DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-85-91 УДК 621.039.75

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАДИОНУКЛИДНОГО ВЕКТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ СЛОЖНОДЕТЕКТИРУЕМЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОТОКАХ РАО

А. П. Варлаков[1], Я. В. Сергеечева[1], М. В. Ивлиев[1], Г. А. Варлакова[1], В. А. Горбунов[2], С. В. Карлин[2]

[1]АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара», Москва
[2]ФГУП «РАДОН», Москва

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2019 г.

Метод радионуклидного вектора применяется для определения радиационных характеристик радиоактивных отходов на основе выявленных зависимостей между содержанием сложнодетектируемых (^{239}Pu, ^{241}Am) и легкодетектируемых (^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu) радионуклидов в РАО. Применение данного метода позволило сократить количество операций пробоотбора и проведения расширенных радиохимических анализов РАО при категорировании, снизить радиационное воздействие на персонал, общее время и стоимость выполнения работ при характеризации РАО. В статье описано применение метода радионуклидного вектора для определения радиационных характеристик партии РАО большого объема и сложного состава, содержащих сложнодетектируемые радионуклиды, и доказана его эффективность.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, радионуклидный вектор, сложнодетектируемые радионуклиды, доверительный интервал.*

Требования нормативных документов [1—4] в части учета и обращения с радиоактивными отходами (далее — РАО) предусматривают необходимость выполнения контроля радионуклидного состава и активности РАО на всех стадиях обращения с ними: при сборе, сортировке, перевозке, переработке и хранении.

При образовании большого объема отходов актуальна задача оперативного и достоверного определения в них удельной и общей активности радионуклидов в условиях ограниченного времени и ресурсов. Для определения активности радионуклидов в РАО применяются как экспериментальные, так и расчетные методы, которые основаны на результатах предварительных прямых и/или косвенных измерений значений контролируемых параметров.

При определении удельной и общей активности радионуклидов в РАО используются как разрушающие, так и неразрушающие методы контроля [5—7]. Одним из наиболее распространенных неразрушающих методов контроля при паспортизации РАО является гамма-спектрометрия [7]. Однако этот метод не позволяет определять активности сложнодетектируемых радионуклидов (например, ^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{99}Tc, ^{129}I, ^{234}U, $^{239,\,241}Pu$). Распад сложнодетектируемых радионуклидов («difficult-to-measure radionuclide», DTM [8]) не сопровождается гамма-излучением достаточной для регистрации неразрушающими методами измерений интенсивности и/или энергией гамма-квантов.

Разрушающие методы контроля предполагают отбор проб РАО, подготовку счетных образцов, которая часто включает в себя радиохимическое выделение отдельных радионуклидов, и анализ счетного образца методами альфа-, бета-, гамма-спектрометрии, жидкосцинтилляционной спектрометрии и др. Разрушающие методы контроля применяются, как правило, если в РАО присутствуют сложнодетектируемые альфа- и бета-излучающие радионуклиды. Основными недостатками разрушающих методов являются трудность в обеспечении представительности пробы вследствие возможной неоднородности распределения РАО в упаковке и/или недостаточного количества проб, характеризующих объем РАО, а также высокая стоимость и продолжительность анализа.

Для достижения оптимального результата при характеризации больших объемов однородных потоков РАО, содержащих сложнодетектируемые радионуклиды, рассматривается совместное применение разрушающих и неразрушающих методов контроля.

Подход к характеризации РАО, основанный на установлении корреляционных зависимостей между активностями радионуклидов в заданном потоке РАО, называется методом «радионуклидного вектора» (или «масштабирующих коэффициентов», в иностранной литературе — «nuclide-vector method», «scaling-factor method») [5, 8—11]. Данный метод основывается на предположении о совместном распространении и накоплении DTM и легкодетектируемых радионуклидов в потоках РАО, сходных механизмах образования DTM и легкодетектируемых радионуклидов, их физико-химических свойствах. Легкодетектируемые радионуклиды выступают в качестве реперных («key nuclide», KN) для определения DTM.

На АЭС и крупных предприятиях с типовыми технологическими процессами потоки РАО являются достаточно стабильными. МАГАТЭ в данном случае рекомендует [8, 10] осуществлять выбор реперного радионуклида на основании сходства поведения и процесса образования группы радионуклидов.

При определении радиационных характеристик отходов, которые образовались при смешении отходов из разных источников и в состав которых входит большое количество различных радионуклидов, метод радионуклидного вектора имеет ограничения. Количество потенциальных реперных радионуклидов, характеризующихся оптимальными периодом полураспада и интенсивностью гамма-излучения, в таких РАО ограничено. Поэтому не для всех DTM можно подобрать реперный радионуклид, основываясь только на сходстве поведения, образования и химических свойств. В этом случае для характеризации РАО возможен вариант выбора реперного радионуклида на основе корреляционно-регрессионного анализа зависимостей измеренных удельных активностей легкодетектируемых и труднодетектируемых радионуклидов в пробах заданного потока РАО.

Суть метода заключается в следующем. Выполняют отбор проб, подготовку счетных образцов и проводят измерение удельных активностей радионуклидов. На основе измеренных удельных активностей определяют статистически значимые корреляционные зависимости между активностями DTM и KN. Определяют коэффициенты уравнения линейной регрессии, описывающего зависимость между удельными активностями DTM и KN в объекте измерений. Далее контроль радиационных характеристик РАО выполняют неразрушающими методами с применением расчета активности DTM на основе удельной активности KN.

Целью работы являлось определение радиационных характеристик большого объема РАО, размещенных в контейнерах и содержащих труднодетектрируемые и легкодетектируемые радионуклиды, с применением метода радионуклидного вектора, а также оценка достоверности полученных результатов.

Первоначально измеряемые РАО представляли собой накопленные из нескольких источников ЖРО в блоках емкостей большого объема (каждая ~200 м^3), затем ЖРО были зацементированы в емкостях. С течением времени цементная матрица подверглась разрушению. РАО из емкостей были перемещены в контейнеры и зацементированы повторно. Под потоком РАО в данном случае подразумевается совокупность контейнеров с РАО из одной емкости.

Для определения удельной активности и оценки однородности распределения активности измеряемых радионуклидов в РАО был проведен отбор проб способом колонкового бурения массива РАО, размещенных в контейнерах и относящихся к определенному потоку. Отбор производился «методом конверта» по площади контейнера и по глубине.

Измерения удельных активностей радионуклидов в пробах выполнялись методами гамма-спектрометрии высокого разрешения, альфа- и бета-радиометрии, альфа- и бета-спектрометрии и ЖС-спектрометрии, в том числе с предварительной радиохимической пробоподготовкой.

В результате измерений представительных проб РАО был определен их радионуклидный состав, а также удельные активности основных радионуклидов: ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu, ^{234}U, ^{238}U, ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{241}Am.

С учетом полученных значений удельных активностей были выбраны радионуклиды, которые определяют отнесение РАО к определенному классу отходов в соответствии с [5], — DTM ^{239}Pu и ^{241}Am. Потенциальными реперными радионуклидами выбраны ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu.

Измерения удельных активностей легкодетектируемых радионуклидов (^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu) в упаковках (контейнерах типа КМЗ-3.1) проводились с применением мобильного полупроводникового гамма-спектрометра CANBERRA с программным обеспечением Genie-2000 и системой расчета эффективности регистрации гамма-квантов ISOCS.

Для определения однородности распределения активности измеряемых радионуклидов в РАО был проведен анализ проб по глубине контейнеров.

В качестве критерия однородности распределения активности выбран коэффициент вариации V [12], который характеризует долю усредненного значения отклонений от средней величины. В статистике принято, что если значение коэффициента вариации не превышает 33%, то совокупность считается однородной (1):

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение, $\bar{x}$ — среднее значение величины удельной активности радионуклида.

Расчеты показали, что распределение радионуклидов по высоте и слоям внутри контейнеров однородно.

Для построения корреляционных зависимостей между активностями легкодетектируемых (^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu) и сложнодетектруемых (^{239}Pu и ^{241}Am) радионуклидов провели дополнительный отбор проб. Так как распределение радионуклидов по высоте контейнера однородно, пробы представляли собой керн — от поверхности и до дна контейнера.

Далее проводили обработку полученных экспериментальных данных по удельным активностям проб и установление функциональных зависимостей между активностями труднодетектируемых и легкодетектируемых радионуклидов для каждой емкости.

При расчетах было принято, что содержание радионуклидов в пробах или упаковках РАО из емкостей подчиняется логнормальной модели распределения [5—9], поэтому коэффициенты корреляции определялись для зависимости между логарифмами измеренных значений удельных активностей радионуклидов.

Для пар массивов данных $\ln(A_{DTM})$ — $\ln(A_{KN})$ рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона r_{xy} [12].

Для оценки силы корреляционной связи используют общепринятые критерии, согласно которым абсолютные значения $r_{xy} < 0{,}3$ свидетельствуют о слабой связи, значения r_{xy} от 0,3 до 0,7 — о связи средней тесноты, значения $r_{xy} > 0{,}7$ — о сильной связи.

Определяли пары легкодетектируемых и труднодетектируемых радионуклидов, для которых коэффициент корреляции r_{xy} между значениями логарифмов удельных активностей составлял больше 0,7. В качестве оптимальной выбирали пару с максимальным r_{xy}. Легкодетектируемый радионуклид из оптимальной пары являлся для труднодетектируемого радионуклида реперным.

По массивам данных логарифмов удельных активностей пар DTM и KN строили зависимости в координатах $\ln(A_{KN})$ — $\ln(A_{DTM})$. Для полученных зависимостей построены линии тренда с линейной аппроксимацией, рассчитаны уравнения линейной регрессии. На рис. 1 и 2 приведены примеры корреляционных зависимостей для пар радионуклидов для одной емкости.

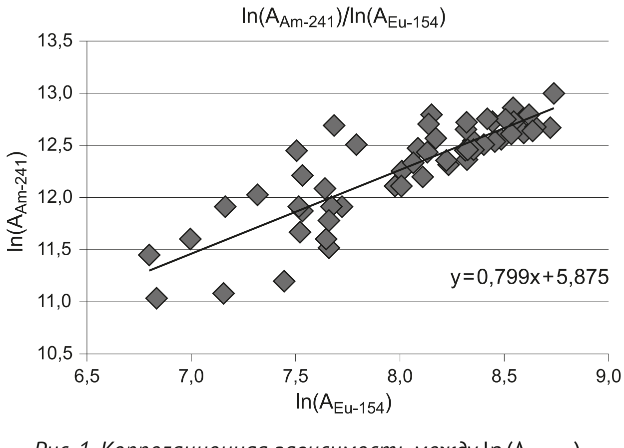

Рис. 1. Корреляционная зависимость между $\ln(A_{Am\text{-}241})$ *и* $\ln(A_{Eu\text{-}154})$ *для емкости 1*

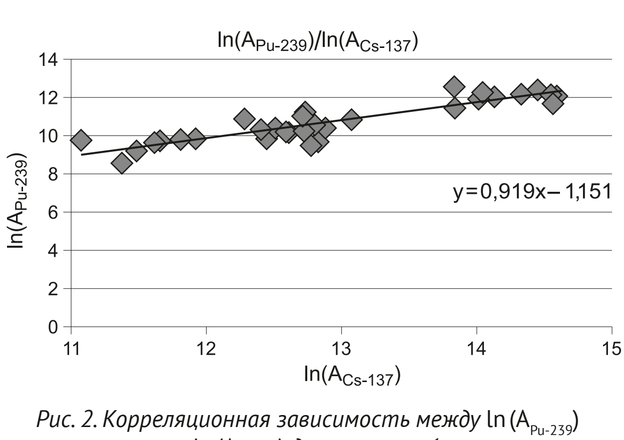

Рис. 2. Корреляционная зависимость между $\ln(A_{Pu\text{-}239})$ *и* $\ln(A_{Cs\text{-}137})$ *для емкости 1*

Уравнения аппроксимации, представленные на рис. 1 и 2, являются уравнениями регрессии для пар радионуклидов DTM и KN вида:

$$\ln(A_{DTM}) = \alpha \cdot \ln(A_{KN}) + \beta. \quad (2)$$

Например, в приведенном примере на рис. 1:

$$\ln(A_{Am-241}) = 0,799 \cdot \ln(A_{Eu-154}) + 5,875. \quad (3)$$

Расчет коэффициентов уравнений регрессии выполняли с применением математического аппарата Excel (функции CORREL, PIRSON, РЕГРЕССИЯ и т. д. [13—15]).

В табл. 1 приведены уравнения регрессии, полученные для DTM ^{239}Pu и ^{241}Am для двух емкостей.

Таблица 1. Пары труднодетектируемых и реперных радионуклидов и уравнения регрессии

Емкость	DTM	KN	Уравнение регрессии
1	^{239}Pu	^{137}Cs	$\ln(A_{Pu-239}) = -2,292 + 1,029 \cdot \ln(A_{Cs-137})$
	^{241}Am	^{154}Eu	$\ln(A_{Am-241}) = 5,875 + 0,799 \cdot \ln(A_{Eu-154})$
2	^{239}Pu	^{137}Cs	$\ln(A_{Pu-239}) = 0,010 + 0,847 \cdot \ln(A_{Cs-137})$
	^{241}Am	^{137}Cs	$\ln(A_{Am-241}) = 0,061 + 0,814 \cdot \ln(A_{Cs-137})$

Полученные уравнения регрессии позволили оценить расчетным методом удельные активности ^{239}Pu и ^{241}Am в контейнерах, из которых пробы не отбирались, на основе измерения удельной активности реперных радионуклидов методом гамма-спектрометрии. Значения удельных активностей DTM рассчитывали исходя из следующего уравнения (4):

$$\hat{A}_{DTM} = e^{\beta} \cdot (A_{KN})^{\alpha}. \quad (4)$$

Доверительный интервал для удельной активности DTM, рассчитанной с помощью масштабирующих коэффициентов, при P = 0,95 [14—16]:

$$\hat{A}_{DTM} - \Delta^{-}_{A_{DTM}} \le A_{DTM} \le \hat{A}_{DTM} + \Delta^{+}_{A_{DTM}}, \quad (5)$$

где $\Delta^{-}_{A_{DTM}}$ и $\Delta^{+}_{A_{DTM}}$ — левый и правый доверительные полуинтервалы соответственно, которые вычисляют как:

$$\Delta^{-}_{A_{DTM}} = \hat{A}_{DTM} \cdot \sqrt{\delta^2_{A_{KN}} + \left(1 - \exp\left(-t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}, n-2\right)} \cdot S_{\ln A_{DTM}}\right)\right)^2}, \quad (6)$$

$$\Delta^{+}_{A_{DTM}} = \hat{A}_{DTM} \cdot \sqrt{\delta^2_{A_{KN}} + \left(\exp\left(t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}, n-2\right)} \cdot S_{\ln A_{DTM}}\right) - 1\right)^2}, \quad (7)$$

где $\delta_{A_{KN}}$ — относительная погрешность измерения реперного радионуклида;

$S_{\ln A_{DTM}}$ — среднеквадратичное отклонение логарифма активности сложнодетектируемого радионуклида.

Результат расчета удельной активности DTM, выполненный с помощью масштабирующих коэффициентов, представляли в виде:

$$\left\{A_{DTM} - \Delta^{-}_{A_{DTM}},\ A_{DTM} + \Delta^{+}_{A_{DTM}}\right\}, \text{Бк/кг}. \quad (8)$$

Для проверки применимости метода радионуклидного вектора проведено сравнение удельных активностей труднодетектируемых радионуклидов, рассчитанных по методу радионуклидного вектора и измеренных методом ЖС-спектрометрии с предварительной радиохимической подготовкой. В табл. 2 представлен результат сравнения расчетных и измеренных значений удельных активностей DTM.

Погрешность измерения удельной активности реперных радионуклидов неразрушающим методом контроля в соответствии с используемой

Таблица 2. Сравнение измеренных и расчетных значений удельных активностей DTM

Емкость	DTM	KN	Измеренная A_{KN}, Бк/кг	Измеренная A_{DTM}, Бк/кг	Расчетная $\hat{A}_{DTM}$, Бк/кг	$(\hat{A}_{DTM} - A_{DTM})/\hat{A}_{DTM}$, %
1	^{239}Pu	^{137}Cs	3,07 E+06	4,24E+05	4,75E+05	10,7
			3,23 E+06	6,53E+05	5,01E+05	–30,3
			3,35 E+06	5,74E+05	5,20E+05	–10,4
			2,88 E+06	3,42E+05	4,45E+05	23,2
			2,67 E+06	2,78E+05	4,12E+05	32,5
	^{241}Am	^{154}Eu	3,67 E+03	3,22E+05	2,52E+05	–27,8
			4,10 E+03	2,30E+05	2,75E+05	16,4
			5,00 E+03	2,84E+05	3,22E+05	11,8
			1,92 E+03	2,66E+05	2,50E+05	–6,4
			3,91 E+03	3,02E+05	2,65E+05	–13,9
			3,54 E+03	1,20E+05	1,45E+05	17,2
2	^{239}Pu	^{137}Cs	2,80 E+06	3,10E+05	2,93E+05	–5,8
	^{241}Am	^{137}Cs	2,80 E+06	2,27E+05	1,87E+05	–21,4

методикой измерения $\delta_{A_{KN}}$ составляла 50 %. При подстановке этого значения в уравнения (6), (7) было определено, что погрешность расчета удельной активности труднодетектируемого радионуклида практически полностью определяется погрешностью измерения удельной активности реперного радионуклида.

Согласно данным из табл. 2 расчетные и измеренные удельные активности DTM различаются не более чем на 35 %. Эти данные говорят о хорошей сходимости результатов и позволяют сделать вывод о применимости метода радионуклидного вектора для определения радиационных характеристик большого объема типовых РАО, содержащих ^{239}Pu и ^{241}Am.

Выводы

Показана возможность применения метода радионуклидного вектора для определения радиационных характеристик потоков РАО сложного состава, содержащих труднодетектрируемые радионуклиды:

- для выделенного потока РАО определены корреляционные зависимости между удельными активностями пар радионуклидов, рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии и выбраны реперные радионуклиды (табл. 1);
- определены удельные активности DTM на основе измерений KN мобильным гамма-спектрометром — произведен оперативный радиационный контроль РАО в контейнерах типа КМЗ-3.1 общим объемом около 600 м^3;
- выполнено сравнение измеренных и расчетных значений удельных активностей DTM. Показано, что для представленных потоков РАО расчетные и измеренные удельные активности DTM различаются не более чем на 35 %, что подтверждает возможность применения метода.

Разработана методика определения удельной активности DTM в потоках типовых отходов больших партий РАО сложного состава методом радионуклидного вектора.

На основании полученных данных разработаны методические рекомендации по применению метода радионуклидного вектора для определения радиационных характеристик других потоков РАО.

Литература

1. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).

2. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

3. НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.

4. НП-067-16. Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации.

5. 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.

6. *Жеребцов А. А., Варлаков А. П., Германов А. В., Шаров Д. А., Ельцин В. Ф., Чураков А. К., Скакун Г. Е.* Подходы к характеризации РАО, образующихся при реализации проекта «ПРОРЫВ» // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 88—94.

7. *Вербицкий В. В.* Характеризация и паспортизация РАО // Безопасность окружающей среды. 2010. № 3. С. 116—120.

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

9. ISO 21238-2007. Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants.

10. IAEA-TECDOC-1537. Strategy and methodology for radioactive waste characterization. 2007.

11. *Жеребцов А. А., Варлаков А. П., Германов А. В., Мельников М. В., Коротков А. С., Ельцин В. Ф., Чураков А. К.* Метод оценки содержания альфа- и бета-излучающих радионуклидов в РАО радиохимических производств по матрице присутствующих гамма-излучающих радионуклидов // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 3 (85). С. 17—25.

12. Основы теории статистики : [учеб. пособие] / В. В. Полякова, Н. В. Шаброва; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 148 с.

13. *Ишханян М. В., Карпенко Н. В.* Эконометрика. Часть 1. Парная регрессия: Учебное пособие. М.: МГУПС (МИИТ), 2016. 117 с.

14. Корреляционный анализ. Использование MS Excel для расчета коэффициента корреляции : Учебно-методическое пособие для студентов. Казань : ГБОУ ВПО «Казанский государственный медицинский университет», 2011. 18 с.

15. *Харченко М. А.* Корреляционный анализ : Учебное пособие для вузов. Воронеж, Изд-во ВГУ, 2008. 31 с.

Информация об авторах

Варлаков Андрей Петрович, доктор технических наук, директор отделения, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Сергеечева Яна Владимировна, ведущий инженер-технолог, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: yanasergeecheva@yandex.ru.

Ивлиев Михаил Владимирович, кандидат биологических наук, начальник отдела, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: MiVIvliev@bochvar.ru.

Варлакова Галина Андреевна, кандидат технических наук, главный специалист, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: varlakova@inbox.ru.

Горбунов Валерий Алексеевич, начальник центральной лаборатории, ФГУП «РАДОН» (119121, Москва, 7-й Ростовский пер., д. 2/14), e-mail: VaAlGorbunov@radon.ru.

Карлин Сергей Викторович, начальник отдела технической подготовки производства, ФГУП «РАДОН» (119121, Москва, 7-й Ростовский пер., д. 2/14), e-mail: SVKarlin@radon.ru.

Библиографическое описание статьи

Варлаков А. П., Сергеечева Я. В., Ивлиев М. В., Варлакова Г. А., Горбунов В. А., Карлин С. В. Применение методологии радионуклидного вектора для определения активности сложнодетектируемых радионуклидов в потоках РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 85—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-85-91.

APPLICATION OF THE NUCLIDE-VECTOR METHODOLOGY TO DETERMINE THE ACTIVITY OF DIFFICULT-TO-MEASURE RADIONUCLIDES IN RADIOACTIVE WASTE STREAMS

Varlakov A. P.[1], Sergeecheva Y. V.[1], Ivliev M. V.[1], Varlakova G. A.[1], Gorbunov V. A.[2], Karlin S. V.[2]

[1]JSC VNIINM, Moscow, Russia

[2]Federal State Unitary Enterprise — united ecological, scientific and research centre of decontamination of radioactive waste (RAW) and environmental protection (FSUE «RADON»), Moscow, Russia

Article received on December 11, 2019

Nuclide-vector method (scaling-factor method) is used to determine the radiation characteristics of radioactive waste based on the identified dependences between the contents of difficult-to measure radionuclides (^{239}Pu, ^{241}Am) and key radionuclides (^{60}Co, ^{137}Cs, ^{152}Eu, ^{154}Eu). The application of this method allowed to reduce the number of sampling operations and advanced radiochemical analyzes of radioactive waste during its categorization, to reduce the radiation impact on personnel, the total time and cost of operations performed during waste characterization. The paper describes the application of the nuclide-vector method enabling to identify the radiation characteristics of a large amount of radioactive waste with complex composition, containing difficult-to-measure radionuclides along with relevant demonstration of its effectiveness.

Keywords: *radioactive waste, nuclide-vector method, difficult-to-measure radionuclide, confidence interval.*

References

1. SP 2.6.1.2612-10. Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010) [Basic sanitary rules for radiation safety].
2. Postanovleniye Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 19 oktyabrya 2012 g. N 1069 «O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh othodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov» [Decree of the Government of the Russian Federation of 19 October 2012 No.1069 “On the criteria of designation of solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria of radioactive waste designation as non-retrievable radioactive waste and retrievable radioactive waste and criteria of classification of retrievable radioactive waste”].
3. NP-093-14. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii “Kriterii priemlemosti radioaktivnyh othodov dlya zahoroneniya”

[Federal codes and standards in the field of use of atomic energy "Criteria for acceptance of radioactive waste for disposal"].

4. NP-067-16. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Osnovnye pravila ucheta i kontrolya radioaktivnyh veshchestv i radioaktivnyh othodov v organizacii" [Federal codes and standards in the field of use of atomic energy "Basic rules for accounting and control of radioactive substances and radioactive waste in an organization"].

5. RB-154-19. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj energii. "Rekomendacii po primeneniyu metoda radionuklidnyh sootnoshenij dlya opredeleniya soderzhaniya slozhnodetektiruemyh radionuklidov v radioaktivnyh othodah predpriyatij yadernogo toplivnogo cikla" [Safety Guide for the Use of Atomic Energy. "Recommendations on the application of the radionuclide ratio method for determining the content of complex detectable radionuclides in the radioactive waste of nuclear fuel cycle enterprises"].

6. Zherebtsov A. A., Varlakov A. P., Germanov A. V., Sharov D. A., Eltsin V.F., Churakov A. K., Skakun G. E. Podhody k harakterizacii RAO, obrazuyushchihsya pri realizacii proekta «PRORYV» [Approaches to the characterization of RW generated during implementation of the project "PRORYV"]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 88—94.

7. Verbitskij V. V. Harakterizaciya i pasportizaciya RAO [RW characterization and certification]. *Bezopasnost' okruzhayushchej sredy — Environmental safety,* 2010, no. 3, pp. 116—120.

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

9. ISO 21238-2007. Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants.

10. IAEA-TECDOC-1537. Strategy and methodology for radioactive waste characterization. 2007.

11. Zherebcov A. A., Varlakov A. P., Germanov A. V., Mel'nikov M. V., Korotkov A. S., El'cin V. F., Churakov A. K. Metod ocenki soderzhaniya al'fa- i beta-izluchayushchih radionuklidov v RAO radiohimicheskih proizvodstv po matrice prisutstvuyushchih gamma-izluchayushchih radionuklidov [Method for Assessment of Alpha- and Beta- Emitting Radionuclide Content in Radiochemical Production RAW by the Matrix of Present Gamma-Emitting Radionuclides]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety,* 2017, no. 3(85), pp. 17—25.

12. Polyakova V. V., Shabrova N. V. *Osnovy teorii statistiki* [Basics of statistics theory]. Ekaterinburg, Ural. Feder. Univ. Publ., 2015. 148 p.

13. Ishkhanyan M. V., Karpenko N. V. *Econometrica. Chast' 1. Parnaya regressiya* [Econometrics. Chapter 1. Pair regression]. Moscow, MGUPS (MIIT) Publ., 2016. 117 p.

14. *Korrelyacionnyj analiz. Ispol'zovanie MS Excel dlya rascheta koefficienta korrelyacii* [Correlation analysis. Using MS Excel to calculate the correlation coefficient]. Kazan, Kaz. Gos. Med. Univ. Publ., 2011.

15. Kharchenko M. A. *Korrelyacionnyj analiz* [Correlation analysis]. Voronezh, VGU Publ., 2008. 31 p.

Information about the authors

Varlakov Andrey Petrovich, Doctor of Sciences, Director of Department, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., 123098, Moscow, Russia), e-mail: APVarlakov@bochvar.ru.

Sergeecheva Yana Vladimirovna, Leading process engineer, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., 123098, Moscow, Russia), e-mail: yanasergeecheva@yandex.ru.

Ivliev Michail Vladimirovich, PhD, Head of department, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., 123098, Moscow, Russia), e-mail: MiVIvliev@bochvar.ru.

Varlakova Galina Andreevna, PhD, Main specialist, JCS "VNIINM" (5a, Rogova St., 123098, Moscow, Russia), e-mail: varlakova@inbox.ru.

Gorbunov Valery Alekseevich, Head of the central laboratory, FSUE "RADON" (2/14, 7 Rostovsky Lane, 119121, Moscow, Russia), e-mail: VaAlGorbunov@radon.ru.

Karlin Sergey Viktorovich, Head of technical preparation department, FSUE "RADON" (2/14, 7 Rostovsky Lane, 119121, Moscow, Russia), e-mail: SVKarlin@radon.ru.

Bibliographic description

Varlakov A. P., Sergeecheva Y. V., Ivliev M. V., Varlakova G. A., Gorbunov V. A., Karlin S. V. Application of the Nuclide-vector Methodology to Determine the Activity of Difficult-to-measure Radionuclides in Radioactive Waste Streams. *Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 85—91. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-85-91.