

УДК 621.039.75

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ УДАЛЯЕМЫХ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Иванов Е. А., к.т.н. (EAIvanov@vniiaes.ru), Шаров Д. А.,
к.ф.-м.н. (DASharov@vniiaes.ru) (АО «ВНИИАЭС»),
Курьиндин А. В., к.т.н. (Kuryndin@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

В статье рассматривается действующая система классификации удаляемых твердых радиоактивных отходов. Показан ряд противоречий и неточностей в системе, создающих определенные трудности для эксплуатирующих организаций при обращении с РАО.

Сформулированы предложения по корректировке системы классификации РАО, включая критерии отнесения к РАО, категоризацию по уровню удельной активности, классификацию по периоду потенциальной опасности.

► **Ключевые слова:** *твердые радиоактивные отходы, категоризация ТРО, удельная активность, индекс ТРО, период потенциальной опасности РАО.*

ACTUAL PROBLEMS OF CLASSIFICATION OF RADIOACTIVE WASTE GENERATED DURING NUCLEAR ENERGY APPLICATION

Ivanov E., Ph. D., Sharov D., Ph. D. (JSC «VNIIAES»),
Kuryndin A., Ph. D. (SEC NRS)

The article deals with the current system of solid radioactive waste classification. A number of contradictions and inaccuracies in the system creating certain difficulties for the operating organizations during the process of radioactive waste management are shown.

The proposals for the correction of the radioactive waste classification system, including criteria for RW identification, categorization by the level of specific activity, classification by the period of potential danger are formulated.

► **Key words:** *solid radioactive waste, SRW categorization, specific activity, SRW index, the period of potential danger of radioactive waste.*

Основополагающим элементом системы обращения с радиоактивными отходами (РАО) является их классификация. В соответствии с Федеральным законом от 11.07.2011 № 190-ФЗ (далее – 190-ФЗ [1]) критерии классификации удаляемых твердых РАО с целью их захоронения установлены постановлением Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 (далее – постановление Правительства [2]). Согласно постановлению Правительства [2] класс удаляемых твердых РАО (ТРО) определяется категорией РАО (очень низкоактивные – ОНРАО, низкоактивные – НАО, среднеактивные – САО и высокоактивные – ВАО) и периодом полураспада содержащихся в РАО радионуклидов (долгоживущие РАО, короткоживущие РАО). Классификация устанавливает прямую связь с вариантами захоронения РАО (таблица 1) [2].

Важно отметить, что от критериев классификации удаляемых отходов напрямую зависит как безопасность населения, так и затраты на захоронение РАО, так как тариф на захоронение¹ определяется классом РАО.

По мнению авторов положенные в основу постановления Правительства [2] критерии требуют дальнейшего совершенствования с учетом накопленного к настоящему времени опыта правоприменения. Далее рассмотрим некоторые из возможных путей развития нормативной базы в этой части.

1. Критерии отнесения к ТРО

В соответствии с постановлением Правительства [2] твердые отходы относятся к РАО в случае, если сумма отношений удельных активностей радионуклидов в отходах к их предельным значениям превышает единицу.

Введем понятие «индекс ТРО»:

$$I_{SRW} = \sum_{i=1}^N \frac{YA_i}{ПЗУА_i}, \quad (1)$$

где:

YA_i и $ПЗУА_i$ – удельная активность и предельное значение удельной активности радионуклида i в твердых отходах соответственно;

N – число радионуклидов в твердых отходах.

Тогда критерий отнесения твердых отходов к ТРО можно записать в виде:

$$I_{SRW} > 1. \quad (2)$$

В постановлении Правительства [2] в качестве $ПЗУА$ в твердых отходах приняты рекомендованные международными основными нормами безопасности [3, 4] уровни изъятия (выраженные в единицах удельной активности) для умеренных количеств (не более одной тонны) твердого материала $(EL_1)^2$. Однако в Руководстве по безопасности МАГАТЭ GSG-1 [6] в качестве нижних границ (по удельной активности радионуклидов искусственного происхождения) отнесения твердых отходов к ТРО принимаются уровни изъятия для больших количеств твердого материала (EL_2) [4, 7] (в ОСПОРБ-99/2010 [8] эти уровни изъятия приняты в качестве удельных активностей техногенных радионуклидов, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов).

Таким образом, условие освобождения от радиационного контроля (РК) больших количеств твердого материала (в том числе твердых отходов) записывается в виде:

$$I_{ecw} = \sum_{i=1}^N \frac{YA_i}{УАНИ_i} \leq 1, \quad (3)$$

где $УАНИ_i$ – удельная активность техногенного радионуклида i , при которой допускается неограниченное использование твердых материалов.

Формула (3) позволяет определить период потенциальной опасности ТРО:

$$\tau_{RW} : I_{ecw} = \sum_{i=1}^N \frac{YA_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \tau_{RW})}{УАНИ_i} = 1, \quad (4)$$

где λ_i – постоянная распада радионуклида i в ТРО.

¹ В соответствии с Положением о государственном регулировании тарифов на захоронение РАО, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 03.12.2012 № 1249, тарифы на захоронение РАО на первый период регулирования (2013 – 2017 гг.) установлены приказом Минприроды России от 13.03.2013 № 89. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 14.09.2016 № 920 в последующий период времени установление тарифов на захоронение РАО возложено на ФАС России.

² В НРБ-99/2009 [5] указанные уровни изъятия приняты в качестве минимально значимой удельной активности радионуклидов (МЗУА) на рабочем месте.

**Связь между классом и вариантом захоронения удаляемых ТРО
в соответствии с критериями приемлемости**

Класс РАО	Характеристика РАО	Вариант захоронения РАО
1.	ВАО	Пункт глубинного захоронения РАО с предварительной выдержкой в целях снижения их тепловыделения
2.	Долгоживущие САО и ВАО	Пункт глубинного захоронения РАО без предварительной выдержки в целях снижения их тепловыделения
3.	Долгоживущие НАО и САО	Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на глубине до 100 м
4.	Короткоживущие НАО и ОНРАО	Пункт приповерхностного захоронения РАО, размещаемый на одном уровне с поверхностью земли
5.	Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО)	Пункты глубинного захоронения РАО, сооруженные и эксплуатируемые на день вступления в силу 190-ФЗ [1]
6.	Другие РАО*	Пункт приповерхностного захоронения РАО

* РАО, образующиеся при добыче и переработке урановых руд и при осуществлении видов деятельности (не связанных с использованием атомной энергии) по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

По нашему мнению значение величины τ_{RW} должно влиять (через определение понятий долгоживущие/короткоживущие РАО) на идентификацию класса удаляемых ТРО, передаваемых на захоронение НО РАО (возможный механизм такого учета рассмотрен далее в разделах 2 и 3 настоящей работы).

Уровни изъятия для умеренных (EL_1) и больших (EL_2) количеств твердого материала получены с использованием консервативной модели, базирующейся на дозовых критериях и наборе типовых сценариев (в том числе маловероятных) рециклирования и захоронения отходов ([9, 10] в случае величины (EL_1) и [11] в случае величины (EL_2)). При непревышении указанных выше уровней изъятия к твердому материалу (в зависимости от его количества) нет необходимости применять регулирующий (радиационный) контроль [4, 7, 12].

В зависимости от радионуклида значения величины $\eta = ПЗВА / УАНИ$ ($\eta = EL_1 / EL_2$) варьируют в широком диапазоне от 10^0 до 10^4 [2, 4, 8]. Например, $\eta = 10^0$ для ^{235}Pu , ^{237}Np и ^{243}Cm ; $\eta = 10^1$ для ^{144}Ce , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu и ^{241}Am ; $\eta = 10^2$ для ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs ; $\eta = 10^3$ для ^{63}Ni , ^{106}Ru и ^{125}Sb ; $\eta = 10^4$ для ^3H , ^{14}C и ^{36}Cl . Для 113 техногенных радионуклидов ПЗВА (EL_1) совпадает с УАНИ (EL_2), то есть $\eta = 1$.

Согласно стандартам МАГАТЭ [4, 6, 12] к РАО относятся отходы, которые не могут быть освобождены от регулирующего контроля.

Принципиальное отличие российской системы классификации РАО [1, 2] от рекомендованной в стандартах МАГАТЭ [6] и принятой во многих странах мира состоит в том, что в России твердые отходы, для которых индекс ТРО не превышает единицу, но которые не могут быть освобождены от РК, не относятся к РАО. Такие отходы классифицируются как очень низкоактивные отходы (ОНАО) [13, 14].

Условия отнесения твердых отходов к ОНАО записываются в виде [13]:

$$I_{ecw} > 1, I_{SRW} \leq 1. \quad (5)$$

В дальнейшем целесообразность и обоснованность сохранения такого различия в системах классификации РАО не очевидна.

Действительно, при разработке 190-ФЗ [1] одна из главных причин невключения ОНАО в состав РАО состояла в возможности захоронения таких отходов экономичным и безопасным способом (приповерхностная локализация отходов) в пунктах захоронения (ПЗ) ОНАО, сооружаемых, например, на земельных участках атомных станций [13]. Для РАО возможность такого захоронения исключалась до принятия 190-ФЗ [1] и распоряжения Правительства Российской Федерации [15].

В соответствии со статьями 12 и 27 190-ФЗ [1] по решению Правительства Российской Федерации организации, в результате осуществления деятель-

ности которых по добыче и переработке урановых руд образуются РАО, и организации, эксплуатирующие особо радиационно опасные и ядерно-опасные производства и объекты и осуществляющие деятельность, в результате которой образуются ОНРАО, могут захоранивать указанные отходы без их кондиционирования в пунктах приповерхностного захоронения РАО, которые размещены на используемых такими организациями земельных участках.

Распоряжением Правительства Российской Федерации [15] утвержден перечень из 12 организаций (включая, в том числе, АО «Концерн Росэнергоатом»), которым разрешено захоронение указанных отходов в ПЗ РАО, размещенных на земельных участках этих организаций. Однако практической реализации захоронения ОНРАО в ряде случаев препятствует требование статьи 40 190-ФЗ [1], согласно которой в течение года с момента возникновения права собственности у юридического лица на ПЗ РАО необходимо отчуждать его в собственность НО РАО. Это требование демотивирует соответствующие организации на захоронение ОНРАО собственными силами.

В работе [16] обоснована целесообразность совместного захоронения ОНАО и ОНРАО (как это было сделано на Балаковской АЭС в 2005 г.) с целью снижения затрат без ущерба для безопасности персонала, населения и окружающей среды, то есть обоснована принципиальная возможность включения ОНАО в категорию ОНРАО.

В случае гармонизации российской системы классификации РАО с рекомендациями МАГАТЭ условие отнесения твердых отходов к ТРО примет вид:

$$I_{есв} > 1. \quad (6)$$

При этом нет необходимости вносить изменения в 190-ФЗ [1], будет достаточно внести изменения в постановление Правительства [2]: в качестве нижней границы (в единицах удельной активности) отнесения твердых отходов к ТРО вместо ПЗУА (EL_1) следует принять УАНИ (EL_2).

Также нельзя не отметить сложности в определении перечня радионуклидов, содержание которых необходимо учитывать при отнесении отходов

к РАО. В постановлении Правительства [2] определен перечень из 275 радионуклидов, для которых установлены ПЗУА. Актуальной задачей является обоснованный выбор подлежащих учету радионуклидов из указанного перечня с учетом реальных радиационных характеристик рассматриваемых отходов. Для решения этой задачи необходимо установить соответствующий критерий, например, в НП-093-14 [17].

Потенциальная опасность РАО обусловлена возможностью попадания радионуклидов в окружающую среду в результате деградации системы физических барьеров, что может иметь негативные последствия для многих поколений. В связи с этим предлагается установить следующий критерий: перечень радионуклидов в паспорте на упаковку удаляемых РАО должен включать радионуклиды, суммарный вклад которых в дозу планируемого и потенциального облучения³ персонала и населения, создаваемую в период потенциальной опасности РАО⁴, составляет не менее 99 %.

2. Категории ТРО

В постановлении Правительства [2] и ОСПОРБ-99/2010 [8] критерии категоризации ТРО установлены в терминах удельных активностей трития, бета-излучающих радионуклидов (кроме трития), альфа-излучающих радионуклидов (кроме трансурановых) и трансурановых радионуклидов (таблица 2).

Термины удельная активность «бета-излучающих радионуклидов», «альфа-излучающих радионуклидов (кроме трансурановых)» и «трансурановых радионуклидов» не являются строгими и их использование в нормативных документах, регламентирующих обеспечение безопасности при обращении с РАО, создает трудности, а сама суммарная активность радионуклидов характеризует лишь частоту ядерных переходов и не отражает уровень радиологической опасности отходов.

РАО с одним и тем же значением удельной активности альфа-излучающих или бета-излучающих радионуклидов, в зависимости от конкретного радионуклидного состава, могут соответствовать различные радиологические опасности.

³ Потенциальное облучение – облучение, которого нельзя ожидать с абсолютной уверенностью, но которое может иметь место в результате аварии с источником, либо события или последовательности событий гипотетического характера, включая отказы оборудования и ошибки во время эксплуатации [4, 5].

⁴ Период потенциальной опасности РАО – срок, в течение которого уровни радиоактивности РАО снижаются до показателей, при которых не требуется радиационный контроль [1].

Таблица 2

Категории твердых радиоактивных отходов

Категория отходов	Удельная активность, Бк/г			
	Тритий	Бета-излучающие радионуклиды (кроме трития)	Альфа-излучающие радионуклиды (кроме трансурановых)	Трансурановые радионуклиды
В постановлении Правительства [2]				
ОНРАО	до 10 ⁷	до 10 ³	до 10 ²	до 10 ¹
НАО	от 10 ⁷ до 10 ⁸	от 10 ³ до 10 ⁴	от 10 ² до 10 ³	от 10 ¹ до 10 ²
САО	от 10 ⁸ до 10 ¹¹	от 10 ⁴ до 10 ⁷	от 10 ³ до 10 ⁶	от 10 ² до 10 ⁵
ВАО	более 10 ¹¹	более 10 ⁷	более 10 ⁶	более 10 ⁵
До принятия постановления Правительства [2]				
НАО	от 10 ⁶ до 10 ⁷	до 10 ³	до 10 ²	до 10 ¹
САО	от 10 ⁷ до 10 ¹¹	от 10 ³ до 10 ⁷	от 10 ² до 10 ⁶	от 10 ¹ до 10 ⁵
ВАО	более 10 ¹¹	более 10 ⁷	более 10 ⁶	более 10 ⁵

В таблице 2 разбиение радионуклидов на группы неоднозначно. Так, например, ²⁴¹Pu как трансурановый радиоактивный элемент и почти чистый бета-излучатель (вклад других видов излучения составляет менее 0,0025 %) [18] относится как к группе «бета-излучающие радионуклиды (кроме трития)», так и к группе «трансурановые радионуклиды». Если рассматривать ²⁴¹Pu только как трансурановый радионуклид, то отходы, содержащие исключительно этот радиоизотоп с удельной активностью 50 Бк/г, относятся к категории НАО (класс 3). Те же отходы при рассмотрении ²⁴¹Pu только как бета-излучателя относятся к категории ОНАО, то есть не являются РАО (по оценкам АО «ВНИИАЭС» затраты на захоронение ОНАО атомных станций России на 31.12.2017 примерно в девять раз меньше, чем при захоронении ТРО класса 3).

Из таблицы 2 видно, что верхняя граница по удельной активности ³H (10⁷ Бк/г) при отнесении твердых отходов к ОНРАО в 10 раз превышает его ПЗУА (10⁶ Бк/г).

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [19] при характеристике РАО представляют интерес следующие трансурановые радиоактивные элементы⁵:

²³⁷₉₃Np ($T_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$ лет), ²³⁸₉₄Pu ($T_{1/2} = 87,7$ лет), ²³⁹₉₄Pu ($T_{1/2} = 24\ 110$ лет), ²⁴⁰₉₄Pu ($T_{1/2} = 6\ 564$ лет), ²⁴¹₉₄Pu ($T_{1/2} = 14,29$ лет), ²⁴²₉₄Pu ($T_{1/2} = 3,75 \cdot 10^5$ лет), ²⁴¹₉₅Am

($T_{1/2} = 432,6$ лет), ²⁴²₉₆Cm ($T_{1/2} = 162,94$ суток), ²⁴³₉₆Cm ($T_{1/2} = 29,1$ лет), ²⁴⁴₉₆Cm ($T_{1/2} = 18,1$ лет). Для всех долгоживущих радионуклидов из этого перечня (²³⁷₉₃Np, ²³⁸₉₄Pu, ²³⁹₉₄Pu, ²⁴⁰₉₄Pu, ²⁴²₉₄Pu, ²⁴¹₉₅Am, ²⁴³₉₆Cm) предельные значения удельной активности совпадают и равны 1 Бк/г [2]. Для короткоживущих трансурановых радионуклидов ПЗУА составляет 10¹ Бк/г (²⁴⁴₉₆Cm) и 10² Бк/г (²⁴¹₉₄Pu и ²⁴²₉₆Cm).

Учитывая вышесказанное можно заключить, что верхняя граница по удельной активности трансурановых радионуклидов (10¹ Бк/г) при отнесении твердых отходов к ОНРАО в 10 раз превышает ПЗУА (10⁰ Бк/г) долгоживущих радионуклидов из этого ряда.

При характеристике РАО представляют интерес следующие альфа-излучающие радионуклиды⁶ (исключая трансурановые радионуклиды): ²³⁵₉₂U ($T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8$ лет) и ²³⁸₉₂U ($T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ лет) [19], ПЗУА которых совпадают и равны 10 Бк/г⁷ [2]. Следовательно, верхняя граница по удельной активности этой группы радионуклидов (10² Бк/г) при отнесении твердых отходов к ОНРАО в 10 раз превышает их ПЗУА (10¹ Бк/г).

В категории ОНРАО разброс значений отношения верхней границы по удельной активности отдельных бета-излучающих радионуклидов (исключая тритий) к их ПЗУА достигает четырех порядков. Например, для ⁶³₂₈Ni ($T_{1/2} = 100,1$ лет) это отношение равно 10⁻², ¹³⁵₅₅Cs ($T_{1/2} = 2,3 \cdot 10^6$ лет) – 10⁻¹,

⁵ Радиоактивные химические элементы, расположенные в периодической системе элементов Д. И. Менделеева за ураном, то есть с атомным номером $Z > 92$.

⁶ Подавляющее большинство искусственных (техногенных) альфа-излучающих ядер сосредоточено в области трансураниевых ядер, то есть с атомным номером $Z > 82$ и массовым числом $A \geq 140$ (есть несколько исключений).

⁷ В условиях равновесия с дочерними радионуклидами: ²³⁵₉₂U с ²³¹₉₀Th и ²³⁸₉₂U с ²³⁴₉₀Th и ^{234m}₉₁Pa [2].

$^{93}_{42}\text{Mo}$ ($T_{1/2} = 4,0 \cdot 10^3$ лет) – 10^0 , $^{90}_{38}\text{Sr}$ ($T_{1/2} = 29,1$ лет)⁸ – 10^1 , $^{60}_{27}\text{Co}$ ($T_{1/2} = 5,271$ лет) – 10^2 [2].

Таким образом, можно заключить, что ширины диапазонов по удельной активности для каждой из представленных в таблице 2 групп радионуклидов (кроме группы бета-излучающих радионуклидов без учета трития) в единицах, характерных для каждой группы радионуклидов ПЗУА, совпадают и равны 10.

Установить характерное ПЗУА для бета-излучающих радионуклидов не представляется возможным ввиду указанных выше обстоятельств.

В таблице 2 для НАО и САО отношения верхней и нижней границ диапазонов удельной активности внутри рассматриваемых групп радионуклидов совпадают и для НАО составляют 10^1 , для САО – 10^3 .

Подход к делению РАО на категории по уровню удельной суммарной активности является отголоском предыдущих этапов использования атомной энергии, когда определение удельных активностей отдельных радионуклидов было сопряжено со значительными сложностями, либо вообще невозможно.

С развитием средств и методов контроля стало возможным проведение детальных спектрометрических и радиометрических измерений, позволя-

ющих определять содержание в РАО конкретных радионуклидов. Этот факт находит отражение в установлении критерия (2) отнесения отходов к ТРО по содержанию в них отдельных радионуклидов.

При современном уровне развития науки и техники в области радиационного контроля представляется не целесообразным использовать для категоризации РАО критерии по удельной суммарной активности, в то время как в паспортах на РАО приводится детальная информация о радионуклидном составе и удельных активностях отдельных радионуклидов в соответствии с НП-093-14 [17].

Использование в качестве критериального параметра удельной суммарной активности без учета радиологической опасности отдельных радионуклидов, как правило, приводит к значительному излишнему консерватизму при определении категории (а затем и класса) РАО, многократному завышению объемов РАО высоких категорий и, как следствие, неоправданным затратам на захоронение удаляемых РАО.

Необходимо отметить, что для ряда радионуклидов установленные ПЗУА в постановлении Правительства [2] превышают уровни отнесения к НАО или даже к САО. Перечень таких радионуклидов приведен в таблице 3. Рассмотрим, к чему это может привести на практике.

Таблица 3

Радионуклиды с ПЗУА выше уровней отнесения к различным категориям ТРО [2,8]

Радионуклид	ПЗУА, Бк/г	Удельная активность, Бк/г	
		ОНРАО	НАО
^{14}C	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{36}Cl	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{53}Mn	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{55}Fe	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{59}Ni	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{63}Ni	10^5	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{93}Zr	10^3	до 10^3	$10^3 - 10^4$
$^{93\text{m}}\text{Nb}$	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{97}Tc	10^3	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{99}Tc	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
^{135}Cs	10^4	до 10^3	$10^3 - 10^4$
$^{241}\text{Pu}^*$	10^2	до 10^1	$10^1 - 10^2$
^{242}Cm	10^2	до 10^1	$10^1 - 10^2$
^{244}Cm	10^1	до 10^1	$10^1 - 10^2$

*При рассмотрении ^{241}Pu только как трансуранового радионуклида и игнорировании его принадлежности к бета-излучающим радионуклидам.

⁸ В условиях равновесия ^{90}Sr с дочерним радионуклидом ^{90}Y [2].

Например, твердые отходы с удельной активностью ^{63}Ni ($T_{1/2} = 100,1$ лет), незначительно меньшей соответствующего ПЗУА (10^5 Бк/г), при отсутствии других радионуклидов можно отнести, с одной стороны, к ОНАО (то есть к не радиоактивным отходам), с другой стороны – к категории САО, если ориентироваться на таблицу 2. Исходя из определения «долгоживущие РАО» [2], такие отходы следует отнести к классу 2 (долгоживущие САО). Тариф на захоронение РАО класса 2 (593 974,63 руб./м³ в 2017 г.) [20] превышает, например, затраты на захоронение ОНАО атомных станций (15 000 руб./м³ в 2017 г. по оценке АО «ВНИИАЭС») примерно в 40 раз.

Указанные выше обстоятельства на практике сопряжены с многократным ростом затрат на обращение с РАО. Так, при учете в РАО атомных станций рассмотренного выше радионуклида ^{63}Ni , содержание которого, как правило, близко к содержанию радионуклида ^{60}Co , РАО могут быть отнесены к более высокой категории, чем следовало ожидать.

Пусть, например, в ТРО удельные активности ^{60}Co и ^{63}Ni составляют соответственно 4 кБк/г и 8 кБк/г. Для таких отходов индекс ТРО равен:

$$I_{SRW} = \frac{4 \cdot 10^3}{10^1} + \frac{8 \cdot 10^3}{10^5} = 4 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^{-2} = 400,08 \approx 4 \cdot 10^2. \quad (7)$$

^{60}Co ^{63}Ni ^{60}Co ^{63}Ni

Из выражения (7) видно, что значение величины практически полностью определяется ^{60}Co . Удельная активность бета-излучающих радионуклидов в ТРО (в отсутствие других бета-излучателей) составляет 12 кБк/г, что требует их отнесения к САО, при этом удельная активность ^{63}Ni составляет всего 8 % его ПЗУА и вклад этого радионуклида в индекс ТРО составляет 0,02 %.

При учете в ТРО только ^{60}Co их следует отнести к короткоживущим НАО (класс 4), тогда как учет в отходах только ^{63}Ni вообще выводит их за пределы РАО. Получается, что объединение двух равных по массе партий отходов (НАО с удельной активностью ^{60}Co на уровне 8 кБк/г и ОНАО с удельной активностью ^{63}Ni на уровне 16 кБк/г) приводит к образованию долгоживущих САО (класс 2).

Система категоризации РАО по нашему мнению должна базироваться на критериях, учитывающих радиологическую опасность отдельных радионуклидов. Так, например, в США для классификации коммерческих РАО установлены уровни отнесения к различным классам для отдельных радионуклидов [21].

Для совершенствования российской системы классификации РАО логичным представляется

применение следующего подхода. В качестве параметра, характеризующего радиологическую опасность радионуклидов, целесообразно использовать их ПЗУА [2].

Критерии категоризации ТРО могут быть сформулированы на основе индекса отходов, определяемого формулой (1), и выполненного выше анализа диапазонов значений удельной активности радионуклидов, входящих в различные группы, для различных категорий ТРО (таблица 2).

В первом приближении в качестве критериев категоризации ТРО можно принять индексы отходов, рассчитываемые отдельно для различных групп радионуклидов.

Верхняя граница диапазона значений индекса твердых отходов θ_{ij} для радионуклидов группы i в категории отходов j может быть определена по формуле:

$$\theta_{ij} = \frac{\Psi_{ij}^{\max}}{ПЗУА_i^{\min}}, \quad (8)$$

где:

Ψ_{ij}^{\max} – верхняя граница диапазона значений удельной активности радионуклидов группы i ($i = 1, 2, 3$ и 4 соответственно для трития, бета-излучающих радионуклидов (исключая тритий), альфа-излучающих радионуклидов (исключая трансураниевые радионуклиды) и трансураниевых радионуклидов) в категории отходов j ($j = 1, 2, 3$ и 4 соответственно для ОНАО, НАО, САО и ВАО);
 $ПЗУА_i^{\min}$ – минимальное ПЗУА радионуклида в группе i [2].

Например, для категории ОНАО ($j = 1$) из соотношения (8) с учетом таблицы 2 и значений ПЗУА [2] получим:

$$\theta_{11} = \theta_{31} = \theta_{41} = 10^1, \quad \theta_{21} = 10^2. \quad (9)$$

Указанный подход к категоризации ТРО приведен в таблице 4.

Однако использование на практике при категоризации РАО отдельных индексов отходов для различных групп радионуклидов представляется не оптимальным.

Следующим шагом может быть обобщение представленных в таблице 4 результатов и переход к принципиально новой системе категоризации ТРО на базе индекса отходов, рассчитываемого по всем содержащимся и указанным в паспорте на РАО радионуклидам. В таблице 5 ширина диапазона индекса ТРО для ОНАО унифицирована по всем группам радионуклидов и составляет один порядок.

Таблица 4

Категоризация ТРО на основе индекса отходов, рассчитываемого отдельно для различных групп радионуклидов

Категория РАО	Тритий	Бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий)	Альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
ОНРАО	от 10^0 до 10^1	от 10^0 до 10^2	от 10^0 до 10^1	от 10^0 до 10^1
НАО	от 10^1 до 10^2	от 10^2 до 10^3	от 10^1 до 10^2	от 10^1 до 10^2
САО	от 10^2 до 10^5	от 10^3 до 10^6	от 10^2 до 10^5	от 10^2 до 10^5
ВАО	более 10^5	более 10^6	более 10^5	более 10^5

Таблица 5

Предлагаемые критерии категоризации ТРО на основе индекса отходов I_{SRW}

Категория РАО	Индекс отходов
ОНРАО	от 10^0 до 10^1
НАО	от 10^1 до 10^2
САО	от 10^2 до 10^5
ВАО	более 10^5

3. Классификация РАО по периоду потенциальной опасности

В настоящее время в нормативно-правовых документах существует неопределенность в части классификации РАО по периоду их потенциальной опасности.

Так, в 190-ФЗ [1] (статья 12) определено понятие «короткоживущие РАО» как «радиоактивные отходы, удельная активность которых в результате распада радионуклидов за время хранения может быть снижена до уровня, при котором такие отходы перестают быть радиоактивными отходами».

В НП-058-14 [22] установлено, что срок хранения короткоживущих РАО не должен превышать срока их промежуточного хранения⁹ и срока

службы пункта хранения (хранилища) РАО.

В постановлении Правительства [2] определено понятие «долгоживущие РАО» как отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 31 года¹⁰. Такое определение долгоживущих РАО было первоначально позаимствовано из ГОСТ Р 50996-96 [23], в котором в разделе «Стандартизованные термины и определения» устанавливалось, что «долгоживущие отходы – РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 30 лет», а «короткоживущие отходы – РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет».

В постановлении Правительства [2] по сути дано также определение понятию «долгоживущие радионуклиды» – как радионуклиды с периодом

⁹ Приказом Госкорпорации «Росатом» от 07.07.2014 № 1/24-НПА для организаций, эксплуатирующих радиационно опасные и ядерно-опасные производства и объекты, установлен единый срок (10 лет) промежуточного хранения РАО.

¹⁰ Постановлением Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 № 95 внесены изменения в постановление Правительства [2] в части исключения явной опечатки: замена ^{228}U на ^{238}U и изменения критерия отнесения радионуклидов к долгоживущим (30 лет заменены на 31 год); тогда как следовало исправить период полураспада ^{137}Cs с 30,2 года на 30,0 лет. Такое значение периода полураспада ^{137}Cs используется в публикациях НКДАР ООН, стандартах МАГАТЭ (Руководство по безопасности № GSG-1 [6]), USA Codes Federal Regulation (CFR's) [21] и НРБ-99/2009 [5].

полураспада более 31 года (ранее – 30 лет), антонимом которого является понятие «короткоживущие радионуклиды»¹¹ – как радионуклиды с периодом полураспада не более 31 года (ранее – 30 лет).

В постановлении Правительства [2] понятие «короткоживущие РАО», в отличие от 190-ФЗ [1], используется имплицитно как антоним понятия «долгоживущие РАО» и по этой причине, по мнению законодателя, не требует дополнительного определения.

Из вышесказанного видно, что понятия «долгоживущие РАО» из постановления Правительства [2] и «короткоживущие РАО» из 190-ФЗ [1], которые должны быть антонимами, по сути таковыми не являются и относятся к различным этапам обращения с РАО.

Наряду с указанным несоответствием, определение «долгоживущие РАО» в постановлении Правительства [2] (равно как и в ГОСТ Р 50996-96 [23]) имеет еще один принципиальный недостаток, обусловленный тем, что понятие «не долгоживущие (короткоживущие) РАО» в постановлении Правительства [2] эксплицитно не установлено. В отсутствии иных нормативных документов, предполагая, что понятия «долгоживущие РАО» и «недолгоживущие РАО» должны иметь противоположное значение, к недолгоживущим (короткоживущим) РАО следует отнести отходы, не содержащие долгоживущих радионуклидов, то есть радионуклидов с периодом полураспада более 31 года.

На практике такие отходы не существуют, поскольку вопрос обнаружения какого-либо количества долгоживущих радионуклидов ($T_{1/2} > 31$ год) в отходах заключается исключительно в точности применяемых методов измерений, каждый из которых к тому же имеет отличные от нуля нижние границы диапазона измерений содержания радионуклидов в РАО. Это означает, что в настоящее время все НАО следует отнести к классу 3, а САО – к классу 2 (таблица 1).

Отмеченные выше обстоятельства требуют уточнения применяемых при классификации РАО понятий и внесения соответствующих корректировок в регулирующие документы. При этом в международной практике сформирована самосогласованная классификация РАО по периоду потенциальной опасности.

Так, согласно Глоссарию МАГАТЭ [12] «долгоживущие РАО – радиоактивные отходы,

которые содержат значительные уровни радионуклидов с периодом полураспада более 30 лет. Короткоживущие РАО – радиоактивные отходы, которые не содержат значительных уровней радионуклидов с периодом полураспада более 30 лет».

В классификации МАГАТЭ [12] понятия «долгоживущие РАО» и «короткоживущие РАО» являются антонимами, что позволяет реально разделять отходы на различные группы при должном определении понятия «значительные уровни радионуклидов». Что важно, такие определения взаимовязанных понятий позволяют принципиально существовать на практике обоим видам РАО – как долгоживущим, так и короткоживущим.

В предыдущей редакции рекомендаций МАГАТЭ по классификации радиоактивных отходов [24] приведен количественный критерий для понятия «значимый уровень радионуклидов»: в короткоживущих НАО и САО максимальная суммарная удельная активность альфа-излучающих радионуклидов в отдельной упаковке РАО составляет 4 МБк/кг, при этом в среднем по хранилищу удельная активность альфа-излучающих радионуклидов не должна превышать 0,4 МБк/кг. В Руководстве по безопасности МАГАТЭ № GSG-1 [6] рекомендации в отношении количественных критериев «значительных уровней радионуклидов» отсутствуют.

На смысловом уровне понятию «короткоживущие РАО» из 190-ФЗ [1] больше соответствует введенное в Руководстве по безопасности МАГАТЭ № GSG-1 [6] альтернативное понятие «очень короткоживущие отходы». Это отходы, которые «могут находиться на хранении до нескольких лет, а затем выводиться из-под регулирующего контроля в соответствии с порядком, утвержденным регулирующим органом, для неконтролируемого захоронения, использования или сброса».

В международной практике применяются различные подходы к определению понятий «короткоживущие РАО» и «долгоживущие РАО». Так, согласно закону Украины «Об обращении с РАО» [25]: короткоживущие РАО – РАО, для которых уровни освобождения из-под регулирующего контроля достигаются не более чем через 300 лет после захоронения. В постановлении Правительства Финляндии [26] применяются следующие критерии:

¹¹ В Руководстве по безопасности МАГАТЭ № GSG-1 [10] определено: «С точки зрения безопасности радиоактивных отходов радионуклид с периодом полураспада менее 30 лет считается короткоживущим».

- короткоживущие РАО – РАО, удельная активность которых через 500 лет не превысит 100 МБк/кг для отдельной упаковки РАО и 10 МБк/кг в среднем для ячейки захоронения;

- долгоживущие РАО – РАО, удельная активность которых через 500 лет превысит 100 МБк/кг для отдельной упаковки РАО или 10 МБк/кг в среднем для ячейки захоронения.

В классификации РАО Венгрии и Чехии руководствуются рекомендациями [24].

Для разрешения обозначенных проблемных вопросов логичным представляется уточнение российской классификации РАО на основе понятия «период потенциальной опасности радиоактивных отходов». Используя это понятие можно откорректировать классификацию РАО: уточнить определения «долгоживущие РАО» и «короткоживущие РАО» и ввести понятие «очень короткоживущие РАО».

Так, предлагается использовать следующие определения:

- долгоживущие РАО – РАО, период потенциальной опасности которых превышает 300 лет;
- короткоживущие РАО – РАО, период потенциальной опасности которых не превышает 300 лет;
- очень короткоживущие РАО – РАО, период потенциальной опасности которых не превышает срока их промежуточного хранения и срока службы пункта хранения (хранилища) РАО.

Рекомендация принять критерий «300 лет» имеет следующее обоснование. Как известно, одним из основных физических барьеров является упаковка РАО. Конструкция контейнера и конструкционные материалы контейнера, как элементы упаковки, должны обеспечивать сохранение его целостности и работоспособности в период последующего этапа обращения с упаковкой РАО.

В России (ОАО «345 механический завод») создан и уже 15 лет успешно эксплуатируется

технологический комплекс по серийному производству невозвратных железобетонных защитных контейнеров для хранения и захоронения РАО НЗК-150-1,5П и НЗК-150-1,5П(С), срок эксплуатации которых 300 лет [27].

В таблице 6 показана зависимость класса удаляемых ТРО от их категории и периода потенциальной опасности с учетом сформулированных в настоящей работе предложений. В этой таблице границы диапазонов значений индекса I_{SRW} для различных категорий ТРО во многом обусловлены действующей системой категоризации ТРО [2].

Выбор оптимальных граничных значений индекса I_{SRW} с учетом принятых базовых способов захоронения РАО (таблица 1) представляет большую научную и практическую проблему, решение которой позволит сократить затраты на захоронение РАО при соблюдении современных требований безопасности персонала, населения и окружающей среды.

Выводы

Предложенная в работе корректировка системы классификации РАО по мнению авторов позволит:

- устранить внутренние противоречия и неточности системы;
- исключить излишний консерватизм при классификации РАО (в частности, обеспечить на практике возможность отнесения части НАО к классу 4, а части САО – к классу 3, что в настоящее время, как правило, исключено);
- оптимизировать на всех этапах (включая захоронение) процедуры обращения с РАО.

Однако предложенные изменения требуют серьезной дальнейшей проработки (в том числе в части обоснования оптимальных граничных значений индекса I_{SRW}) и широкого обсуждения среди заинтересованных специалистов различных ведомств.

Таблица 6

Классификация удаляемых на захоронение ТРО

Категория РАО	Период потенциальной опасности	
	не более 300 лет (короткоживущие РАО)	более 300 лет (долгоживущие РАО)
ОНРАО ($10^0 < I_{SRW} \leq 10^1$)	4	
НАО ($10^1 < I_{SRW} \leq 10^2$)	4	3
САО ($10^2 < I_{SRW} \leq 10^5$)	3	2
ВАО ($I_{SRW} > 10^5$)	1,2*	

*Определяется в зависимости от необходимости предварительной выдержки в целях снижения тепловыделения ВАО.

Список литературы

1. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ (в ред. Федерального закона от 02.07.2013 № 188-ФЗ).
2. 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 Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 (в ред. Постановления Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 № 95).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Standard Series No 115, Vienna (1996).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, Vienna (2014).
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series, No GSG-1, Vienna (2009).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10.
9. EUROPEAN COMMISSION, Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) Below which Reporting is not Required in the European Directive, Radiation Protection 65, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (1993).
10. NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not Included in the European Basic Safety Standards Directive (MOBBS, S.F., HARVEY, M.P.), NRPB-R306, Chilton (1998).
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition, IAEA, Vienna (2007).
13. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды. СП 2.6.6.2572-2010 (в ред. постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 12.01.2015 № 2).
14. Гигиенические требования к обращению с промышленными отходами на Федеральном государственном унитарном предприятии «Северное федеральное предприятие по обращению с радиоактивными отходами» (Р ОНАО СевРАО-08). Р 2.6.5.04-08.
15. Перечень организаций, в результате осуществления деятельности которых по добыче и переработке урановых руд образуются РАО, и организации, эксплуатирующие особо радиационно опасные и ядерно-опасные производства и объекты и осуществляющие деятельность, в результате которой образуются ОНРАО, которые могут осуществлять захоронение указанных отходов в ПЗ РАО, размещенных на используемых такими организациями земельных участках: распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.12.2015 № 2499-р.
16. Асмолов В. Г., Барчуков В. Г., Иванов Е. А., Кочетков О. А. Очень низкоактивные отходы в системе обращения с радиоактивными отходами. В ж. Росэнергоатом, № 10, 2014.
17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572.
18. Гусев Н. Г., Дмитриев П. П. Радиоактивные цепочки. Справочник. Энергоатомиздат, М., 1988.
19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18, Vienna (2009).

20. О первоначальном установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов: приказ Минприроды России от 13.03.2013 № 89 (зарегистрирован в Минюсте России 21.05.2013 № 28445) (в ред. Приказа Минприроды России от 24.12.2015 № 557).
21. USA Codes Federal Regulation (CFR's): 10 CFR 61.55 – Waste classification.
22. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения. НП-058-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 5 августа 2014 г. № 347.
23. Сбор, хранение, переработка и захоронение радиоактивных отходов. Термины и определения. ГОСТ Р 50996-96.
24. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series, No 111-G-1.1, Vienna (1994).
25. Об обращении с радиоактивными отходами: Закон Украины от 30.06.1995 № 255/95-ВР (<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/255/95-вр>, дата обращения к ресурсу 20.04.2018).
26. Government Decree (736/2008) on the safety of disposal of nuclear waste, Mauri Pekkarinen (Minister of Economic Affairs), Pasi Mustonen (Senior Adviser), Issued in Helsinki, 27.11.2008 (<https://www.finlex.fi/fi/laki/kaannokset/2008/en20080736.pdf>, дата обращения к ресурсу 20.04.2018).
27. Гатауллин Р. М., Меделяев И. А., Шарафутдинов Р. Б. Использование перспективных технологий для решения проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами. Ядерная и радиационная безопасность, № 4, 2008 (http://www.secncrs.ru/magazine/2008/50/50_22.pdf, дата обращения к ресурсу 20.04.2018).

References

1. On Management of Radioactive Waste and Amendment of some Acts of Law of the Russian Federation: Federal Law No. 190-FZ of 11.07.2011 (as amended by the Federal Law No. 188-FZ of 02.07.2013).
2. On Criteria Used to Define Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, Criteria Used to Define Radioactive Waste as Special Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste, Criteria for the Classification of Removable Waste: Decree of the Government of the Russian Federation No. 1069 of 19.10.2012 (as amended by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 95 of 04.02.2015).
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Standard Series No 115, Vienna (1996).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, Vienna (2014).
5. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). SanPiN 2.6.1.2523-09.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series, No GSG-1, Vienna (2009).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
8. Principal Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). SP 2.6.1.2612-10.
9. EUROPEAN COMMISSION, Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) below which Reporting is not Required in the European Directive, Radiation Protection 65, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (1993).
10. NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not Included in the European Basic Safety Standards Directive (MOBBS, S.F., HARVEY, M.P.), NRPB-R306, Chilton (1998).
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition, IAEA, Vienna (2007).

13. Radiation Safety when Managing NPP Industrial Wastes Containing Technogenic Radionuclides. SP 2.6.6.2572-2010 (as amended by the Decree of the Chief State Sanitary Officer of the Russian Federation No. 2 of 12.01.2015).

14. Hygienic Requirements to Management of Industrial Wastes at the Federal State Unitary Enterprise “Northern Federal Enterprise for Radioactive Waste Management” (R ONAO SevRAO-08). R 2.6.5.04-08.

15. List of organizations generating radioactive wastes, as a result of the uranium ore mining and processing activity, and organizations operating particularly radiation-hazardous wastes and nuclear-hazardous productions and facilities and executing an activity, as a result of which there are generated very low level wastes, which can perform disposal of the mentioned wastes in radioactive waste disposal facilities, located within the land plots used by such organizations: Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2499-r of 07.12.2015.

16. V. G. Asmolov, V. G. Barchukov, E. A. Ivanov, O. A. Kochetkov. Very Low-Level Radioactive Wastes in the Radioactive Waste Management System. Rosenergoatom Journal No. 10, 2014.

17. Federal Safety Regulations in the Field of Atomic Energy Use. Criteria for Accepting Radioactive Waste for Disposal. NP-093-14: approved by Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No. 572 of December 15, 2014.

18. N. G. Gusev, P. P. Dmitriev. Radioactive Chains. Handbook. Energoatomizdat, Moscow: 1988.

19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18, Vienna (2009).

20. On the Initial Establishment of Tariffs for Disposal of Radioactive Wastes: Order of the RF Ministry of Natural Resources No. 89 of 13.03.2013 (registered in the Ministry of Justice of Russia on 21.05.2013 under the No. 28445) (as amended by the Order of the RF Ministry of Natural Resources No. 557 of 24.12.2015).

21. USA Codes Federal Regulation (CFR’s): 10 CFR 61.55 – Waste classification.

22. Federal Safety Regulations in the Field of Atomic Energy Use. Safety in Radioactive Waste Management. General Provisions. NP-058-14: approved by Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No. 347 of August 05, 2014.

23. Collection, Storage, Treatment and Disposal of Radioactive Wastes. Terms and Definitions. GOST R 50996-96.

24. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series, No 111-G-1.1, Vienna (1994).

25. On the Management of Radioactive Wastes: Ukraine Law No. 255/95-VR of 30.06.1995 (<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/255/95-вр>, the date of appealing to the information resource: 20.04.2018).

26. Government Decree (736/2008) on the safety of disposal of nuclear waste, Mauri Pekkarinen (Minister of Economic Affairs), Pasi Mustonen (Senior Adviser), Issued in Helsinki, 27.11.2008 (<https://www.finlex.fi/fi/laki/kaannokset/2008/en20080736.pdf>, the date of appealing to the information resource: 20.04.2018).

27. R. M. Gataullin, I. A. Medelyaev, R. B. Sharafutdinov. Use of Perspective Technologies to Solve the Problems of Safe Handling of Radioactive Wastes. Nuclear and Radiation Safety, No. 4, 2008 (http://www.secnrs.ru/magazine/2008/50/50_22.pdf, the date of appealing to the information resource: 20.04.2018).

