

УДК 539.16.08 + 51-73

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОГО УЧАСТКА ПОЧВЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА МЕТОДОМ «*IN SITU*»

Жуковский А.И.¹, Кутень С.А.², Хрущинский А.А.², Толкачев А.Н.¹,
Гузов В.Д.¹, Кожемякин В.А.¹, Чудаков В.А.³

¹УП «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

²НИИ ядерных проблем БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

³Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Рассчитана интенсивность нерассеянных гамма-квантов, поглощенных в цилиндрическом детекторе, помещенном над равномерно загрязненной почвой. Установлена зависимость радиуса области влияния для сцинтилляционного детектора в зависимости от глубины залегания радионуклидов цезия на примере почв региона Тохоку, Япония.

Ключевые слова: детектор, объемный радиоактивный источник, гамма-квант, функция отклика, критический радиус.

Введение

Для решения задач, связанных с радиационным мониторингом объектов окружающей среды, в частности почв, подвергшихся радиоактивному загрязнению, на практике используют различные инструментальные методы и средства контроля.

Стандартный метод экспресс-оценки радиоактивного загрязнения почвы беспробоотборным способом – измерение функции отклика детектора (например, сцинтилляционного) на некоторой высоте над загрязненным участком почвы. Функция отклика в виде энергетического распределения импульсов гамма-излучения зависит от характеристик детектора, почвы и геометрии измерения. На этапе калибровки устройства детектирования требуются калибровочные энергетические распределения импульсов гамма-излучения в геометрии измерения, получение которых слишком трудоемко и дорого. Для этих целей, а также для оптимизации задачи эффективно используют Монте-Карло моделирование процесса переноса гамма-излучения. При использовании метода «*in situ*» почва не может быть непосредственно использована в качестве математической модели, так как представляет собой объект измерения условно бесконечных размеров. Поэтому

очень важно определить область влияния, т.е. тот минимальный участок почвы, который вносит основной вклад в функцию отклика детектора. После этого задача Монте-Карло моделирования решается корректно.

Данная работа отражает результаты теоретических исследований в рамках решения задач по разработке и созданию средства измерений для контроля радиоактивного загрязнения почв региона Тохоку в Японии.

Целью настоящей работы являлась разработка алгоритма определения полуаналитическим методом параметров области влияния загрязненного участка почвы на функцию отклика детектора и получение численных данных для их использования в моделировании методом Монте-Карло процесса переноса гамма-излучения в геометрии измерения «*in situ*».

Аналитическая связь «источник-детектор» для определения влияния нерассеянных гамма-квантов на показания детектора над загрязненной почвой

В бесконечно однородной среде, ослабляющей одинаково во всех направлениях, интенсивность излучения от объемного цилиндрического

источника является функцией линейных размеров и физико-химических параметров источника и детектора, а также расстояния между ними [1]. Как правило, аналитическая связь между параметрами и интенсивностью нерассеянного излучения устанавливается в какой-либо точке пространства, что эквивалентно приближению точечного детектора. Важно получить такую связь для детектора конечных размеров. Для оценки радиуса области влияния достаточно рассмотреть только нерассеянное излучение, что в свою очередь значительно упростит выражение аналитической связи «источник – детектор».

Рассмотрим цилиндрический детектор (цилиндр высотой h_d и радиусом r_d), расположенный на высоте h над загрязненной почвой (рисунок 1), которая представлена слоем цилиндрической формы (высота h_s , радиус r_s). Мы можем использовать такую простую модель реального устройства детектирования только для определения влияния нерассеянных гамма-квантов на чувствительность детектора и определения области влияния на детектор.

Интересующая функция отклика детектора будет определяться нерассеянным потоком гамма-квантов до и после поглощения в детекторе. Показания детектора (функция отклика) конечных размеров I_{det} , полученные в результате поглощения детектором нерассеянного гамма-излучения, пропорциональны следующей величине:

$$I_{det}(E) = \int_{V_s} dV_s \int_{V_d} dV_d a(\vec{r}_1) \frac{\exp(-\mu_s(E)R_s - \mu_a(E)R_a)}{4\pi R^2} \times (1 - \exp(-\mu_d(E)R_d)), \quad (1)$$

где R – расстояние между произвольно выбранной точкой r_1 на поверхности почвы и произвольно выбранной точкой r_2 на поверхности детектора, представляющее собой сумму R_s , R_a и R_d – длин прямолинейных участков траекторий движения гамма-кванта в почве, воздухе и детекторе, соответственно; $a(\vec{r}_1)$ – удельная активность нуклида; $\mu_s(E)$, $\mu_a(E)$ и $\mu_d(E)$ – линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения соответственно для почвы, воздуха и материала детектора для энергии E ; членами μ_s и μ_a представлен поток нерассеянных гамма-квантов, проходящий расстояние R_s в почве, а также расстояние R_a в воздухе соответственно. Последний член уравнения (1) представляет гамма-кванты, которые были выпущены в направ-

лении детектора $\bar{n}_R = \frac{\bar{R}}{R}$, достигли его поверхности и были поглощены в теле детектора в точке r_2 . Интегрирование выполняется для объема почвы $dV_s = d^3r_1$ для объема детектора $dV_d = d^3r_2$.

Последний множитель в подинтегральном выражении (1) описывает вероятность поглощения гамма-квантов в материале детектора. В общем случае он не равен единице и отражает возможность для гамма-квантов пролететь детектор не поглотившись в нем. Эти процессы могут быть существенными для детекторов малых размеров и для приповерхностных траекторий гамма-квантов.

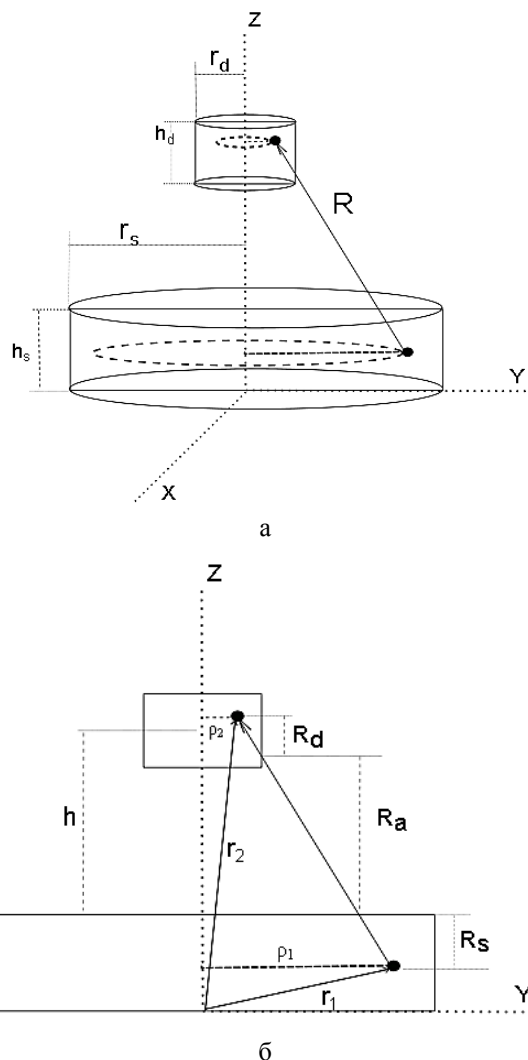


Рисунок 1 – Детектор и источник в цилиндрической системе координат (а) с проекцией на плоскость yz (б)

Для упрощения задачи примем, что радионуклид с энергией E равномерно распре-

делен по объему почвы, т.е. $a(r_1) = \text{const}$, и подставим эту величину в уравнение (1).

Интегрирование в уравнении (1) будем проводить в цилиндрической системе координат (переменные z_1, ρ_1, φ_1 и z_2, ρ_2, φ_2 для почвы и детектора, соответственно).

Величины R_s, R_a и R_d определяются из геометрических соотношений через расстояние R между точкой испускания гамма-кванта в почве и точкой поглощения его в детекторе:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \bar{r}_2 - \bar{r}_1; \\ R &= \sqrt{R_{\perp}^2 + (z_2 - z_1)^2}; \\ R_{\perp}^2 &= \rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Путь гамма-кванта в почве R_s определяется из соотношения:

$$R_s = \frac{h_s - h}{z_2 - z_1} R, \quad (3)$$

где h_s – толщина загрязненного слоя почвы; h – высота расположения центра детектора над почвой.

Уравнения для траекторий гамма-кванта в воздухе и в материале детектора зависят от направления \vec{n}_R и различаются в зависимости от пересечения гамма-квантом торцевой или боковой поверхности детектора. Эти расстояния можно найти путем решения системы из двух уравнений. Первое из них описывает траекторию фотона, проходящую через две точки r_1 и r_2 :

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}. \quad (4)$$

Второе уравнение является уравнением для торцевой и боковой поверхности детектора, соответственно, и имеет вид:

$$\begin{aligned} z &= h_s + h - \frac{h_d}{2}; \\ x^2 + y^2 &= r_d^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Окончательные выражения для путей R_a и R_d при пересечении гамма-квантом боковой поверхности детектора (по траектории R) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{u_c - h_s}{z_2 - z_1} R; \\ R_d &= \frac{z_2 - u_c}{z_2 - z_1} R; \\ u_c &= \frac{1}{R_{\perp}^2} (z_1\rho_2^2 + z_2\rho_1^2 - (z_1 + z_2)\rho_1\rho_2 \times \\ &\times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - (z_2 - z_1)\sqrt{D}); \\ D &= (r_d R_{\perp})^2 - (\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2))^2. \end{aligned} \quad (6)$$

В случае пересечения гамма-квантом нижней поверхности детектора по траектории R выражения для R_a и R_d имеют более простой вид:

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{h - h_d}{z_2 - z_1} R; \\ R_d &= \frac{z_2 - h_s - h + h_d/2}{z_2 - z_1} R. \end{aligned} \quad (7)$$

Необходимо отметить, что все величины в выражении (1) зависят от азимутов φ_1 и φ_2 только через их разность $\varphi_1 - \varphi_2$. Поэтому, вводя новые угловые переменные $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ и $u = \varphi_1 + \varphi_2$ и проводя интегрирование по u , выражение (1) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} I_{\text{det}}(E) &= \int_0^{h_s} dz_1 \int_{h_s+h_d/2}^{h_s+h_d/2+z_1} dz_2 \int_0^{r_d} \rho_1 d\rho_1 \int_0^{r_d} \rho_2 d\rho_2 \int_0^{2\pi} (2\pi - \varphi) G(z_1, z_2, \rho_1, \rho_2, \varphi) d\varphi; \\ G(z_1, z_2, \rho_1, \rho_2, \varphi) &= \frac{\exp(-\mu_s(E)R_s - \mu_a(E)R_a)}{\pi R^2} (1 - \exp(-\mu_d(E)R_d)). \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет рассчитать вклад «прямых» гамма-квантов в функцию отклика детектора после вычисления пятикратного интеграла.

Расчет параметров области влияния для загрязненного радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs плодородного слоя почвы региона Тохоку, Япония

Линейные коэффициенты ослабления для выражения (8) в почве, воздухе и материале детектора были рассчитаны при помощи программы XCOM (Версия 3.1, июнь 1999, M.J. Berger, S.M. Seltzer и др.) на основании широко известных массовых коэффициентов ослабления M.J. Berger и J.H. Hubbell [2].

Массовые доли элементов, формирующих плодородный слой почвы региона Тохоку, представлены в таблице 1. Элементный состав получен на основе данных представленных в работе [3]. В качестве органической составляющей вместо гумусовых кислот использовались данные элементного состава торфа. Рассчитанный массовый коэффициент ослабления гамма-излучения для почвы региона Тохоку в зависимости от энергии гамма-кванта показан на рисунке 2.

Приведенные выше массовые коэффициенты ослабления использовались в качестве основы для построения функции $\mu_s(E)$, используемой в (8) как известная аналитическая функция. Аналогичным образом были построены функции для $\mu_a(E)$ и $\mu_d(E)$.

Представленные ниже расчеты выполнялись для сцинтилляционного детектора NaI(Tl) высотой $h_d=63$ мм и радиусом $r_d=31,5$ мм. При этом геометрический центр детектора располагался над загрязненной почвой на высоте $h=53,5$ мм. Типичное значение плотности почвы региона Тохоку составляет $1,3$ г/см³.

Пятикратный интеграл (8) рассчитан в пакете «*Mathematica*» с использованием метода интегрирования «*AdaptiveQuasiMonteCarlo*» [4]. На рисунке 3 показана типичная зависимость показаний детектора от радиуса участка почвы с равномерно распределенным радионуклидом ¹³⁷Cs (глубина до 10 см).

С ростом радиуса участка почвы показание детектора стремится к насыщению (истинному значению), поэтому зависимость показаний детектора от радиуса участка почвы может быть аппроксимирована кривой:

$$I_{det}(r) = a + b(1 - \exp(-cr)), \quad (9)$$

где коэффициенты a, b, c определяются в процессе аппроксимации.

Истинное показание детектора, которое выходит на асимптотику при росте радиуса, с учетом выражения (9) можно представить в виде:

$$I_{det} = I_{det}(\infty) = a + b. \quad (10)$$

Таблица 1

Элементный состав почвы региона Тохоку

Элемент	H	C	N	O	Na	Mg	Al
Массовая доля	0,004	0,035	0,002	0,622	0,011	0,006	0,051
Элемент	Si	P	S	K	Ca	Fe	
Массовая доля	0,243	0,001	0,001	0,012	0,003	0,010	

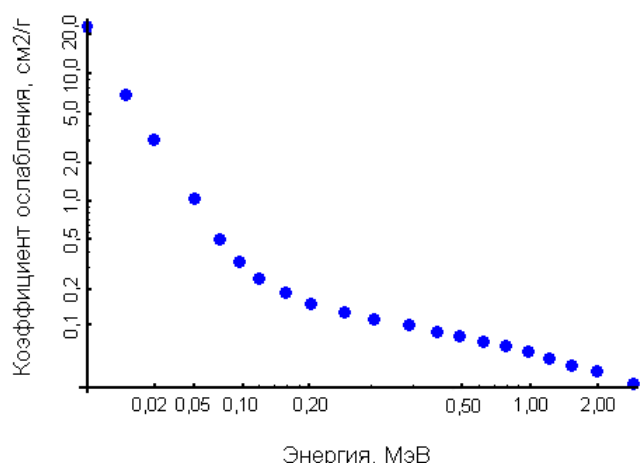


Рисунок 2 – Массовый коэффициент ослабления для почвы региона Тохоку в зависимости от энергии гамма-кванта

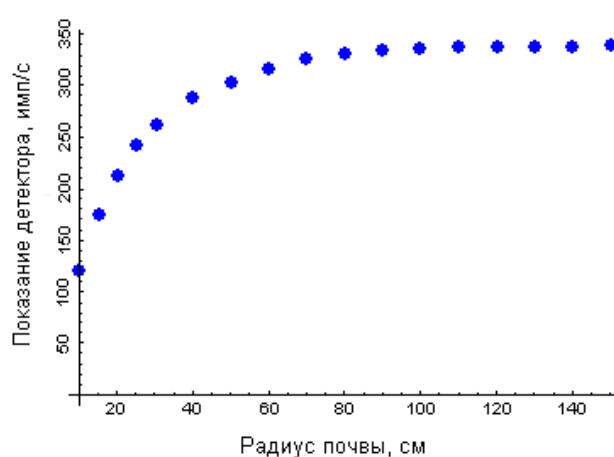


Рисунок 3 – Зависимость показаний детектора от радиуса участка почвы с равномерным распределением ¹³⁷Cs по глубине до 10 см

Из рисунка 3 видно, что показания детектора не изменяются для радиусов, превышающих некоторый критический радиус (эффективный радиус области влияния). Влияние на показание детектора бесконечного слоя почвы, равномерно загрязненной в слое заданной толщины, эквивалентно влиянию слоя такой же толщины с конечным радиусом, равным критическому.

Критический радиус фактически определяет область источника, влияющую на показание прибора.

Для определения критического радиуса целесообразно использовать допустимое относительное отклонение β показаний детектора $I_{det}(r)$ для заданного радиуса участка почвы r относительно показаний детектора $I_{det}(\infty)$. По определению, величина β записывается в виде:

$$\beta = \frac{I_{det}(\infty) - I_{det}(r)}{I_{det}(\infty)} \quad (11)$$

В соответствии с (11) показания детектора для радиуса участка почвы r будут отклоняться в пределах погрешности β от своего максимального (истинного) значения, соответствующего значению $r = \infty$.

Согласно уравнениям (9–11) для заданной погрешности β значение критического радиуса участка почвы можно представить в виде:

$$r_c = \frac{\ln\left(\frac{b}{\beta(a+b)}\right)}{c} \quad (12)$$

Зависимости показаний детектора от радиуса участка почвы с равномерным распределением ^{137}Cs по глубине и их аппроксимации кривой насыщения (9) на глубине 2 см, 5 см, 10 см и 15 см приведены на рисунке 4.

Соответствующие значения критических радиусов почв, рассчитанные с использованием выражений (8) и (12), представлены в таблице 2 для различных глубин залегания радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs .

Следует отметить, что величина относительного отклонения β не может быть меньше типичной ошибки измерения (в нашем случае порядка 10 %).

Для этого значения относительного отклонения $\beta = 10\%$ в таблице 2 в последнем столбце приведены также значения критических радиусов почв, рассчитанные согласно (12) с

использованием вместо уравнения (8) следующего выражения [5] для интенсивности излучения в центре рассматриваемого детектора при заданном распределенном источнике (приближение точечного детектора):

$$I_{det}(E) = \frac{1}{2\mu_s(E)} \{E_2[\mu_a(E)h] - E_2[\mu_a(E)h + \mu_s(E)h_s] - \int_{\mu_s(E)h}^{\mu_s(E)(h+h_s)} E_1\left[\frac{x + h(\mu_a(E) - \mu_s(E))}{x} \times dx\right] \times \sqrt{(\mu_s(E)r_s)^2 + x^2}\} \quad (13)$$

где $E_n(x)$ – интегральная показательная функция [5]:

$$E_n(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t^n} dt \quad (14)$$

Как и следовало ожидать, влияние размера детектора на эффективный радиус области влияния максимально (порядка 9 %) для загрязнения с глубиной залегания радионуклидов 2 см и практически исчезает уже для загрязнения с глубиной 5 см.

Для Монте-Карло моделирования процесса измерения удельной или поверхностной активности с использованием сцинтилляционного детектора следует использовать критический радиус области влияния из предпоследнего столбца таблицы 2, для величины относительного отклонения β порядка 10 %.

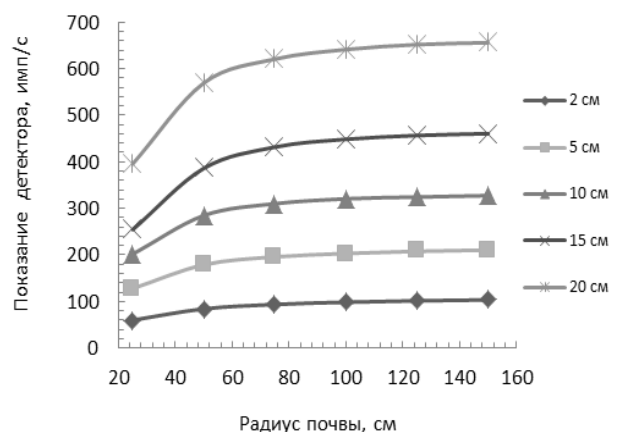


Рисунок 4 – Зависимости показаний детектора от радиуса участка почвы с равномерным распределением ^{137}Cs по глубине и их аппроксимации кривой насыщения (9) на глубине 2 см, 5 см, 10 см и 15 см

Таблица 2
Критический радиус участка почвы региона
Тохоку для различных глубин залегания
радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs

Глубина залегания, см	Относительное отклонение показаний детектора от истинного значения, β %			
	3 %	5 %	10 %	10 % ¹
2	115	98	76	69
5	83	71	55	52
10	71	60	47	46
15	64	55	42	44

¹Значения критического радиуса для точечного детектора, рассчитанные с использованием уравнений (12) и (13)

Заключение

Аналитический метод, использованный для описания прохождения нерассеянного гамма-излучения, позволил получить и оптимизировать математическую модель равномерно загрязненной по глубине почвы, необходимую для последующего Монте-Карло моделирования. В частности, определена область влияния загрязненной почвы региона Тохоку, в зависимости от глубины залегания радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs .

Полученная аналитическая связь «источник – детектор» и рассчитанные на ее основе параметры, в частности, значения критического радиуса источника излучения (загрязненного участка почвы) для различных глубин залегания контролируемых радионуклидов использованы в ходе разработки и создания портативного гамма-спектрометра МКС-АТ6101ДР

Проведенные натурные испытания МКС-АТ6101ДР и последующая эксплуатация спектрометра в префектурах Японии, подвергшихся радиоактивному загрязнению, подтвердили высокую степень достоверности представленных теоретических исследований.

Список использованных источников

1. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений. Том 1: Физические основы защиты от излучений : учебное пособие / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов. – 3-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
2. Berger, M.J. XCOM: Photon Cross Section Database (v. 3.1) / M.J. Berger [et. al]. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/download.html> (accessed 17.09.2013)
3. International Commission on Radiation Units and Measurements, Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53, ICRU Publication Bethesda, Maryland, 1994.
4. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г.М. Фихтенгольц. – Том 3. – М. : Физматлит, 2001. – 662 с.
5. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений. Том 2: Защита от излучений ядерно-технических установок : учебное пособие / Н.Г. Гусев, Е.Е. Ковалев, В.П. Машкович, А.П. Суворов. – 3-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Том 1: Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О. И. Маричев. – 2-е изд. – М. : Физматлит, 2003. – 631 с.

**IMPACT RANGE ESTIMATION OF POLLUTED SOIL AREA FOR RADIATION MONITORING
BY «IN SITU» METHOD**

Zhukouski A.¹, Kutsen S.², Khrutchinsky A.², Tolkachev A.¹, Guzov V.¹, Kojemiakin V.¹, Chudakov V.³

¹SPE «ATOMTEX», Minsk, Belarus

²Research Institute for Nuclear Problems, Minsk, Belarus

³International Sakharov Environmental University, Minsk, Belarus
e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Abstract. Intensity of «direct» gamma-quanta absorbed in cylindrical detector has been determined for the detector placed over soil uniformly contaminated in depth. The dependence of impact range radius for NaI(Tl) detector to cesium depth contamination is established for soil from Tohoku region, Japan.

Keywords: detector, volume radioactive source, gamma quantum, response function, critical radius.

References

1. Gusev N.G., Climanov V.A., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy. Tom 1: Fizicheskiye osnovy zashchity ot izlucheniy* [Ionizing radiation's protection. V. 1: Physical basis of radiation protection], 3rd edition, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 512 p. (in Russian).
2. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K., XCOM: Photon Cross Section Database (v. 3.1). <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/download.html> (accessed 17.09.2013).
3. International Commission on Radiation Units and Measurements, Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53, ICRU Publication Bethesda, Maryland, 1994.
4. Fikhtengolts G.M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya. Tom 3* [Course of differential and integral calculus. V. 3], Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 662 p. (in Russian).
5. Gusev N.G., Kovalev E.E., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy. Tom 2: Zashchita ot izlucheniy yaderno-tekhnicheskikh ustanovok* [Ionizing radiation's protection. V. 2: Radiation protection against nuclear installations] 3rd edition, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 352 p. (in Russian).
6. Prudnikov A.P., Brychkov U.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady. Tom 1: Elementarnyye funktsii.* [Integrals and series. V. 1: Elementary Functions.] 2nd edition, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 631 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.03.2014.