

УЧЕТ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ НИКЕЛЬ-59 И НИКЕЛЬ-63 В РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДАХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Д. А. Шаров¹, А. С. Коротков¹, Е. А. Логутенкова¹, С. С. Селькин¹,
О. В. Корнюшкина², А. А. Загородних²

¹АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва

²АО «Концерн Росэнергоатом», Москва

Статья поступила в редакцию 4 октября 2025 г.

В статье обсуждается вопрос учета долгоживущих сложнодетектируемых радионуклидов ^{59}Ni и ^{63}Ni в радиоактивных отходах (РАО) атомных станций (АЭС). Рассмотрены свойства этих радионуклидов и методы определения их содержания. Представлен анализ накопленных данных по удельным активностям ^{59}Ni и ^{63}Ni в РАО атомных станций АО «Концерн Росэнергоатом» и их соотношениям с реперным гамма-излучающим радионуклидом ^{60}Co . Приведено сравнение полученных значений по российским АЭС с соответствующими зарубежными данными.

Ключевые слова: *сложнодетектируемый радионуклид, ^{59}Ni , ^{63}Ni , удельная активность, масштабирующий коэффициент, радиационный контроль, радиоактивные отходы, атомная станция.*

Введение

Для обеспечения долговременной безопасности захоронения РАО АЭС необходима информация о содержании в них долгоживущих радионуклидов. В различных потоках РАО из долгоживущих значимый вклад в удельную активность на горизонте десятков, сотен и тысяч лет могут вносить такие радионуклиды как ^{14}C , ^{36}Cl , $^{59,63}\text{Ni}$, ^{99}Tc , ^{129}I и др., которые являются сложнодетектируемыми (СДР), т. е. их активность в упаковке РАО не может быть определена с использованием неразрушающих методов и требуется применение отбора представительных проб с последующей их подготовкой и анализом.

В соответствии с международной практикой для контроля содержания в РАО СДР

применяется методология радионуклидного вектора [1], [2]. Ее использование для контроля содержания СДР в РАО АЭС Российской Федерации регламентируется национальным стандартом [3], [4]. Суть методологии заключается в установлении для потоков РАО устойчивых или консервативных соотношений между удельными активностями СДР и реперных радионуклидов, содержание которых в отходах может быть измерено неразрушающими методами гамма-спектрометрии. Эти соотношения принято называть радионуклидными векторами, радионуклидными соотношениями или масштабирующими коэффициентами [1]–[5]. После их установления контроль содержания в упаковках

РАО СДР осуществляется путем измерения на паспортизаторах удельной активности реперных гамма-излучающих радионуклидов и расчета удельной активности СДР по установленным радионуклидным векторам.

Начиная с 2010 года на АЭС АО «Концерн Росэнергоатом» силами специалистов АО «ВНИИАЭС» и других профильных организаций выполняется комплекс работ по исследованию характеристик потоков РАО, установлению перечней наиболее значимых и подлежащих контролю радионуклидов, определению радионуклидных векторов, разработке методического обеспечения радиационного контроля отходов. С целью обобщения и представления полученных результатов запланирована публикация серии статей с обзором накопленной информации о содержании в РАО АЭС СДР и соответствующих радионуклидных векторах.

Радиационные и химические свойства радионуклидов ^{59}Ni и ^{63}Ni

Радионуклиды $^{59,63}\text{Ni}$ образуются на АЭС в результате нейтронной активации стабильных изотопов никеля, присутствующих в конструкционных материалах реакторной установки (РУ): $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$, $^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}$, а также в пороговой реакции $^{63}\text{Cu}(n, p)^{63}\text{Ni}$ на изотопе меди. Следует отметить, что никель присутствует в сталях конструкций РУ в качестве предусмотренной полезной примеси со значимым содержанием. Например, в аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T, применяемой для изготовления внутриреакторных устройств ВВЭР, а также технологических каналов и каналов СУЗ РБМК, его содержание составляет 10–11% [6]. Этим он отличается от кобальта, который, как правило, присутствует в элементах РУ, контактирующих с теплоносителем и подверженных воздействию потоков нейтронов, в качестве зачастую ненормируемой и неконтролируемой микропримеси. Параметры основных реакций образования (материнский нуклид, сечения реакции для тепловых и эпитепловых (резонансных) нейтронов) для ^{59}Ni и ^{63}Ni приведены в табл. 1 [7].

Радиационные характеристики данных изотопов представлены в табл. 2 [8].

Таблица 1. Параметры основных реакций образования ^{59}Ni и ^{63}Ni [7]

Нук-лид	Реакция образования	Материнский нуклид (доля в естественной смеси изотопов)	Сечение реакции, барн	
			На тепловых нейтронах	Резонансный интеграл
^{59}Ni	(n, γ)	^{58}Ni (67,76 %)	$4,6 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,3$
^{63}Ni	(n, γ)	^{62}Ni (3,71 %)	$14,5 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,4$

Таблица 2. Характеристики изотопов ^{59}Ni и ^{63}Ni [8]

Нук-лид	Период полураспада, лет	Тип распада	Энергия распада, кэВ	Продукты распада
^{59}Ni	$7,5 \cdot 10^4$	электронный захват	6,9	^{59}Co
^{63}Ni	100,1	β^- -распад	17,4 (средняя) 67 (максимальная)	^{63}Cu

Распад изотопов ^{59}Ni и ^{63}Ni сопровождается испусканием мягкого бета- и рентгеновского излучения. Дозовые коэффициенты для них на один-два порядка меньше, чем для основного присутствующего в РАО АЭС радионуклида коррозийного происхождения — ^{60}Co [9]. В табл. 3 приведены величины дозовых коэффициентов для ^{59}Ni и ^{63}Ni для населения при поступлении с пищей и водой в сравнении с ^{60}Co [9], а также предельные значения для отнесения твердых и жидких отходов к РАО (ПЗУА) [10], удельные активности для вывода материалов в неограниченное обращение (УАНИ) [11] и уровни вмешательства (УВ) при наличии в питьевой воде [9].

Видно, что радионуклиды ^{59}Ni и ^{63}Ni представляют существенно меньшую радиологическую опасность в сравнении с ^{60}Co , распад которого сопровождается испусканием высокоэнергетического гамма-излучения.

Никель относится к переходным 3d-металлам, что обуславливает сходство его химических свойств с железом и кобальтом. При нормальных условиях основная степень окисления никеля — +2, в водных растворах он присутствует

Таблица 3. Дозовые коэффициенты, критерии отнесения к РАО, освобождения от контроля и уровни вмешательства для ^{59}Ni и ^{63}Ni

Нук-лид	Дозовый коэффициент для населения, Зв/Бк [9] при поступлении			УАНИ, Бк/г [11]	УВ, Бк/г [9]	ПЗУА, Бк/г [10]	
	с воздухом	с пищей	с водой			ТРО	ЖРО
^{63}Ni	$4,8 \cdot 10^{-10}$	$8,4 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	100	0,91	10^5	91
^{59}Ni	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$6,3 \cdot 10^{-11}$	100	2,2	10^4	220
^{60}Co	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	0,1	0,04	10	4

преимущественно в виде иона Ni^{2+} . Карбонат, оксалат, гидроксид и сульфид никеля малорастворимы. При значениях pH выше 7 соединения никеля подвергаются гидролизу, минимум растворимости (10^{-8} М) наблюдается при pH 10. В аналитической химии нередко используют образование хорошо растворимых в щелочной среде комплексных соединений никеля с аммиаком [12].

Методы контроля

Ввиду того, что долгоживущие изотопы никеля подвергаются бета-распаду (^{63}Ni) и электронному захвату (^{59}Ni) и не испускают гамма-излучение, они не могут быть идентифицированы в РАО с применением штатных гамма-спектрометрических установок и паспортизаторов и относятся к СДР, анализ содержания которых требует радиохимической пробоподготовки и селективного выделения из анализируемых проб. Измерение активности радиоизотопов никеля возможно методами жидкостно-сцинтилляционной (ЖС), рентгеновской или масс-спектрометрии.

Комплексный радиохимический анализ проб для определения активности радиоизотопов никеля включает в себя их вскрытие, методика которого зависит от морфологии, избавление от влияния мешающих бета-излучающих радионуклидов (^{137}Cs , ^{60}Co и др.) и селективное выделение изотопов никеля.

Последнее основано на реакции никеля Ni^{2+} с диметилглиоксимом (реактивом Чугаева) — в аммиачной среде (pH 9) они образуют малорастворимую внутриклеточную соль ярко-розового цвета, выделение которой возможно как путем простого осаждения, так и с помощью более сложных процедур экстракции и хроматографии [13].

Химическими методами отделить изотопы $^{59,63}Ni$ друг от друга невозможно. Ввиду того, что ЖС-спектр ^{63}Ni перекрывает спектр ^{59}Ni , а активность ^{63}Ni при этом гораздо выше, чем у ^{59}Ni из-за большей константы распада, методом ЖС-спектрометрии, как правило, достоверно можно определить активность только ^{63}Ni . Для экспериментального вычисления содержания ^{59}Ni требуется использование рентгеновской или ускорительной масс-спектрометрии. В случае применения первого метода требуется получение тонкого счетного образца, а для второго необходимо избавление от изобарного влияния стабильного изотопа ^{59}Co .

Для контроля содержания изотопов $^{59,63}Ni$ в упаковках РАО в международной практике

принято использовать метод радионуклидного вектора, который в наиболее простом и удобном варианте сводится к набору линейных соотношений между удельными активностями радионуклидов вида:

$$A_{СДР} = K \cdot A_r, \quad (1)$$

где $A_{СДР}$ — удельная активность контролируемого СДР, Бк/г;

A_r — удельная активность радионуклида, реперного для данного СДР, Бк/г;

K — масштабирующий коэффициент, характеризующий соотношение между удельными активностями реперного радионуклида и СДР в РАО.

В соответствии с ГОСТ [3], при установлении радионуклидных векторов на основе анализа набора экспериментальных данных, в случае линейного соотношения применяется следующая формула для масштабирующего коэффициента:

$$K = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(K_i)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{K_i}} \right)^2} \right), \quad (2)$$

где K_i — значение соотношения между удельными активностями сложнодетектируемого и реперного радионуклидов в i -й пробе;

u_{K_i} — относительная стандартная неопределенность результата расчета соотношения K_i , с учетом неопределенностей результатов измерения удельных активностей СДР и реперного радионуклида.

В случае близости неопределенностей измерения удельной активности радионуклидов формула заменяется вычислением простого (невзвешенного) среднего геометрического.

Реперным радионуклидом при контроле содержания в РАО ^{59}Ni и ^{63}Ni методом радионуклидных векторов обычно выступает ^{60}Co , источники и механизмы образования, распространения и накопления которого в РАО практически идентичны таковым для никеля.

Содержание радионуклидов ^{59}Ni и ^{63}Ni в РАО отечественных АЭС

Поскольку абсолютное значение удельной активности радионуклидов ^{59}Ni и ^{63}Ni в РАО может варьироваться в очень широких диапазонах, с практической точки зрения для анализа и сопоставления интерес представляют относительные величины — масштабирующие коэффициенты. Далее рассмотрим их значения, связывающие между собой содержание в РАО изотопов $^{59,63}Ni$ и радионуклида ^{60}Co для российских и зарубежных АЭС с РУ различного типа. В международной практике часто для вычисления масштабирующих коэффициентов применяют среднее

геометрическое, без учета неопределенности результатов измерений. В рамках статьи при рассмотрении данных по отечественным АЭС также будем использовать среднее геометрическое с указанием доверительного интервала, определяемого выражением [1]:

$$K \cdot e^{-\frac{2S}{\sqrt{n}}} \leq K \leq K \cdot e^{\frac{2S}{\sqrt{n}}}, \quad (3)$$

где n — количество точек в анализируемой выборке;

S — относительное стандартное отклонение по анализируемой выборке логарифмов отношений между удельными активностями СДР и реперного радионуклида.

Масштабирующие коэффициенты будем определять в среднем по всем потокам твердых и жидких РАО (ТРО и ЖРО соответственно) по отдельности. При анализе результаты измерений со значениями удельной активности менее нижнего предела измерений не учитываются. Для сохранения полноты информации очистка выборок от статистических выбросов не проводилась.

Анализ данных по ^{63}Ni

На большей части АЭС АО «Концерн Росэнергоатом» в том или ином объеме выполнялись исследования радиационных характеристик

потоков РАО, включая определение содержания в них радионуклида ^{63}Ni . В табл. 4 приведена сводная информация по рассчитанным на основе накопленного массива экспериментальных данных масштабирующим коэффициентам, связывающим удельную активность ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО и ЖРО энергоблоков с РУ различного типа.

Реакторные установки типа ВВЭР-1000

Для наиболее распространенного в Российской Федерации типа РУ ВВЭР-1000 имеются экспериментальные данные по содержанию в различных потоках РАО изотопа ^{63}Ni , охватывающие Балаковскую, Калининскую, Ростовскую АЭС и энергоблок № 5 Нововоронежской АЭС. Из представленных в табл. 4 результатов видно, что для ТРО Балаковской, Калининской и Нововоронежской (блок № 5) АЭС для масштабирующего коэффициента получено близкое значение — около 0,45. Следует отметить, что для отдельных потоков ТРО указанных АЭС значение варьируется в широком диапазоне от 0,25 до 1,92.

Из группы АЭС с РУ ВВЭР-1000 выделяется Ростовская, для которой значение коэффициента для ТРО составляет 0,08. Указанное отличие может быть обусловлено отбором более свежих РАО при формировании выборки и/или повышенным содержанием примеси стабильного

Таблица 4. Сводная информация по масштабирующим коэффициентам для ^{63}Ni в РАО АЭС АО «Концерн Росэнергоатом»

АЭС	Поток	Масштабирующие коэффициенты $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ (доверительные интервалы при $P=0,95$)	Объем выборки	Год исследования
ВВЭР-1000				
Балаковская АЭС	ТРО	0,48 (0,42 – 0,55)	86	2015, 2018
Калининская АЭС	ТРО	0,42 (0,25 – 0,70)	46	2018
Калининская АЭС	ЖРО	1,38 (0,83 – 2,28)	10	2018
Нововоронежская АЭС блок № 5	ТРО	0,45 (0,38 – 0,52)	168	2013
Ростовская АЭС	ТРО	0,08 (0,06 – 0,12)	89	2019, 2021
Ростовская АЭС	ЖРО	0,59 (0,46 – 0,76)	11	2019
ВВЭР-440				
Кольская АЭС	ТРО	0,05 (0,04 – 0,07)	144	2024
Нововоронежская АЭС (блоки № 3, 4)	ТРО	0,28 (0,23 – 0,33)	65	2015
ВВЭР-1200				
Нововоронежская АЭС (блоки № 6, 7)	ТРО	0,09 (0,05 – 0,15)	103	2022
ВВЭР-210, ВВЭР-365				
Нововоронежская АЭС (блоки № 1, 2)	ТРО	1,79 (1,26 – 2,55)	45	2016
РБМК-1000				
Ленинградская АЭС	ТРО	0,12 (0,08 – 0,18)	103	2018
Смоленская АЭС	ТРО	2,22 (1,41 – 3,49)	52	2017
ЭГП-6				
Билибинская АЭС	ТРО	0,09 (0,06 – 0,13)	74	2023

кобальта в элементах ее РУ и требует отдельного анализа.

Среднее по всем имеющимся данным по ТРО для ВВЭР-1000 значение масштабирующего коэффициента составляет 0,30. Графическое представление объединенного массива данных для ТРО энергоблоков с РУ ВВЭР-1000 приведено на рис. 1.

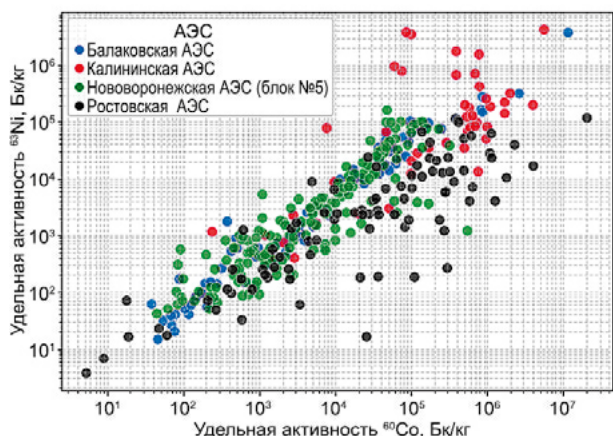


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО АЭС с ВВЭР-1000

Для ЖРО наблюдаются более высокие значения масштабирующего коэффициента в сравнении с ТРО: для Калининской АЭС — превышение в 3,3 раза, а для Ростовской — в 7,4. Различие может быть обусловлено, в частности, большей выдержкой исследованных ЖРО, связанной с их накоплением в емкостях для хранения.

Реакторные установки типа ВВЭР-440

Энергоблоки с РУ ВВЭР-440 в РФ эксплуатируются на Нововоронежской и Кольской АЭС. В результате анализа выборки экспериментальных данных для Кольской АЭС получено среднее по всем потокам ТРО значение масштабирующего коэффициента для ^{63}Ni , равное 0,05, а для

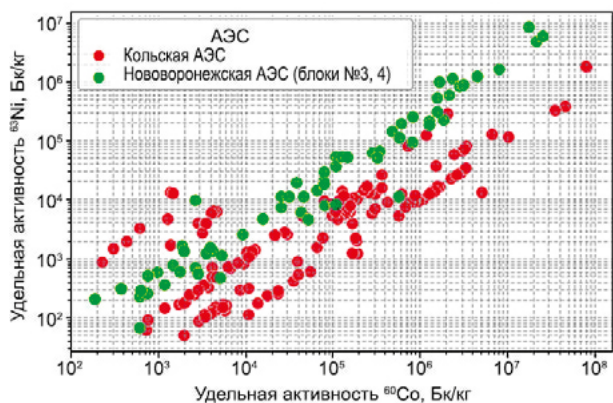


Рис. 2. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО АЭС с ВВЭР-440

энергоблоков №3, 4 Нововоронежской АЭС — 0,28. Графическое представление объединенного массива данных для ТРО энергоблоков с РУ ВВЭР-440 приведено на рис. 2, среднее значение масштабирующего коэффициента составляет 0,09.

Реакторные установки типа ВВЭР-1200

Энергоблоки с РУ ВВЭР-1200 эксплуатируются на Нововоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2 в Российской Федерации, а также на Белорусской АЭС.

Для энергоблоков №6 и 7 Нововоронежской АЭС в результате анализа выборки экспериментальных данных, содержащей 103 пробы, получено среднее по всем потокам ТРО значение масштабирующего коэффициента для ^{63}Ni , равное 0,09. На рис. 3 показана диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО. Прямая на рисунке соответствует линейному соотношению с коэффициентом пропорциональности, равным масштабирующему коэффициенту.

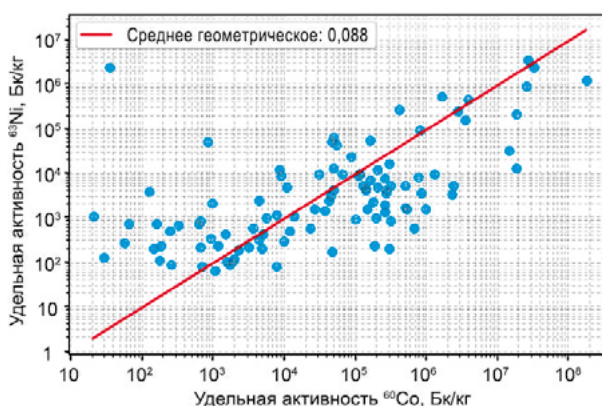


Рис. 3. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО энергоблоков №6 и 7 Нововоронежской АЭС

Исследования характеристик РАО Ленинградской АЭС-2 планируется выполнить в 2025 году, Белорусской АЭС с энергоблоками ВВЭР-1200 — в период с 2025 по 2027 год.

Реакторные установки типа ВВЭР-210/365

Энергоблоки №1 и 2 Нововоронежской АЭС с РУ ВВЭР-210 и ВВЭР-365 окончательно остановлены в 1984 и 1990 гг. соответственно и в настоящее время выводятся из эксплуатации. На основе выборки из 45 проб, отобранных в 2016 году, для указанных блоков получено среднее по всем потокам ТРО значение масштабирующего коэффициента для ^{63}Ni , равное 1,79. Очевидно, что для РАО остановленных для

вывода из эксплуатации энергоблоков со временем соотношение должно увеличиваться. На рис. 4 показана соответствующая диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co .



Рис. 4. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО энергоблоков № 1 и 2 Нововоронежской АЭС

Реакторные установки типа РБМК-1000

Энергоблоки с РУ типа РБМК-1000 эксплуатируются на Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС.

Для энергоблоков № 1–4 Ленинградской АЭС получено среднее по всем потокам ТРО значение масштабирующего коэффициента для ^{63}Ni , равное 0,12, а для Смоленской АЭС — 2,22, при этом для отдельных потоков коэффициент варьировался от 0,4 до 11. Наблюдаемое значительное расхождение в соотношении $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ между Ленинградской и Смоленской АЭС может быть обусловлено более высокой выдержкой проб ТРО в объединенной выборке для Смоленской

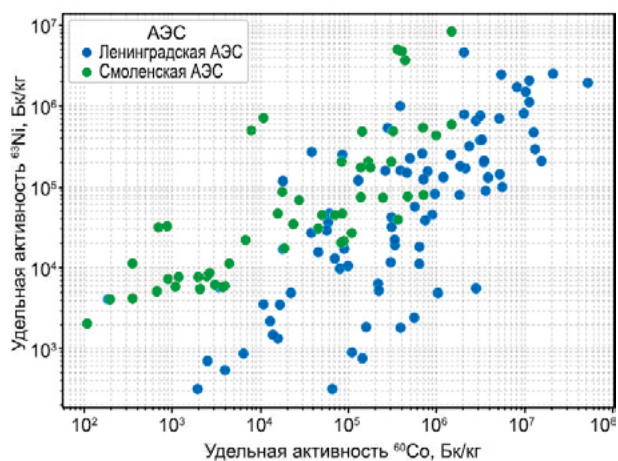


Рис. 5. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО АЭС с РБМК-1000

АЭС и различием в содержании активируемых примесей в материалах РУ, контактирующих с теплоносителем.

Графическое представление объединенного массива данных для ТРО энергоблоков с РУ РБМК-1000 приведено на рис. 5.

Реакторные установки типа ЭГП-6

Для ТРО Билибинской АЭС с энергоблоками типа ЭГП-6 получено среднее по всем потокам значение масштабирующего коэффициента для ^{63}Ni , равное 0,09. На рис. 6 показана соответствующая диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co .

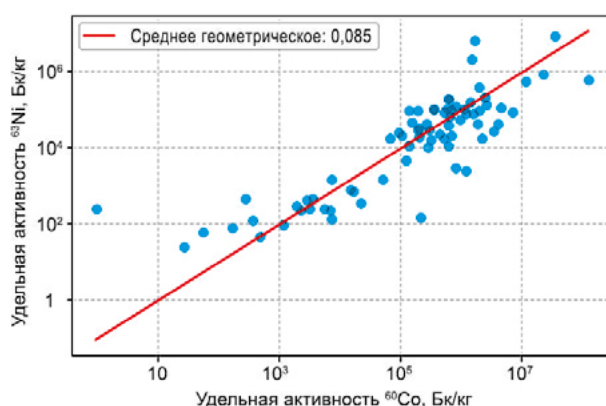


Рис. 6. Диаграмма рассеяния для соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{60}Co в ТРО Билибинской АЭС

О содержании в РАО радионуклида ^{59}Ni

Результатов измерения удельной активности ^{59}Ni в РАО АЭС накоплено значительно меньше, чем для ^{63}Ni . Это обусловлено его более низким содержанием в отходах и отмеченной ранее сложностью измерения. По этой причине в настоящее время провести сравнительный статистический анализ соотношений для ^{59}Ni в РАО российских АЭС не представляется возможным — требуется продолжение накопления массива экспериментальных данных.

В то же время, ввиду одинаковых химических свойств радионуклидов никеля и их образования в основном в реакции радиационного захвата нейтронов на его стабильных изотопах, обоснованной представляется возможность расчетного установления соотношения между удельными активностями ^{59}Ni и ^{63}Ni в РАО.

Используя информацию, приведенную в табл. 1 и 2, можно получить оценку соотношения ^{59}Ni к ^{63}Ni , равную ~0,008. Результаты расчетов наведенной активности в конструкционных материалах РУ ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000 и

ЭПП-6 (см., например, [14], [15]) для данных изотопов дают значение в диапазоне 0,008—0,011. Таким образом, можно ожидать, что в РАО АЭС соотношение удельных активностей ^{59}Ni и ^{63}Ni должно составлять около 0,01.

Учитывая, что соотношение между ^{63}Ni и реперным гамма-излучателем ^{60}Co варьируется от 0,05 до 2, соответствующее значение для ^{59}Ni и ^{60}Co должно составлять от 0,0005 до 0,02.

С учетом величины ПЗУА можно констатировать, что для отдельных потоков РАО вклад в радиологическую опасность радионуклида ^{59}Ni будет несущественным. В то же время для части видов среднеактивных РАО (САО) и для всех активированных САО и высокоактивных РАО (ВАО) данный изотоп несет значимый, а при большой выдержке и определяющий вклад в суммарную удельную активность.

Международный опыт

Контроль содержания в РАО АЭС радионуклидов ^{63}Ni и ^{59}Ni является обязательным во многих странах с развитой атомной энергетикой, что объясняется их распространенностью и значимой активностью (в первую очередь ^{63}Ni), а также большими периодами полураспада и определяющим влиянием на радиационную опасность РАО (^{59}Ni) на горизонтах сотен и тысяч лет после захоронения.

Первой страной, внедрившей мониторинг данных изотопов на нормативном уровне, стали США, где эти радионуклиды с 1984 года были включены в критерии классификации РАО [16]. При этом, согласно [16], ^{59}Ni учитывается только для активированных металлических отходов. Для их контроля предусмотрены как инструментальное измерение [17], так и применение расчетных методов на основе масштабирующих коэффициентов [18]. Для РАО АЭС США выполнен

комплекс исследовательских работ по созданию и обоснованию применения метода масштабирующих коэффициентов для их характеристики [19]—[26]. По итогам многолетнего анализа радионуклидного состава потоков РАО АЭС с реакторами типа PWR (Pressure Water Reactor — реактор с водой под давлением) и BWR (Boiling Water Reactor — кипящий водо-водяной реактор) США было обнаружено, что соотношения удельных активностей ^{63}Ni и ^{59}Ni с реперным ^{60}Co в эксплуатационных РАО сохраняют устойчивые значения в течение десяти и более лет даже при значительных изменениях в режимах эксплуатации [25]. Результаты исследований, проведенных в Японии, где впервые на практике начали определять соотношение удельных активностей $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ в РАО АЭС, подтверждают его стабильность в течение десятилетий [2].

В качестве параметра (масштабирующего коэффициента), характеризующего соотношения между удельными активностями радионуклидов в РАО, в США [1], [18]—[26], а впоследствии и в других странах использовалось геометрическое среднее, так как распределение их значений в потоках отходов близко к логнормальному.

Значения соотношений удельных активностей $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ и $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ в эксплуатационных РАО АЭС (в основном для станций с PWR и BWR) США, Франции, Канады, Японии, Южной Кореи, Швеции приведены в табл. 5. Видно, что они варьируются в широком диапазоне в зависимости от АЭС, типа РУ и вида отходов: от 0,009 до 4 — для $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ и от $5,4 \cdot 10^{-4}$ до $9,7 \cdot 10^{-2}$ — для $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$.

Для АЭС с BWR отмечаются более низкие значения отношения активностей радионуклидов ^{63}Ni и ^{60}Co , чем для АЭС с PWR, что объясняется составом конструкционных материалов — на PWR используются в основном никелевые сплавы и нержавеющая сталь, при этом углеродистая

Таблица 5. Значения соотношений удельных активностей $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ и $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ в эксплуатационных РАО АЭС разных стран

Параметры	РАО PWR	РАО BWR	ИОС	Фильтр-контейнеры	Сжигаемые	Компактируемые	Зола	Неперерабатываемые	РАО BWR (Япония) [2]	Южная Корея [28]	РАО PWR	РАО BWR
	США										Франция [2]	
Количество проб	1103	730	~500	~500	~100	~100	~100	~100	384	*	12	34
Усредненное соотношение $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$	0,33 [1], [19], [24]	$5,7 \cdot 10^{-2}$ [1], [19], [24]	1,5	0,22	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	0,11	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,2	4	$8 \cdot 10^{-2}$
Усредненное соотношение $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$	$1 \cdot 10^{-3}$ [25]	$1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	*	*	*	*	*	*	$9,7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Соотношение $^{59}\text{Ni}/^{63}\text{Ni}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	*	*	*	*	*	$8 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

* нет данных

сталь — в меньшей степени, а в кипящем реакторе (BWR) применяются углеродистая и нержавеющая сталь [1]. Таким образом, в первом приближении при оценке вкладов в активность изотопов Ni и Co отходы можно дифференцировать по типу реактора, учитывая различия в материалах, что проиллюстрировано на рис. 7 [2].

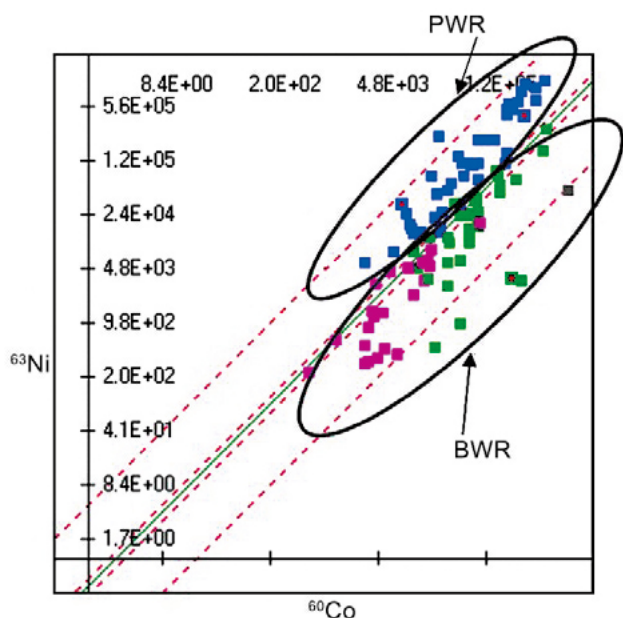


Рис. 7. Иллюстрация различия соотношения активности $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ в РАО АЭС с РУ PWR и BWR [2]

Заключение

Радионуклиды ^{63}Ni и ^{59}Ni образуются на АЭС в результате активации элементов РУ и продуктов коррозии в поле нейтронов и присутствуют во всех потоках РАО АЭС как в России, так и за рубежом. При этом их удельная активность и вклад в ее суммарный показатель варьируются в широких пределах.

^{63}Ni характеризуется существенно большим по сравнению с ^{59}Ni вкладом в суммарную удельную активность вновь образующихся при эксплуатации энергоблоков АЭС РАО — до десятков процентов. С выдержкой до сотни лет по мере распада короткоживущих радионуклидов доля обоих изотопов никеля растет. В дальнейшем относительный вклад ^{59}Ni начинает доминировать и на горизонте тысяч лет может определять радиологическую опасность, особенно для РАО в виде активированных элементов РУ. Это обуславливает отнесение ^{63}Ni к обязательным для контроля радионуклидам, в большей части образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС РАО. Что касается ^{59}Ni , то его контроль

обязателен в активированных САО и ВАО с исходным существенным значением примеси стабильного никеля. В остальных видах РАО его удельная активность может быть незначительна, а необходимость его контроля определяется по результатам исследований.

Для потоков РАО наблюдаются устойчивые соотношения между удельными активностями ^{63}Ni , ^{59}Ni и соответствующего им реперного радионуклида коррозионного происхождения ^{60}Co , что позволяет применять методологию радионуклидных векторов для расчетного определения их содержания в упаковках РАО при паспортизации. При этом важно отметить, что соотношения могут значительно отличаться для разных потоков даже в пределах одной АЭС.

Параметры соотношений удельных активностей $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ для РАО АЭС АО «Концерн Росэнергоатом» варьируются в диапазоне от 0,05 до 2,22. Для наиболее широко представленных в России энергоблоков ВВЭР-1000 среднее значение масштабирующего коэффициента для ТРО составляет 0,30, для ЖРО — 1,0. Для ЖРО в целом наблюдаются значения соотношения $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ выше, чем для ТРО, что может быть обусловлено их в среднем большей выдержкой.

По ^{59}Ni в настоящее время для отечественных АЭС представительная выборка данных не сформирована. Расчетные оценки демонстрируют наличие устойчивого соотношения между удельными активностями ^{59}Ni и ^{63}Ni со значением около 0,01.

В целом результаты выполненных на российских АЭС исследований подтверждаются мировым опытом. Значения соотношений удельных активностей $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ и $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ в эксплуатационных РАО АЭС (в основном для АЭС с PWR и BWR) США, Франции, Канады, Японии, Южной Кореи, Швеции варьируются в широком диапазоне в зависимости от АЭС, типа РУ и вида отходов: от 0,009 до 4 — для $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ и от $5,4 \cdot 10^{-4}$ до $9,7 \cdot 10^{-2}$ — для $^{59}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$. Отмечаются меньшие значения отношения активностей радионуклидов ^{63}Ni к ^{60}Co для АЭС с BWR в сравнении с PWR, что объясняется составом конструкционных материалов: в реакторе с водой под давлением (PWR) используются в основном никелевые сплавы и нержавеющая сталь, а в кипящем реакторе (BWR) используются углеродистая и нержавеющая сталь.

Целесообразно продолжение исследований, включающих сбор экспериментальных данных и их сравнительный анализ для выявления закономерностей и причин, определяющих различия между АЭС и типами РУ.

Литература

1. 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.
2. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. Vienna, IAEA, 2009.
3. ГОСТ Р 59968-2021. Радиоактивные отходы атомных станций. Определение радиационных характеристик для передачи на захоронение. Введен в действие с 01.03.2022 приказом Росстандарта от 28.12.2021 № 1866-ст.
4. Шаров Д. А., Коротков А. С., Иванов Е. А., Демьяненко М. В., Курындин А. В., Шаповалов А. С. Стандартизация в области характеристики радиоактивных отходов атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 4 (110). С. 25—36.
5. Коротков А. С., Щипунов А. Н., Ярына В. П., Тимофеева Е. Б., Шаров Д. А. Определение активности радиоактивных отходов АЭС корреляционным методом // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 2. С. 95—99.
6. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
7. Российская библиотека Файлов Оцененных Нейтронных Данных (РОСФОНД-2010). — URL: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (дата обращения: 19.09.2025).
8. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. — URL: <https://www.nndc.bnl.gov/> (дата обращения: 19.09.2025).
9. СанПиН 2.6.1.2523-09. Санитарные правила и нормативы. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
10. 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 : постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069.
11. СП 2.6.1.2612-10. Санитарные правила и нормативы. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).
12. Неорганическая химия. / Под ред. Ю. Д. Третьякова. В 3 томах. Т. 3: Химия переходных элементов. Кн. 2 : учебник для студ. высших учеб. заведений. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. 400 с.
13. Hou X., Østergaard L. F., Nielsen S. P. Determination of ⁶³Ni and ⁵⁵Fe in nuclear waste samples using radiochemical separation and liquid scintillation counting. *Analytica chimica acta*. 2005. Vol. 535. No. 1—2. Pp. 297—307.
14. Селькин С. С., Шаров Д. А., Плеханов Р. В., Ерак Д. Ю., Казенов К. Б., Кочкин В. Н., Познырев Е. Н., Решетников А. А., Тимофеев А. М., Маматов А. П. Исследование радиационных характеристик корпуса реактора и ВКУ остановленного для подготовки к выводу из эксплуатации блока №3 Нововоронежской АЭС с РУ ВВЭР-440 // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 16—25. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-16-25.
15. Селькин С. С., Шаров Д. А., Плеханов Р. В., Зинаков Д. Л. Определение радиационных характеристик металлических конструкций РУ РБМК-1000, остановленных для подготовки к выводу из эксплуатации // Вестник МЭИ. 2024. № 5. С. 149—158. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-149-158.
16. United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, § 61.55 Waste classification. US Code of Federal Regulations, 2012.
17. Thomas C. W., Thomas V. W., Robertson D. E. Radioanalytical Technology for 10 CFR Part 61 and Other Selected Radionuclides. Nureg/CR-6230. Pacific Northwest National Laboratory for NRC. USA, 1996.
18. Low Level Waste Licensing Branch Technical Position on Radioactive Waste Classification. United States Nuclear Regulatory Commission, May 11, 1983.
19. Radionuclide Correlations in Low-Level Radwaste. EPRI NP-4037, 1985.
20. Updated Scaling Factors in Low-Level Radwaste. EPRI NP-5077, 1987.
21. Radionuclide Characterization of Potential BRC Waste Types from Nuclear Power Stations. EPRI NP-5677, 1987.
22. Generic Scaling Factors for Dry Active Wastes. EPRI TR-100740, 1992.
23. Mixed Waste Characterization Guidelines. EPRI TR-104401, 1994.
24. Utility Use of Constant Scaling Factors. EPRI TR-109448, 1999.
25. Operational Changes & Impacts on LLW Scaling Factors. EPRI 1008017, 2003.
26. Robertson D. E., Abel K. H., Thomas C. W., Lepel E. A., Thomas W. V., Carrick L. C., Leale M. W., Evans J. C. Residual radionuclide contamination within and around nuclear power plants: origin, distribution, inventory and decommissioning assessment. USA, Washington, Richland, Pasific Northwest Laboratory, 1984.
27. Lindgren M., Pettersson M., Wiborgh M. R-07-05 Correlation factors for C-14, Cl-36, Ni-59, Ni-63, Mo-93, Tc-99, I-129 and Cs-135 in operational waste for SFR1. SKB Sweden 2007.
28. Park Ch. J. et al. A Comparison Test on Isotopic Scaling Factors with Measured Scaling Factors of Dry Active Waste Forms. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting. Jeju, Korea, May 17—18, 2018.

Информация об авторах

Шаров Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор Отделения РБ, РАО и ОЯТ, вывода из эксплуатации, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

Коротков Алексей Сергеевич, заместитель руководителя Департамента радиационной безопасности, экологии и охраны труда — начальник лаборатории радиационного контроля, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: ASKorotkov@vniiaes.ru.

Логутенкова Елизавета Алексеевна, младший научный сотрудник Лаборатории радиационного контроля, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: EALogutenkova@vniiaes.ru.

Селькин Сергей Сергеевич, главный специалист Лаборатории радиационного контроля, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: SSSelkin@vniiaes.ru.

Корнюшкіна Ольга Викторовна, заместитель директора по производству и эксплуатации АЭС — директор Департамента по обращению с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выводу из эксплуатации АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: kornushkina-ov@rosenergoatom.ru.

Загородних Андрей Анатольевич, заместитель директора Департамента по обращению с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом и выводу из эксплуатации АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом» (109507, Москва, Ферганская ул., д. 25), e-mail: zagorodnikh-aa@rosenergoatom.ru.

Библиографическое описание статьи

Шаров Д. А., Коротков А. С., Логутенкова Е. А., Селькин С. С., Корнюшкіна О. В., Загородних А. А. Учет долгоживущих радионуклидов никель-59 и никель-63 в радиоактивных отходах атомных станций // Радиоактивные отходы. 2026. № 1 (34). С. 20—31. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-20-31.

ACCOUNTING FOR LONG-LIVED NIKEL-59 AND NIKEL-63 RADIONUCLIDES IN RADIOACTIVE WASTE FROM NUCLEAR POWER PLANTS

Sharov D. A.¹, Korotkov A. S.¹, Logutenkova E. A.¹, Selkin S. S.¹,
Kornyushkina O. V.², Zagorodnikh A. A.²

¹JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation”, Moscow, Russia

²JSC Rosenergoatom, Moscow, Russia

Article received on October 4, 2025

The article evaluates the issues associated with the accounting of long-lived hard-to-detect ⁵⁹Ni and ⁶³Ni radionuclide in radioactive waste (RW) from nuclear power plants. It considers the properties of these radionuclides and the methods applied to measure their content. It evaluates the accumulated data on the specific activity of ⁵⁹Ni and ⁶³Ni in RW from nuclear power plants operated by JSC Rosenergoatom Concern and their correlations with the specific activity of a reference gamma-emitting ⁶⁰Co radionuclide. The article compares the data on Russian nuclear power plants with corresponding international data.

Keywords: hard-to-detect radionuclide, ⁵⁹Ni, ⁶³Ni, specific activity, scaling factor, radiation monitoring, radioactive waste, nuclear power plant.

References

1. 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.
2. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18. Determination and use of scaling factors for waste characterization in NPP. Vienna, IAEA, 2009.
3. GOST R 59968-2021. *Radioaktivnyye otkhody atomnykh stantsiy. Opredeleniye radiatsionnykh kharakteristik dlya peredachi na zakhroneniye* [Radioactive waste produced by nuclear power plants. Radiation characteristics determination for transfer to disposal]. Enacted on March 1, 2022, by Rosstandart Order No. 1866-st of December 28, 2021.
4. Sharov D. A., Korotkov A. S., Ivanov E. A., Dem'yanenko M. V., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S. Standartizatsiya v oblasti kharakterizatsii radioaktivnykh otkhodov atomnykh stantsiy [Standardization in the Field of Characterization of Radioactive Waste Produced by Nuclear Power Plants]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2023, no. 4 (110), pp. 25–36.
5. Korotkov A. S., Shchipunov A. N., Yaryna V. P., Timofeeva E. B., Sharov D. A. Opredeleniye aktivnosti radioaktivnykh otkhodov AES korrelyatsionnym metodom [Correlation Method Applied to Measure the Activity of Radioactive Waste from NPP]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 95–99.
6. GOST 5632-2014. *Legirovannyye nerzhaveyushchiye stali i splavy korrozionno-stoykiye, zharostoykiye i zharoprochnyye. Marki* [Stainless steels and corrosion resisting, heat-resisting and creep resisting alloys. Grades].
7. Rossiyskaya biblioteka Faylov Otsenennykh Neytronnykh Dannyykh [Russian File Library of Evaluated Neutron Data] (ROSFOND-2010). — URL: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (accessed on: 19.09.2025).
8. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. — URL: <https://www.nndc.bnl.gov/> (accessed on 19.09.2025).
9. 2.6.1.2523-09. *Sanitarnyye pravila i normativy SanPiN. Normy radiatsionnoy bezopasnosti* [Sanitary Rules and Regulations SanPiN. Radiation Safety Standards] (NRB-99/2009).
10. *O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k obyem radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov* [On Criteria Applied to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, Criteria for Radioactive Waste Categorization Either as Special Radioactive Waste or Retrievable Radioactive Waste and Classification Criteria for Retrievable Radioactive Waste]: Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069.
11. SP 2.6.1.2612-10. *Sanitarnyye pravila i normativy* [Sanitary Rules and Norms]. *Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti* [Basic Sanitary Rules for Radiation Safety]. (OSPORB-99/2010).
12. *Neorganicheskaya khimiya* [Inorganic Chemistry]. Edt. by Yu. D. Tret'yakov. Vol. 3: *Khimiya perekhodnykh elementov* [Chemistry of Transition Elements]. Book 2 : textbook for students of higher educational institutions. Moscow, Publishing center Academy Publ., 2007. 400 p.
13. Hou X., Østergaard L. F., Nielsen S. P. Determination of ^{63}Ni and ^{55}Fe in nuclear waste samples using radiochemical separation and liquid scintillation counting. *Analytica chimica acta*, 2005, vol. 535, no. 1–2, pp. 297–307.
14. Selkin S. S., Sharov D. A., Plekhanov R. V., Erak D. Y., Kazenov K. B., Kochkin V. N., Poznyrev N., Reshetnikov A. A., Timofeev A. M., Mamatov A. P. Issledovaniye radiatsionnykh kharakteristik korpusa reaktora i VKU ostanovlennogo dlya podgotovki k vyvodu iz ekspluatatsii bloka No. 3 Novovoronezhskoy AES s RUVVER-440 [Pre-Decommissioning Study Focused on WVER-440 Reactor Unit No. 3 at Novovoronezh NPP Exploring the Radiation Characteristics of the Reactor Vessel and Its Internals]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2024, no. 1 (26), pp. 16–25. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-16-25.
15. Selkin S. S., Sharov D. A., Plekhanov R. V., Zinakov D. L. Opredeleniye radiatsionnykh kharakteristik metallicheskih konstruktsiy RU RBMK-1000, ostanovlennyykh dlya podgotovki k vyvodu iz ekspluatatsii [Radiological characterization of metal structures constituting to RBMK-1000 reactor unit shut down for pre-decommissioning activities]. *Vestnik MPEI — Bulletin of MPEI*, 2024, no. 5, pp. 149–158. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-5-149-158.
16. United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, § 61.55 Waste classification. US Code of Federal Regulations, 2012.
17. Thomas C. W., Thomas V. W., Robertson D. E. Radioanalytical Technology for 10 CFR Part 61 and Other Selected Radionuclides. Nureg/CR-6230. Pacific Northwest National Laboratory for NRC. USA, 1996.
18. Low Level Waste Licensing Branch Technical Position on Radioactive Waste Classification. United States Nuclear Regulatory Commission, May 11, 1983.

19. Radionuclide Correlations in Low-Level Radwaste. EPRI NP-4037, 1985.
20. Updated Scaling Factors in Low-Level Radwaste. EPRI NP-5077, 1987.
21. Radionuclide Characterization of Potential BRC Waste Types from Nuclear Power Stations. EPRI NP-5677, 1987.
22. Generic Scaling Factors for Dry Active Wastes. EPRI TR-100740, 1992.
23. Mixed Waste Characterization Guidelines. EPRI TR-104401, 1994.
24. Utility Use of Constant Scaling Factors. EPRI TR-109448, 1999.
25. Operational Changes & Impacts on LLW Scaling Factors. EPRI 1008017, 2003.
26. Robertson D. E., Abel K. H., Thomas C. W., Lepel E. A., Thomas W. V., Carrick L. C., Leale M. W., Evans J. C. Residual radionuclide contamination within and around nuclear power plants: origin, distribution, inventory and decommissioning assessment. USA, Washington, Richland, Pacific Northwest Laboratory, 1984.
27. Lindgren M., Pettersson M., Wiborgh M. R-07-05 Correlation factors for C-14, Cl-36, Ni-59, Ni-63, Mo-93, Tc-99, I-129 and Cs-135 in operational waste for SFR1. SKB Sweden 2007.
28. Park Ch. J. et al. A Comparison Test on Isotopic Scaling Factors with Measured Scaling Factors of Dry Active Waste Forms. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting. Jeju, Korea, May 17–18, 2018.

Information about the authors

Sharov Dmitrii Alexandrovich, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director of VNIIAES-NTP, Director of Radiation Safety, Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel and Decommissioning Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

Korotkov Aleksei Sergeevich, Deputy Head of the Department of Radiation, Environmental and Occupational Safety, Head of the Radiation Control Laboratory, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: ASKorotkov@vniiaes.ru.

Logutenkova Elizaveta Alekseevna, Junior Researcher of the Radiation Control Laboratory, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: EALogutenkova@vniiaes.ru.

Selkin Sergey Sergeevich, Chief Specialist of the Radiation Control Laboratory, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: SSSelkin@vniiaes.ru.

Kornyushkina Olga Victorovna, Deputy Director for Production and Operations NPP, Director of the Department for Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management and Decommissioning of NPP, JSC Rosenergoatom (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: kornushkina-ov@rosenergoatom.ru.

Zagorodnikh Andrey Anatolyevich, Deputy Director of Department for the Management of Radioactive Waste, Spent Nuclear Fuel and Decommissioning of NPP, JSC Rosenergoatom (25, Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia), e-mail: zagorodnikh-aa@rosenergoatom.ru.

Bibliographic description

Sharov D. A., Korotkov A. S., Logutenkova E. A., Selkin S. S., Kornushkina O. V., Zagorodnikh A. A. Accounting for Long-Lived Nickel-59 and Nickel-63 Radionuclides in Radioactive Waste from Nuclear Power Plants. *Radioactive Waste*, 2026, no. 1 (34), pp. 20–31. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-20-31. (In Russian).