

DOI: <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-7-468-473>

УДК 621.039.76

© Коллектив авторов, 2020

Коренков И.П.¹, Ермаков А.И.², Майзик А.Б.³, Лашеннова Т.Н.^{1,4}, Клочков В.Н.¹, Бушманов А.Ю.¹**Оценка объемной активности радиоактивных отходов по поверхностной и удельной α -загрязненности методом переносной γ -спектрометрии**¹ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», ул. Живописная, 46, Москва, Россия, 123182;²Федеральный центр ядерной и радиационной безопасности, Каширское ш., 33/18 Москва, Россия, 115409; ³Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», ул. Рогова, 5а, Москва, Россия, 123098;⁴ФГАОУ «Российский институт дружбы народов», ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198**Цель исследования** — оценка объемной активности радиоактивных отходов (РАО) по поверхностной и удельной альфа-загрязненности методом переносной γ -спектрометрии.**Материалы и методы.** Рассмотрены методы оперативной оценки содержания α -излучающих радионуклидов в твердых отходах различной морфологии с помощью γ -спектрометров на основе германиевых детекторов. Представлены расчетные методы определения эффективности регистрации радионуклидов.**Результаты.** Показана возможность использования переносной γ -спектрометрии для оценки поверхностной и удельной активности различных материалов, загрязненных α -излучателями (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Am). Приведены расчетные значения эффективности регистрации низкоэнергетических γ -излучателей, полученные с помощью моделирования пространственно-энергетических параметров детектора.

Для упрощения решения этой задачи в программе расчета были использованы 20 типовых шаблонов различной геометрии (прямоугольные, цилиндрические, конические, сферические и т. д.). Исследованы основные источники погрешности при обследовании загрязненных поверхностей, крупногабаритного оборудования и строительных конструкций.

Выводы. Исследованы возможности переносной γ -спектрометрии для оценки объемов РАО по поверхностной плотности загрязнения материалов радионуклидами урана и трансурановых элементов. При использовании γ -спектрометра с детектором из особо чистого германия с расширенным в низкоэнергетической области диапазоном регистрации γ -квантов, такие радионуклиды, как ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am определяли по собственному излучению или по излучению дочерних продуктов. «Проблемным» элементом является плутоний, для экспресс-оценки которого предложено, в соответствии с методологией радионуклидного вектора, использовать ^{241}Am , накапливающийся при β -распаде ^{241}Pu .По расчетам, наиболее вероятное значение отношения активностей $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ для объекта, на котором проводились работы, (масштабирующий коэффициент) варьирует в интервале от 5,0 до 9,0.На основании результатов выполненных расчетов и экспериментальных исследований получены параметры эффективности регистрации различных α -излучающих радионуклидов переносными γ -спектрометрами. Установлено, что для германиевых детекторов с абсолютной эффективностью регистрации точечного источника $7 \div 15\%$ она составляет $n \cdot 10^{-5} \div n \cdot 10^{-4}\%$.**Ключевые слова:** α -излучающий радионуклид; радиационное обследование; γ -спектрометрия; объем радиоактивных отходов; поверхностное и удельное альфа-активное загрязнение**Для цитирования:** Коренков И.П., Ермаков А.И., Майзик А.Б., Лашеннова Т.Н., Клочков В.Н., Бушманов А.Ю. Оценка объемной активности радиоактивных отходов по поверхностной и удельной α -загрязненности методом переносной γ -спектрометрии. *труда и пром. экол.* 2020; 60(7). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-7-468-473>**Для корреспонденции:** Игорь Петрович Коренков, гл. науч. сотр. ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, д-р биол. наук, проф. E-mail: korenkovip@yandex.ru**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 17.06.2020 / Дата принятия к печати: 02.06.2020 / Дата публикации: 22.07.2020

Igor P. Korenkov¹, Alexandr I. Ermakov², Aleksey B. Mayzik³, Tatyana N. Laschenova^{1,4}, Vladimir N. Klochkov¹, Andrey Yu. Bushmanov¹**Assessment of the volume activity of α -radioactive wastes on surface and specific contamination by portable γ -spectrometry method**¹A.I. Bunasyan Federal Medical Biophysical Center, 46, Zhivopisnaya str., Moscow, Russia;²Federal Center for Nuclear and Radiation Safety, 33/18, Kashirskoye highway, Moscow, Russia;³SC «A.A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», 5a, Rogova str., Moscow, Russia;⁴Peoples' Friendship Institute of Russia, 6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198**The aim of the study** is to evaluate the volume activity of radioactive waste (RW) by surface and specific alpha contamination using portable gamma-spectrometry.**Materials and methods.** Methods of rapid assessment of the content of α -emitting radionuclides in solid waste of various morphologies using gamma-spectrometers based on germanium detectors are considered. Computational methods for determining the effectiveness of radionuclide registration are presented.

Results. The possibility of using portable gamma-ray spectrometry to assess the surface and specific activity of various materials contaminated with α -emitters (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu and ^{241}Am) is shown. The calculated values of the registration efficiency of low-energy gamma-emitters obtained by modeling the spatial-energy parameters of the detector are given.

To simplify the solution of this problem, the calculation program used 20 standard templates of various geometries (rectangular, cylindrical, conical, spherical, etc.). The main sources of error in the survey of contaminated surfaces, large-sized equipment and building structures were investigated.

Conclusions. The possibilities of portable γ -spectrometry for estimating the volume of RW based on the surface density of contamination of materials with radionuclides of uranium and transuranic elements are investigated. When using γ -spectrometer with a high-purity germanium detector with a range of γ -quanta extended in the low-energy region, radionuclides such as ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am were determined by their own radiation or by the radiation of their daughter products.

The “problem” element is plutonium, for rapid evaluation of which it is proposed, in accordance with the radionuclide vector methodology, to use ^{241}Am , which accumulates during the β -decay of ^{241}Pu .

According to calculations, the most likely value of the activity ratio $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ for the object where the work was performed (scaling factor) varies in the range from 5.0 to 9.0.

Based on the results of calculations and experimental studies, the parameters of the efficiency of registration of various α -emitting radionuclides by portable γ -spectrometers. It has been found that for germanium detectors with an absolute efficiency of registering a point source of $7\div 15\%$, it is $n \times 10^{-5} \div n \times 10^{-4}\%$.

Keyword: α -emitting radionuclide, radiation survey, γ -spectrometry, radioactive waste, surface and specific contamination.

For citation: Korenkov I.P., Ermakov A.I., Maizik A.B., Lashchenova T.N., Klochkov V.N., Bushmanov A.Yu. Assessment of the volume activity of α -radioactive wastes on surface and specific contamination by portable γ -spectrometry method. *Med. truda i prom. ekol.* 2020; 60(7). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-7-468-473>

For correspondence: Igor P. Korenkov, chief researcher of A.I. Bunasyan Federal Medical Biophysical Center, Dr. of Sci. (Biol.), Professor. E-mail: korenkovip@yandex.ru

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

ORCIDs: Korenkov I.P. 0000-0002-5709-0858, Lashchenova T.N. 0000-0002-6682-1261

Received: 17.06.2020 / Accepted: 02.06.2020 / Published: 22.07.2020

Введение. В России расположено большое количество радиационно опасных объектов, на которых в ближайшее время необходимо осуществить комплекс работ по выводу из эксплуатации [1–6].

Проблемы вывода из эксплуатации радиационно опасных объектов решаются в соответствии с Федеральной целевой программой «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» [7]. Одним из сложных вопросов является осуществление экспрессного радиационного контроля радиоактивных отходов (РАО), в особенности содержащих альфа-излучающие радионуклиды, для оценки их объемов.

Цель исследования — оценка объемной активности радиоактивных отходов по поверхностной и удельной альфа-загрязненности методом переносной γ -спектрометрии.

Характеристика объекта. Исследование поверхностной и удельной активности РАО проводилось при выполнении комплекса работ по выводу из эксплуатации радиационно опасного объекта, в котором более 45 лет проводились работы с открытыми источниками ионизирующих излучений, в частности, с ^{232}Th , ^{235}U , $^{238}\text{Pu} \div ^{241}\text{Pu}$ и ^{241}Am [8]. В ходе выполнения этих работ было установлено, что уровень загрязнения отдельных участков рабочих поверхностей, оборудования, крупногабаритных изделий достигал 40 000 α -частиц/(см²·мин).

Для экспрессной оценки поверхностной и удельной активности различных α -излучающих радионуклидов в загрязненных материалах в качестве методического подхода было предложено использовать метод переносной γ -спектрометрии, чтобы в дальнейшем по уровню загрязнения провести оценку образующихся объемов радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации объектов.

Материалы и методы. Гамма-спектрометрия в переносном варианте является весьма эффективным инструментом для оценки загрязнения различными радионуклидами

строительных конструкций и крупногабаритного оборудования, включая его отдельные фрагменты. Например, при использовании тонкого (карбонового или бериллиевого) входного окна γ -детектора возможно проводить измерения низкоэнергетических γ -квантов с энергией выше 20 кэВ, что очень важно при оценке загрязнения материалов α -излучающими радионуклидами.

Для оценки чувствительности γ -спектрометра с точки зрения контроля α -излучающих радионуклидов можно использовать приведенную эффективность регистрации по их ключевым γ -линиям $\epsilon_{\text{пр } i}$ (табл. 1), допуская, что фон, обусловленный в основном Комптон-эффектом, в интервале энергий 60–200 кэВ можно считать постоянным:

$$\epsilon_{\text{пр } i} = \epsilon_{\text{отн } ij} \times y_{ij} \quad (1),$$

где $\epsilon_{\text{отн } ij}$ — относительная эффективность регистрации γ -квантов i -радионуклида для j энергии; y_{ij} — выход фотонов с j энергией на распад для γ -квантов i -радионуклида.

Значения приведенной эффективности регистрации α -излучающих радионуклидов (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Am) переносными γ -спектрометрами, полученные в результате расчетов и экспериментальных исследований, представлены в таблице 1.

При анализе расчетных результатов, приведенных в таблице 1, следует учесть, что эффективность регистрации γ -квантов для коллимированного детектора от плоского источника будет несколько выше, чем для точечного источника даже при подобии геометрического фактора (телесный угол, ограничивающий поток γ -квантов на детектор). Для первичной оценки такой подход достаточно корректен.

Из таблицы 1 следует, что γ -спектрометрический метод наиболее эффективен для определения ^{241}Am и ^{238}U . В то же время, изотопы плутония относятся к сложно детектируемым и не могут быть зарегистрированы с помощью гамма-спектрометра.

Эффективность регистрации основных α -излучателей, присутствующих в РАО
Efficiency of registration of the main α -emitters present in radioactive waste

Радио- нуклид	Энергия γ -излучения, кэВ, (излучающий нуклид)	Относительная эффек- тивность регистрации, %	Выход на рас- пад, %	Приведенная эффективность реги- страции $\epsilon_{пр}$, % [$\times 10^2$]
^{232}Th	238,6 (^{212}Pb)	3,6	43,6	1,57
^{235}U	185,7 (^{235}U)	4,2	57,0	2,39
^{238}U	63,3 (^{234}Th)	3,7	3,7	0,14
^{237}Np	86,5 (^{237}Np)	8,5	12,4	1,05
	98,4 (^{233}Pa)	8,2	16,9	1,39
^{238}Pu	99,9 (^{238}Pu)	8,2	$7,3 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-4}$
^{239}Pu	51,6 (^{239}Pu)	8,5	$2,7 \times 10^{-2}$	$22,9 \times 10^{-4}$
^{240}Pu	104,2 (^{240}Pu)	7,8	$7,1 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-4}$
^{241}Am	59,5 (^{241}Am)	8,5	35,9	3,05

Для оценки содержания радионуклидов в слое материала, который будет удаляться при дезактивации, для обнаружения «скрытых» загрязнений и последующего расчета удельной активности РАО необходимо точное представление о характере распределения активности радионуклида по глубине исследуемого материала.

В основе подхода к решению этой задачи лежит моделирование пространственно-энергетических параметров конкретного детектора методом Монте-Карло. Была выполнена проверка адекватности модели с помощью тестовых измерений, а также расчет кривых эффективности. Для упрощения в программу расчета калибровочных кривых было введено 20 шаблонов геометрий, наиболее часто применяющихся при практическом использовании переносной γ -спектрометрии:

- объекты прямоугольной формы (простой и комбинированный параллелепипед, полностью или частично заполненный активным материалом);
- объекты цилиндрической формы (простой и комбинированный цилиндр при измерениях с боковой и торцевой поверхностей);
- сферические объекты, в том числе и многослойные;
- профили в виде трубы, уголка, швеллера, двутавра, короба с поверхностным загрязнением;
- многослойные участки плоской поверхности;
- участки плоской поверхности с экспоненциальным распределением активности радионуклида.

Используемый математический аппарат позволяет провести достаточно корректную оценку загрязнений практически для любых объектов сложной геометрии, если с помощью коллиматора (возможны варианты с телесным углом 30° и 90°) осуществлять измерения отдельных фрагментов такого объекта.

Для реализации такого подхода необходимо знание реальной зависимости распределения радионуклидов по глубине (экспоненциальное распределение вблизи поверхности, равномерное распределение, наличие активного слоя, экранированного условно-чистым материалом с обеих сторон и т. д.).

Для определения активности сложно детектируемых радионуклидов использован метод радионуклидного вектора (метод радионуклидных соотношений), который заключается в регистрации в некотором объеме радиоактивных отходов активности нуклида, испускающего фотонное излучение (реперный радионуклид), и определении на этой основе активности радионуклидов, испускающих только слабопроникающее излучение (α , β -излучение). Этот метод

активно развивается в международной практике [9–10] и в России [11].

Для реализации метода радионуклидного вектора должен быть определен масштабирующий коэффициент, т. е. коэффициент прямой пропорциональной зависимости между удельной активностью сложно детектируемого радионуклида и удельной активностью реперного радионуклида в РАО. В данной работе с учетом особенностей РАО, образовавшихся при выводе из эксплуатации радиационно опасного объекта, в котором проводились работы с высокотоксичными α -излучающими нуклидами, самым надежным реперным радионуклидом определения плутония может служить ^{241}Am , который является дочерним продуктом распада изотопа ^{241}Pu . По расчетам, наиболее вероятное значение отношения активностей $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ в поверхностном загрязнении исследованных объектов (масштабирующий коэффициент) варьирует в интервале от 5,0 до 9,0.

Ключевыми стадиями обследования помещений с точки зрения выявления загрязнения сложнодетектируемыми α -излучающими радионуклидами являются следующие:

Детектирование радионуклидов, перечисленных в таблице 1, прежде всего ^{241}Am , передвижным γ -спектрометром в режиме сканирования (без свинцового коллиматора):

При наличии источника загрязнения определение его локализации. Первичная локализация загрязнений среднего и высокого уровня (100 – 10000) Бк достигается контролем скорости счета в области выделенной энергии γ -излучения при медленном передвижении коллимированного детектора или при его повороте.

Стационарные измерения загрязнения поверхности в местах их локализации по выбранным γ -линиям.

Послойный отбор проб по регулярной сетке в выявленных местах локализации загрязнений с целью определения: характера распределения контролируемых радионуклидов по глубине для уточненного расчета содержания радионуклидов по спектрам, полученным при стационарных измерениях; флуктуации загрязнения по выявленному методу γ -спектрометрии достаточно большому «пятну», определения его контуров; масштабирующего коэффициента методами разрушающего контроля (радиохимическая подготовка, полупроводниковая α -спектрометрия, жидкостная сцинтилляционная спектрометрия).

При анализе загрязнения крупногабаритных объектов сложной формы (вытяжные шкафы, перчаточные и защитные боксы, элементы технологического оборудования, трубопроводы, воздуховоды, строительные конструкции)

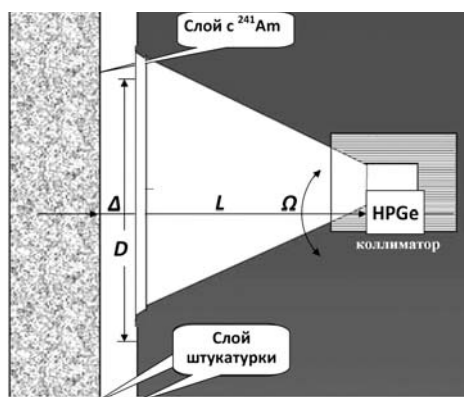


Рисунок. Модель для расчета ослабления потока (изменения реальной эффективности регистрации) γ -квантов за счет экранирования плоского источника.

Figure. A model for calculating the attenuation of the flow (changes in the real registration efficiency) of γ -quanta due to flat source shielding.

возможно проведение измерений их отдельных частей с последующим суммированием измеренных активностей.

Результаты. Для оценки поверхностной плотности загрязнения объектов при измерении с помощью γ -спектрометра с коллимированным ОЧГ-детектором (детектором из особо чистого германия) использованы основные методические подходы к измерению загрязнения радионуклидом ^{241}Am плоского объекта с помощью коллимированного спектрометра в случае экранирования загрязненного слоя слоем штукатурки различной толщины (рисунок).

Исходные условия: источник — слой малой толщины (т. е. самопоглощением можно пренебречь), сверху он заштукатурен (толщина — Δ), материал — гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); загрязнение равномерно распределено по поверхности.

Телесный угол коллиматора — $\Omega = 30^\circ, 90^\circ$.

Относительная эффективность регистрации детектора — 30%.

Диаметр круга, с которого собираются фотоны — D , начальное значение $D = 2$ м.

Расстояние до стены (пола) — L .

Задача сводится к расчету плотности потока нерассеянных γ -квантов от дискового источника за защитой, в точке, расположенной на оси диска. Основная расчетная формула имеет вид:

$$\varphi = (S_A/2) \times [E_1(b) - E_1(b \times \sec \theta)] \quad (2),$$

где: — плотность потока γ -квантов, с^{-1} ; S_A — поверхностный выход γ -квантов источника в телесный угол 4π , с^{-1} ;

$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy$ — интегральная показательная функция, ее значения в табулированном виде приводятся в математических справочниках, например, в [12];

$b = \mu d$ — толщина защиты, выраженная в числе длин свободного пробега;

$\mu = 0,596 \text{ см}^{-1}$ — линейный коэффициент ослабления γ -квантов с энергией 60 кэВ в бетоне;

d — толщина защиты, см;

θ — угол, равный половине угла коллиматора.

В предельном случае при $d = 0$ формула принимает вид

$$\varphi_0 = (S_A/2) \times \lg(\sec \theta) \quad (3).$$

В таблице 2 приведена зависимость интенсивности излучения ^{241}Am от толщины экранирующего слоя (штукатурки) и телесных углов коллиматора. Приведены расчет-

ные значения φ/φ_0 для изменения параметра d от 0 до 5 см с шагом 1 см и для углов коллиматора 90 и 30 градусов, а также значения $\varphi = \exp(b)$.

Таблица 2 / Table 2

Интенсивность излучения ^{241}Am ($E=60$ кэВ) в зависимости от толщины экранирующего слоя штукатурки (гипса)

The radiation intensity of ^{241}Am ($E=60\text{keV}$) depending on the thickness of the shielding layer of plaster (gypsum)

Толщина слоя штукатурки, см	Телесный угол коллиматора		$\exp(-b)$
	90°	30°	
0	1,00	1,00	1,00
1,0	0,49	0,55	0,551
2,0	0,24	0,30	0,304
3,0	0,12	0,16	0,167
4,0	0,061	0,087	0,092
5,0	0,030	0,048	0,051

Таким образом, при толщине слоя штукатурки 3 см (наиболее вероятное значение), определенное с помощью коллимированного детектора значение плотности загрязнения ^{241}Am (а, следовательно, и плутонием) будет уменьшено почти на порядок (точнее в 8,3 раза) по сравнению с фактическим. Если толщина штукатурки составит 5 см (данный вариант весьма актуален при поиске скрытых загрязнений), занижение активности ^{241}Am и плутония достигает 33 раз.

Приведенный пример демонстрирует важность установления реального характера распределения активности по глубине слоя исследуемого объекта, как с точки зрения уточнения технологии его дезактивации, так и, прежде всего, для оценки объемов и удельной активности образующихся при этом твердых радиоактивных отходов.

Таким образом, для экспрессной и достоверной предварительной оценки объемов РАО при загрязнении α -излучающими радионуклидами строительных конструкций, крупногабаритного оборудования, трубопроводов спецвентиляции и спецканализации, с помощью γ -спектрометра с коллимированным детектором и программного комплекса ISOCS, необходимо решить две основные задачи:

— установить характер распределения загрязнений по исследуемому объекту (в основном относится к строительным конструкциям);

— определить значение масштабирующего коэффициента, — отношения активностей ^{241}Am , определяемого γ -спектрометрией, и радионуклидов плутония, определяемых α -спектрометрией с радиохимической подготовкой или/и жидкостной сцинтилляционной спектрометрией.

Получение такой информации позволяет наиболее корректно проводить расчет активности радионуклидов при обработке γ -спектра и дополнять эти данные полученными расчетным путем значениями активностей трудно определяемых радионуклидов плутония. Таким образом, с учетом массогабаритных характеристик, образующихся при дезактивации конструкций или разделке оборудования и коммуникаций, можно расчетным путем провести категорирование РАО в упаковках, которые будут формироваться после выполнения указанных операций.

Характеризация упаковок РАО с помощью γ -спектрометра с коллимированным ОЧГ-детектором. Аналогичный подход (сканирование объекта с помощью коллимированного детектора) используется для характеристики конечных

упаковок РАО, отправляемых на хранение и переработку. Стандартными вторичными упаковочными средствами для основной части РАО (за исключением крупногабаритных фрагментов изделий) являются стальные барабаны (бочки) 200-литровые с крышками ($D_{\text{вн}}=590$ мм, $H=845$ мм, $\Delta=2$ мм).

Важным элементом характеристики упаковок РАО является оценка возможных погрешностей при паспорттизации упаковок РАО в случае неравномерного по сечению распределения загрязненных фрагментов, если использовать γ -излучение ^{241}Am , как реперного для плутония радионуклида.

При паспорттизации РАО, помещенных в штатный 200-литровый контейнер, излучение γ -квантов с энергией 60 кэВ регистрируется только из части РАО, примыкающей к внешней стенке контейнера. Из остальной внутренней части γ -кванты вследствие поглощения не достигают детектора. Зададимся кратностью ослабления γ -излучения в слое материала из фрагментов РАО и стенки контейнера равной 30. Рассмотрим величину поправки для трех типов РАО: фрагментов железа, бетона и штукатурки.

РАО — фрагменты железа. Исходные данные: вес фрагментов железа 159 кг, насыпная плотность $0,725$ г/см³. Кратность ослабления определяется по формуле:

$$K = e^{\mu(0,2+d)} \quad (4)$$

где K — кратность ослабления; μ — коэффициент линейного ослабления излучения в железе, $8,646$ см⁻¹; d — толщина слоя фрагментов железа, приведенная к плотности $7,8$ г/см³.

Подставив значения в формулу 4, получим значение $d = 0,155$ см, а с учетом насыпного веса толщина фрагментов железа составит: $\Delta_{\text{ж}} = 0,155 \cdot 7,8 / 0,72 = 2,1$ см.

Фактически детектор регистрирует γ -кванты, испускаемые из пристеночного слоя толщиной $2,1$ см, объем слоя фрагментов железа составит при этом $31,5$ л. Этот объем составляет 15% объема 200-литрового контейнера, т. е. существует вероятность, что в средней части упаковки удельная активность материала может быть на порядок выше или, наоборот, ниже, что внесет существенные отклонения от реальных значений.

Для корректного определения удельной активности РАО необходимо вводить поправочный коэффициент. Существует несколько способов его определения, что требует отдельного обсуждения.

РАО — фрагменты бетона. Исходные данные: вес бетона в контейнере 100 кг, насыпная плотность $0,48$ г/см³, μ — коэффициент линейного ослабления излучения в бетоне, $0,627$ см⁻¹.

Расчет по формуле 4 для бетона дает значение $d = 2,7$ см, а с учетом насыпного веса толщина фрагментов бетона составит: $\Delta_{\text{бет}} = 2,7 \cdot 2,35 / 0,48 = 13,2$ см. Объем слоя фрагментов бетона составит 159 л. Этот объем составляет 77% от объема контейнера, что означает достаточную представителность измерений содержания ^{241}Am в упаковке в виде 200-литровой бочки с фрагментами бетона (грунтом).

РАО — фрагменты штукатурки. Исходные данные: вес штукатурки в контейнере 50 кг, насыпная плотность $0,24$ г/см³, μ — коэффициент линейного ослабления излучения в штукатурке, $0,25$ см⁻¹.

Расчет по формуле 4 дает значение $d = 6,6$ см. Толщина слоя штукатурки с учетом насыпного веса составит: $\Delta_{\text{шт}} = 6,6 \cdot 0,95 / 0,24 = 26$ см. Объем слоя фрагментов штукатурки составит 223 л. Этот объем штукатурки практически равен объему контейнера.

Для уточнения значений поправочных коэффициентов в реальной практике необходимо определять насыпную плотность материала РАО и проводить расчеты по представленным выше примерам.

Выводы:

1. На основании расчетов и экспериментальных исследований получены значения эффективности регистрации α -излучающих радионуклидов (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Am) переносными γ -спектрометрами.

2. Исследованы возможности переносной γ -спектрометрии для оценки объемов РАО по поверхностной плотности альфа-загрязнения материалов радионуклидами урана и трансурановых элементов. При использовании γ -спектрометра на основе ОЧГ-детектора с расширенным в низкоэнергетической области диапазоном регистрации γ -квантов, такие радионуклиды как ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am определялись по собственному излучению или по излучению дочерних радионуклидов. «Проблемным» элементом является плутоний, для экспресс-оценки которого предложено использовать ^{241}Am , накапливающийся при β -распаде ^{241}Pu . Согласно расчетам, наиболее вероятное значение отношения активностей $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ в поверхностном загрязнении исследованных объектов (масштабирующий коэффициент) варьирует в интервале от 5,0 до 9,0.

3. Исследованы основные источники погрешностей при обследовании строительных конструкций и крупногабаритного оборудования методом переносной спектрометрии. Для их компенсации необходимо проводить корректный отбор проб, отражающий как реальное распределение активности радионуклидов по глубине материалов, так и флуктуации радионуклидного соотношения $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$.

4. Показано, что в зависимости от морфологии отходов (железо, бетон, штукатурка) результаты измерения активности РАО, помещенных в штатный 200-литровый контейнер, могут отличаться от истинного значения и варьируются в диапазоне от 15 до 90%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Былкин Б.К., Енгатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных ядерных установок. М., РНЦ «Курчатовский институт»; 2018.
2. Агапов А.М., Абрамов А.А., Дьяков С.В. и соавт. Проблема ядерного наследия и пути их решения. М., 2010, том. 1.
3. Коренков И.П., Шандала Н.К., Лашенова Т.Н., Соболев А.И. Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов. М., Бином; 2014.
4. Коренков И.П., Лашенова Т.Н., Шандала Н.К. Алгоритм принятия решений при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов. Гигиена и санитария. 2010; 6: 55–61.
5. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации и реабилитации территорий. Том 1 под общей редакцией И.И. Линге и А.А. Абрамова. М. изд. ИБРАЭ; 2017.
6. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации и реабилитации территорий. Том 2 под общей редакцией И.И. Линге и А.А. Абрамова. М. изд. ИБРАЭ; 2017.
7. Абрамов А.А. Итоги реализации ФЦП ЯРБ и задачи на будущее. 15-я юбилейная Российская научная конференция. М., ИБРАЭ; 2015: 15–21.
8. Майзик А.Б., Кузнецов А.Ю., Цовьянов А.Г. и соавт. Организационно-методические подходы при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов. АНРИ. 2017; 1(88): 55–62.
9. ИСО 21238–2007 Ядерная энергия. Технология ядерного топлива. Метод с применением масштабного коэффициента для опре-

деления радиоактивности пакетов радиоактивных отходов низкого и среднего уровня, полученных на ядерных электростанциях.

10. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. IAEA, Vienna, Austria, 2009.

11. 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» (РБ-154-19). Утверждено Приказом Ростехнадзора от 04.04.2019 № 137.

12. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Изд. 2-е. М.: Физматлит, 2003; Т. 1. ISBN 5-9221-0323-7.

REFERENCES

1. Bylkin B.K., Engatov I.A. Decommissioning of nuclear reactor systems. Moscow, National Research Center "Kurchatov Institute"; 2018 (in Russian).
2. Agapov A.N., Abramov A.A., Dyakov S.V. et al. *Problems related to nuclear legacy and their solutions*. Moscow; 2010, vol. 1. (in Russian).
3. Korenkov I.P., Shandala N.K., Laschenova T.N., Sobolev A.I. *Environmental protection at operation and decommissioning of radiation-hazardous facilities*. Moscow, Binom; 2014 (in Russian).
4. Korenkov I.P., Laschenova T.N., Shandala N.K. Decision-making behavior at decommissioning of radiation-hazardous facilities. *Gigiena i sanitariya*. 2010; 6: 55–61. (in Russian).
5. *Best foreign practices of site decommissioning and remediation*. Volumes 1. Ed.: Linge I.I. and Abramov A.A. IBRAE; 2017 (in Russian).
6. *Best foreign practices of site decommissioning and remediation*. Volumes 2. Ed.: Linge I.I. and Abramov A.A. IBRAE; 2017 (in Russian).
7. Abramov A.A. *Final results of implementation of the NRB FTP and challenges for the future. The 15th anniversary Russian scientific conference*. Moscow, IBRAE; 2015: 15–21 (in Russian).
8. Mayzik A.B., Kuznetsov A.Yu., Tsovyanov A.G. et al. Organizational and methodical approaches to decommissioning of radiation-hazardous facilities. *ANRI*. 2017; 1(88): 55–62 (in Russian).
9. ISO 21238:2007. Nuclear energy — Nuclear fuel technology — Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants.
10. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. *Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP*. IAEA, Vienna, Austria; 2009.
11. Guidance for safety in the use of nuclear power. Guidelines on using of the radionuclide relations method for determination of the content of hard detectable radionuclides in radioactive wastes of nuclear fuel cycle facilities (RB-154-19). Approved by Rostekhnadzor order No. 137 of 04.04.2019
12. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integrals and series*. 2nd edition. Moscow, Fizmatlit, 2003, vol. 1, ISBN 5-9221-0323-7.