

# Адаптированный метод расчета функции радиационного отклика при создании высокочувствительных образцовых средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с NaI(Tl) кристаллами для дозиметрии малоинтенсивных и околофоновых уровней

Метрологическое обеспечение полей фотонного излучения малоинтенсивных и околофоновых уровней (0,04–100 мкЗв/ч (мкГр/ч)) по мощности амбиентного эквивалента дозы или мощности кермы в воздухе с использованием сцинтилляционных детекторов с NaI(Tl) кристаллами выглядит перспективным и востребованным в дозиметрии, но нетривиальным ввиду сложной зависимости эффективности регистрации гамма-квантов от энергии. Решение подобных задач с применением данных детекторов может быть основано на применении функций радиационного отклика, являющихся функционалами от распределения флюенса поля излучения по энергиям.

В статье предложен адаптированный для решения задач метрологического обеспечения метод расчета функции радиационного отклика для создания высокоточных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с NaI(Tl) кристаллами.

## **Ключевые слова:**

*сцинтилляционный блок детектирования с NaI(Tl) кристаллом, функция радиационного отклика, метод Монте-Карло, дозиметрия, спектрометрический метод.*

## **Р.В. Лукашевич**

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

Метрологическое обеспечение измерений фотонного излучения базируется в основном на использовании ионизационного метода. Данный метод обладает неоспоримыми преимуществами, такими как воспроизводимость, линейность и относительно постоянное значение отклика в широком диапазоне энергий фотонного излучения. Вместе с тем, нижняя граница диапазона измерений для ионизационных камер, входящих в состав первичных эталонов, соответствует уровню мощности кермы в воздухе порядка 10 мкГр/ч. В современных требованиях к рабочим эталонам в государственных поверочных схемах указано, что нижняя граница диапазона измерения мощности кермы в воздухе составляет 0,4 мкГр/ч [1]. Поэтому, как правило, для воспроизведения уровней излучения меньше 10 мкГр/ч на поверочных дозиметрических установках используют закон обратных квадратов расстояний. Однако данному подходу присущи несколько недостатков, связанных с влиянием внешнего

радиационного фона, геометрией поля фотонного излучения, а также расчетами вследствие использования корректирующих констант или ошибок. Вместо закона обратных квадратов следует использовать измеренные опорные значения дозиметрических величин на определенных расстояниях источник–детектор, полученных с использованием, например, сцинтилляционных детекторов.

Средства измерений на основе сцинтилляционных детекторов обладают высокой чувствительностью к фотонному излучению и широко применяются для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы. Поскольку они имеют большую плотность рабочего вещества, чем ионизационные камеры, а также высокий эффективный порядковый номер  $Z_{эфф}$ , малоразмерные сцинтилляционные детекторы имеют сопоставимую чувствительность с ионизационными камерами больших размеров, что позволяет создавать портативные высокочувствительные средства измерений.

Применение высокочувствительных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных NaI(Tl) кристаллов в качестве рабочих эталонов или блоков-компараторов в составе поверочных дозиметрических установок позволяет снизить нижнюю границу диапазона измерений мощности дозы до 0,4 мкГр/ч (мкЗв/ч) методом прямых измерений. Кроме того, в [1] приведены требования к рабочим эталонам, имеющим защиту от внешнего фона гамма-излучения для метрологического обеспечения полей фотонного излучения околофоновых уровней по мощности дозы (0,04–0,4 мкГр/ч (мкЗв/ч)). Такой диапазон по мощности дозы легко достижим для сцинтилляционных блоков детектирования с NaI(Tl) кристаллами даже небольших размеров.

Отличительной особенностью при использовании дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных NaI(Tl) кристаллов для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы рентгеновского или гамма-излучений является чувствительность сцинтиллятора в диапазоне энергий фотонного излучения, т. е. зависимость показаний дозиметрического средства измерений от энергии фотонного излучения. Для таких детекторов, из-за сложной формы и сильной энергетической зависимости функции отклика, достижение приемлемой точности в дозиметрах на их основе является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное практическое значение в области дозиметрии полей фотонного излучения низкоинтенсивных уровней.

Возможности улучшения детекторной части измерительного тракта с целью уменьшения погрешности измерения отклика детектора на фотонное излучение ограничены. Для достижения данной цели лучше использовать методы расчета мощности амбиентного эквивалента дозы или мощности кермы в воздухе из получаемой спектрометрической информации.

### **Спектрометрический метод дозиметрии**

Во второй половине XX века в Японии были разработаны несколько методов оценки поглощенной или экспозиционной дозы (далее – дозы) из аппаратурных спектров сцинтилляционных блоков детектирования. Один из них вводит функцию радиационного отклика, с помощью которой можно получить величину дозы непосредственно из аппаратурного спектра, используя эту функцию в качестве ядра интегрального преобразования от характеристики поля к дозе [2-5]. Преимущество метода состоит в возможности измерения малых уровней гамма-излучения благодаря высокой чувствительности применяемых сцинтилляционных детекторов.

Принцип метода заключается в том, что если для фотонного излучения с любой энергией излучения  $E$  в любом произвольно взятом интервале энергии существует функция  $G(E)$ , которая может быть выражена из интегрального уравнения:

$$H(E_0) = \int_0^{\infty} n(E, E_0) \cdot G(E) dE,$$

где  $n(E, E_0)$  – аппаратный спектр фотонного излучения в NaI(Tl) сцинтилляторе, то, применив функцию  $G(E)$  к аппаратному спектру, измеренному детектором, можно непосредственно определить дозу. Если  $H$  – полная доза, полученная путем суммирования доз для фотонного излучения всех энергий, то получим следующее уравнение:

$$H = \int_0^{\infty} N(E) \cdot G(E) dE, \quad (1)$$

где  $N(E)$  – смешанный аппаратный спектр фотонного излучения различных энергий. На практике измеряемый спектр  $N(E)$  имеет сложную форму и отражает набор энергий падающих фотонов, поэтому его можно представить суперпозицией спектров от моноэнергетических фотонов.

Отсюда видно, что полная доза находится в таком виде с помощью функции  $G(E)$  без восстановления реального спектра фотонного излучения из измеренного аппаратного спектра.

Выражение (1) показывает, что если для данного сцинтилляционного детектора определена  $G(E)$  функция, то можно от спектра амплитуд импульсов перейти к дозе излучения путем взвешивания распределения амплитуд импульсов с использованием этой функции. Для NaI(Tl) сцинтилляционных детекторов факторами, влияющими на распределение амплитуд и  $G(E)$  функцию, являются размеры и форма кристалла детектора, а также материал и толщина корпуса детектора. Для однотипных детекторов взвешивающая  $G(E)$  функция одна и та же.

При применении функции  $G(E)$  к аппаратному спектру в качестве функционала общая мощность дозы может быть определена без информации о распределении радиоизотопов в окружающей среде. На основе этой идеи в работе [2] разработан метод преобразования аппаратного спектра сцинтилляционных детекторов путем воздействия на него функции радиационного отклика, которая задается функцией  $G(E)$ . Это позволило получать суммарную мощность дозы излучения непосредственно по аппаратному спектру внешнего фотонного излучения.

Поскольку только моделированием спектра вычислить функцию  $G(E)$  нельзя, необходимо найти способ вычисления, использующий распределение амплитуд импульсов, фактически наблюдаемое в детекторе. В качестве спектра сравнения сцинтилляционного детектора, применяющегося в вычислении функции  $G(E)$ , используется спектр энергетических потерь для параллельного пучка фотонного излучения, определенный теоретически с помощью метода Монте-Карло [6-8]. Для определения функции  $G(E)$  методом Монте-Карло рассчитываются аппаратные функции отклика сцинтилляционного NaI(Tl) детектора на излучение моноэнергетических фотонных источников, а также другие характеристики.

Рассматриваемый в статье метод используется при создании дозиметрических средств измерений на базе неорганических сцинтилляционных детекторов. Но применение данного метода ограничивается созданием дозиметрических средств измерений с погрешностью и энергетической зависимостью в пределах 15–25% [9,10]. Поэтому в этой работе представлен адаптированный для задач аттестации малоинтенсивных полей фотонного излучения метод расчета функции

радиационного отклика для создания высокоточных (с погрешностью в пределах 5%) дозиметрических средств измерений.

Данный метод оценки дозы из аппаратурного спектра универсален для различных дозиметрических величин и позволяет рассчитывать поглощенную дозу в различных средах, амбиентный эквивалент дозы, керму в воздухе, экспозиционную дозу. В рамках данной работы использовали единицы мощности кермы в воздухе и мощности амбиентного эквивалента дозы, в результате были получены идентичные результаты для данных дозиметрических величин. Поэтому для лаконичности изложения мы будем писать мощность дозы, подразумевая любую из приведенных выше дозиметрических величин.

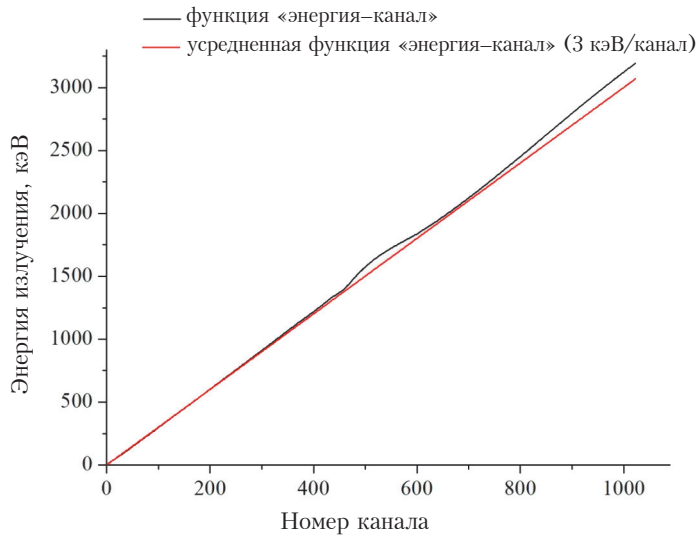
### **Адаптированный метод расчета функции радиационного отклика для создания блоков-компараторов фотонного излучения**

Для реализации адаптированного метода вычислений используется пакет *Mathcad*. Расчет аппаратурных функций отклика используемых сцинтилляционных блоков детектирования проводился по методу Монте-Карло с помощью программного комплекса *SNEGMONT*, который был разработан в Беларуси и успешно применяется для решения различных задач [11]. В качестве экспериментальных аппаратурных функций отклика используются измеренные спектры с известной мощностью дозы, полученные с помощью блоков детектирования на эталонных дозиметрических установках рентгеновского и гамма-излучения. Использование экспериментальных и теоретически полученных аппаратурных функций отклика блоков детектирования позволяет избежать серьезных ошибок при расчете функций радиационного отклика, возникающих из-за невозможности учесть все особенности физической модели блока детектирования, окружающих его объектов и самого поля фотонного ионизирующего излучения при использовании теоретически полученных с использованием метода Монте-Карло.

При моделировании аппаратурных спектров методом Монте-Карло сначала определяются аналогичные экспериментальным спектры для проверки моделей детектора. Таким образом осуществляется проверка модели средства измерений. При необходимости выполняется коррекция модели для достижения точного совпадения с экспериментальными аппаратурными спектрами. Затем рассчитываются остальные аппаратурные спектры во всем энергетическом диапазоне, которые используются при расчете функций радиационного отклика.

Адаптированный метод расчета функций радиационного отклика для минимизации энергетической зависимости чувствительности и нелинейности дозовой характеристики основан на использовании полиномиальной аппроксимации с целью минимизации суммы квадратов относительных отклонений для аппаратурных спектров, на анализе количества и расположения границ энергетических интервалов средства измерений, а также на анализе изменений аппаратурного спектра от загрузки. Анализ осуществляется для серий аппаратурных спектров с минимально и максимально возможной загрузкой по скорости счета для конкретного средства измерений во всем энергетическом диапазоне энергий с использованием измеренных и расчетных аппаратурных спектров.

В общем виде адаптированный метод расчета функции радиационного отклика можно представить следующим образом.



**Рис.1.** Усредненная линейная функция «энергия–канал» и функция «энергия–канал» блока детектирования с NaI(Tl) детектором Ø40×40 мм.

в средстве измерений. Основной причиной расхождения являются технические особенности при настройке и работе с используемыми в работе средствами измерений. Применение функции радиационного отклика основано на использовании энергетической шкалы прибора, поэтому метод очень чувствителен к энергетической калибровке. По этой причине для соответствия энергетической шкалы при расчетах в пакете *Mathcad* и в реальном приборе применяется функция «энергия–канал» реального средства измерений, что, в свою очередь, обеспечивает хорошую сходимость результатов расчета с результатами измерений мощности дозы.

Это обеспечивается за счет того, что границы энергетических окон при расчете функции радиационного отклика точно совпадают с реальными значениями каналов в блоке детектирования, в отличие от случая, когда у нас может быть 1–4 кэВ на канал для части шкалы вместо «усредненных» 3 кэВ на канал. Если границы энергетических окон (конец одного и начало другого окна) попадут в один канал, возникнет ошибка в рассчитываемой величине дозы из-за двойного суммирования импульсов из таких каналов.

## 2. Расчет функции радиационного отклика с использованием полиномиальной аппроксимации.

Функция радиационного отклика  $G(E)$  может быть представлена как:

$$G(E) = \sum_{k=1}^{k_{max}} A_k (\log E)^{k-1}, \quad (2)$$

где  $k$  – максимальное число членов полиномиального ряда,

$A_k$  – коэффициент для  $k$ -члена полиномиального ряда.

С другой стороны, поглощенная доза  $H_j$ , соответствующая  $j$  аппаратному спектру  $N_j(E)$  при использовании  $G(E)$  функции можно представить как:

$$H_j = \int_{E_0}^{E_j} N_j(E) \cdot G(E) dE = \sum_{n=1}^{n_{max}} A_n \left[ \sum_{i=1}^{max E} N_j(E_i) \cdot (\log E_i)^{k-1} \right] = \sum_{k=1}^{k_{max}} A_k \cdot B_{jk},$$

## 1. Расчетный блок с использованием функции «энергия–канал» реального средства измерений (вместо усредненной линейной функции «энергия–канал»).

На рис.1 представлены усредненная линейная функция «энергия–канал» (3 кэВ/канал) и функция «энергия–канал» блока детектирования с NaI(Tl) кристаллом Ø40×40 мм. Как видно из рис.1, после 500 канала имеет место отклонение усредненной линейной функции «энергия–канал» от используемой

где  $E_i$  – энергия, соответствующая  $i$  каналу аппаратурного спектра гамма-излучения,

$B_{jk} = \sum_{i=1}^{i_{max}} N_j(E_i) \cdot (\log E_i)^{k-1}$  и вычисляется для аппаратурных спектров  $N_j(E)$ .

В таком случае функция  $G(E)$  вычисляется с помощью определения коэффициентов  $A_k$  из формулы (2) методом наименьших квадратов, в предположении, что рассчитанная с использованием  $G(E)$  функции поглощенная доза  $H'_j$  для каждого аппаратурного спектра равна поглощенной дозе  $H_j$  для данного спектра.

Тогда относительное отклонение  $S_j$  между  $H'_j$  и  $H_j$  можно выразить следующим образом:

$$S_j = \frac{H'_j}{H_j} - 1 = \frac{\sum_{k=1}^{k_{max}} A_k \cdot B_{jk}}{H_j} - 1.$$

Тогда сумма квадратов относительных отклонений для  $j$  аппаратурных спектров:

$$S^2 = \sum_j S_j^2.$$

Поскольку коэффициент  $A_k$  для  $k$  члена полиномиального ряда определяется методом наименьших квадратов, минимизируя сумму квадратов относительных отклонений  $S^2$ , то:

$$\frac{\partial S^2}{\partial A_k} = 0.$$

В таком случае система линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов  $A_k$  полинома имеет вид:

$$\begin{aligned} c_{11}A_1 + c_{12}A_2 + \dots + c_{1n}A_n + \dots + c_{1k}A_k + H_1 &= 0 \\ c_{21}A_1 + c_{22}A_2 + \dots + c_{2n}A_n + \dots + c_{2k}A_k + H_2 &= 0 \\ \dots & \\ c_{m1}A_1 + c_{m2}A_2 + \dots + c_{mn}A_n + \dots + c_{mk}A_k + H_m &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Значения  $c_{mn}$  и  $H_m$  вычисляются численно с помощью соответствующих аппаратурных спектров, коэффициенты  $A_1, A_2 \dots A_k$  определяются в процессе решения системы (3).

Таким образом, степень полинома увеличивается на единицу по мере проведения вычислений. Когда  $S^2$  достигает минимума, процесс расчета останавливается.

### 3. Оценка максимальных относительных отклонений и отклонений между соседними узлами аппроксимации.

Для пар соседних узлов аппроксимации, между которыми отклонение превышает заданный порог, энергетический интервал разбивается на два интервала. Граница между новыми энергетическими интервалами рассчитывается перебором в границах (1/4; 3/4) исследуемого энергетического интервала с шагом в один энергетический канал средства измерений. Процесс расчета прекращается, когда отклонение между соседними узлами аппроксимации минимально и, кроме того,  $S^2$  после разбивки энергетического интервала меньше или равна  $S^2$  до разбивки для всех аппаратурных спектров. Процедура последовательно выполняется для всех узлов аппроксимации.

До реализации пункта 3 было проведено исследование влияния количества энергетических интервалов на  $S^2$  при определении мощности дозы для используемых в расчете аппаратурных спектров на примере блока детектирования с NaI(Tl) детектором  $\varnothing 40 \times 40$  мм. В результате

**Табл.1.** Применение функции радиационного отклика с различным количеством энергетических окон для блока детектирования с NaI(Tl) Ø40×40 мм.

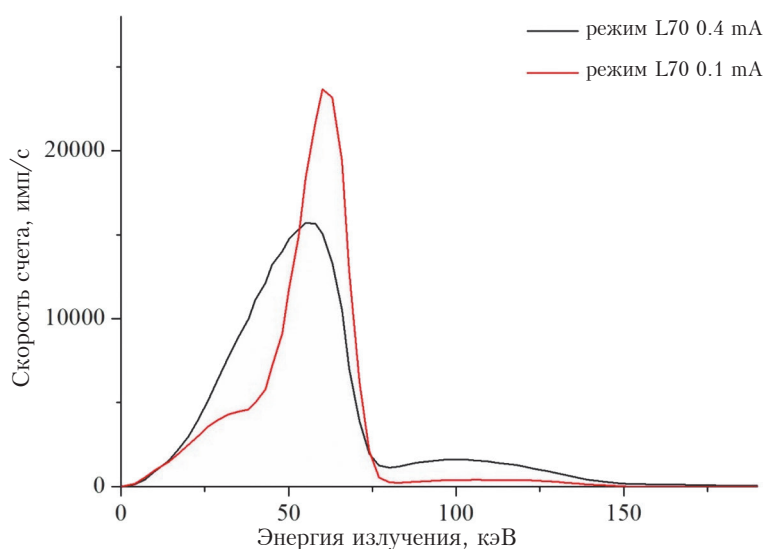
Р/н или режим излучения	Средняя энергия, кэВ	Отклонение между максимальной и минимальной загрузкой в аппаратурном спектре от действительного значения мощности дозы, %		
		16 окон	32 окна	Поканальная функция
L55	48	6,7	6,5	6,4
Am-241	59,5	9,1	5,1	4,9
L70	61	14,2	6,7	6,6
L100	88	3,3	2,4	2,3
L125	111	2,0	1,8	1,8
L170	152	4,9	1,0	0,8
L210	191	0,3	0,3	0,2
L240	222	5,7	5,2	4,8
Cs-137	662	2,6	2,0	1,7
Ra-226	850	2,1	1,9	1,7
Co-60	1250	2,4	1,2	1,1

исследования было установлено, что увеличение количества энергетических интервалов (с 16 до 32) приводит к снижению  $S^2$  в среднем до 10%, при использовании более 32 энергетических интервалов снижение  $S^2$  несущественно и не превышает 1%. При использовании функции  $G(E)$  для каждого энергетического канала (поканальной функции  $G(E)$ )  $S^2$  сопоставима со случаем 32 энергетических каналов. Таким образом, увеличение количества энергетических интервалов более 32

не целесообразно с точки зрения точности расчета  $G(E)$ . В результате выполнения процедуры в соответствии с пунктом 3 количество энергетических интервалов для применяемых средств измерений колеблется от 24 до 32, что не противоречит вышесказанному.

#### 4. Оценка максимальных относительных отклонений и отклонений между соседними узлами аппроксимации при минимальной и максимальной загрузке по скорости счета средства измерений.

Процедура в соответствии с пунктом 3 параллельно выполняется для аппаратурных спектров с минимальной и максимально возможной скоростями счета для конкретного средства измерений. По результатам работы отбирается несколько оптимальных функций радиационного отклика для минимальной и максимальной загрузки по скорости счета.



**Рис.2.** Аппаратурные спектры для блока детектирования с NaI(Tl) детектором Ø40×40 мм, полученные на поверочной рентгеновской установке УПР-АТ300 при различной загрузке.



Были проанализированы результаты измерения мощности дозы в широком диапазоне (при минимальной и максимально возможной скорости счета) с применением функций радиационного отклика для 16, 32 энергетических окон и поканальной функции радиационного отклика (табл.1).

Как следует из табл.1, применение поканальной функции радиационного отклика не дает принципиального выигрыша по сравнению с функцией, состоящей из 32 энергетических окон. Прежде всего, это связано с существенным изменением формы спектра от загрузки.

На рис.2 видно, что при скорости счета, близкой к максимальной статистической нагрузке данного средства измерений, аппаратурный спектр имеет вид, отличный от аппаратурного спектра при скорости счета намного ниже максимальной статистической нагрузки. Применение функции радиационного отклика, рассчитанной с использованием аппаратурных спектров, измеренных при малых скоростях счета, к аппаратурным спектрам при больших скоростях счета приведет к некорректному расчету мощности дозы. В первую очередь это связано с суммированием импульсов за время сбора импульсов вследствие загрузки блока детектирования. Существенный вклад суммирования импульсов и наложений в аппаратурный спектр или линии для режимов излучения рентгеновского излучения требует коррекции ширины окон в данном диапазоне энергий.

Минимизация отклонений значений функции радиационного отклика для данных энергетических окон от значения функции в энергетическом окне с основным пиком ключевого аппаратурного спектра обеспечивает высокую точность при измерениях мощности дозы для различной скорости счета с учетом максимальной статистической загрузки для данного средства измерений.

**Табл.2.** Сравнительные характеристики блоков детектирования БДКГ-03К и ННС6.

Основные характеристики	ННС6 [12]	БДКГ-03К
Детектор	NaI(Tl) Ø12,7×12,7 mm	NaI(Tl) Ø25×16 mm
Диапазон энергий	50 keV – 3 MeV	40 keV – 3 MeV
Диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы	0,1 – 60 µSv/h (50 – 300 keV) 0,1 – 600 µSv/h (300 – 3000 keV)	0,1 – 50 µSv/h (40 – 300 keV) 0,1 – 650 µSv/h (300 – 3000 keV)
Линейность дозовой характеристики чувствительности для энергии 662 кэВ ( <sup>137</sup> Cs)	±20%	±3%
Энергетическая зависимость чувствительности для энергии 662 кэВ ( <sup>137</sup> Cs)	±20%	±5%

**Табл.3.** Сравнительные характеристики блоков детектирования БДКГ-05К и ННС7.

Основные характеристики	ННС7 [12]	БДКГ-05К
Детектор	NaI(Tl) Ø25×25 mm	NaI(Tl) Ø40×40 mm
Диапазон энергий	50 keV – 3 MeV	40 keV – 3 MeV
Диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы	0,1 – 30 µSv/h (50 – 300 keV) 0,1 – 75 µSv/h (300 – 3000 keV)	0,1 – 50 µSv/h (40 – 300 keV) 0,1 – 300 µSv/h (300 – 3000 keV)
Линейность дозовой характеристики чувствительности для энергии 662 кэВ ( <sup>137</sup> Cs)	±20%	±3%
Энергетическая зависимость чувствительности для энергии 662 кэВ ( <sup>137</sup> Cs)	±20%	±5%



### Результаты применения адаптированного метода расчета

Нужно отметить, что спектрометрический метод дозиметрии, помимо предприятия «АТОМТЕХ», применяется некоторыми производителями дозиметрической аппаратуры, в том числе в Японии компанией *Fuji Electric Co.*

Сравнительный анализ основных метрологических характеристик блоков детектирования предприятия «АТОМТЕХ» с использованием предложенных подходов при расчете функции радиационного отклика (БДКГ-03К и БДКГ-05К) и серийно выпускаемых средств измерений компании *Fuji Electric Co.*, в основе которых лежит стандартный спектрометрический метод дозиметрии, показал явные преимущества адаптированного метода (табл.2 и 3).

Из данных табл.2 и 3 видно, что при меньших размерах детекторов и, соответственно, более низкой чувствительности и меньшей нагрузке спектрометрического тракта, блоки детектирования компании *Fuji Electronic Co* обладают схожими или меньшими диапазонами измерения мощности дозы, большими погрешностями для дозовой характеристики и энергетической зависимости чувствительности, чем блоки детектирования, для которых применялся адаптированный метод расчета.

Представленные выше блоки детектирования (БДКГ-03К и БДКГ-05К) были откалиброваны в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и вошли в состав блоков-компараторов для широкого круга дозиметрических задач метрологического обеспечения. Данные блоки-компараторы фотонного излучения используются для проведения измерений мощности дозы на эталонных дозиметрических установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130 на предприятии «АТОМТЕХ» в диапазоне 0,4–100 мкЗв/ч (мкГр/ч) при проверке в точках, для которых мощность дозы была определена с применением приближенного закона обратных квадратов расстояний от аттестованных значений.

Для метрологического обеспечения полей фотонного излучения околофоновых уровней по мощности дозы в диапазоне 0,04–0,4 мкЗв/ч данные блоки-компараторы были откалиброваны в низкофоновой лаборатории *SPLBRL* (Румыния) и применяются на предприятии «АТОМТЕХ» в составе низкофоновой камеры при проверке серийно выпускаемых средств измерений [13].

Блоки-компараторы, разработанные на предприятии «АТОМТЕХ» с применением адаптированного метода и используемые ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева», входят в состав государственного вторичного эталона Российской Федерации ГВЭТ 8–2.

### Заключение

Метод оценки мощности дозы по энергии фотонов в аппаратурном спектре с использованием функции радиационного отклика является гибким и обеспечивает надежные результаты, совпадающие с современной концепцией радиационного контроля, так как при измерении дозы присутствует аппаратурный спектр излучения и доступна информация об энергии излучения.

Использование функции радиационного отклика для создания дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных NaI(Tl) кристаллов привлекательно за счет высокой чувствительности таких средств измерений и их приемлемой стоимости.

Применение адаптированного метода расчета функции радиационного отклика позволяет существенно минимизировать энергетическую зависимость чувствительности и нелинейность дозовой характеристики при создании дозиметрических средств измерений с неорганическими сцинтилляционными детекторами, в том числе и на основе современных сцинтилляционных кристаллов высокого разрешения.

В основе адаптированного метода расчета лежат: использование полиномиальной аппроксимации; анализ количества и расположения границ энергетических интервалов средства измерений; анализ изменения формы аппаратного спектра от загрузки. Анализ осуществляется для серий аппаратных спектров с минимально и максимально возможной загрузкой по скорости счета для конкретного средства измерений во всем энергетическом диапазоне энергий с использованием экспериментальных и расчетных аппаратных спектров.

Сравнение метрологических характеристик средств измерений, разработанных с применением адаптированного метода, и средств измерений, основанных на использовании стандартного метода расчета функции радиационного отклика, показал существенные преимущества адаптированного метода расчета функции радиационного отклика.

Таким образом, применение описанных подходов при расчете функций радиационного отклика позволяет на основе сцинтилляционных блоков детектирования создавать высокоточные высокочувствительные дозиметрические средства измерений для метрологического обеспечения полей фотонного излучения малоинтенсивных и околофоновых уровней по мощности дозы.

Автор выражает глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. Кожемякину Валерию Александровичу за помощь в подготовке и обсуждении материалов статьи.

### Литература

1. Государственная поверочная схема для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений. Введ. 31.12.20 приказом N 2314 Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. М.: Росстандарт, 2020. 13 с.
2. S. Moriuchi. «A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator», *Japan Atomic Energy Research Inst. (JAERI)*, no. 1209, 35 p., 1971.
3. S. Moriuchi et al. «Determination of spectrum-dose conversion operator for spherical NaI(Tl) scintillators», *Japan Atomic Energy Research Inst. (JAERI-M)*, no. 8092, 46 p., 1979.
4. Фоминых В.И., Шульгович Г.И., Шульгович В.А. Кожемякин В.А. Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» // *Метрология*. 1983. N 10. С. 32-39.
5. S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito. «Development of a dosimetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation». 10-th Intern. congress of the International Radiation Protection Association IRPA-10: proc. congress, Hiroshima, 14-19 May 2000. Japan Health Physics Society, Tokyo, pp. 3b-197, 2000.
6. K. Saito, S. Moriuchi, «Monte Carlo calculation of accurate response functions for a NaI(Tl) detector for gamma rays», *Nuclear instruments and methods.*, no. 185, pp. 299-308, 1981.
7. G. Cho, H.K. Kim, H. Woo, «Electronic dose conversion technique using a NaI(Tl) detector for assessment of exposure dose rate from environmental radiation», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, no. 45, pp. 981-985, 1998.
8. K. Saito, S. Moriuchi, «Monte Carlo calculation of NaI(Tl) detector response functions for low energy gamma rays», *Nuclear instruments and methods*, no. 226, pp. 449-454, 1984.
9. K. Aoyama et al. «Development of low-energy x-ray survey-meter, radiation detectors and their uses», *KEK Proceedings*, no. 7, pp. 57-67, 2006.

10. S. Yamamura et al., «Development of wide-energy range X/gamma-ray survey-meter», *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 45, iss. 5, pp. 187-190, 2008.
11. Лукашевич Р.В., Фоков Г.А. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерений на базе сцинтилляционных блоков детектирования // Приборы и методы измерений. 2017. N 8(3). С. 246-253. URL: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253> (дата обращения: 27.07.2021).
12. Survey Meter NHC6/NHC7. URL: <https://geigercounter001.blog.fc2.com/blog-entry-1057.html> (дата обращения: 13.07.2021).
13. R. Lukashovich, M. Korhzik, A. Gektin. «Application scintillation comparators for calibration low intense gamma radiation fields by dose rate in the range of 0,03–0,1  $\mu\text{Sv/h}$ »; (eds), «Engineering of scintillation materials and radiation technologies», *Springer Proceedings Phys.*, vol. 227, pp. 221-235. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21970-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21970-3_16) (дата обращения: 31.08.2021).

## Adapted Method of Radiation Response Function Calculation for Development of High-Sensitivity Reference Meters Based on Scintillation Detection Units with NaI(Tl) Crystals for Dosimetry of Low-Intensity and Near-Background Levels

Lukashevich Raman (Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Minsk, Belarus)

**Abstract.** Metrological support of photon radiation fields of low-intensity and near-background levels (0.04–100  $\mu\text{Sv/h}$  ( $\mu\text{Gy/h}$ )) by ambient equivalent dose rate or kerma rate in air using scintillation detectors with NaI(Tl) crystals looks promising and in demand in dosimetry, but nontrivial due to the complex dependence of efficiency registration of gamma quanta from energy. The solution of such problems with the use of these detectors can be based on the use of the radiation response functions, which are functionals of the energy distribution of the radiation field fluence.

The paper proposes a method for calculating the radiation response function adapted for solving metrological support problems for creating high-precision dosimetric measuring instruments based on scintillation detection units with NaI(Tl) crystals.

**Key words:** *scintillation detection unit with NaI(Tl) crystal, radiation response function, Monte Carlo method, dosimetry, spectrometric method.*

*Р.В.Лукашевич (нач.сект.) – Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь.*

*Контакты: тел. +375 17 270-67-53; e-mail: lukashevich@atomtex.com.*