DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-27-37 УДК 621.039.7

ВЛИЯНИЕ НЕВЕРНОГО ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАБЛОНА ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ КАЛИБРОВКИ НА ТОЧНОСТЬ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ПАСПОРТИЗАЦИИ УПАКОВОК РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

М. В. Батяева, А. П. Варлаков, А. В. Германов, В. В. Плисов

АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара», Москва

Статья поступила в редакцию 2 июня 2025 г.

В статье рассмотрено влияние неверного задания параметров, описывающих конфигурацию гамма-спектрометрических измерений упаковок радиоактивных отходов (РАО) при расчете эффективности регистрации гамма-квантов, на результаты измерений удельной активности радионуклидов. Показано, что данная ошибка может отличаться от истинного итогового значения более чем в 100 раз. Для обеспечения точности и достоверности гамма-спектрометрических измерений упаковок РАО с использованием расчетных калибровок предлагается проведение межлабораторных сличительных испытаний.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, упаковка РАО, радиационные характеристики, удельная активность, гамма-спектрометрия, расчетная калибровка, эффективность регистрации, паспортизация РАО, межлабораторные сличительные испытания.*

Измерение радиационных характеристик является наиболее важной задачей при паспортизации загрязненных радионуклидами твердых отходов, образующихся на объектах использования атомной энергии. На основании определения радионуклидного состава и измерений удельных активностей радионуклидов принимается решение о том, какая часть твердых отходов является РАО с отнесением их к тому или иному классу в соответствии с Критериями [1], а какая — промышленными отходами и материалами ограниченного использования. От точности измерений зависят объемы образующихся РАО, их категория, класс и период потенциальной опасности.

Рекомендации по определению радионуклидного состава и удельной активности радионуклидов в РАО изложены в руководствах по безопасности РБ-004-21 [2], РБ-154-19 [3], РБ-155-20 [4], утвержденных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзором), и национальном стандарте ГОСТ Р 59968-2021 [5]. Госкорпорацией «Росатом» разработаны типовые методики измерений (их перечень приведен в [6]) и утверждены Единые отраслевые методические указания [7], в которых описан порядок их выполнения методами альфа-, бета- и гамма-спектрометрии.

Основным методом измерений активности без вскрытия упаковок является гамма-спектрометрия. В процессе измерений регистрируют спектр гамма-излучения от упаковки РАО, при обработке которого выделяют пики полного поглощения, соответствующие энергиям гамма-квантов, испускаемых радионуклидами, и на основании измеренных скоростей счета импульсов в них вычисляют значения активности радионуклидов в упаковке РАО по формуле:

$$A = \frac{S(E_\gamma)}{\varepsilon\left(E_\gamma, \vec{x}\right) \cdot \eta(E_\gamma)}, \qquad (1)$$

где A — активность радионуклида, испускающего гамма-кванты с энергией E_γ, в упаковке РАО, Бк;
$S(E_\gamma)$ — скорость счета импульсов в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией E_γ, измеренная гамма-спектрометром (за исключением фона), $с^{-1}$;
$\varepsilon\left(E_\gamma, \vec{x}\right)$ — эффективность регистрации гамма-квантов с энергией E_γ для условий измерений упаковки РАО, характеризующихся набором параметров $\vec{x}$, $с^{-1}\cdot Бк^{-1}$;
$\eta(E_\gamma)$ — выход гамма-квантов с энергией E_γ на один распад радионуклида (ядерная константа), отн. ед.

Из формулы (1) видно, что знание точного значения эффективности регистрации гамма-квантов $\varepsilon\left(E_\gamma, \vec{x}\right)$ очень важно для правильного установления активности радионуклида в упаковке РАО по измеренному значению скорости счета $S(E_\gamma)$ в пике полного поглощения энергии E_γ гамма-спектра.

Эффективность регистрации гамма-квантов определяется условиями измерений и зависит от параметров детектора гамма-излучения, его расположения относительно упаковки РАО, а также от ее характеристик: размеров, толщины, состава и плотности материала стенок контейнера, состава и плотности материала РАО (источника гамма-излучения) и геометрии его расположения внутри контейнера.

Калибровка спектрометров по эффективности регистрации гамма-квантов должна выполняться путем измерения серии стандартных образцов, воспроизводящих свойства объекта измерений, однако, когда ими являются упаковки РАО, создание таких стандартных образцов невозможно из-за их большого объема, разнообразия типов контейнеров и морфологии отходов. Это приводит к необходимости применения расчетных калибровок, которые создаются с использованием специализированного программного обеспечения (СПО), например, ISOCS [8], EffMaker [9] или МСС-МТ [10].

Оператор, выполняющий гамма-спектрометрические измерения упаковок РАО, должен предварительно заполнить шаблон в СПО, в котором задаются численные значения набора параметров $\vec{x}$, описывающих взаиморасположение детектора гамма-излучения и упаковки РАО, а также ее характеристики. На основании данных показателей, введенных оператором в СПО, методом Монте-Карло рассчитываются величины эффективности регистрации гамма-квантов $\varepsilon\left(E_\gamma, \vec{x}\right)$.

При заполнении шаблона СПО оператор может неверно указывать численные значения параметров, что приводит к отклонению их заданных величин от реальных условий измерений. Причиной неверного задания параметров может стать как невнимательность самого оператора, так и его неполные знания о содержимом упаковки РАО. Подобные отклонения могут также возникать при выборе уже готовых расчетных калибровок, не соответствующих типу упаковок РАО и/или условиям их измерений.

Отклонения в величинах каждого из параметров $x_i \in \varepsilon\left(E_\gamma, \vec{x}\right) = \{x_1, x_2, \ldots x_n\}$ в различной степени влияют на рассчитанное СПО значение эффективности регистрации и, соответственно, на результаты измерения активности радионуклидов, полученные по формуле (1). В настоящей работе рассмотрено влияние неверного задания параметров шаблона СПО, таких как толщина стенок контейнера (D), высота слоя РАО в контейнере (H) и расстояние от детектора гамма-излучения до его стенки (L), на точность гамма-спектрометрических измерений активности радионуклидов в упаковках РАО.

На схеме расположения детектора гамма-излучения и упаковки РАО (рис. 1) ось детектора направлена перпендикулярно стенке контейнера и находится на середине его высоты. Такое расположение детектора гамма-излучения и упаковки РАО характеризуется значениями параметров, заданными в шаблоне СПО ($\vec{x}_0 = \{D_0, H_0, L_0\}$), и отклонениями заданных параметров в шаблоне СПО от их реальных значения ($\Delta\vec{x}_0 = \{\Delta D, \Delta H, \Delta L\}$, где $\Delta(x_i) = (x_i - x_{0i})$.

В соответствии с законом суммирования погрешностей для независимых друг от друга параметров $x_i = D$, H, L и определенной энергии

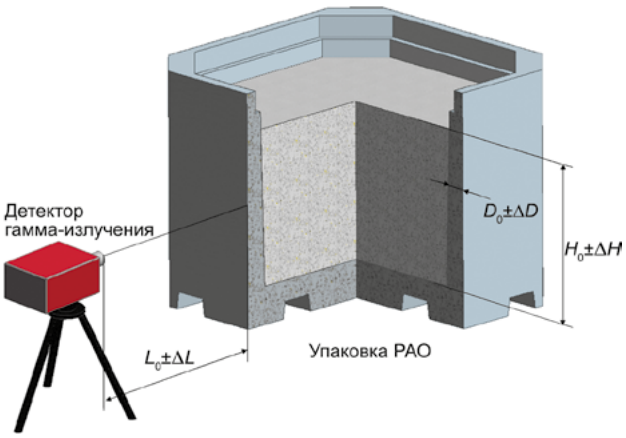

Рис. 1. Расположение детектора гамма-излучения и упаковки РАО при выполнении измерений активности радионуклидов

гамма-квантов E_γ, изменение величины активности радионуклида $A(S, \vec{x})$, вызванное изменениями величин параметров $\Delta\vec{x}$ и скорости счета импульсов в пике полного поглощения ΔS, составляет:

$$\Delta^2\left(A(S,\vec{x})\right) = \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta^2\left(x_i\right)\cdot\left(\frac{\partial A(S,\vec{x})}{\partial x_i}\bigg|_{S,\vec{x}}\right)^2\right] + \Delta^2\left(S\right)\cdot\left(\frac{\partial A(S,\vec{x})}{\partial S}\bigg|_{S,\vec{x}}\right)^2, \quad (2)$$

где $A(S, \vec{x})$ — измеренное значение активности радионуклида в упаковке, которое является функцией параметров $\vec{x} = \{x_1, x_2, \ldots x_n\}$, где $x_i = D, H, L$ и скорости счета импульсов S в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией E_γ, измеренной гамма-спектрометром;

$\Delta(x_i)$ — отклонение значения i-го параметра, заданного в шаблоне СПО, от реальных условий измерений упаковки РАО, $\Delta x_i = \Delta D, \Delta H, \Delta L$;

$\Delta(S)$ — погрешность измерения скорости счета импульсов в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией E_γ, $с^{-1}$.

При измеренной гамма-спектрометром скорости счета импульсов S истинное значение активности радионуклида в упаковке РАО $A(S, \vec{x})$ соотносится со значением активности радионуклида, рассчитанным при заданных параметров шаблона СПО $A_0(S, \vec{x}_0)$, как

$$A\left(S,\vec{x}\right) = A_0\left(S,\overrightarrow{x_0}\right)\cdot\frac{\varepsilon(\overrightarrow{x_0})}{\varepsilon(\vec{x})}, \quad (3)$$

где $A_0(S, \vec{x}_0)$ — активность радионуклида, соответствующая скорости счета импульсов S в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией E_γ для заданных параметров в шаблоне СПО $\vec{x}_0 = \{x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0n}\}$, где $x_{0i} = D_0, H_0, L_0$:

$\varepsilon(\overrightarrow{x_0})/\varepsilon(\vec{x})$ — отношение эффективностей регистрации гамма-квантов с энергией E_γ в условиях, заданных в шаблоне СПО, и в реальных условиях.

Подставляя частные производные $\left.\frac{\partial A(S,\vec{x})}{\partial x_i}\right|_{S,\vec{x}}$ и $\left.\frac{\partial A(S,\vec{x})}{\partial S}\right|_{S,\vec{x}}$ в формулу (2), получаем выражение для квадрата относительной погрешности определения активности радионуклида, испускающего гамма-кванты с энергией E_γ:

$$\delta^2\left(A(S,\vec{x})\right) = \left(\frac{\Delta\left(A(S,\vec{x})\right)}{A(S,\vec{x})}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta^2\left(x_i\right)\cdot\left(\frac{\partial\varepsilon/\partial x_i}{\varepsilon(\vec{x})}\bigg|_{\vec{x}}\right)^2\right] + \frac{\Delta^2\left(S\right)}{S^2} = \sum_{i=1}^{n}\Delta^2\left(x_i\right)\cdot c_i^{\,2} + \frac{\Delta^2\left(S\right)}{S^2}, \quad (4)$$

где $c_i = \left|\frac{\partial\varepsilon/\partial x_i}{\varepsilon(\vec{x})}\right|$ — коэффициенты чувствительности, выражающие степень влияния изменения параметра x_i на результат определения величины активности радионуклида в упаковке РАО.

Таким образом, оценка влияния неверного задания значений для каждого из параметров D, H, L в шаблоне СПО может быть выполнена путем вычисления коэффициентов чувствительности (c_i) в формуле (4) как относительных частных производных $\frac{\partial\varepsilon/\partial D}{\varepsilon(\vec{x})}$, $\frac{\partial\varepsilon/\partial H}{\varepsilon(\vec{x})}$, $\frac{\partial\varepsilon/\partial L}{\varepsilon(\vec{x})}$ при произвольных значениях D, H, L.

Для определения коэффициентов чувствительности было выполнено расчетное моделирование взаимодействия гамма-излучения упаковок РАО с детектором с помощью программного обеспечения МСС-МТ [10], информация о сравнении которого с широко применяемым СПО EffMAKER представлена в [11]. В расчетах определялись значения эффективности регистрации гамма-квантов при варьировании отклонения параметров $\Delta(x_i)$.

Расчетное моделирование выполняли для упаковок РАО в виде бочки объемом 200 $дм^3$ и железобетонного контейнера на основании следующих исходных данных:

1. Для упаковки РАО в виде бочки объемом 200 дм^3 принимались размеры: высота — 84 см, внешний диаметр — 60 см, толщина стенки варьировалась от 1,1 до 1,9 мм с шагом 0,2 мм. Материал стенки бочки — сталь.

2. Для упаковки РАО в виде железобетонного контейнера задавались внешние размеры 165 × 165 × 134 см, толщина стенки варьировалась от 10 до 20 см с шагом 1 см. В качестве материала контейнера задавался бетон плотностью 2,5 г/см^3 с элементным составом, соответствующим обычному бетону в таблице 6.11 справочника [12].

3. РАО задавались в качестве материала с равномерно распределенной по объему плотностью и элементным составом (весовые доли): H — 0,025; O — 0,358; Ca — 0,476; Si — 0,085; Al — 0,026; Fe — 0,017; Mg — 0,010; S — 0,003. При верхнем значении высоты слоя РАО в контейнере их плотность принималась 1,2 г/см^3.

4. Высота слоя РАО в упаковке варьировалась от 50 до 100 см с шагом 10 см (для железобетонного контейнера) и от 40 до 80 см с шагом 5 см (для бочки). В расчетах принималось, что масса РАО в контейнере постоянна, соответственно, при уменьшении высоты слоя плотность материала РАО пропорционально увеличивалась.

5. Расстояние от упаковки РАО до детектора гамма-излучения варьировалась от 80 до 120 см с шагом 10 см (для железобетонного контейнера) и от 40 до 60 см с шагом 3 см (для бочки).

6. Источник гамма-излучения задавался равномерно распределенным по объему материала РАО.

7. Энергии гамма-излучения E_γ: 59,5; 185,7; 661,7; 1332,5 кэВ (соответствуют энергиям гамма-излучения, испускаемого радионуклидами ^{241}Am, ^{235}U, ^{137}Cs, ^{60}Co).

Для параметров ($\vec{x}_0$), задаваемых оператором в шаблоне СПО, при обработке результатов расчетного моделирования принимались значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров в шаблоне СПО

Система измерений упаковки РАО	D_0, см	H_0, см	L_0, см
Бочка объемом 200 дм^3	0,15	80	50
Контейнер типа НЗК	10	100	100

Результаты определения эффективности регистрации гамма-квантов заданных энергий представлены на рис. 2—4 в виде зависимости относительных приращений эффективности $\frac{\varepsilon(x_i)}{\varepsilon(x_{0i})} = \frac{\varepsilon(x_{0i}+\Delta x_i)}{\varepsilon(x_{0i})}$ от величины отклонения каждого из параметров $\Delta(x_i)$. Относительное приращение эффективности регистрации гамма-квантов показывает, как изменилось значение эффективности регистрации гамма-квантов заданной энергии при отклонении реального значения i-го параметра от шаблона СПО на величину $\Delta(x_i)$ по отношению к величине эффективности регистрации, соответствующей параметрам шаблона СПО (x_{0i}).

Для определения коэффициентов чувствительности (c_i) в формуле (4) для каждого из параметров полученные зависимости относительных приращений эффективности регистрации гамма-квантов аппроксимировали и определяли соответствующие частные производные $\frac{\partial\varepsilon/\partial x_i}{\varepsilon(\vec{x})}$.

Зависимости относительного приращения эффективности регистрации гамма-квантов $\frac{\varepsilon(D_0+\Delta D)}{\varepsilon(D_0)}$ от изменения толщины стенки контейнера на величину ΔD, представленные на рис. 2, для каждой энергии гамма-излучения E_γ аппроксимируются функцией:

$$\frac{\varepsilon(D+\Delta D)}{\varepsilon(D)} = \exp\left(-\alpha\cdot\Delta D\right), \qquad (5)$$

где α — фактор ослабления гамма-излучения стенкой контейнера, см$^{-1}$.

Относительная частная производная функции (5) по параметру D составляет $\frac{\partial\varepsilon/\partial D}{\varepsilon(\vec{x})} = -\alpha$, соответственно, коэффициенты чувствительности величины активности радионуклидов в упаковке РАО к изменению толщины стенки контейнера в формуле (4) составляют $c_1 = \alpha$. Их значения при заданных энергиях гамма-излучения для обоих типов упаковок РАО представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Фактор ослабления гамма-излучения α обратно зависит от его энергии E_γ, и влияние толщины стенки контейнера наиболее сильно проявляется при низких значениях E_γ, постепенно уменьшаясь в несколько раз с увеличением энергии гамма-излучения от 59,5 до 1332,5 кэВ. При переходе от тонкой металлической стенки бочки к толстой оболочке железобетонного контейнера заметно возрастает влияние ее толщины для всех E_γ.

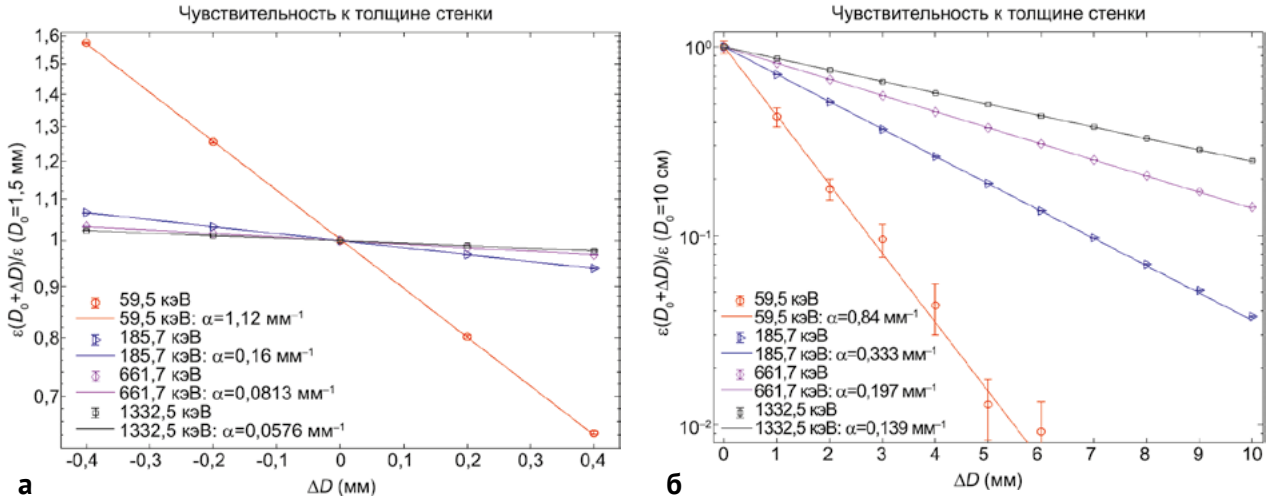

Рис. 2. Зависимость относительного приращения эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий от изменения толщины стенки контейнера: а) для упаковки РАО в виде бочки объемом 200 дм^3, D_0 = 1,5 мм; б) для упаковки РАО в виде железобетонного контейнера, D_0 = 10 см

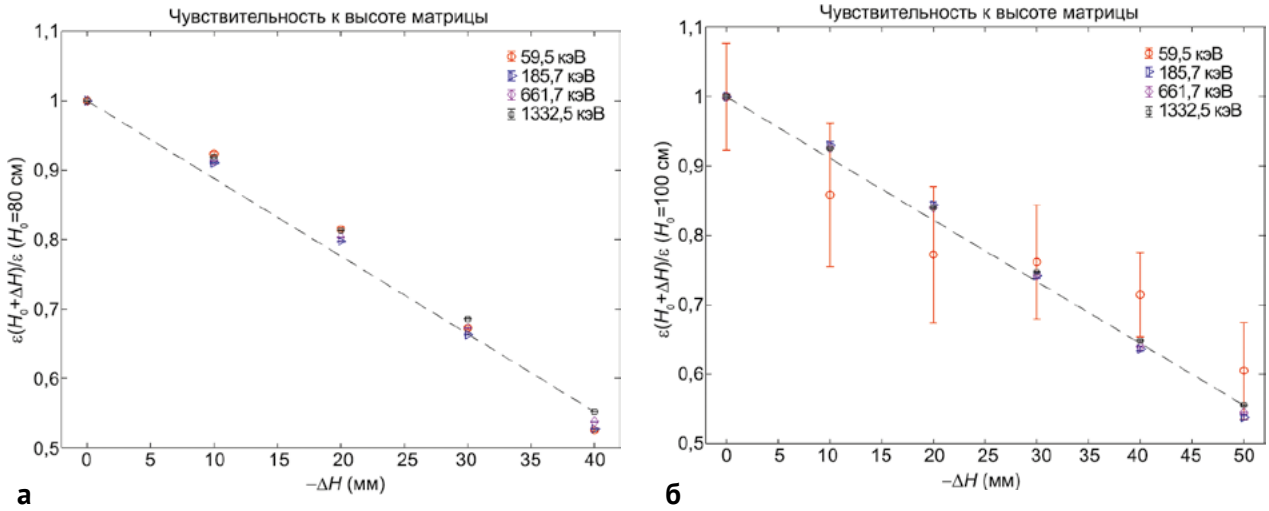

Рис. 3. Зависимость относительного приращения эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий от изменения высоты слоя РАО внутри контейнера: а) для упаковки РАО в виде бочки объемом 200 дм^3, H_0=80 см; б) для упаковки РАО в виде железобетонного контейнера, H_0=100 см

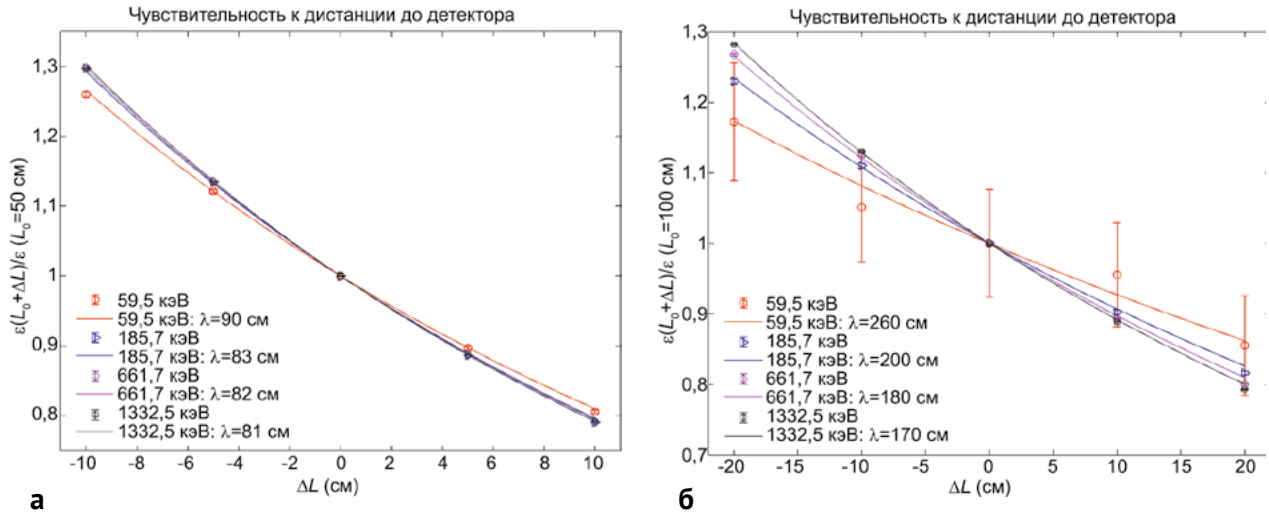

Рис. 4. Зависимость относительного приращения эффективности регистрации гамма-квантов различных энергий от изменения расстояния между детектором гамма-излучения и упаковкой РАО а) для упаковки РАО в виде бочки объемом 200 дм^3, L_0=50 см; б) для упаковки РАО в виде железобетонного контейнера, L_0=100 см

Зависимости относительного приращения $\frac{\varepsilon(H_0+\Delta H)}{\varepsilon(H_0)}$ эффективности регистрации гамма-квантов от уменьшения высоты слоя РАО в контейнере на величину ΔH, представленные на рис. 3, для всех энергий гамма-излучения аппроксимируются функцией:

$$\frac{\varepsilon(H+\Delta H)}{\varepsilon(H)} = 1-\beta\cdot\Delta H, \qquad (6)$$

где β — коэффициент, единый для всех энергий гамма-излучения E_γ, $\beta = 0{,}009$ см$^{-1}$.

Относительная частная производная функции (6) по параметру H составляет $\frac{\partial\varepsilon/\partial H}{\varepsilon(\vec{x})} = -\beta$, соответственно, коэффициенты чувствительности величины измерения активности радионуклидов в упаковке РАО к изменению высоты их слоя в формуле (4) составляют $c_2 = \beta = 0{,}009$ см$^{-1}$.

Зависимости относительного приращения эффективности регистрации гамма-квантов $\frac{\varepsilon(L_0+\Delta L)}{\varepsilon(L_0)}$ от варьирования расстояния между детектором гамма-излучения и упаковкой РАО на величину ΔL, представленные на рис. 4, для каждой энергии гамма-излучения E_γ аппроксимируются функцией:

$$\frac{\varepsilon(L+\Delta L)}{\varepsilon(L)} = \frac{\lambda^2}{(\lambda+\Delta L)^2}, \qquad (7)$$

где коэффициент λ выполняет роль эффективной дистанции от детектора до источника гамма-излучения. Его значения для различных энергий E_γ представлены на рис. 4.

Разложение функции (7) в ряд Маклорена позволяет упростить функциональную зависимость:

$$\frac{\varepsilon(L+\Delta L)}{\varepsilon(L)} = \frac{\lambda^2}{(\lambda+\Delta L)^2} \approx 1-\frac{2\Delta L}{\lambda}. \qquad (8)$$

Соответственно, относительная частная производная функции (8) по параметру L составляет $\frac{\partial\varepsilon/\partial L}{\varepsilon(\vec{x})} = -\frac{2}{\lambda}$, а коэффициенты чувствительности величины активности радионуклидов в упаковке РАО к изменению расстояния между детектором и упаковкой РАО в формуле (4) составляют $c_3 = 2/\lambda$. Значения коэффициентов чувствительности при заданных E_γ для обоих типов упаковок РАО представлены в табл. 2.

При изменении расстояния между детектором гамма-излучения и упаковкой РАО для обоих типов упаковок РАО наблюдается увеличение значений коэффициентов чувствительности с увеличением энергии гамма-излучения, что объясняется эффектом самоколлимирования потока гамма-квантов стенками контейнера. Эффект самоколлимирования заключается в увеличении вклада составляющей потока гамма-квантов, перпендикулярной стенке контейнера, и связан с увеличением поглощения других составляющих потока гамма-квантов материалом стенки контейнера, что сильнее проявляется в случае толстой железобетонной стенки и гамма-квантов низких энергий.

В табл. 2 представлены значения коэффициентов чувствительности активности радионуклидов с различными энергиями испускаемых гамма-квантов к изменению параметров D, H, L для упаковок РАО обоих типов.

Таблица 2. Значения коэффициентов чувствительности измеренной активности к изменению параметров системы измерений x_i для упаковок РАО при различных энергиях гамма-излучения

Радионуклид	E_γ, кэВ	Коэффициент чувствительности, c_i, см$^{-1}$					
		Бочка объемом 200 дм^3			Железобетонный контейнер		
		$x_1 = D$	$x_2 = H$	$x_3 = L$	$x_1 = D$	$x_2 = H$	$x_3 = L$
^{241}Am	59,5	11	0,009	0,022	0,84	0,009	0,008
^{235}U	185,7	1,6	0,009	0,024	0,33	0,009	0,010
^{137}Cs	661,7	0,81	0,009	0,024	0,20	0,009	0,011
^{60}Co	1332,5	0,58	0,009	0,025	0,14	0,009	0,012

Коэффициенты чувствительности c_i в табл. 2 показывают, какой вклад будет внесен в относительную погрешность измерения активности радионуклида при изменении каждого из параметров шаблона СПО на 1 см.

С использованием полученных значений коэффициентов чувствительности по формуле (4) рассчитаны вклады в относительную погрешность измерения активности радионуклидов в упаковке РАО при отклонении каждого из параметров D, H, L от значений, заданных в шаблоне СПО, на 10% — результаты расчетов представлены в табл. 3.

Данные табл. 2 и 3, а также анализ зависимостей, представленных на рис. 2—4, показывают, что:

1) дополнительная погрешность измерений активности радионуклидов зависит от точности задания толщины стенки контейнера в шаблоне

Таблица 3. Вклады в относительную погрешность измерений активности радионуклида в упаковке РАО при отклонении параметров в шаблоне СПО на 10%

Радионуклид	E_γ, кэВ	Вклад в относительную погрешность, %					
		Бочка объемом 200 дм^3			Железобетонный контейнер		
		ΔD = 0,15 мм	ΔH = 8 см	ΔL = 5 см	ΔD = 1 см	ΔH = 10 см	ΔL = 10 см
^{241}Am	59,5	16,5	7,2	11	84	9	8
^{235}U	185,7	2,4	7,2	12	33	9	10
^{137}Cs	661,7	1,2	7,2	12	20	9	11
^{60}Co	1332,5	0,8	7,2	13	14	9	12

СПО. Для радионуклидов, испускающих гамма-излучение с низкими энергиями например, для ^{241}Am (E_γ = 59,5 кэВ), погрешность измерения активности составляет 16,5% и 85% при изменении толщины стенок бочки и железобетонного контейнера на 10% соответственно;

2) неточности и ошибки в задании толщины стенки железобетонного контейнера оказывают влияние на результат измерений активности всех гамма-излучающих радионуклидов. Следовательно, необходимо особое внимание уделять тому, какой тип железобетонных контейнеров используется для упаковки РАО, поскольку при схожих внешних габаритных размерах они существенно отличаются по толщине стенки: 10,5 см — для НЗК-РАДОН, 12,0 см — для НЗК-МР, 15,0 см — для НЗК-150-1,5П и др. Например, если при измерении активности ^{137}Cs в контейнере типа НЗК-150-1,5П по ошибке в шаблоне были заданы параметры для НЗК-РАДОН, то результат будет завышен почти в 2,5 раза. Соответственно, при определении активности ^{241}Am это отклонение составит уже 100 раз.

3) в методиках измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в железобетонных контейнерах необходимо учитывать дополнительную погрешность, вносимую неточным знанием плотности бетона стенки контейнера (ее повышение эквивалентно увеличению толщины). Например, согласно техническим характеристикам контейнеров типа НЗК [13] допускается отклонение плотности бетона в ±4%, что приводит к дополнительной относительной погрешности измерений активности ^{137}Cs, равной 8%, а ^{241}Am — 35%.

4) отсутствие данных о высоте слоя РАО внутри упаковки оказывает одинаковое влияние на ошибку измерений для всех гамма-излучающих радионуклидов в упаковках любого типа. При заполнении объема контейнера материалом РАО более чем на 90% дополнительная погрешность измерений активности гамма-излучающих радионуклидов не превышает 10%.

5) дополнительная погрешность измерений активности при неверном задании расстояния между упаковкой РАО и детектором гамма-излучения в шаблоне СПО растет при увеличении энергии гамма-излучения и составляет 10—13% при отклонении значения параметра на 10%, что объясняется эффектом самоколлимирования потока гамма-квантов низких энергий стенками контейнера.

Заключение

СПО, применяемое в настоящее время при гамма-спектрометрических измерениях упаковок РАО, позволяет получить расчетные калибровки по эффективности регистрации гамма-квантов для любых их типов без использования стандартных образцов. Однако представленные в работе оценки показывают высокую чувствительность результатов гамма-спектрометрических измерений активности радионуклидов в упаковке РАО к корректности задания параметров конфигурации измерений в шаблоне СПО при выполнении калибровки: неверное задание параметров шаблона СПО оператором приводят к ошибкам в измеренных значениях активности радионуклидов в упаковках РАО, которые для радионуклидов с низкими энергиями гамма-излучения (например, для ^{241}Am и ^{235}U) могут составлять более 100 раз.

Достоверность измерений активности радионуклидов при отнесении твердых отходов к категории РАО и паспортизации упаковок РАО обеспечивается развитием культуры измерений на предприятиях отрасли, которая заключается в том, что операторы, выполняющие гамма-спектрометрические измерения упаковок твердых отходов, должны корректно задавать параметры в шаблонах СПО, а также контролировать соответствие реальных условий измерений используемым готовым калибровкам.

Из-за отсутствия стандартных образцов, воспроизводящих упаковки РАО, подтверждение правильности измерений активности

радионуклидов и соблюдение точности их проведения должно выполняться путем межлабораторных сличительных испытаний (МСИ).

МСИ по измерениям радиационных характеристик упаковок РАО ранее никогда не проводились. Участие в них впервые позволит предприятиям отрасли экспериментально оценить, насколько точно они выполняются, выявить наличие ошибок в задании параметров шаблонов СПО и при необходимости провести корректирующие действия. В качестве образцов, имитирующих упаковки РАО, при проведении МСИ могут быть использованы объекты, описанные в [6].

После завершения МСИ измеренные образцы, имитирующие упаковки РАО, будут аттестованы в качестве стандартных образцов или аттестованных объектов по ГОСТ Р 8.1003-2021 [14] и далее использоваться для экспериментальной оценки точности измерений при аттестации методик гамма-спектрометрических измерений и оперативного контроля качества измерений, который является обязательным при обеспечении единства измерений в области использования атомной энергии.

Развитие культуры измерений радиационных характеристик при паспортизации загрязненных радионуклидами твердых отходов за счет участия в МСИ и проведения корректирующих мероприятий по их результатам, а также внедрение комплексного подхода к определению характеристик упаковок РАО позволят предприятиям отрасли повысить точность результатов контроля радиационных характеристик твердых отходов и достоверность их отнесения к категории РАО или к нерадиоактивным промышленным отходам, а также обеспечить безопасное обращение с упаковками РАО при их захоронении.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069».
2. РБ-004-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по формированию перечня радионуклидов, контролируемых в кондиционируемых радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 июля 2021 г. № 251.
3. РБ-154-19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 апреля 2019 г. № 137.
4. РБ-155-20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по порядку, объему, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 июня 2020 г. № 253.
5. ГОСТ Р 59968-2021. Радиоактивные отходы атомных станций. Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение.
6. *Дорофеев А. Н., Зиннуров Б. С., Варлаков А. П., Германов А. В., Ивлиев М. В., Чаузова М. В., Калмыков С. Н., Петров В. Г.* Реализация единства измерений характеристик РАО при передаче на захоронение // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 8—20. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-8-20.
7. Единые отраслевые методические указания по измерению радиационных характеристик отходов. Утв. приказом Госкорпорации «Росатом» от 02.12.2020 № 1/1433-П.
8. ISOCS™/LabSOCS™ Calibration Methodology. — URL: https://www.mirion.com/isocs.
9. Программный комплекс EffMaker. — URL: https://lsrm.ru/products/.
10. МСС-МТ — 3D-моделирование взаимодействия излучения с веществом. — URL: https://ekosf.ru/product/mcc-mt-3d/.
11. *S. Pohuliai, M. Kanapelka, A. lupilov.* Comparison of MCC-MT and EffMAKER software packages for in SITU field measurements with Monte Carlo simulations, Applied Radiation and Isotopes. Vol. 199 (2023), 110901, https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110901.
12. *Машкович В. П., Кудрявцева А. В.* Защита от ионизирующих излучений: Справочник — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
13. Контейнер железобетонный защитный невозвратный для твердых и отвержденных радиоактивных отходов типа НЗК. Руководство по эксплуатации. АТ-9-00.00.00.000 РЭ. АО «345 механический завод».

14. ГОСТ Р 8.1003-2021. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестованные объекты в области использования атомной энергии. Порядок разработки и аттестации.

Информация об авторах

Батяева Мария Владимировна, кандидат физико-математических наук, начальник отдела, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: MVBatyaeva@bochvar.ru.

Варлаков Андрей Петрович, доктор технических наук, директор отделения, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Германов Александр Владимирович, кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

Плисов Вячеслав Владимирович, ведущий инженер-технолог, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им академика А. А. Бочвара» (123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: VVPlisov@bochvar.ru.

Библиографическое описание статьи

Батяева М. В., Варлаков А. П., Германов А. В., Плисов В. В. Влияние неверного задания параметров шаблона для расчетной калибровки на точность гамма-спектрометрических измерений активности радионуклидов при паспортизации упаковок радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2025. № 3 (32). С. 27—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-27-37.

INCORRECTLY SPECIFIED PARAMETERS OF THE CALCULATED CALIBRATION TEMPLATE AND THEIR IMPACT ON THE ACCURACY OF THE RADIONUCLIDE ACTIVITY MEASURED VIA GAMMA-SPECTROMETRY UNDER THE RADIOACTIVE WASTE PACKAGE CERTIFICATION PROCESS

Batyaeva M. V., Varlakov A. P., Germanov A. V., Plisov V. V.

JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials", Moscow, Russia

Article received on June 2, 2025

The article discusses the impact of incorrectly specified parameters describing the configuration of gamma-spectrometric measurements performed for RW packages when calculating the gamma-quanta registration efficiency

on the measured specific activity of radionuclides. The study shows that due to incorrectly specified parameters, the measured specific activity of radionuclides in a RW package may differ from the true value by more than 100 times. The paper proposes some interlaboratory comparison tests to ensure the accuracy and reliability of gamma-spectrometric measurements performed for RW packages using the calculated calibrations.

Keywords: *radioactive waste, RW package, radiation characteristics, specific activity, gamma spectrometry, calculated calibration, registration efficiency, RW certification, interlaboratory comparison tests.*

References

1. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 29.10.2022 № 1929 "O vnesenii izmeneniy v postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 oktyabrya 2012 g. № 1069"* [Government Decree of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929 On Amendments to the Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069].

2. RB-004-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po formirovaniyu perechnya radionuklidov, kontroliruyemykh v konditsioniruyemykh radioaktivnykh otkhodakh predpriyatiy yadernogo toplivnogo tsikla"* [Safety Guide for Atomic Energy Use. Recommendations Regarding the Developed Lists of Radionuclides Monitored in Conditioned Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Enterprises]. Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 251 of July 7, 2021.

3. RB-154-19. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po primeneniyu metoda radionuklidnykh sootnosheniy dlya opredeleniya soderzhaniya slozhnodetektiruyemykh radionuklidov v radioaktivnykh otkhodakh predpriyatiy yadernogo toplivnogo tsikla"* [Safety Guide for Atomic Energy Use. Recommendations Regarding the Application of the Radionuclide Ratio Method to Determine the Content of Difficult-to-Detect Radionuclides in Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Enterprises]. Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 137 of April 4, 2019.

4. RB-155-20. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomendatsii po poryadku, ob"yemu, metodam i sredstvam kontrolya radioaktivnykh otkhodov v tselyakh podtverzhdeniya ikh sootvetstviya kriteriyam priyemlemosti dlya zakhoroneniya"* [Safety Guide for Atomic Energy Use. Recommendations Regarding the Radioactive Waste Monitoring Procedure, Volume, Methods and Means Applied to Confirm Waste Compliance with Waste Acceptance Criteria for Disposal]. Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 253 of June 30, 2020.

5. GOST R 59968-2021. *Radioaktivnyye otkhody atomnykh stantsiy. Opredeleniye radiatsionnykh kharakteristik dlya peredachi na zakhoroneniye* [Radioactive Waste from Nuclear Power Plants. Determination of Radiation Characteristics for Waste Transfer for Disposal].

6. Dorofeev A. N., Zinnurov B. S., Varlakov A. P., Germanov A. V., Ivliev M. V., Chauzova M. V., Kalmykov S. N., Petrov V. G. Realizatsiya yedinstva izmereniy kharakteristik RAO pri peredache na zakhoroneniye [Assuring the uniformity in the measurements of RW characteristics during waste transfer for disposal]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 2 (23), pp. 8—20. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-8-20.

7. *Yedinyye otraslevyye metodicheskiye ukazaniya po izmereniyu radiatsionnykh kharakteristik otkhodov* [Uniform industry guidelines for the measurement of radiation waste characteristics]. Approved by the Order of the State Corporation Rosatom No. 1/1433-P of December 2, 2020.

8. ISOCS™/LabSOCS™ Calibration Methodology. — URL: https://www.mirion.com/isocs.

9. EffMaker software package. — URL: https://lsrm.ru/products/.

10. MCC-MT – *3D-modelirovaniye vzaimodeystviya izlucheniya s veshchestvom* [3D modeling of interaction between radiation and matter]. — URL: https://ekosf.ru/product/mcc-mt-3d.

11. S. Pohuliai, M. Kanapelka, A. lupilov, Comparison of MCC-MT and EffMAKER software packages for in SITU field measurements with Monte Carlo simulations, *Applied Radiation and Isotopes.* Vol. 199 (2023), 110901, https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110901.

12. Mashkovich V. P., Kudryavtseva A. V. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy* [Protection against ionizing radiation]. Handbook. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995.

13. *Konteyner zhelezobetonnyy zashchitnyy nevozvratnyy dlya tverdykh i otverzhdennykh radioaktivnykh otkhodov tipa NZK* [Non-returnable reinforced concrete protective container for solid and solidified radioactive waste of the NZK type]. Operation manual. AT-9-00.00.00.000 RE. JSC 345 Mechanical Plant [AO "345 mekhanicheskiy zavod"].

14. GOST R 8.1003-2021. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Attestovannyye ob"yekty v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Poryadok razrabotki i attestatsii* [State system for the uniformity of measurements. Certified facilities in the field of atomic energy use. Development and certification procedure].

Information about the authors

Batyaeva Maria Vladimirovna, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Department, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: MVBatyaeva@bochvar.ru.

Varlakov Andrej Petrovich, Doctor of Sciences, Director of Department, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Germanov Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: AVGermanov@bochvar.ru.

Plisov Vyacheslav Vladimirovich, Leading Process Engineer, JSC "A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials" (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: VVPlisov@bochvar.ru.

Bibliographic description

Batyaeva M. V., Varlakov A. P., Germanov A. V., Plisov V. V. Incorrectly Specified Parameters of the Calculated Calibration Template and their Impact on the Accuracy of the Radionuclide Activity Measured via Gamma-Spectrometry under the Radioactive Waste Package Certification Process. *Radioactive Waste*, 2025, no. 3 (32), pp. 27—37. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-27-37. (In Russian).