

Расчет оператора «спектр-доза» для оценки дозовых нагрузок кожного покрова при загрязнении бета-излучающими нуклидами

В статье рассматривается алгоритм создания математического оператора, позволяющего конвертировать показания детектора бета-излучения, работающего в спектрометрическом режиме, в поглощенную дозу в тканеэквивалентном материале на глубине 70 мкм. В основе алгоритма лежит матрица отклика детектора, полученная при помощи Монте-Карло моделирования. Корректность работы математического оператора (далее – оператор «спектр-доза») была проверена путем прямых измерений бета-излучения с известными характеристиками. В качестве детектирующего устройства был использован экспериментальный макет блока детектирования бета-излучения (далее – БД), разработанный предприятием «АТОМТЕХ».

Ключевые слова:

Монте-Карло моделирование, детектор бета-излучения, матрица отклика детектора, оператор «спектр-доза».

**А.А.Загороднюк, Д.В.Горшков,
Р.В.Лукашевич, А.Д.Повод,
Н.А.Прямосудова**

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

Одной из важнейших задач при выполнении работ с радиоактивными веществами (РВ) и источниками ионизирующего излучения (ИИИ) является обеспечение радиационной безопасности персонала. Решение данной задачи требует введения различного рода организационно-технических мероприятий, включающих в том числе и контроль внешнего облучения персонала. Одной из основных составляющих внешнего контроля облучения персонала является контроль загрязнения кожных покровов. Несмотря на то, что при работе с РВ предусмотрены меры безопасности, полностью исключить вероятность загрязнения кожных покровов персонала нельзя.

Таким образом, оценка дозы в коже при ее локальном загрязнении РВ является весьма актуальной задачей для целей обеспечения радиационной безопасности персонала атомных электростанций и предприятий ядерно-топливного цикла.

В случае, когда источником поверхностного загрязнения кожных покровов является бета-активный нуклид, оценка дозовой нагрузки на кожу производится при помощи инструментального метода, описанного в работах [1,2]. В соответствии с работой [2], для целей оценки дозы бета-излучения предложено использовать дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М в составе с блоком детектирования бета-излучения БДПБ-01. Данный прибор является широко распространенным средством измерений на АЭС и предприятиях ядерно-топливного цикла. Блок детектирования БДПБ-01 предлагается использовать с установленной на нем насадкой-коллиматором с площадью входного окна 1 см². С использованием данного прибора выполняется усредненная оценка плотности потока с данной площади, а далее расчетным путем осуществляется оценка дозы в коже персонала. Однако с практической точки зрения удобнее использовать прямопоказывающее устройство, при использовании которого не требуется проводить дополнительных расчетов. Таким устройством может являться детектор бета-излучения на основе пластикового сцинтиллятора, работающий в спектрометрическом режиме. Данный детектор позволяет определить значение величины дозовой нагрузки на кожу как свертку аппаратурного спектра детектора с оператором «спектр-доза».

Целью работы является расчет оператора «спектр-доза» методом Монте-Карло моделирования и исследование возможности его применения при оценке дозовых нагрузок кожного покрова при их загрязнении бета-излучающими нуклидами. В работе рассматри-

вается макет блока детектирования бета-излучения, работающий в спектрометрическом режиме и позволяющий производить свертку измеренного спектра бета-излучения с оператором «спектр-доза» в режиме реального времени. В качестве величины, характеризующей дозовую нагрузку, создаваемую бета-излучением, в настоящей работе выбрана доза, поглощенная в тканезквивалентном материале на глубине 70 мкм. С практической точки зрения эта величина позволяет оценить эквивалентную дозу в коже, создаваемую поверхностным загрязнением бета-излучающим нуклидом.

Алгоритм расчета оператора «спектр-доза»

Алгоритм расчета оператора «спектр-доза» X состоит из трех основных этапов:

- в компьютерной программе создается Монте-Карло модель блока детектирования;
- при помощи Монте-Карло модели рассчитывается матрица отклика БД на воздействие бета-излучения. Последовательно облучая БД моноэнергетическим бета-излучением с заданной энергией в заданной геометрии, модель генерирует набор аппаратурных спектров. Эти спектры используются для построения матрицы отклика A [3];
- на третьем этапе создается Монте-Карло модель фантома, представляющего собой куб из четырехкомпонентной ткани МКРЗ [4] с размерами 30×30×30 см [5], покрытого слоем материала, эквивалентным коже толщиной 2 мм (далее по тексту – кожа) [6]. Фантом облучается бета-излучением при тех же условиях, при которых облучался БД во время построения матрицы отклика. Последовательно изменяя энергию бета-излучения, программа рассчитывает дозу, поглощенную в коже фантома на глубине 70 мкм. Результаты расчета далее используются для построения столбца D зависимости поглощенной дозы от энергии бета-излучения.

экспериментально путем измерения спектра бета-излучения ряда источников: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{147}Pm , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl . Сопоставляя границы бета-спектра с теоретическим спектром излучения, было установлено, что каналу 256 соответствует энергия 2,1 МэВ. Результаты моделирования приведены на рис. 2, 3, 4.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что модель хорошо согласуется с экспериментом. Небольшое расхождение между измеренными и модельными спектрами можно объяснить неполнотой данных при построении модели источника (в частности, о толщине слоя радиоактивного вещества).

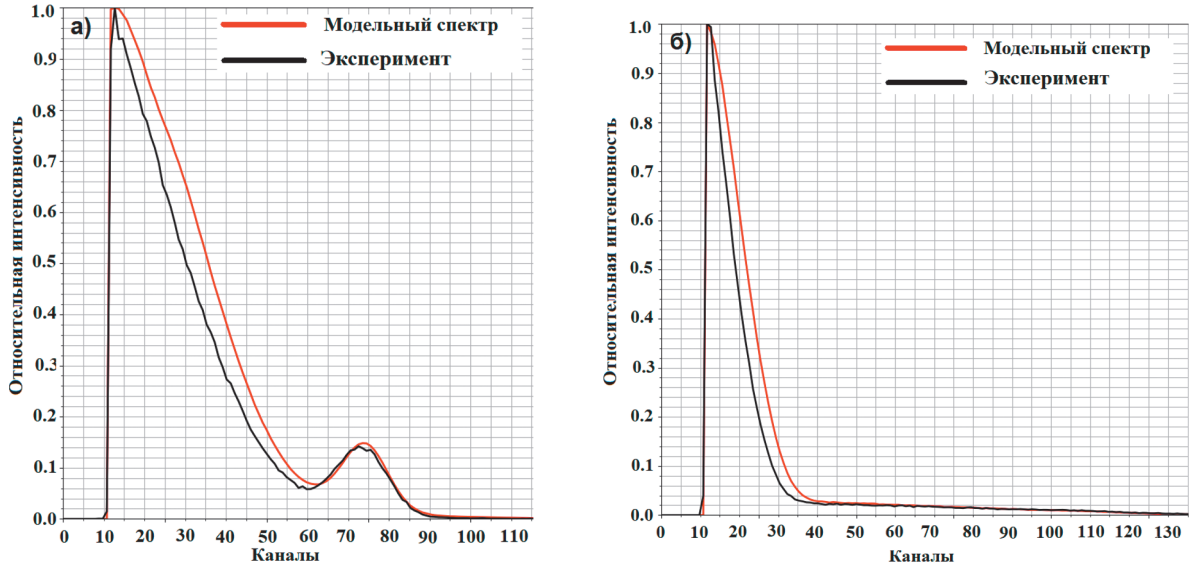


Рис.2. Сравнение измеренного и модельного спектров гамма- + бета-излучения при использовании источников типа ОРИБИ (суммарный гамма- + бета-спектр): а) – ^{137}Cs ; б) – ^{60}Co .

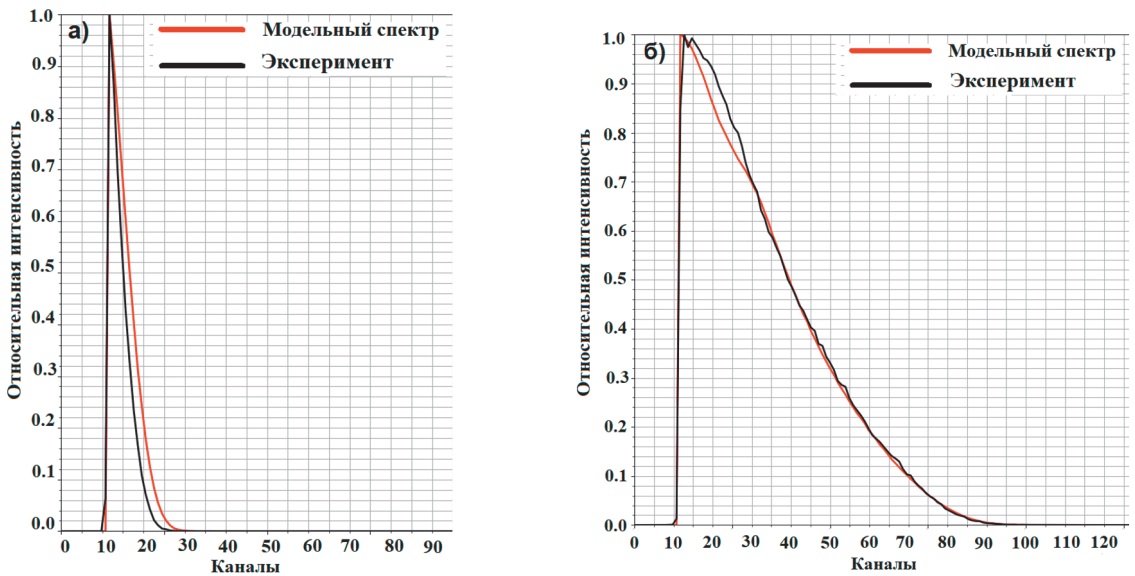


Рис.3. Сравнение измеренного и модельного спектров бета-излучения при использовании источников типа ОРИБИ: а) – ^{147}Pm ; б) – ^{204}Tl .

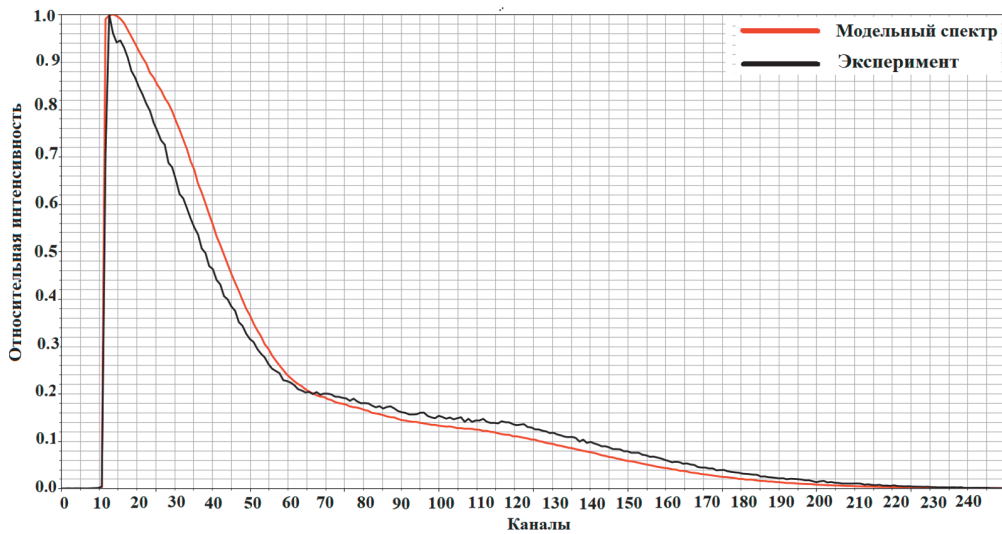


Рис. 4.
Сравнение
измеренного
и модельного
спектров
бета-
излучения при
использовании
источника
типа ОРИБИ
 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$.

Матрица отклика блока детектирования

Для построения матрицы отклика модель БД последовательно облучается моноэнергетическим бета-излучением с заданной энергией в заданной геометрии. Для каждого случая с фиксированной энергией программа рассчитывает аппаратный спектр БД. Энергия бета-излучения выбирается таким образом, чтобы попадала в середину энергетического интервала заданного канала БД. Всего было получено 256 аппаратных спектров, соответствующих 256 каналам в реальном приборе.

Матрица отклика БД на воздействие бета-излучения представляет собой двумерный массив. Каждая строка данного массива является аппаратным спектром – откликом БД на воздействие моноэнергетического излучения с заданной энергией.

Всего было построено две матрицы отклика, соответствующие двум различным вариантам облучения: а) изотропный дисковый источник с радиусом поперечного сечения, равным 2,5 см на расстоянии 20 см от БД; б) изотропный дисковый источник радиусом 1,75 см, расположенный на поверхности входного окна БД. Эти две геометрии были выбраны исходя из следующих соображений:

- вариант с изотропным дисковым источником на расстоянии 0 см соответствует случаю

поверхностного загрязнения кожи радиоактивным материалом. Однако для проверки его работоспособности необходимо иметь реальные источники, аттестованные в этой геометрии;

- вариант с изотропным дисковым источником на расстоянии 20 см соответствует излучению, воспроизводимому дозиметрической установкой бета-излучения УДБ-АТ200 [9], что делает возможным экспериментальную проверку этого случая на установке. Расстояние $d = 20$ см было выбрано как компромисс между погрешностью расчета (погрешность расчета обратно пропорциональна квадратному корню времени расчета) и профилем поля излучения, создаваемым заданным источником при изменении d в интервале от 8 см до 70 см.

Расчет дозы, поглощенной в коже фантома

Для расчета столбца зависимости дозы, поглощенной в коже фантома, от энергии бета-излучения D , в программе была построена Монте-Карло модель фантома, представляющего собой куб из четырехкомпонентной ткани МКРЗ с линейными размерами $30 \times 30 \times 30$ см, покрытого 2 мм слоем кожи. Химический состав МКРЗ ткани и кожи фантома приведен в табл.1.

Табл.1. Химический состав фантома МКРЗ.

Химический элемент	Массовая доля	
	Четырехкомпонентная ткань МКРЗ (плотность 1,0 г/см ³)	Кожа (плотность 1,09 г/см ³)
H (водород)	0,101	0,100
C (углерод)	0,111	0,204
N (азот)	0,026	0,042
O (кислород)	0,762	0,645
Na (натрий)	-	0,002
P (фосфор)	-	0,001
S (серы)	-	0,002
Cl (хлор)	-	0,003
K (калий)	-	0,001

Фантом последовательно облучается моноэнергетическим бета-излучением в тех же условиях (одинаковая энергия и геометрия пучка), в которых облучался БД при построении матрицы отклика. На глубине 70 мкм от поверхности кожи расположен цилиндр толщиной 100 мкм и радиусом 5,64 мм. Размер области выбран таким образом, чтобы площадь поверхности цилиндра равнялась 1 см². Схематическое изображение модели облучения представлено на рис.5. Программа рассчитывает дозу, поглощенную в этом цилиндре.

Как и в случае построения матрицы отклика, были смоделированы две геометрии облу-

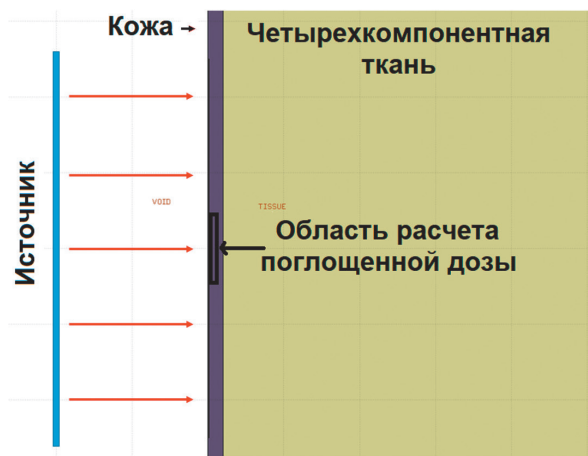


Рис.5. Схематическое изображение модели расчета дозы, поглощенной в коже фантома. С целью наглядности размер области расчета поглощенной дозы на рисунке увеличен.

чения: дисковый источник с радиусом поперечного сечения 2,5 см, расположенный на расстоянии 20 см от поверхности фантома, и дисковый источник радиусом 1,75 см, расположенный на расстоянии 0,1 мм от поверхности фантома. Радиус данного источника был выбран таким образом, чтобы расстояние от границы области расчета поглощенной дозы до границы области проекции источника на поверхность фантома было примерно равно экстраполированному пробегу электрона с энергией 2,1 МэВ в материале фантома (примерно 1 см).

Результаты расчета зависимости дозы, поглощенной в коже фантома, от энергии бета-излучения представлены на рис.6. В общем случае Монте-Карло модель нормирует расчетную величину на одну испущенную источником частицу. Ввиду того, что один источник расположен дальше второго и имеет большую площадь, абсолютная расчетная величина дозы, формируемой им в фантоме, будет меньше, чем у источника, расположенного ближе. Поэтому для наглядности результаты расчета для каждого случая были нормированы на соответствующее максимальное значение.

Как видно из рис.6, поглощенная доза при прочих равных условиях сильно зависит от геометрии пучка бета-излучения. Как следствие,

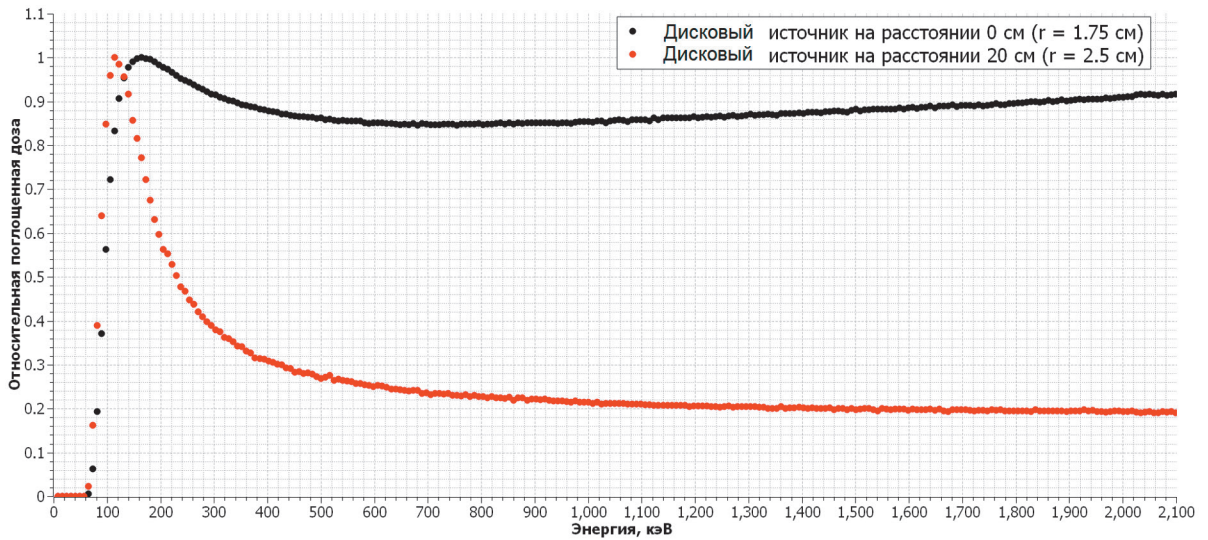


Рис.6. Зависимость дозы, поглощенной в коже на глубине 70 мкм, от энергии бета-излучения: случай дискového источника на расстоянии 0 см (черный) и случай дискového источника на расстоянии 20 см (красный). Значения поглощенной дозы для каждого случая нормированы на соответствующую максимальную величину.

Табл.2. Результаты измерений МПД на установке бета-излучения УДБ-АТ200: источник $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$.

Расстояние, мм	Действительное значение МПД, Гр/с	Измеренное значение МПД (Disc 20 см), Гр/сек	Отклонение, %	Измеренное значение МПД (Disc 0 см), Гр/с	Отклонение, %
80	2,08E-04	2,70E-05	671	4,50E-05	363
110	1,16E-04	3,20E-05	263	3,00E-05	288
200	3,57E-05	2,20E-05	62	5,50E-05	54
300	1,57E-05	1,68E-05	7	3,60E-05	129
400	8,63E-06	1,00E-05	16	2,20E-05	155
500	5,35E-06	6,40E-06	20	1,30E-05	143
700	2,73E-06	2,50E-06	9	8,00E-06	193

оператор «спектр-доза» для обоих случаев также будет различным.

Экспериментальная проверка оператора «спектр-доза»

Для проверки корректности работы оператора «спектр-доза» была создана программа, позволяющая в реальном времени считывать аппаратный спектр БД и производить его свертку с оператором. Проверка производилась путем прямых измерений БД бета-излучения, воспроизводимого установкой УДБ-АТ200. Для этого БД размещался в калиброванной по мощности поглощенной дозы

точке на заданном расстоянии от источника. Далее результаты измерений мощности поглощенной дозы (МПД) БД сопоставлялись с табличными данными установки. Измерения производились для двух операторов «спектр-доза»: случай дискového источника на расстоянии 0 см (Disc 0 см) и случай дискového источника на расстоянии 20 см (Disc 20 см). В качестве источника бета-излучения на установке УДБ-АТ200 был выбран $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ источник типа БИС-50. Результаты сопоставления расчетных значений МПД с табличными приведены в табл.2.

Из табл.2 можно сделать вывод, что при больших значениях МПД существенно изменяется форма аппаратурного спектра прибора и, как следствие, появляются большие отклонения в результате расчета МПД. При МПД меньше $1\text{E-}05$ Гр/с показания прибора начинают хорошо сходиться с действительными значениями МПД на установке. Дополнительно из табл.2 можно сделать вывод, что показания прибора сильно зависят от математической модели расчета, которая была использована для построения матрицы отклика. В частности, модель дискового источника, расположенного вплотную к детектору, имеет сильные расхождения на дальних расстояниях (на близких расстояниях модель невозможно проверить из-за высокой МПД, создаваемой установкой). Модель дискового источника, расположенного на расстоянии 200 мм, имеет хорошее согласие с действительными значениями МПД на дальних расстояниях.

Заключение

В работе рассматривался алгоритм расчета оператора «спектр-доза» применительно к блоку детектирования бета-излучения, работающего в спектрометрическом режиме. Для практической проверки корректности работы математически рассчитанного оператора был изготовлен макет блока детектирования. Кроме того, была выполнена разработка прикладного программного обеспечения, которое позволяет управлять функциями макета блока детектирования, а также выполнять расчет МПД с применением различных операторов «спектр-доза» к аппаратурному спектру.

Прямые измерения МПД, полученные при облучении макета блока детектирования на установке бета-излучения УДБ-АТ200, показывают, что при больших загрузках (МПД в точке больше чем $1\text{E-}05$ Гр/с) наблюдаются

просчеты. Это выражается в том, что при увеличении интенсивности излучения измеренная МПД стремится к постоянной величине. Можно утверждать, что верхняя граница диапазона измерений МПД для прибора с таким детектором составляет $1\text{E-}05$ Гр/с.

Сопоставление результатов измерений с действительными значениями МПД для УДБ-200 показывает, что оператор «спектр-доза» зависит от пространственного распределения бета-излучения. Оператор, рассчитанный для случая дискового источника, удаленного от детектора на расстояние 20 см, имеет хорошее согласие с действительными значениями МПД на УДБ-200 при расстоянии источник–детектор больше чем 20 см. В то же время оператор, рассчитанный для случая дискового источника, расположенного на поверхности детектора, имеет сильное расхождение с действительными значениями МПД на УДБ-200. Исходя из этого результата (полученного на ограниченном количестве точек) можно предположить, что для каждой конкретной геометрии измерения необходимо использовать различные операторы «спектр-доза». Как следствие, для валидации расчета и коррекции оператора «спектр-доза» необходим отдельный набор источников бета-излучения малой активности, отвечающий заданной геометрии. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что расчет поглощенной дозы при помощи оператора «спектр-доза» может использоваться для оценки дозовых нагрузок кожного покрова при их загрязнении бета-излучающими нуклидами. В дальнейшем полученные в данной работе результаты планируется использовать при разработке дозиметра бета-излучения, рассчитанного на измерение дозовых нагрузок в коже при ее поверхностном загрязнении бета-излучающими нуклидами.

Литература

1. Оценка дозы в коже персонала при локальном загрязнении радиоактивными веществами. Методические указания. МУ 1.1.4.01.1511-2018. ООО «АЭБ «Альфа-Х91», 2019.
2. Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Оценка доз облучения кожных покровов при их загрязнении радионуклидами. Часть 2: Практика // АНРИ. 2019. № 3(98). С. 11-18.
3. Загороднюк А.А., Лукашевич Р.В., Сеньковский К.Г., Новиченко А.В. Модифицированный метод коррекции аппаратурного спектра детектора на основе особо чистого германия // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 14-28.
4. Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123 // Ann ICRP. 2013. № 42. 366 p.
5. Operational Quantities for External Radiation Exposure. ICRU report 95 // Radiation Protection and Environment. 2021. № 44. 116 p.
6. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection. ICRP Publication 89 // Ann ICRP. 2002. № 32. 277 p.
7. B.J. Giuseppe, B.K. Till, C.A. Francesco, W.C. Pik, E.Q. Salvatore, F.O. Alberto, F.M. Alfredo «Overview of the FLUKA code», *Annals of Nuclear Energy*, vol. 82, no. 1. pp. 10-18, 2015.
8. NumPy. The fundamental package for scientific computing with Python. URL: <https://numpy.org> (дата обращения: 20.12.2022).
9. Федина С.А, Тренкин В.А, Гузов В.Д, Титков Р.И. Исследование характеристик полей от дозиметрических источников бета-излучения на установке УДБ-АТ200 // АНРИ. 2022. № 4 (111). С. 1-5.

Calculation of the «Spectrum-Dose» Operator for Assessing the Dose Loads of the Skin in Case of Contamination with Beta-Emitting Nuclides

Zaharadniuk Aliaksei, Gorshkov Dmitry, Lukashevich Raman, Povod Alexander, Pryamosudova Natalia
(ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers an algorithm for creating a mathematical operator that allows one to convert the readings of a beta-radiation detector operating in the spectrometric mode into an absorbed dose in a tissue-equivalent material at a depth of 70 μm . The algorithm is based on the detector response matrix obtained using Monte Carlo simulation. The correctness of the operation of the mathematical operator was verified by direct measurements of beta radiation with known characteristics. For this purpose, an experimental beta-radiation detection unit was developed at ATOMTEX SPE.

Key words: Monte-Carlo modelling, beta-detector, response matrix, spectrum-dose conversion operator.

А.А.Загороднюк (инж.), Д.В.Горшков (нач.сект.), Р.В.Лукашевич (нач.сект., к.т.н.),
А.Д.Повод (инж.), Н.А.Прямосудова (инж.) – Научно-производственное унитарное
предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь.

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