

УДК 53.089.68

Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.

УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь

Поступила 21.03.2017

Принята к печати 27.06.2017

Приборы на основе сцинтилляционных детекторов обладают высокой чувствительностью к фотонному излучению и широко применяются для измерения мощности дозы гамма-излучения окружающей среды. Модернизация измерительного тракта для минимизации погрешности измерения отклика детектора на гамма-излучение уже достигла своего технологического потолка и не дает должного эффекта. Более перспективными для этой цели являются методы обработки получаемой спектрометрической информации. Целью данной работы являлась разработка высокочувствительных образцовых средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с применением спектрометрического метода расчета мощности дозы.

В данной работе рассматривается спектрометрический метод дозиметрии гамма-излучения на основе преобразования измеренного аппаратурного спектра. С использованием заранее рассчитанных или измеренных функций отклика детектора на воздействие гамма-излучения заданной энергии и плотности потока определяется некоторая функция от энергии $G(E)$. Используя эту функцию в качестве ядра интегрального преобразования от характеристики поля к дозе, можно получить величину дозы непосредственно из текущего аппаратурного спектра. Применяя функцию $G(E)$ к энергетическому распределению флюенса фотонного излучения в окружающей среде, общая мощность дозы может быть определена без информации о распределении радиоизотопов в окружающей среде.

Для определения $G(E)$ методом Монте-Карло рассчитываются аппаратурные функции отклика сцинтилляционного детектора на излучение моноэнергетических фотонных источников, а также другие характеристики. Далее весь энергетический диапазон регистрации разбивается на энергетические интервалы, для которых вычисляется функция $G(E)$ с применением линейной интерполяции.

Рассматриваемый спектрометрический метод расчета дозы с применением функции $G(E)$ позволяет использовать сцинтилляционные блоки детектирования для решения широкого круга дозиметрических задач. В статье приведен способ вычисления данной функции с помощью методов Монте-Карло и описываются особенности ее применения. Представлены результаты расчета функции $G(E)$ для блока детектирования с NaI(Tl) детектором ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) и результаты его использования в качестве блока-компаратора для аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности кермы в воздухе.

Ключевые слова: сцинтилляционный детектор, оператор преобразования «спектр-доза», метод Монте-Карло, компаратор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Адрес для переписки:

Лукашевич Р.В.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: rimlianin@gmail.com

Address for correspondence:

Lukashevich R.
SPE «ATOMTEH»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: rimlianin@gmail.com

Для цитирования:

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.
Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 3. С. 246–253.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

For citation:

Lukashevich R., Fokov G.
[Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units].
Devices and Methods of Measurements. 2017, vol. 8, no. 3, pp. 246–253 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units

Lukashevich R., Fokov G.

SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

Received 21.03.2017

Accepted for publication 27.06.2017

Abstract

Devices based on scintillation detector are highly sensitive to photon radiation and are widely used to measure the environment dose rate. Modernization of the measuring path to minimize the error in measuring the response of the detector to gamma radiation has already reached its technological ceiling and does not give the proper effect. More promising for this purpose are new methods of processing the obtained spectrometric information. The purpose of this work is the development of highly sensitive instruments based on scintillation detection units using a spectrometric method for calculating dose rate.

In this paper we consider the spectrometric method of dosimetry of gamma radiation based on the transformation of the measured instrumental spectrum. Using predetermined or measured functions of the detector response to the action of gamma radiation of a given energy and flux density, a certain function of the energy $G(E)$ is determined. Using this function as the core of the integral transformation from the field to dose characteristic, it is possible to obtain the dose value directly from the current instrumentation spectrum. Applying the function $G(E)$ to the energy distribution of the fluence of photon radiation in the environment, the total dose rate can be determined without information on the distribution of radioisotopes in the environment.

To determine $G(E)$ by Monte-Carlo method instrumental response function of the scintillator detector to monoenergetic photon radiation sources as well as other characteristics are calculated. Then the whole full-scale energy range is divided into energy ranges for which the function $G(E)$ is calculated using a linear interpolation.

Spectrometric method for dose calculation using the function $G(E)$, which allows the use of scintillation detection units for a wide range of dosimetry applications is considered in the article. As well as describes the method of calculating this function by using Monte-Carlo methods and the features of its application. The results of the calculation function $G(E)$ for the detection unit on the basis of NaI(Tl) detector ($\varnothing 40$ mm, $h = 40$ mm) to use it as a comparator for kerma rate in the air certification of low intense photon radiation fields.

Keywords: scintillation detector, spectrum-dose conversion operator, the Monte-Carlo method, comparator.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Адрес для переписки:

Лукашевич Р.В.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: rimlianin@gmail.com

Address for correspondence:

Lukashevich R.
SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: rimlianin@gmail.com

Для цитирования:

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.
Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 246–253.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

For citation:

Lukashevich R., Fokov G.
[Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 246–253 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Введение

Приборы на основе сцинтилляционных детекторов обладают высокой чувствительностью к фотонному излучению и широко применяются для измерения мощности дозы окружающей среды. Поскольку они имеют большую плотность, чем ионизационные камеры, небольшие сцинтилляционные детекторы имеют сопоставимую чувствительность с ионизационными камерами больших размеров, что позволяет создавать портативные высокочувствительные приборы. Часто сцинтилляционные приборы используются в спектрометрии для идентификации отдельных радионуклидов и оценки их вклада в суммарную мощность дозы. Однако из-за сложной формы и сильной энергетической зависимости функции отклика сцинтилляционных детекторов, достижение приемлемой точности в дозиметрах на их основе является трудной задачей.

Возможности улучшения детекторной части измерительного тракта с целью уменьшения погрешности измерения отклика детектора на гамма-излучение ограничены. Поэтому для достижения этой цели был выбран путь модернизации методов обработки получаемой спектрометрической информации.

В Японии в 1960–1970-х гг. были разработаны несколько методов оценки дозы по амплитуде импульсов аппаратурного спектра сцинтилляционных детекторов. Один из них вводит некоторую функцию $G(E)$, с помощью которой можно получить величину дозы непосредственно из аппаратурного спектра, используя эту функцию в качестве ядра интегрального преобразования от характеристики поля к дозе [1, 2, 3]. Преимущество метода состоит в возможности измерения малых уровней гамма-излучения благодаря высокой чувствительности применяемых сцинтилляционных детекторов [4]. Данный метод используется в радиационном приборостроении, но его применение в основном ограничивается созданием средств измерения с погрешностью 15–25 % [5–7]. При этом возможности метода намного шире и позволяют создавать, например, образцовые высокочувствительные средства измерения для аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности дозы.

Например, поверка и калибровка дозиметрических установок фотонного излучения по мощности кермы в воздухе проводится с использованием эталонных полостных ионизационных камер объемом до 10 л, нижняя граница измере-

ний которых соответствует дозе порядка нескольких мкГр/ч. Для высокочувствительных дозиметров радиационной защиты часто требуется проводить калибровку в диапазоне мощности кермы в воздухе до 0,1 мкГр/ч. Поэтому целью данной работы являлась разработка блока-компаратора на основе сцинтилляционного блока детектирования с возможностью поверки образцовых и рабочих средств измерений, калибровки полей фотонного излучения низкой интенсивности по мощности кермы в воздухе.

Функция $G(E)$

При применении функции $G(E)$ к энергетическому распределению флюенса фотонного излучения в окружающей среде в качестве функционала общая мощность дозы может быть определена без информации о распределении радиоизотопов в окружающей среде. Суммарная мощность дозы излучения, вызванная фотонным излучением, может быть получена без сведений о спектральном распределении радиоизотопов, если энергетическое распределение флюенса фотонного излучения получено в месте расположения детектора. На основе этой идеи в работе [1] разработана методика преобразования аппаратурного спектра сцинтилляционных детекторов путем воздействия на него функционала «спектр-доза», который задается функцией $G(E)$. Это позволило получать суммарную мощность дозы излучения непосредственно по детектируемому аппаратурному спектру внешнего фотонного излучения.

Поскольку только моделированием спектра вычислить функцию $G(E)$ нельзя, необходимо найти способ вычисления, использующий распределение амплитуды импульсов, фактически наблюдаемое в детекторе. В качестве распределения 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 [8, 9]. Для определения функции $G(E)$ методом Монте-Карло рассчитываются аппаратурные функции отклика сцинтилляционного NaI(Tl) детектора на излучение моноэнергетических фотонных источников, а также другие характеристики.

Используя эти результаты, можно рассчитать функцию $G(E)$, однако нельзя надеяться на вычисление точных ее значений, поскольку между фактическим и теоретически рассчитанным распределением имеется расхождение. Поэтому, как

правило, энергетическое распределение находится путем интерполяции полученных экспериментальных и теоретических спектральных распределений.

Источниками ошибок в данном методе являются:

- отклонение действительного распределения амплитуды импульса от предполагаемого прямоугольного распределения;
- зависимость функции $G(E)$ от расстояния между источником и детектором;
- угловая характеристика чувствительности сцинтилляционного детектора, которая важна, в частности, при измерении излучения окружающей среды.

Кроме того, возникают ошибки, получающиеся при энергетической калибровке шкалы прибора и из-за изменений усиления измерительного тракта во время измерений. Но при этом метод позволяет эффективно избегать неопределенностей, имеющих место при классической обработке спектров матричным методом.

Моделирование детектора и расчет функции $G(E)$

В нашей работе для определения функции $G(E)$ методом Монте-Карло использовался программный комплекс *SNEGMONT* [10]. А именно рассчитывались аппаратные функции отклика используемого сцинтилляционного блока детектирования. В режиме расчета аппаратных функций отклика при моделировании накапливается спектр энергии, поглощенной детектирующим элементом, т.е. для каждого энергетического канала подсчитывается количество соответствующих импульсов. По завершении монтекарловской части программы аппаратные функции отклика разыгрываются по Гауссу на основе рассчитанных энергетических спектров и экспериментально определенной зависимости энергетического разрешения от энергии.

При расчете функций отклика учет конфигурации и эффективности регистрации NaI(Tl) детектора, используемых в расчетах, является очень важным, поскольку существенно влияют на спектральную форму аппаратного спектра.

Расчетная геометрическая модель детектора включает в себя NaI(Tl) кристалл с окружающими его внешними оболочками, а также элементы внешних конструкций блока детектирования и окружающей среды. В данной работе рассматривается сцинтилляционный блок детектирования

на основе NaI(Tl) детектора ($\text{Ø}40$ мм, $h = 40$ мм). NaI(Tl) детектор, обладающий высокой чувствительностью к фотонному излучению и низким собственным фоном, имеет ряд преимуществ при использовании функции $G(E)$, а именно:

- отсутствие энергетической зависимости при оценке дозы облучения фотонного излучения;
- определение дозы облучения без спектрального анализа и оценки дифференциальной дозы облучения, включая дозу облучения рассеянного излучения со спектральным анализом;
- непродолжительность времени измерения и простота процесса измерения по сравнению с ионизационной камерой.

С помощью программного комплекса *SNEGMONT* были рассчитаны аппаратные функции отклика NaI(Tl) детектора ($\text{Ø}40$ мм, $h = 40$ мм) на потоки моноэнергетических фотонов с энергией от 10 до 3000 кэВ (рисунок 1). Предполагалось, что на входное окно детектора падает по нормали равномерный параллельный поток моноэнергетических фотонов с заданной мощностью амбиентного эквивалента дозы у поверхности детектора. Соответствующая плотность потока вычисляется программой в процессе задания пользователем исходных данных моделирования. Моделируемое время воздействия определялось по критерию заданной статистической достоверности результатов.

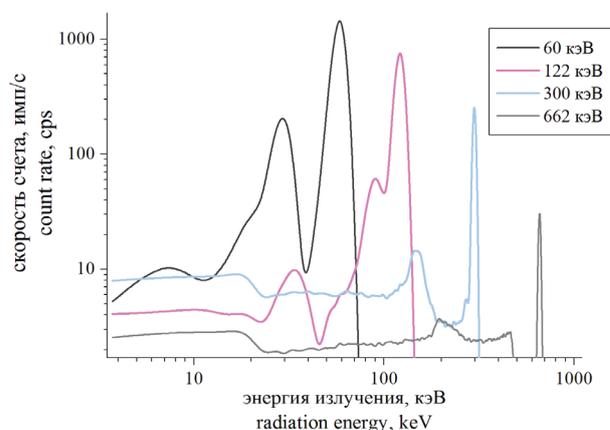


Рисунок 1 – Аппаратурные функции отклика NaI(Tl) детектора ($\text{Ø}40$ мм, $h = 40$ мм) на моноэнергетическое гамма-излучение, рассчитанные по методу Монте-Карло

Figure 1 – Instrument response functions of the NaI(Tl) detector ($\text{Ø}40$ мм, $h = 40$ мм) to monoenergetic gamma radiation calculated by Monte-Carlo method

На основе смоделированных функций отклика для нескольких десятков различных исходных монолиний гамма-излучений были рассчитаны эффективность регистрации и чувствительность детектора.

Полученные аппаратурные функции отклика на моноэнергетическое излучение в диапазоне энергий от 10 до 3000 кэВ представляют собой спектральное распределение, соответствующее параллельному пучку фотонного излучения.

Аппаратурное спектральное распределение фотонного излучения в кристалле NaI(Tl) в области энергий менее 2 МэВ, где влияние образования электронных пар невелико, образуется из распределения вторичных электронов с энергиями от нуля до комптоновского порога, пика полного поглощения, созданного главным образом фотоэлектрическим поглощением, а также низкоэнергетической составляющей, обусловленной рассеянием.

Наблюдаемое в действительности амплитудное распределение импульсов, ширина которых увеличивается как при прохождении сцинтилляционных фотонов от места генерации до входного окна фотоэлектронного умножителя, так и при усилении тока электронов, образованных в результате фотоэффекта, представляет собой непрерывный спектр. Далее весь энергетический диапазон регистрации разбивается на энергетические интервалы, для каждого из которых вычисляется функция $G(E)$ с применением линейной интерполяции.

Расчеты функции $G(E)$ удобно производить в среде *MathCAD* с использованием интеллектуального алгоритма, позволяющего подбирать энергетические интервалы и минимизировать отклонения функции $G(E)$. На рисунке 2 представлены примеры аппаратурного спектра и спектр дозы, создаваемые коллимированным источником гамма-излучения ^{226}Ra в составе дозиметрической установки.

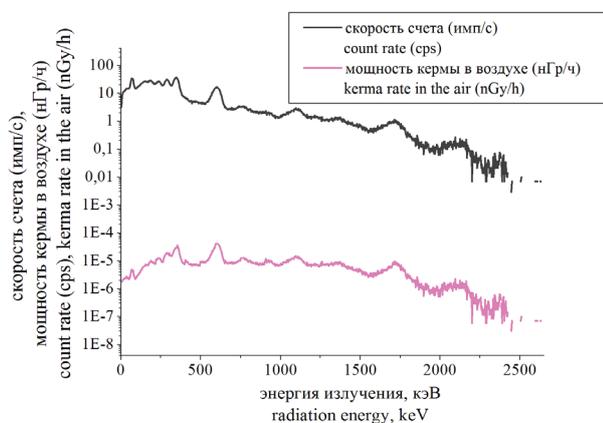


Рисунок 2 – Измеренный аппаратурный и рассчитанный дозовый спектры источника гамма-излучения ^{226}Ra
Figure 2 – Measured instrumental and calculated dose spectra of the gamma radiation source ^{226}Ra

Отметим, что точность измерения мощности дозы, основанного на использовании функции $G(E)$, зависит от ширины канала энергетической шкалы спектрального распределения. Для создания образцовых средств измерения важно учитывать данный момент, так как он может вносить существенную погрешность в величину измеренной мощности дозы. Для решения этой задачи разработан алгоритм расчета функции $G(E)$, учитывающий реальную ширину энергетического канала используемых блоков детектирования. Применение данного подхода позволило добиться хорошей сходимости результатов расчета мощности дозы с помощью функции $G(E)$ и измеренных значений мощности дозы на поверочных дозиметрических установках.

Направленность детектора при использовании функции $G(E)$

Для решения задач по измерению мощности дозы окружающей среды необходимо учитывать положение сцинтилляционного детектора при проведении измерений. В отличие от ионизационных камер, сцинтилляционные блоки детектирования имеют выраженную характеристику направленности. Поэтому расчет функции $G(E)$ и калибровка должны выполняться для рабочей геометрии измерений прибора.

С помощью программного комплекса *SNEGMONT* обнаружено, что сцинтилляционные детекторы с отношением диаметра к высоте 4:3 имеют самую лучшую характеристику направленности. При этом в сцинтилляционных детекторах, у которых диаметр в 1,5 раза больше высоты, самая высокая чувствительность (прирост составляет +3 %) наблюдается при углах падения излучения в пределах 15° и далее, приближаясь к 90° , снижение чувствительности достигает –6 %.

В наших исследованиях применялся сцинтилляционный детектор с равными по размеру диаметром и высотой. В этом случае по мере увеличения угла падения гамма-излучения чувствительность детектора растет и становится максимальной при углах $70\text{--}80^\circ$ (прирост чувствительности составляет +10 % относительно рабочей торцевой геометрии измерения).

Разработка блока-компаратора

Полученные значения функции $G(E)$ использовались при отладке блока детектирования на основе NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм). На

его основе был создан блок-компаратор для аттестации полей фотонного излучения по мощности кермы в воздухе.

Апробация блока детектирования с функцией $G(E)$ в качестве средства измерения проведена на поверочной дозиметрической установке УДГ-АТ110 [11] с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs и ^{60}Co . Сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчетных аппаратных спектров показал хорошую сходимость. Поэтому значения мощности дозы, полученные с использованием функции $G(E)$, хорошо согласуются с действительными значениями мощности дозы (отклонения менее 3 %) в исследуемых полях излучения. В результате проведенных измерений определены основные метрологические характеристики блока-компаратора.

Для подтверждения метрологических характеристик блока-компаратора были проведены исследования, а позже выполнена калибровка в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» на государственных эталонах Российской Федерации по мощности кермы в воздухе: эталонной установке рентгеновского излучения УЭД 50-320 из состава ГЭТ 8-2011, эталонной установке гамма-излучения УИЭЗ с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{60}Co из состава ГВЭТ 8-2.

Зависимость показаний блока-компаратора от мощности кермы в воздухе была исследована в полях гамма-излучения радионуклидных источников из ^{137}Cs (662 кэВ) в диапазоне от 0,03 до 50 нГр/с. Результаты исследований показали отклонение от линейности в пределах $\pm 3\%$ в указанных диапазонах мощностей кермы в воздухе (рисунок 3).

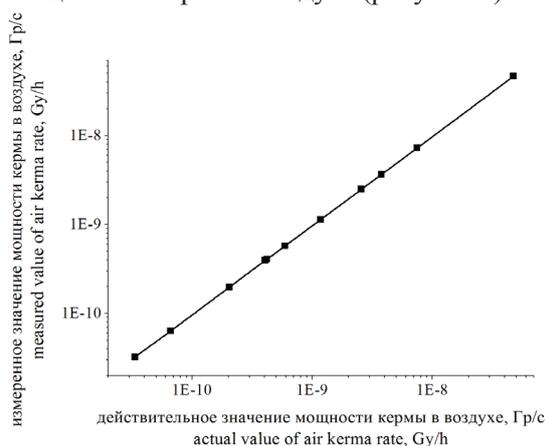


Рисунок 3 – Зависимость показаний блока-компаратора от мощности кермы в воздухе в полях гамма-излучения радионуклидного источника ^{137}Cs (662 кэВ)

Figure 3 – Dependence comparator readings of kerma rate in the air in the fields of gamma radiation of ^{137}Cs radionuclide source (662 keV)

Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора была исследована в диапазоне средних энергий фотонов от 40 до 1250 кэВ с использованием рентгеновского и гамма-излучений. Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора в данном диапазоне энергий не превышает $\pm 6\%$ (рисунок 4).

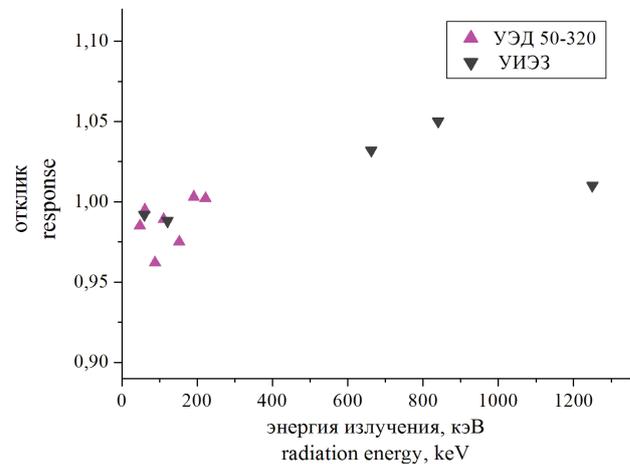


Рисунок 4 – Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора в диапазоне энергий фотонов от 40 до 1250 кэВ

Figure 4 – The energy dependence of the sensitivity of the comparator in the photon energy range from 40 to 1250 keV

В ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» выполнена калибровка блока-компаратора, принадлежащего УП «АТОМТЕХ», с выдачей сертификата калибровки. Максимальное значение расширенной неопределенности полученных значений калибровочных коэффициентов, при коэффициенте охвата $k = 2$, блока-компаратора не превышает 4 %.

В настоящее время несколько подобных блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения поставлены и успешно используются в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» и в УП «АТОМТЕХ».

Заключение

Применение программного комплекса *SNEGMONT* и учет ширины энергетического канала используемых блоков детектирования при расчете функции $G(E)$ обеспечивают хорошую воспроизводимость и достоверность измеряемой мощности дозы. Представленные результаты измерений распределений амплитуд импульсов, полученных методом Монте-Карло с использованием программного комплекса

SNEGMONT, обеспечивают отклонение потока фотонов менее чем в 1 % от истинного входного потока фотонов.

Метод оценки мощности дозы по энергии фотонов в спектре с использованием функции $G(E)$ является более гибким, чем применяемые в настоящее время методы, и обеспечивает надежные результаты, совпадающие с современной концепцией радиационного контроля, так как при измерении дозы присутствует аппаратный спектр излучения и доступна информация об энергии излучения.

Результаты определения метрологических характеристик и калибровка в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева», созданного на базе сцинтилляционного детектора блока-компаратора, показывают, что применение описанного выше подхода позволяет использовать рассматриваемый блок-компаратор в метрологии фотонного излучения для поверки рабочих эталонов и средств измерений, калибровки полей фотонного излучения низкой интенсивности по мощности кермы в воздухе в интервале энергий фотонов от 40 до 1500 кэВ с погрешностью не более 4–6 %.

Список использованных источников

1. *Moriuchi, S.* A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator / S. Moriuchi // *JAERI 1209* (Japan Atomic Energy Research Institute). – 1970.

2. *Moriuchi, S.* Determination of spectrum-dose conversion operator for spherical NaI(Tl) scintillators / S. Moriuchi, T. Nagaoka, S. Sakamoto, K. Saito // *JAERI-M 8092* (Japan Atomic Energy Research Institute). – 1972.

3. *Moriuchi, S.* Development of a dosimetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation / S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito // *Proc. 10-th IRPA International Congress*. – May 2000. – P-3b-197.

4. *Фоминых, В.И.* Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» / В.И. Фоминых, Г.И. Шульгович, В.А. Кожемякин // *Метрология*. – № 10. – 1983. – С. 32–39.

5. *Aoyama, K.* Development of low-energy x-ray survey-meter, radiation detectors and their uses / K. Aoyama, K. Masui, S. Yamamura, T. Nakamura, T. Yabutani, Y. Namito // *KEK Proceedings*. – 2006. – 7 November. – P. 57–67.

6. *Yamamura, S.* Development of wide-energy range X/gamma-ray survey-meter / Seini Yamamura, Takashi Nakamura, Katsuhito Itou, Osamu Hatakeyama, Kaoru Masui // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2008. – No. 45, iss. 5. – P. 187–190.

7. *Бабенко, В.В.* Спектрометрический метод измерения поглощенной дозы гамма-излучения с помощью NaI(Tl) детектора / В.В. Бабенко, А.Г. Исаев [и др.] // Сборник материалов XI ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». – Обнинск : ФГОУ «ГЦИПК», 2005. – С. 67–77.

8. *Cho, G.* Electronic dose conversion technique using a NaI(Tl) detector for assessment of exposure dose rate from environmental radiation / G. Cho, H.K. Kim, H. Woo // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1998. – No. 45. – P. 981–985.

9. *Moriuchi, S.* Construction of Response Matrices for Various Cylindrical and Spherical NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays and the Test Results / S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito // *Japanese Journal of Health Physics*. – 2009. – No. 44. – P. 122–133.

10. *Фоков, Г.А.* Расчет аппаратных функций отклика стандартного NaI детектора гамма-излучения с помощью универсального программного кода SNEGMONT / Г.А. Фоков, Г.И. Шульгович // Сборник материалов XIV ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». – Обнинск : ФГОУ «ГЦИПК», 2008. – С. 145–158.

11. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomtex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf>. – Дата доступа: 04.07.2017

Reference

1. Moriuchi S. A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator. *JAERI 1209*, Japan Atomic Energy Research Institute, 1970 (in Japanese).

2. Moriuchi S., Nagoya T., Sakamoto S., Saito K. Determination of spectrum-dose conversion operator for spherical NaI(Tl) scintillators, *JAERI-M 8092*, Japan Atomic Energy Research Institute, 1972 (in Japanese).

3. Moriuchi S., Satsuma M., Saito K. Development of a dissymmetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation. *Proc. 10-th IRPA International Congress*, Hiroshima, May 2000, p-3b-197.

4. Fominykh V.I., Shulgovich G.I., Kozhemiakin V.A. Measurement of small levels of gamma radiation by spectrometric method using the «spectrum-dose» operator. *Metrologija* [Metrology], no. 10, 1983, pp. 32–39. (in Russian)

5. Aoyama K., Masui K., Yamamura S., Nakamura T., Yabutani T., Namito Y. Development of low-energy x-ray survey-meter, radiation detectors and their uses. *KEK Proceedings*, 2006, 7 November, pp. 57–67.

6. Yamamura Seini, Nakamura Takashi, Itou Katsuhito, Hatakeyama Osamu, Masui Kaoru. Development of

wide-energy range X/gamma-ray survey-meter. *Journal of Nuclear Science and Technology*, no. 45, iss. 5, 2008, pp. 187–190. doi: 10.1080/00223131.2008.10875818

7. Babenko V.V., Isaev A.G. Spectrometric method for the measurement of the absorbed dose of gamma radiation using a NaI(Tl) detector. *Spektrometricheskiiy analiz. Apparatura i obrabotka dannykh na PEVM* [Proc. XI annual seminar «Spectrometric Analysis. Equipment and data processing on PC»]. Obninsk, Federal State Educational Institution «GICPK» Publ., 2005, pp. 67–77 (in Russian).

8. Cho G., Kim H.K., Woo H. 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, 1998, pp. 981–985. doi:10.1109/23.682692

9. Moriuchi S., Tsutsumi M., Saito K. Construction of Response Matrices for Various Cylindrical and Spheri-

cal NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays and the Test Results. *Japanese Journal of Health Physics*, no. 44, 2009, pp. 122–133.

10. Fokov G.A., Shulgovich G.I. Calculation of the instrumental response functions of a standard NaI gamma-ray detector using the universal program code SNEGMONT. *Spektrometricheskiiy analiz. Apparatura i obrabotka dannykh na PEVM* [Proc. XI annual seminar «Spectrometric Analysis. Equipment and data processing on PC»]. Obninsk, Federal State Educational Institution «GICPK» Publ., 2008, pp. 145–158 (in Russian).

11. *Dozimetricheskaya ustanovka gamma-izlucheniya UDG-AT110* [AT110 Gamma Beam Irradiator with Calibration Bench]. Available at: <http://www.atom-tex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf> (accessed 04.07.2017).