

Расчет и применение оператора «спектр-доза» для сцинтилляционного блока детектирования на основе пластмассового детектора большого объема, используемого в составе порталльных радиационных установок

В статье исследуется возможность применения оператора «спектр-доза» для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$ при помощи блока детектирования на основе пластмассового сцинтиллятора с активным объемом 11 литров (далее – БД), используемого в составе радиационных порталльных установок различного назначения. Для этого в среде Монте-Карло моделирования FLUKA были разработаны и верифицированы геометрическая и физическая модели БД. На основе этих моделей рассчитана матрица отклика, представляющая собой набор аппаратных спектров, формируемых при облучении БД моноэнергетическим гамма-излучением. С использованием полученной матрицы отклика рассчитан оператор «спектр-доза» (основы которого были заложены в работе [1]), реализованный в экспериментальном образце БД. Работоспособность экспериментального образца БД с оператором «спектр-доза» проверена на эталонных дозиметрических установках гамма-излучения УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130 (источники ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am). Дополнительно БД был протестирован в низкофоновой камере с применением набора эталонных точечных источников гамма-излучения типа ОСПИ-РТ (^{22}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{228}Th).

Ключевые слова:

оператор «спектр-доза», пластмассовый сцинтиллятор, Монте-Карло моделирование.

**А.А.Загороднюк, А.Н.Толкачев,
Е.В.Быстров**

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

Установлено, что различие между мощностью амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$, измеренного экспериментальным образцом БД на основе рассчитанного оператора «спектр-доза», и опорными значениями, создаваемыми источниками в точке измерения, не превышает 30% при условии, что $\dot{H}(10)$ не превышает величину, равную 25 мкЗв/ч. При небольшой аппаратно-программной корректировке БД верхняя граница измерения $\dot{H}(10)$ может быть расширена до 40 мкЗв/ч.

Основным назначением порталльных установок радиационного контроля на основе пластмассовых сцинтилляторов большого объема (далее – УРК) является радиационный контроль с целью выявления и предотвращения несанкционированного перемещения радиоактивных материалов [2].

В общем случае УРК измеряет суммарную скорость счета (имп/с), создаваемую ионизирующим излучением, с возможностью разделения на заданные энергетические окна. На основе соотношения скоростей счета в различных энергетических окнах, УРК реализует функцию категоризации источников гамма-излучения на естественные и техногенные.

Однако согласно современным требованиям [3,4] необходимо, чтобы УРК не только выявлял факт присутствия источника излучения и производил его категоризацию, но и имел возможность оценить степень потенциальной радиационной опасности. Для этого необходима оценка уровней мощности Ambientного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$.

Одним из возможных методов оценки $\dot{H}(10)$ при помощи УРК, не требующим значительных материально-технических затрат, является использование оператора «спектр-доза», позволяющего оценить величину $\dot{H}(10)$ при помощи свертки аппаратного спектра с оператором [1,5].

Целью настоящей работы являлся расчет оператора «спектр-доза», позволяющий по данным спектрометрических измерений, выполняемых УРК на основе пластмассового БД большого объема (линейные размеры

100×22×5 см, активный объем 11 литров, материал – поливинилтолуол, диапазон измеряемых энергий – 50 кэВ ÷ 3000 кэВ), оценивать мощность Ambientного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$ с погрешностью, не превышающей 30%. Для этого в программе FLUKA была построена Монте-Карло модель БД, при помощи которой была рассчитана матрица отклика M . Дополнительно был рассчитан дозиметрический вектор отклика \bar{D} , представляющий собой набор величин $\dot{H}(10)$, генерируемых моноэнергетическим фотонным излучением в заданной геометрии. Оператор «спектр-доза» рассчитывался путем решения матричного уравнения:
$$\bar{S} \times M = \bar{D}. \quad (1)$$

Построение компьютерной модели детектора

На подготовительном этапе построения модели был произведен набор аппаратных спектров, генерируемых эталонными точечными источниками типа ОСГИ-РТ при облучении БД внутри низкофоновой камеры (рис.1). Низкофоновая камера представляет собой конструкцию в виде параллелепипеда, состоящую из внутреннего пространства с линейными размерами 150×80×80 см³, окруженного слоем стали толщиной 1 см изнутри, слоем

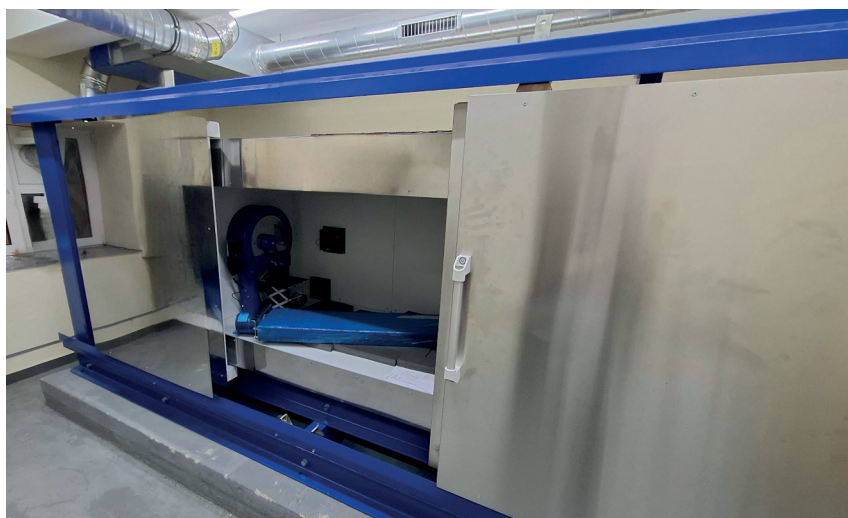


Рис.1. Набор аппаратного спектра БД в низкофоновой камере.

свинца толщиной 10 см и слоем пластика толщиной 3 см снаружи.

Суммарная скорость счета БД внутри низкофоновой камеры при отсутствии источников излучения составляет ~90 импульсов в секунду. Для сравнения, суммарная фоновая скорость счета БД вне низкофоновой камеры составляет ~5800 импульсов в секунду при фоновом значении мощности амбиентного эквивалента дозы, равной 120 нЗв/ч.

На следующем этапе в программе FLUKA версии 4.5.0 [6] была построена модель БД, размещенного внутри низкофоновой камеры. Модель полностью повторяет геометрию набора эталонных аппаратурных спектров (рис.2).

Данная модель облучалась излучением, генерируемым точечными источниками, аналогичными источникам, используемым при наборе аппаратурных спектров при реальных измерениях. В среде программирования Python была разработана программа, позволяющая поканально сравнивать аппаратурные и модельные спектры (предварительно произведя их свертку с функцией Гаусса). В качестве критерия соответствия между модельным и аппаратурным спектром было использовано

среднее значение отклонения. Результатом работы программы является набор параметров для свертки модельного спектра с функцией Гаусса, что позволяет обеспечить близкое соответствие между Монте-Карло моделью и реальным блоком детектирования.

Верификация компьютерной модели блока детектирования была произведена путем прямого сопоставления аппаратурных и модельных спектров. Всего для построения и верификации модели было использовано 11 источников: ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{228}Th , ^{241}Am . На рис.3 представлен пример сопоставления результатов моделирования с измерениями для следующих источников: ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am .

Сопоставление аппаратурных и модельных спектров показало их хорошее согласие (максимальное среднее отклонение для заданного набора радионуклидных источников составило <5%). Исходя из данных результатов можно сделать вывод, что модель БД соответствует реальному блоку детектирования, и, как следствие, может быть использована для дальнейших вычислений.

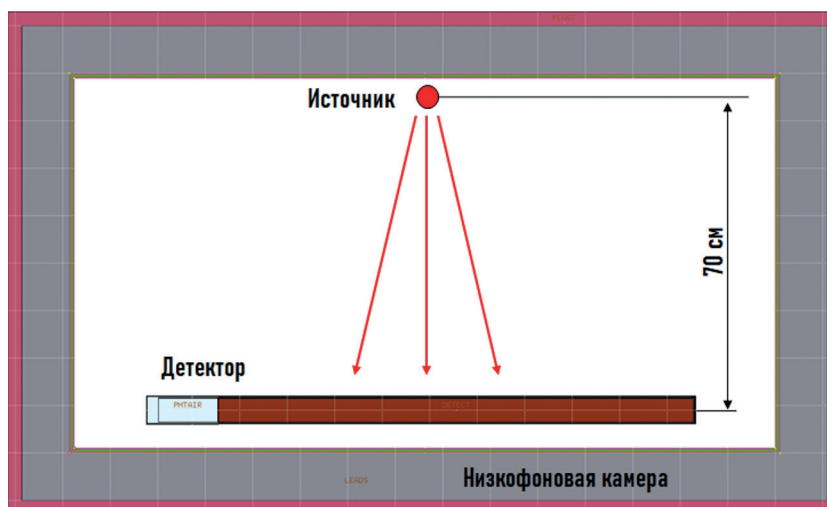


Рис.2. Модель БД, размещенная внутри модели низкофоновой камеры. Модели построены в программе FLUKA версии 4.5.0.

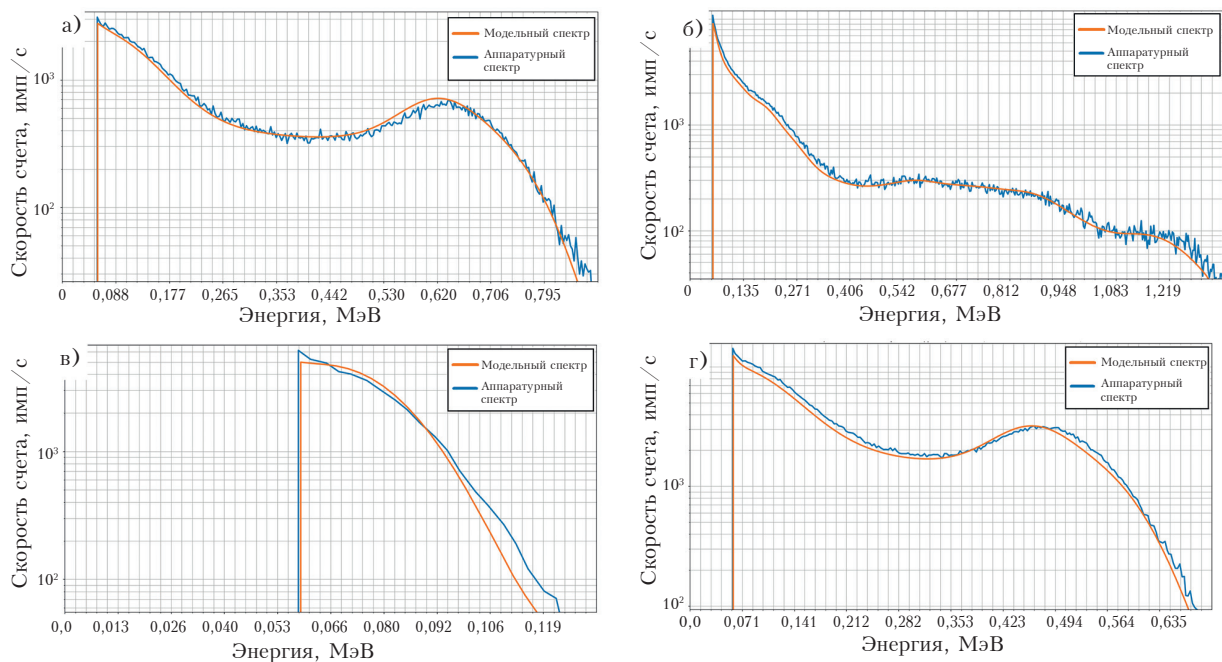


Рис.3. Сопоставление аппаратурных и модельных спектров для заданных нуклидов: а) ^{54}Mn , б) ^{152}Eu , в) ^{241}Am , г) ^{137}Cs .

Расчет оператора «спектр-доза»

В общем случае расчет оператора «спектр-доза» производится следующим образом: для заданной геометрии модель детектора облучается набором источников моноэнергетического фотонного излучения. Из результирующих модельных спектров, предварительно прошедших операцию свертки с функцией Гаусса, строится матрица отклика M .

Далее рассчитывается мощность ambientно эквивалента дозы, генерируемая заданными источниками в точке расположения детектора. Результатом данного этапа является вектор, состоящий из набора дозиметрических величин \vec{D} . Размерность вектора согласована с размерностью матрицы отклика. Оператор «спектр-доза» рассчитывается путем решения матричного уравнения (1).

Основной проблемой, не позволяющей решить данную систему классическим методом при помощи обратной матрицы, является вырожденность матрицы отклика M . В настоящей работе для решения данной системы уравнений было использовано численное моделиро-

вание на основе метода Монте-Карло, позволяющее получить стабильное решение даже при условии вырожденности матрицы отклика (суть алгоритма решения систем линейных алгебраических уравнений методом Монте-Карло детально описана в работах [7,8]).

Дополнительной проблемой расчета оператора «спектр-доза» является выбор размерности матрицы отклика, позволяющей корректно решить уравнение (1). Размерность оператора «спектр-доза» напрямую зависит от размерности матрицы отклика, что в свою очередь влияет на результат расчета мощности ambientно эквивалента дозы при помощи свертки аппаратурного спектра БД с оператором. В случае БД, используемого в данной работе, аппаратурный спектр включает 1024 энергетических канала. Создание матрицы отклика с такой размерностью делает расчет оператора «спектр-доза» невозможным. Решением данной проблемы является объединение нескольких энергетических каналов аппаратурного спектра (и, как следствие, модельного спектра) в энергетические окна. В настоящей

работе было установлено, что наиболее оптимальным вариантом разбиения спектра на энергетические окна является нелинейное разбиение на 30 энергетических окон, при котором мощность амбиентного эквивалента дозы, генерируемая моноэнергетическим излучением, которое соответствует граничным энергиям энергетического окна, отличается не более, чем на 30% (рис.4).

В среде разработки Python была создана программа, которая производит данное разбиение путем анализа кривой зависимости мощности амбиентного эквивалента дозы от энергии фотонного излучения, представленной на рис.4. Кривая получена при помощи Монте-Карло моделирования с использованием коэффициентов перехода от плотности потока фотонного излучения к мощности амбиентного эквивалента дозы.

Верификация оператора «спектр-доза»

Первичная верификация оператора «спектр-доза» была выполнена путем сопоставления расчетных значений мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$, генерируемых точечными источниками внутри низкофо-

новой камеры в точке расположения детектора, с величинами, полученными путем свертки оператора с аппаратурным спектром. Расстояние источник–детектор составляет 70 см. Под теоретической величиной $\dot{H}(10)$ в данном случае понимается величина, полученная путем свертки плотности потока излучения, генерируемого источником в точке расположения детектора, с массовым коэффициентом передачи энергии, умноженная на коэффициент перевода кермы в воздухе в амбиентный эквивалент дозы согласно формулам [9,10]:

$$K_a = \sum_i \beta \times E_i \times \varphi_i \times (\mu_{en}/\rho)_{tr}, \quad (2)$$

где K_a – мощность кермы в воздухе, Гр/с; β – коэффициент перевода мДж/МэВ; E – энергия излучения, МэВ; φ – плотность потока излучения, $1/(см^2 \cdot с)$; $(\mu_{en}/\rho)_{tr}$ – массовый коэффициент передачи энергии, $см^2/г$.

$$\dot{H}(10) = K_a \times \alpha, \quad (3)$$

где $\dot{H}(10)$ – мощность амбиентного эквивалента в воздухе, Зв/с, α – коэффициент перевода, Зв/Гр.

Целью данного этапа была верификация корректности работы оператора в заданном энергетическом диапазоне (50 – 3000 кэВ). В табл.1 представлены результаты сопостав-

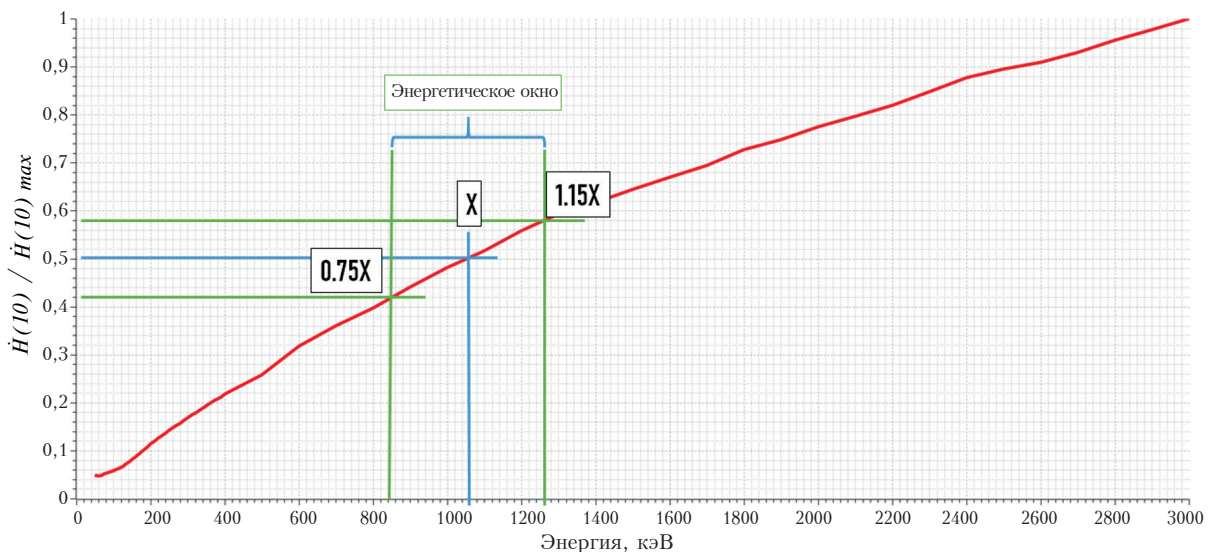


Рис.4. Кривая зависимости относительной мощности амбиентного эквивалента дозы от энергии фотонного излучения (с указанием критерия выбора ширины энергетического окна).

Табл.1. Сопоставление расчетных значений мощности амбиентного эквивалента дозы с величинами, измеренными БД при помощи оператора «спектр-доза», для точечных источников в низкофоновой камере.

Источник	Активность, Бк	$\dot{H}(10)$ расчетная, мкЗв/ч	$\dot{H}(10)$ измеренная, мкЗв/ч	Отклонение, %
²² Na	26518	0,0224	0,0220	-1,7
⁵⁴ Mn	15105	0,0048	0,0040	-16,6
⁶⁰ Co	53473	0,0460	0,0400	-13,2
⁸⁸ Y	56160	0,0484	0,0450	-6,9
¹⁰⁹ Cd	138281	0,0111	0,0110	-1,2
¹¹³ Sn	40156	0,0072	0,0070	-2,7
¹³⁷ Cs	64697	0,0158	0,0160	+1,3
¹³⁹ Ce	58323	0,0056	0,0060	+7,0
¹⁵² Eu	18558	0,0850	0,0090	+6,0
²²⁸ Th	13231	0,0619	0,0060	-3,2

ления расчетных значений $\dot{H}(10)$ и величин, измеренных БД с использованием оператора «спектр-доза».

Результаты сопоставления расчетных значений и измеренных величин показывают хорошую сходимость. Можно сделать вывод, что оператор «спектр-доза» применим для определения мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$ в широком энергетическом диапазоне.

Основная верификация оператора «спектр-доза» производилась на поверочной дозиметрической установке УДГ-АТ110 производства УП АТОМТЕХ [11]. Для этого блок детектирования устанавливался в заданную контрольную точку с известным значением мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$, взятого из свидетельства на поверку установки (далее – опорная величина). Значения $\dot{H}(10)$, измерен-

ные БД при помощи оператора, сравнивались с опорными величинами. Результат сопоставления данных величин представлен в табл.2.

Было установлено, что величины $\dot{H}(10)$, измеренные БД при помощи оператора, хорошо согласуются с опорными величинами для источников ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am при условии, что мощность амбиентного эквивалента дозы не превышает некоторое пороговое значение. Для определения верхней границы мощности амбиентного эквивалента дозы были произведены дополнительные прямые измерения на поверочных дозиметрических установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130 [12] (источник излучения – ¹³⁷Cs). Под верхней границей понимается максимальное значение величины $\dot{H}(10)$, при которой опорная величина отличается от измеренной не более чем на 30%. Результаты измерений представлены в табл.3.

Табл.2. Сопоставление опорных величин мощности амбиентного эквивалента дозы с величинами, измеренными БД при помощи оператора «спектр-доза», для случая облучения блока детектирования на установке УДГ-АТ110.

Источник	$\dot{H}(10)$ опорная, мкЗв/ч	$\dot{H}(10)$ измеренная, мкЗв/ч	Отклонение, %
⁶⁰ Co	2,370	2,497	+5,1
¹³⁷ Cs	0,620	0,706	+12,2
¹³⁷ Cs	40,300	20,895	-48,3
¹³⁷ Cs	35,100	19,305	-45,0
²⁴¹ Am	2,510	2,484	-1,0
²⁴¹ Am	2,180	2,213	+1,5

Табл.3. Сопоставление опорных величин мощности амбиентного эквивалента дозы с величинами, измеренными БД при помощи оператора «спектр-доза», для случая облучения блока детектирования излучением радионуклида ^{137}Cs на установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130.

$\dot{H}(10)$ опорная, мкЗв/ч	$\dot{H}(10)$ измеренная, мкЗв/ч	Отклонение, %
15	12,58	-16,13
20	15,16	-24,20
25	17,44	-30,24
35	19,31	-45,00

Исходя из результатов измерения, можно сделать вывод, что расхождение между измеренной и опорной величиной $\dot{H}(10)$ больше, чем 30%, наблюдается при мощности амбиентного эквивалента дозы большей, чем 25 мкЗв/ч.

Зависимость измеряемой БД величины мощности амбиентного эквивалента дозы от интенсивности излучения связана с изменением формы спектра, возникающим при высоких нагрузках детектора. На рис.5 представлен аппаратный спектр БД при облучении излучением ^{137}Cs для различной интенсивности излучения.

Можно заметить, что чем выше интенсивность излучения, тем дальше расположен

правый край спектра, в то время как в левой области спектра происходит его сглаживание. Это приводит к тому, что величины, рассчитанные при помощи оператора «спектр-доза», занижены относительно опорных величин.

Для того, чтобы учесть изменение формы спектра с увеличением интенсивности излучения, в блок детектирования были добавлены аппаратно-программные решения, позволяющие компенсировать уменьшение измеряемых БД значений мощности амбиентного эквивалента дозы. Результаты прямых измерений, полученные после реализации аппаратно-программных решений в БД, представлены в табл.4.

Исходя из результатов, представленных в табл.4, можно сделать вывод, что при помощи внесенных в блок детектирования аппаратно-программных корректировок, верхняя граница измерений поднялась до значения 40 мкЗв/ч.

Заключение

В статье рассмотрена возможность применения оператора «спектр-доза» при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$ блоком детектирования на основе

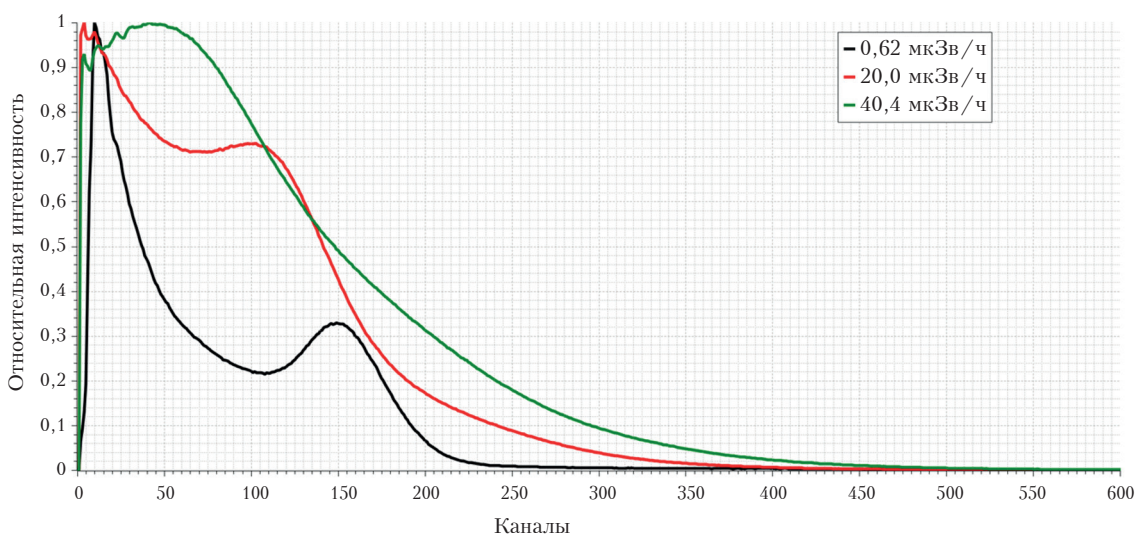


Рис.5. Зависимость аппаратного спектра БД от интенсивности излучения при облучении блока детектирования излучением радионуклида ^{137}Cs (под относительной интенсивностью понимается скорость счета, нормированная на максимальное значение).

Табл.4. Сопоставление опорных величин мощности амбиентного эквивалента дозы с величинами, измеренными БД при помощи оператора «спектр-доза», для случая облучения БД после аппаратно-программной корректировки излучением радионуклида ^{137}Cs на установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130.

$\dot{H}(10)$ опорная, мкЗв/ч	$\dot{H}(10)$ измеренная, мкЗв/ч	Отклонение, %
10	11,83	+15,5
15	16,52	+9,2
25	25,25	+1,0
30	28,62	-4,6
40	34,82	-13,0

пластмассового сцинтиллятора с активным объемом 11 литров, используемого в составе порталных радиационных мониторов различного назначения.

Показано, что использование оператора «спектр-доза» позволяет БД измерять мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}(10)$, генерируемую источниками фотонного излучения, в широком энергетическом диапазоне.

Энергетическая зависимость расчетной величины $\dot{H}(10)$ для БД проверена при помощи эталонных точечных гамма-источников типа ОСГИ-РТ: ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{228}Th . Для каждого источника рассчитывалось значение величины $\dot{H}(10)$, генерируемое источником в точке измерения. Данная величина сравнивалась

со значением $\dot{H}(10)$, измеренным БД с использованием оператора «спектр-доза». Было показано, что для заданных источников излучения максимальное отклонение между рассчитанной и измеренной величиной $\dot{H}(10)$ составляет менее 17%.

Корректность работы БД при использовании оператора «спектр-доза» была проверена на поверочных дозиметрических установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130 путем сопоставления опорных и измеренных БД величин $\dot{H}(10)$. Было показано, что отклонение измеренных величин от опорных не превосходит 30%, при условии, что значение опорной величины $\dot{H}(10)$ не превосходит некоторый предел (верхняя граница измеряемой величины).

Установлено, что при стандартной методике применения оператора «спектр-доза» верхняя граница измеряемой величины $\dot{H}(10)$ для БД составляет 25 мкЗв/ч. При аппаратно-программной модификации блока детектирования верхняя граница $\dot{H}(10)$ может быть расширена до 40 мкЗв/ч.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. Кожемякину В.А. за полезные замечания и рекомендации при ее подготовке.

Литература

1. Фоминых В.И., Шульгович Г.И., Кожемякин В.А. Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» // Метрология. 1983. № 10. С. 32-39.
2. Установка радиационного контроля УРКАТ2329 URL: <https://atomtex.com/ru/ustanovka-radiacionnogo-kontrolya-urk-at2329> (дата обращения: 3 августа 2025).
3. Шильникова Т.И., Алексеев И.В., Аршанский С.М., Домарацкий В.П., Жуков Г.В., Моисеев Н.Н., Оборин А.В. Проблемы и перспективы в области испытаний средств измерений ионизирующих излучений в целях утверждения типа. Часть 1. // АНРИ. 2022. № 3(110). С. 48-60.
4. Шильникова Т.И., Алексеев И.В., Аршанский С.М., Домарацкий В.П., Жуков Г.В., Заневский А.В., Литвинова А.И., Оборин А.В., Моисеев Н.Н., Сэпман С.В., Чуваев С.В. Проблемы и перспективы в области испытаний средств измерений ионизирующих излучений в целях утверждения типа. Часть 2. // АНРИ. 2023. № 3(114). С. 56-64.
5. 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. №3. С. 246-253.
6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/index.html> (дата обращения: 3 августа 2025).
7. V. Alexandrov, E. Atanassov, I. Dimov, S. Branford, A. Thandavan, and C. Weihrauch, «Parallel Hybrid Monte Carlo Algorithms for Matrix Computations», *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings Part III. 3516: 744-752. 5th International Conference. Atlanta. GA. USA. 2005*, p. 22-25.
8. V. Alexandrov and O.A. Esquivel-Flores. «Towards Monte Carlo preconditioning approach and hybrid Monte Carlo algorithms for matrix computations», *Comput. Math. Appl*, 70, 2015, p. 2709-2718.
9. P. Andreo et. al. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*, Wiley, 2017, 1000 p.
10. ISO 4037-3:2019: 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 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence.
11. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at110> (дата обращения: 3 августа 2025).
12. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ130 URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at130> (дата обращения: 3 августа 2025).

Calculation and Application of the «Spectrum-Dose» Operator for a Scintillation Detection Unit Based on a Large-Volume Plastic Detector Used in Portal Radiation Installations

Zaharadniuk Aleksei, Tolkachev Aleksei, Bystrov Evgenii (ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article investigates the possibility of using the «spectrum-dose» operator to measure the ambient dose equivalent rate $\dot{H}(10)$ with a detection unit (DU) based on a plastic scintillator with an active volume of 11 liters, employed in various types of radiation portal systems. For this purpose, geometric and physical models of the DU were developed and validated in the FLUKA Monte Carlo simulation environment. Based on these models, a response matrix was calculated, representing a set of instrumental spectra obtained when the DU is irradiated with monoenergetic gamma radiation. Using the resulting response matrix, the «spectrum-dose» operator was calculated and implemented in an experimental DU prototype. The performance of the DU prototype incorporating the «spectrum-dose» operator was tested at the UDG-AT110 and UDG-AT130 gamma radiation reference dosimetry facilities (^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{241}Am sources). Additionally, the DU was tested in a lowbackground chamber using a set of OSGIRT type reference point gamma sources (^{22}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{228}Th). It was found that the difference between the ambient dose equivalent rate $\dot{H}(10)$ measured by the experimental DU prototype, based on the calculated «spectrum-dose» operator, and the reference values generated by the sources at the measurement point does not exceed 30%, provided that $\dot{H}(10)$ does not exceed 25 $\mu\text{Sv/h}$. With minor hardware and software modifications to the DU, the upper measurement limit of $\dot{H}(10)$ can be extended to 40 $\mu\text{Sv/h}$.

Keywords: *spectrum-dose operator, plastic scintillator, Monte Carlo simulation.*

*А.А.Загороднюк (вед.инж.), А.Н.Толкачев (зам.нач.отд.), Е.В.Быстров (нач.лаб.)
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика
Беларусь*

Контакты: тел. +375 29 171-13-72, e-mail: zaharadniuk_aa@atomtex.com