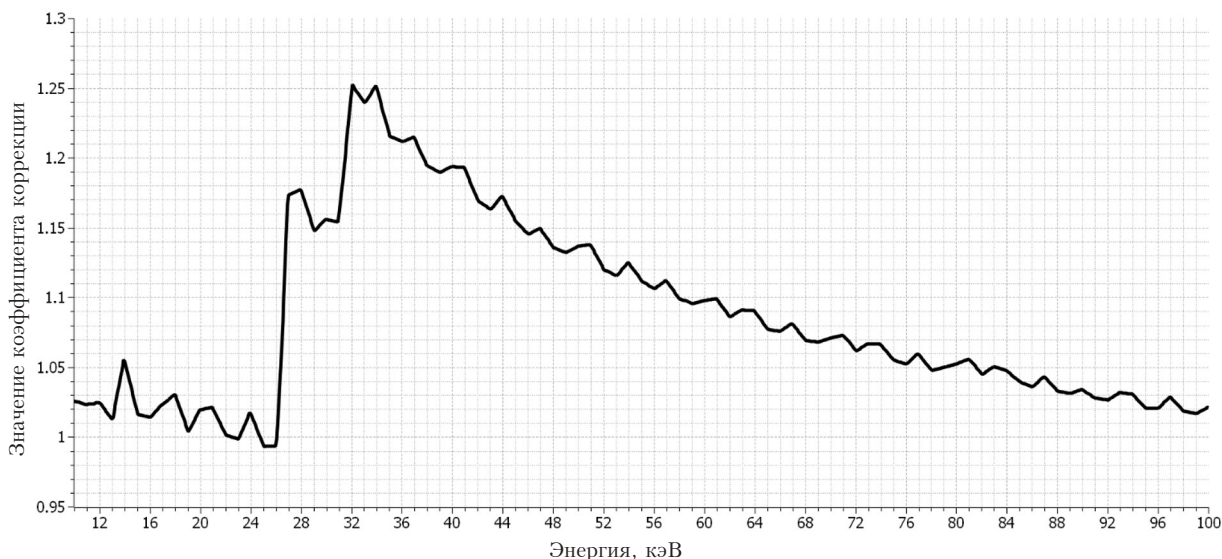


Рис.5. Корректирующие коэффициенты в энергетическом диапазоне 10–100 кэВ с интерполяцией линейным сплайном, используемым для определения значений между двумя расчетными точками.

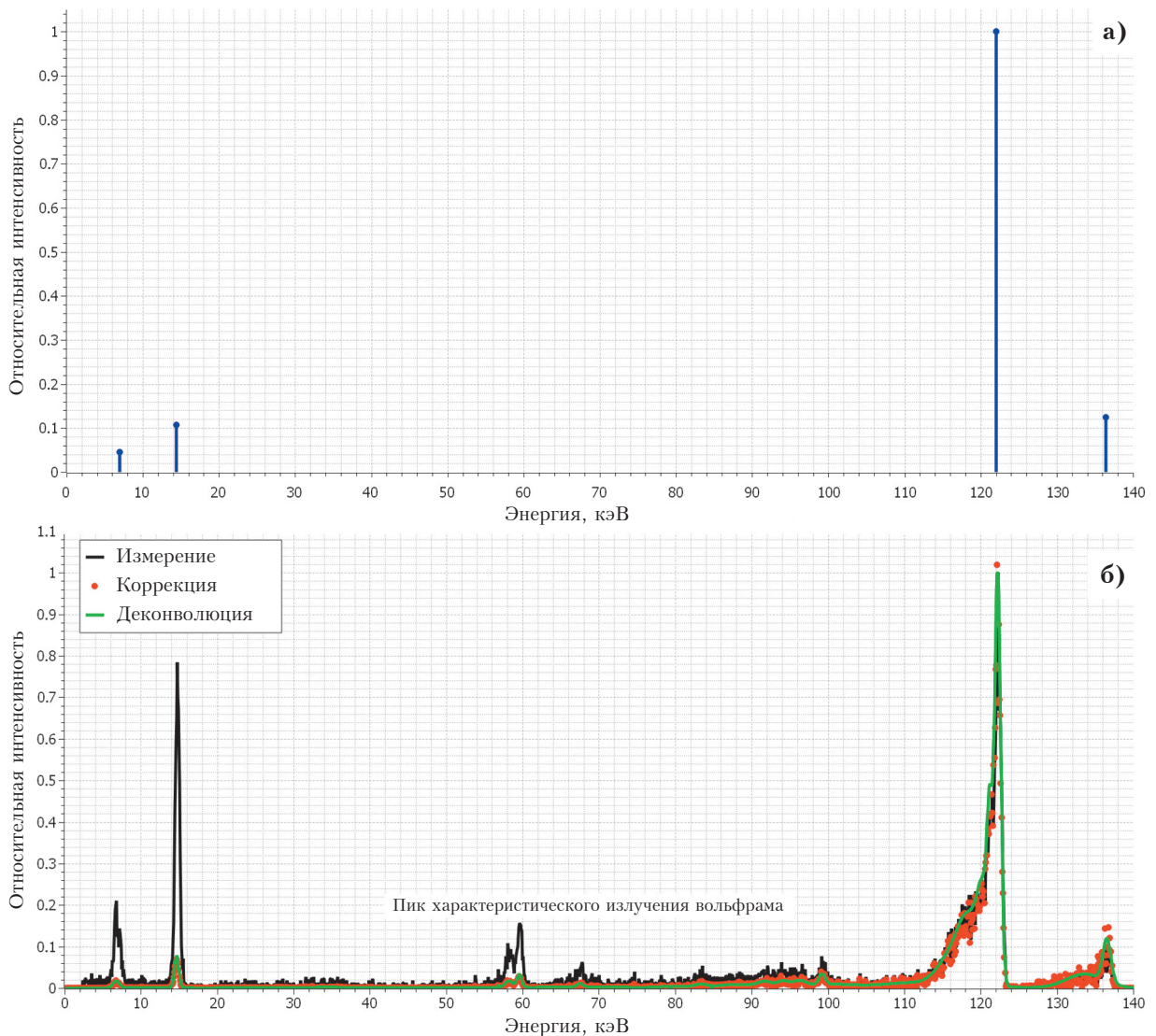


Рис.6. Результат применения усовершенствованного алгоритма коррекции к аппаратурному спектру ^{57}Co : а) спектр излучения нуклида согласно JENDL-2015; б) аппаратурный спектр после коррекции.

детектора на воздействие моноэнергетического излучения с заданной энергией. Элемент столбца представляет собой отклик детектора в заданном канале. В работе моделируется режим детектора, при котором его энергетическая шкала с граничной энергией 382 кэВ разбита на 4096 интервалов. Шаг между двумя соседними строками соответствует энергетическому интервалу между двумя соседними моноэнергетическими линиями, которыми последовательно облучался детектор. При выше обозначенном разбиении энергетической шкалы шаг примерно равен 93 эВ.

В общем случае матрица отклика строится следующим образом. Модель детектора последовательно облучают направленным потоком моноэнергетического излучения с заданной энергией. Выходной спектр модели (с учетом его модификации согласно уравнениям (2), (3), (4)) для каждого варианта облучения представляет собой одну строку матрицы. Матрица формируется путем последовательного добавления в нее указанных строк. Всего при создании матрицы отклика было сделано 4096 шагов.

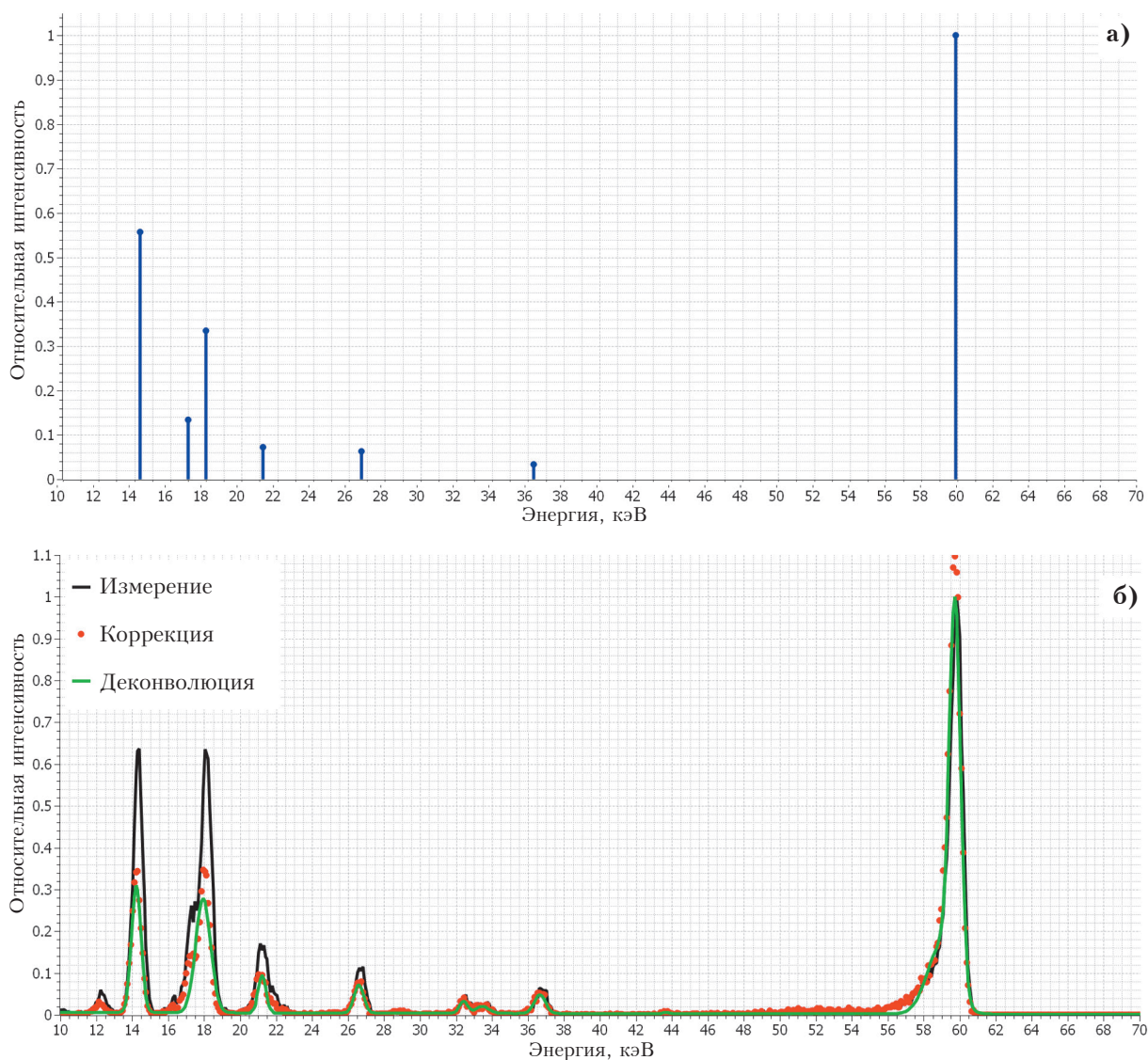


Рис.7. Применение усовершенствованного алгоритма коррекции к аппаратурному спектру ^{241}Am : а) спектр излучения нуклида согласно JENDL-2015; б) аппаратурный спектр после коррекции.

Табл.3. Результат расчета характеристик качества излучения N-серии для расстояния источник–детектор 1 метр.

Название	$\langle E \rangle^*$ ISO, кэВ	$\langle E \rangle$ расч., кэВ	Откл., %	СПО1 ISO, мм	СПО1, расч., мм	Откл., %	СПО2 ISO, мм	СПО2 расч., мм	Откл., %
N10	8,5	8,5	0,00	0,055	0,054	1,85	0,060	0,058	3,45
N15	12,4	12,4	0,00	0,157	0,162	3,09	0,177	0,179	1,12
N20	16,3	16,4	0,61	0,344	0,362	4,97	0,396	0,408	2,94
N25	20,3	20,5	0,98	0,662	0,691	4,20	0,746	0,772	3,37
N30	24,6	24,7	0,40	1,16	1,18	1,69	1,28	1,28	0,00

Табл.4. Результат расчета характеристик качества излучения N-серии для расстояния источник–детектор 2,5 метра.

Название	<E>* ISO, кэВ	<E> расч., кэВ	Откл., %	СПО1 ISO, мм	СПО1, расч., мм	Откл., %	СПО2 ISO, мм	СПО2 расч., мм	Откл., %
N10	8,5	8,9	4,49	0,065	0,066	1,52	0,068	0,069	1,45
N15	12,4	12,6	1,59	0,173	0,176	1,70	0,197	0,188	4,79
N20	16,3	16,5	1,21	0,362	0,380	4,74	0,412	0,417	1,20
N25	20,3	20,6	1,46	0,677	0,700	3,29	0,760	0,777	2,19
N30	24,6	24,6	0,00	1,17	1,18	0,85	1,29	1,28	0,78
N40	33,3	33,9	1,77	2,65	2,72	2,57	2,84	2,94	3,40
N60	47,9	48,2	0,62	0,235	0,246	4,47	0,264	0,270	2,22
N80	65,2	65,3	0,15	0,580	0,574	1,05	0,623	0,639	2,50
N100	83,3	83,0	0,36	1,09	1,09	0,00	1,15	1,17	1,71
N120	100	99	1,01	1,67	1,65	1,21	1,74	1,73	0,58
N150	118	118	0,00	2,30	2,31	0,43	2,41	2,43	0,82

*Стандарт ISO4037-1:2019 не проводит разделение по средней энергии между спектрами с одинаковой граничной энергией но различным расстоянием источник–детектор.

Коррекция отклонения модельной кривой эффективности от аналитической кривой эффективности

Коррекция отклонения модельной кривой эффективности от аналитической кривой эффективности для CdTe производилась введением поправочных коэффициентов в выбранной энергетической области 10–100 кэВ. Предварительно скорректированный спектр умножается на данные коэффициенты, тем самым максимально приближая свой вид к истинной форме.

Коэффициенты коррекции рассчитываются как величины, равные отношению значения аналитически рассчитанной эффективности к модельной эффективности при заданной энергии излучения. Для определения значения коэффициента коррекции, расположенного между двумя расчетными точками, используется линейная интерполяция (рис.5). Выбор энергетической области для расчета коэффициентов коррекции обусловлен тем фактом, что вне данной области аналитическая кривая эффективности практически полностью совпадает с модельной кривой эффективности (рис.1).

Коррекция измеренных спектров в области < 150 кэВ

После построения матрицы отклика была произведена процедура коррекции спектров радионуклидных источников ^{57}Co , ^{241}Am и спектра рентгеновской трубки N-серии с номинальным напряжением 30 кВ. Помимо коррекции, согласно уравнению (1), дополнительно, каждый спектр подвергся процедуре деконволюции, позволяющей учесть энергетическое разрешение детектора в заданном энергетическом интервале. Результаты работы алгоритма представлены на рис.6–8.

Из рис. 6, 7 видно, что алгоритм коррекции спектра хорошо работает для моноэнергетических источников, позволяя добиться практически полного соответствия аппаратурного спектра истинному. Количественно имеются несоответствия в соотношении высоты пиков скорректированного спектра и величин квантового выхода истинного спектра в низкоэнергетической области (до 20 кэВ). Это связано с тем, что излучение источника в данной области поглощается как в оболочке корпуса источника, так и в его керамической активной части, в которой находится радиоактивное вещество.

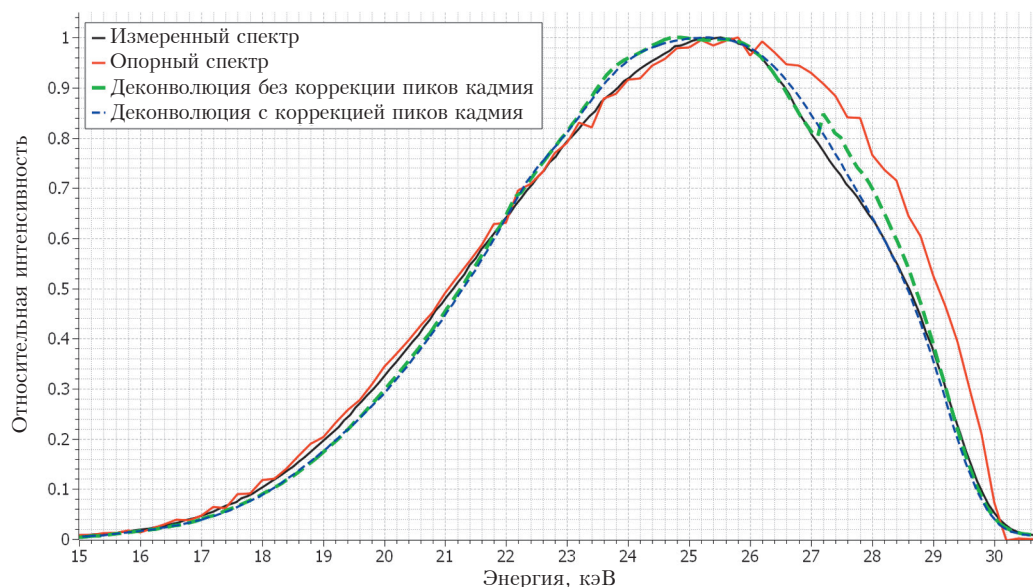


Рис.8. Применение усовершенствованного алгоритма коррекции к аппаратному спектру рентгеновской трубки с номинальным напряжением 30 кВ (спектр N-серии согласно стандарту ISO 4037-1-2019 [10]).

Анализ рис.8 показывает, что деконволюция спектра, производимая после стандартной коррекции, позволяет улучшить измеренный при помощи CdTe-детектора спектр излучения рентгеновской трубки, приблизив его по форме к истинному спектру [11]. Коррекция отклонения модельной кривой эффективности от аналитической кривой эффективности для теллурида кадмия позволяет максимально сгладить кривую, убрав из нее несуществующие пики.

Определение характеристик качества излучения рентгеновской установки

Для проверки корректности алгоритма, представленного в данной работе, с его помощью были рассчитаны характеристики качества N-серии эталонного рентгеновского излучения с граничной энергией до 150 кэВ согласно стандарту ISO 4037-1:2019. В качестве входных данных были использованы спектры поверочной дозиметрической установки УПР-АТ300 производства УП «АТОМТЕХ», измеренные при помощи спектрометра X-123 CdTe.

Согласно стандарту ISO 4037-1:2019 основными характеристиками качества полей рент-

геновского излучения являются слоистое половинное ослабление СПО1, СПО2 и средняя энергия излучения $\langle E \rangle$. Результаты расчета этих величин представлены в табл.3 (расстояние источник–детектор 1 м) и в табл.4 (расстояние источник–детектор 2,5 м).

Выводы

В работе был представлен улучшенный алгоритм коррекции аппаратного спектра детектора на основе теллурида кадмия. Основными особенностями данного алгоритма являются дополнительный этап деконволюции и коррекция отклонения модельной кривой эффективности от аналитической кривой эффективности для теллурида кадмия. Применение улучшенного алгоритма для коррекции аппаратного спектра, полученного при измерении поля фотонного излучения радионуклидов ^{57}Co , ^{241}Am , показало его высокую эффективность. В частности, алгоритм позволяет корректировать высоту пиков в аппаратном спектре, приближая его к истинному виду. Несоответствие в высоте пиков для энергий < 20 кэВ обусловлено высоким поглощением

ем излучения с данной энергией в материале корпуса источника ионизирующего излучения. Данное несоответствие в теории может быть скорректировано путем введения поправочного коэффициента, численно равного ослаблению линии моноэнергетического фотонного излучения в выбранном материале заданной толщины.

Применение алгоритма для определения характеристик качества рентгеновского излучения показывает хорошее согласие между расчетными и табличными величинами. Из анализа табл. 3, 4 можно сделать вывод, что максимальное отклонение расчетных величин от табличных не превышает 5%, что вкладывается в бюджет неопределенности, указанный в стандарте *ISO 4037-1:2019*. Одной из причин отклонений этих величин может быть зависимость аппаратного спектра CdTe-детектора от интенсивности излучения (загрузки). При высокой нагрузке в аппаратном спектре появляются линии, которые отсутствуют в истинном спектре. Другой возможной причиной

отклонения величин может быть дрейф напряжения на аноде рентгеновской трубки.

Использование алгоритма, представленного в данной работе, может быть рекомендовано для коррекции аппаратного спектра при измерении излучения рентгеновской трубки детектором на основе теллурида кадмия с целью дальнейшего расчета характеристик качества излучения. Данный алгоритм также может быть использован для коррекции аппаратного спектра при измерении излучения радионуклидных источников для их последующей идентификации. Также алгоритм можно применить для расчета характеристик радиоактивного материала, требующего определения точного соотношения интенсивностей линий моноэнергетического излучения в измеряемом фотонном спектре.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. В.А.Кожемякину за ценные замечания и рекомендации, сделанные при подготовке данного материала.

Литература

1. J. Franc, E. belas, R. Grill, P. Hlidek, P. Moravec, «CdTe and CdZnTe crystals for room temperature gamma-ray detectors», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 434, no. 1, pp. 146-151, 1999.
2. X-123CdTe Complete X-Ray & Gamma Ray Spectrometer. URL: <https://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/cdte-x-ray-and-gamma-ray-detectors/cdte-x-ray-and-gamma-ray-detector>. (дата обращения: 20.12.2021).
3. S. Miyajima, «Thin CdTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy», *Medical Physics*, vol. 30, no. 5, pp. 771-777, 2003.
4. S. Miyajima, K. Imagawa, M. Matsumoto, «CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy», *Medical Physics*, vol. 29, no. 7, pp. 1421-1429, 2002.
5. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/fluka.html> (дата обращения: 02.01.2022).
6. Загороднюк А.А., Корнеев С.В. Моделирование спектров стандартных образцов урана U_3O_8 SRM-969 измеренных при помощи полупроводникового германиевого детектора // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2017. N 3. С. 92-100.
7. A. Tomal, J. Santos, P. Costa, A.H. Lopez, M.E. Poletti, «Monte Carlo simulation of the response functions of CdTe detectors to be applied in x-ray spectroscopy», *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 100, no. 1, pp. 32-37, 2015.

8. J.L. Campbel, M. Leonard, H. Theodore, P. Tibor, «Simulations of Si(Li) x-ray detector response», *X-ray Spectrometry*, 2001. vol. 30, no. 1, pp. 230-241.
9. K. Zahraman, M. Roumie, A. Raulo, N. Aruicchio, M. Ayob, «Study of the Thickness of the Dead Layer Below Electrodes, Deposited by Electroless Technique, in CdTe Nuclear Detectors», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.53, no. 1, pp. 378-382, 2006.
10. ISO 4037-1:2019: Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods.
11. U. Ankerhold. «Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data. ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnoxtic qualities, unfiltered X-ray spectra», Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB-Bericht Dos 34, 2000.

CdTe Detector Instrumental Spectrum Correction in the Low-Energy X-ray Region

Zaharadniuk Aliaksei ^{1,2}, Lukashevich Raman ¹, Syankovsky Konstantin ¹

¹ Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Minsk, Belarus; ² Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The article devotes to algorithm for the instrumental spectrum correction of a CdTe detector in the low-energy X-ray region with a cutoff energy < 150 keV. By minimizing the influence of the detector's response function, the algorithm allows the instrumental spectrum to be reconstructed, approaching its shape closer to the true one. Particular attention is paid to the low-energy region with the boundary energy up to 100 keV. For a given region, the algorithm makes it possible to correct the spectrum taking into account the difference between the theoretical efficiency curve and the modeled efficiency curve. The main goal of developing an improved algorithm is to determine the characteristics of the radiation quality of an X-ray facility.

Key words: Monte Carlo simulation, spectrum correction, CdTe detector, FLUKA.

А.А.Загороднюк ^{1,2} (инж.), Р.В.Лукашевич ¹ (нач.сект.), К.Г.Сеньковский ¹ (зам.нач.сект.)

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

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Контакты: тел. +375172936753, e-mail: lukashevich@atomtex.com.