

О СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К ВЫБОРУ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО КЛАССОВ 3 И 4

Д. И. Павлов¹, О. А. Ильина²

¹Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» – «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

²ООО «Компания Бентонит», Москва

Статья поступила в редакцию 19 июня 2020 г.

Рассмотрены различные варианты конструкций и материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ) пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), систематизированы данные о функциях ИББ и их технических характеристиках, сделаны предложения по выбору материалов и конструкций барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 на основе системного подхода.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, приповерхностные пункты захоронения радиоактивных отходов, ПЗРО, инженерные барьеры безопасности, контейнеры для захоронения РАО, бентонит, системный подход.

Введение

Федеральным законом «Обращение с радиоактивными отходами...» [1] предусматривается захоронение кондиционированных РАО в зависимости от класса в приповерхностные или глубинные пункты захоронения. ФЦП по обеспечению ядерной и радиационной безопасности предусмотрено создание нескольких региональных приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) для отходов 3 и 4 классов (классификация в соответствии с [2]).

В 2016 году введен в эксплуатацию первый в РФ приповерхностный ПЗРО на площадке АО «УЭХК». В ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» начаты работы по проектированию ПЗРО на территориях ФГУП ПО «Маяк», АО «СХК», в Красноярском крае и других регионах. При проектировании рассматриваются различные варианты конструкций ПЗРО и материалов инженерных барьеров, однако вопрос выбора наиболее безопасных и экономичных вариантов остается открытым.

Проектирование, строительство и эксплуатация объектов окончательной изоляции — относительно новая для специалистов атомной отрасли РФ область деятельности, для которой еще не сформированы единые подходы, не накоплен опыт и достаточный объем знаний. С учетом предстоящего масштаба работ по захоронению РАО, поиск оптимальных технических решений по выбору конструкций ПЗРО и материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ) на основе системного подхода является весьма актуальной задачей.

О необходимости применения системного подхода

Разработка конструкций ПЗРО для РАО классов 3 и 4 сопряжена с задачей выбора целого ряда технических решений. ПЗРО для низко- и среднеактивных отходов, действующие и проектируемые в разных странах, отличаются глубиной размещения (наземные, полузаглубленные

и подземные, рис. 1), материалами ИББ (сталь, бетон, бентонит и прочих), вместимостью (до 1 млн м³), местом расположения (климат, геология) и другими характеристиками. Некоторые технические решения для действующих ПЗРО сложились исторически или были определены особенностями национальной нормативной базы, социально-политическими факторами. Это делает достаточно сложным выбор референтных технологий для окончательной изоляции РАО.

В ряде работ, например в [3–5], были сделаны попытки провести анализ существующих конструкций ПЗРО и материалов ИББ в разных странах, выявить тенденции в технологиях захоронения и определить оптимальные решения. Однако в целом констатировалось многообразие подходов и необходимость разработки технико-экономических исследований для каждого конкретного случая.

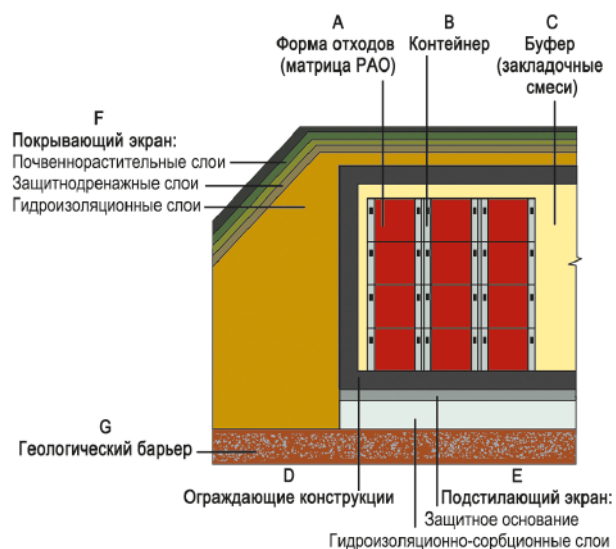
С учетом многообразия способов захоронения, лояльности нормативной базы РФ в вопросах выбора технологий и материалов, масштаба экологических и экономических последствий данного выбора, разработка решений по конструкциям ПЗРО является классическим примером принятия решений в условиях неопределенности.

В данном случае для поиска оптимального решения целесообразно руководствоваться системным подходом [6], так как ПЗРО — совокупность элементов (барьеров), находящихся в отношениях и связях между собой, образующих целостное единство — систему.

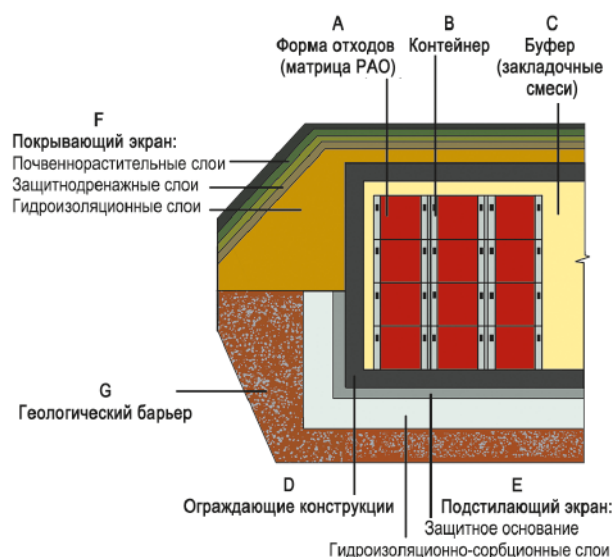
Необходимость применения системного подхода при проектировании ПЗРО указана и в нормативных документах [7, 8]. Однако на сегодняшний день в РФ методики системного анализа в области захоронения РАО не разработаны, а общие методики, например, такие как [9], требуют соответствующей адаптации. Представленные ниже предложения по выбору на системной основе технических решений в отношении барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 при соответствующем развитии могут быть использованы при разработке технико-экономических исследований и проектировании ПЗРО.

О системе барьеров безопасности ПЗРО

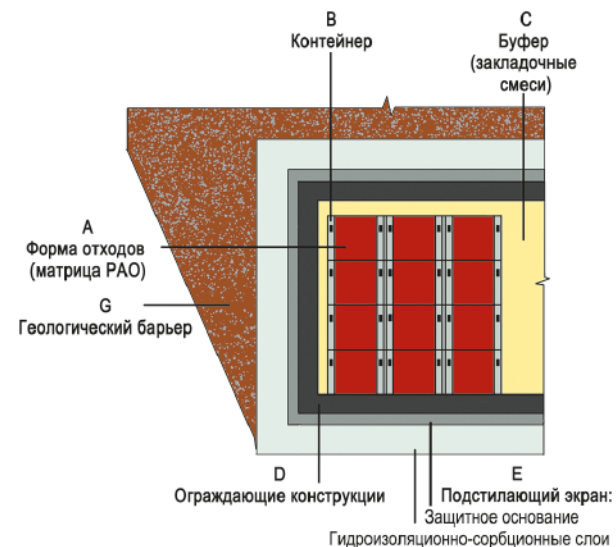
Данные о системе барьеров безопасности (СББ) ПЗРО и перечень ее элементов (барьеров) с указанием их назначения представлены в табл. 1. Они в общих чертах соответствуют конструкции действующего ПЗРО на площадке АО «УЭХК» [10], а также проектируемых ПЗРО на территории АО «СХК» [11] и ФГУП ПО «Маяк» [12].



а) Наземный тип размещения



б) Полузаглубленный тип размещения



в) Подземный тип размещения

Рис. 1. Типовые конструкции пунктов финальной изоляции РАО 3 и 4 классов

Таблица 1. Перечень элементов (защитных барьеров) в системе захоронения РАО классов 3 и 4

Обозначение	Наименование барьера		Назначение
A	Форма отходов (матрица РАО)		• Фиксация радионуклидов в матричном материале
B	Контейнер		• Предотвращение проникновения воды. • Замедление выхода радионуклидов из матричного материала или из первичной упаковки. • Биологическая защита
C	Буфер (закладочные смеси)		• Ликвидация пустот и свободных объёмов. • Сорбция радионуклидов, выходящих из контейнеров. • Предотвращение накопления воды или (в зависимости от решений по обеспечению безопасности) высокая дренирующая способность для минимизации времени контакта воды с упаковками РАО. • Создание нейтральной среды, препятствующей деградации контейнеров
D	Ограждающие конструкции		• Препятствие техногенным и природным воздействиям. • Замедление выхода радионуклидов в геологический барьер или в покрывающий и подстилающий экраны. • Биологическая защита
E	Подстилающий экран*	Защитное основание	• Препятствие техногенным и природным воздействиям. • Восприятие механических нагрузок от барьеров A, B, C, D, F
		Гидроизоляционно-сорбционные слои	• Предотвращение доступа воды к барьерам A, B, C, D. • Сорбция радионуклидов, выходящих из барьеров A, B, C, D
F	Покрывающий экран*	Защитно-дренажные слои	• Препятствие техногенным и природным воздействиям. • Дренаж атмосферных осадков и поверхностных вод, поступающих к гидроизоляционному слою
		Гидроизоляционно-сорбционные слои	• Предотвращение доступа воды к барьерам A, B, C, D. • Сорбция радионуклидов, выходящих из барьеров A, B, C, D (в зависимости от решений по обеспечению безопасности)
		Почвенно-растительные слои	• Формирование устойчивого природного покрытия, препятствующего росту кустарников и деревьев
G	Геологический барьер**		• Предотвращение миграции радионуклидов при деградации инженерных барьеров. • Препятствие техногенным и природным воздействиям

*Для наземных и полузаглубленных ПЗРО.

**Для наземных и полузаглубленных ПЗРО геологический барьер консервативно не рассматривается при оценке безопасности, в соответствии с требованиями [13]

Для обеспечения заданных функций к барьерам безопасности предъявляются различные требования. Общие требования для приповерхностных ПЗРО представлены в [13], к упаковкам для захоронения в [14], к некоторым матрицам — в [15] и [16]. Федеральные нормы и правила и руководства по безопасности при использовании атомной энергии [8, 17] представляют собой системные требования к обеспечению безопасности ПЗРО и подразумевают, что превалирующая часть требований к материалам инженерных барьеров должна определяться проектной документацией. Нормативные требования к барьерным материалам и ограждающим конструкциям

с точки зрения обеспечения защитных функций на сегодняшний день не разработаны. Все это открывает достаточно широкое поле для возможных вариантов технических решений по выбору ИББ.

С учетом проделанной работы в части обзора технологий захоронения [3–5], в самом общем виде матрица вариантов исполнения барьеров безопасности для ПЗРО представлена в табл. 2.

Очевидно, что у такой матрицы множество комбинаций решений. В связи с этим задача выбора оптимальной конструкции и материала ИББ может быть сведена к пошаговой схеме, представленной на рис. 2.

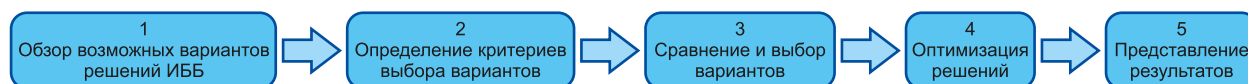


Рис. 2. Пошаговая схема принятия решений

Таблица 2. Матрица вариантов барьеров безопасности для ПЗРО

№ вар.	Параметр										
	A	B	C	D	E1	E2	F1	F2	F3	G	H
	Матрица РАО	Материал контейнера	Материал закладки (буфера)	Материал ограждающих конструкций	Материал подстилающего экрана*		Материал покрывающего экрана*			Вмещающая порода	Тип ПЗРО
Защитное основание					Гидроизоляционный слой	Гидроизоляционный слой	Защитно-дренажный слой	Растительный слой			
1	Битум	Металл	Бентонитовая крупка	Бетон	Щебень	Бентонитовая глина	Бентонитовая глина	Щебень	Грунт	Глины	Наземный
2	Бетон	Бетон	Бетон	Без ограждающих конструкций	Песок	Бентомат	Бентомат	Песок	-	Кристаллические породы	Полузаглубленный
3	Стекло	Прочее (керамика, полиэтилен и др.)	Цементно-бентонитовая смесь	-	Гравийно-песчаная смесь	Геомембрана HDPE/LDPE	Геомембрана HDPE/LDPE	Гравийно-песчаная смесь	-	Соли	Подземный (до 100 м)
4	Ионообменные смолы (ИОС)	-	Песок	-	Бетон	Высокопластичные глины, без требований к минеральному составу	Высокопластичные глины, без требований к минеральному составу	Геокм-позитивные дренажные материалы	-	Прочее	-
5	Солевой плав	-	Щебень	-	-	Битум	Битум	-	-	-	-
6	Металл	-	Смесь бентонита и каолина	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	Песчано-бентонитовая смесь	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Прочее	-	Соль**	-	-	-	-	-	-	-	-

*Для наземного и полузаглубленного типа ПЗРО.

**Для подземных ПЗРО в соляных формациях

■ – некоторые предпочтительные варианты (экспертная оценка)

Похожий алгоритм применяется в широко известном принципе радиационной защиты ALARA [18].

Критерии выбора необходимо определять не только для ИББ, но и для всей системы захоронения в целом, т. к. наилучшее решение для каждого элемента (барьера) не всегда может быть оптимальным для всей СББ.

О критериях выбора вариантов

Каждый элемент ПЗРО выполняет свою определенную роль в системе захоронения и, соответственно, для каждого ИББ существуют свои критерии выбора в соответствии с его назначением.

Количественные критерии приемлемости для барьеров безопасности нормативной базой РФ определены не полностью. Большая часть характеристик, которым должны соответствовать элементы ПЗРО, определяется проектной документацией (локальные критерии приемлемости).

Ключевые для изоляции РАО количественные параметры барьеров безопасности приведены в табл. 3.

Таблица 3. Перечень основных количественных критериев оценки ИББ

№ п/п	Параметр	Единица измерения
1	Срок службы	год
2	Прочность на сжатие	МПа
3	Радиационная стойкость	Гр
4	Модуль упругости	МПа
5	Морозостойкость, (-40 °С – +40 °С)	цикл.
6	Давление набухания (для бентонита)	МПа
7	Паропроницаемость	мг/(м·ч·Па)
8	Водопроницаемость ($K_{\text{фильтрации}}$)	м/сут
9	Толщина	мм (м)
10	Дисперсия	м
11	Плотность	г/см ³
12	Пористость (активная, эффективная)	%
13	Коэффициент распределения (K_d) радиологически значимых радионуклидов	м ³ /кг (мл/г)
14	Коэффициент диффузии радиологически значимых радионуклидов	м ² /с
15	Сорбционная емкость	мг/г (моль/г)

Таблица 4. Некоторые количественные критерии оценки буферных материалов

Параметр	Защитный барьер (буфер)			
	Глина бентонитовая	Бетон	Песок**	Глина каолиновая
Срок службы, год	не ограничен	не менее 100	не ограничен	не ограничен
Модуль упругости, МПа	20–110	$9 \cdot 10^3$ – $4 \cdot 10^4$	40–130	20–110
Морозостойкость, (–40 °С – +40 °С), цикл.	не ограничена	100–1000	не ограничена	не ограничена
Давление набухания (для бентонита), МПа	0,2–10*	-	-	-
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,04–0,06	0,02–0,04	0,15–0,2	0,04–0,06
Водопроницаемость ($K_{\text{фильтрации}}$), м/сут	10^{-8} – 10^{-7}	10^{-9} – 10^{-7}	1–10	10^{-5} – 10^{-4}
Плотность, г/см ³	1,8–2,6	2,2–2,7	1,4–1,9	2,2–2,7
Пористость, %	30–60	10–15***	5–45	6–50
Коэффициент распределения (K_d) радиологически значимых радионуклидов, м ³ /кг****	10^2 – 10^4	$\sim 10^3$	Нет данных	10^2 – 10^3
Коэффициент диффузии радиологически значимых радионуклидов, м ² /с****	10^{-14} – 10^{-11}	10^{-14} – 10^{-13}	Нет данных	10^{-8}
Сорбционная емкость, мг/г	0,8–1,5	Нет данных	Нет данных	0,02–0,10

*Давление набухания – характеристика, применимая только для компактированного (прессованного) бентонита.

**Технические характеристики приведены для песка по ГОСТ 8736-2014.

*** Для тяжелого бетона.

**** Диапазоны значений приведены для ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs.

Параметры 1–9 являются ключевыми для анализа эволюции барьеров ПЗРО, 8–15 – ключевыми для оценки миграции радионуклидов.

Пример количественной оценки некоторых буферных материалов приведен в табл. 4.

Из приведенных в табл. 4 количественных характеристик видно существенное различие между буферными материалами. Решения о том, какой материал для буфера выбрать и какие требования к нему предъявлять, принимаются в проектной документации с учетом конструкции

сооружения захоронения, условий размещения ПЗРО и бюджета на строительство ПЗРО. Целесообразно выглядит разработка отраслевых нормативно-методических документов, включающих системные требования к материалам инженерных барьеров и рекомендации к их применению.

Для вариантов конструктивных решений ПЗРО в большей степени применимы качественные критерии оценки. Пример такой оценки для конструкций ПЗРО представлен в табл. 5.

Таблица 5. Достоинства и недостатки конструкций ПЗРО (качественные критерии оценки)

Достоинства	Недостатки
Наземный	
<ul style="list-style-type: none"> • Невысокие капитальные затраты на строительство [19, 20] • Менее жесткие требования к геологии участка • Простота транспортно-технологической схемы загрузки упаковок 	<ul style="list-style-type: none"> • Влияние сезонных колебаний температур • Большие площади отчуждаемой территории • Сложная многослойная конструкция покрывающего экрана • Необходимость обслуживания покрывающего экрана • Чувствительность к внешним воздействиям (особенно на период загрузки)
Полузаглубленный	
<ul style="list-style-type: none"> • Те же достоинства, что и у наземного варианта, плюс меньшие габариты покрывающих экранов 	<ul style="list-style-type: none"> • Те же недостатки, что и у наземного варианта, плюс: <ul style="list-style-type: none"> - дополнительные объемы земляных работ; - возможность обводнения при колебании уровня грунтовых вод
Подземный / глубинный	
<ul style="list-style-type: none"> • Устойчивость к внешним воздействиям • Отсутствие сезонных перепадов температур • Наличие геологического барьера • Небольшие площади отчуждаемой территории (наземной части ПЗРО) 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие капитальные затраты на строительство [19, 20] • Особые требования к геологии участка • Особые требования к спуско-подъемному оборудованию

В соответствии с подходами системного анализа судить об эффективности выбора технических решений для каждого элемента необходимо по ключевым показателям всей системы как единого целого. Основные критерии, позволяющие оценить эффективность технических решений, формирующих систему захоронения в целом, можно разделить на два вида: критерии безопасности и экономические критерии (см. табл. 6).

Таблица 6. Критерии оценки СББ

№ п/п	Наименование критерия	Единица измерения
Критерии безопасности		
1	Удельная (объемная) активность в объектах окружающей среды	Бк/кг (Бк/м ³)
2	Уровни вмешательства по содержанию отдельных радионуклидов в воде	Бк/кг
3	Дозы облучения персонала	мЗв/год
4	Дозы облучения населения	мЗв/год
5	Скорость миграции радионуклидов через ИББ	м/год
6	Устойчивость к внешним воздействиям	-
7	Скорость и масштабы деградации ИББ	-
8	Надежность технологии	-
9	Референтность	-
Экономические критерии		
10	Капитальные затраты на строительство ПЗРО	руб.
11	Эксплуатационные затраты на ПЗРО	руб./год
12	Затраты на закрытие ПЗРО	руб.
13	Затраты на мониторинг	руб./год
14	Затраты на упаковку и транспортировку РАО до ПЗРО	руб.
15	Удельная стоимость захоронения	руб./м ³
16	Удельная стоимость извлечения (при необходимости)	руб./м ³

Сравнение по критериям, представленным в табл. 6, можно выполнить имея смету на строительство, эксплуатацию и закрытие ПЗРО, а также выполнив комплексную оценку безопасности.

О комплексной оценке безопасности приповерхностных захоронений РАО

Для оценки безопасности приповерхностных ПЗРО существует специальная методология, основанная на системном подходе [21]. В российской нормативной базе общие требования к оценке безопасности изложены в [8], в нормативах МАГАТЭ — в [7].

Для расчета миграции радионуклидов в мире практикуется использование различных

расчетных кодов, отвечающих за моделирование процессов переноса радионуклидов в ИББ, гео- и биосфере, а также процессов деградации барьеров и эволюции ПЗРО.

Для систематизации сценариев эволюции используются подходы, основанные на анализе факторов, событий и процессов, известные в международной практике обоснования безопасности под аббревиатурой FER (Features, Events, Process). Перечни FER представляют собой сотни, а иногда и тысячи различных комбинаций факторов, событий и процессов, влияющих на эволюцию ПЗРО. Методические аспекты учета FER для системы захоронения РАО в РФ освещены в [22].

В основном результаты комплексной оценки безопасности получаются при обработке информации на ЭВМ, однако расчетам предшествует длительная и рутинная работа по сбору и систематизации данных по радионуклидному составу захораниваемых отходов, характеристикам СББ, площадке размещения ПЗРО, анализу сценариев эволюции и проч. В общих чертах схема математического моделирования на ЭВМ при выполнении оценки безопасности представлена на рис. 3.

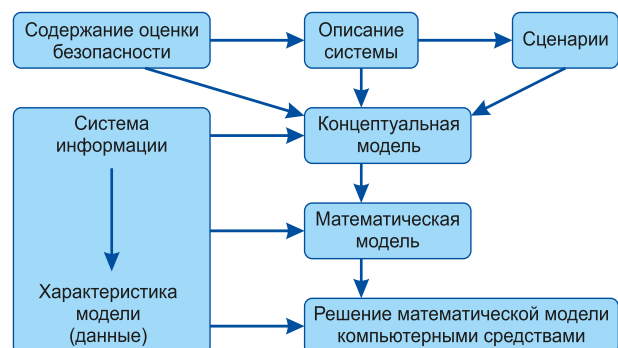


Рис. 3. Схема формирования математической модели и ее расчета компьютерными средствами [21]

Объем работы, предшествующей выполнению расчетов, их сложность и многовариантность сценариев эволюции не позволяют полностью автоматизировать процесс получения результатов комплексной оценки безопасности. В связи с этим представляется проблематичным выполнение анализа применения всех возможных материалов и конструкций ИББ методом их перебора с обчетом на ЭВМ и получением результатов комплексной оценки безопасности. Выполнение расчетов для различных вариантов ИББ целесообразно осуществлять после отбора наиболее перспективных материалов, например, экспертным методом.

Об оценке стоимости различных вариантов ПЗРО

Для комплексного решения задачи по выбору ИББ помимо оценки безопасности требуется экономический анализ возможных вариантов.

Учитывая приоритет безопасности над экономическими факторами и индивидуальный подход к каждому сооружению захоронения, затрачивать усилия на поиск наиболее экономичных конструкций и материалов ИББ целесообразно только в случае получения значимого экономического эффекта. Для этого следует проанализировать

вклад различных ИББ в капитальные и эксплуатационные затраты ПЗРО, а также в функции безопасности, которые ИББ выполняют.

В табл. 7 на основе анализа сметной документации ПЗРО в г. Озёрск (2019 г.), материалов ОБИН на ПЗРО в Северо-Западном территориальном округе (2010 г.), материалов [23] и технико-коммерческих предложений производителей контейнерного оборудования представлены данные о барьерах безопасности и их функциях с указанием вклада в стоимость захоронения. На рис. 4 представлена декомпозиция капитальных и эксплуатационных затрат приповерхностного ПЗРО в г. Озёрск.

Таблица 7. Данные о барьерах безопасности и их функциях с указанием вклада в стоимость захоронения

Наименование элемента ПЗРО	Основные барьерные функции							Вклад в стоимость захоронения			
	Удержание радионуклидов (сорбция, иммобилизация и проч.)	Препятствие накоплению воды (гидроизоляция или дренаж (в зависимости от решений по обеспечению безопасности))	Биологическая защита (защита персонала на период эксплуатации и закрытия)	Препятствие техногенным и природным воздействиям (осадки, эрозия, непреднамеренное вторжение, землетрясение, падение самолета и проч.)	Создание условий для снижения деградации барьеров (заполнение пустот; обеспечение оптимальных значений pH, выравнивание температурных колебаний)	Капитальные затраты на строительство ПЗРО	Эксплуатационные затраты в период загрузки ПЗРО	Затраты на закрытие ПЗРО	% от суммы всех затрат на приобретение/возвращение/создание ИББ		
Форма отходов (матрица РАО)	✓	×	×	×	×	-	-	-	5-15 %		
Контейнер	✓	×	✓	×	×	-	-	-	40-60 %		
Буфер	✓	✓	✓	×	✓	-	20 %	-	3-10 %		
Ограждающие конструкции	✓	✓	✓	×	×	51 %	-	-	15-25 %		
Подстилающий экран	✓	✓	×	✓	×	10 %	-	-	3-5 %		
Покрывающий экран	✓	✓	×	✓	×	-	-	90 %	10-15 %		
Геологический барьер	✓	×	×	✓	✓	-	-	-	-		
Прочие элементы ПЗРО, не являющиеся ИББ	×	×	×	×	×	39 %	80 %	10 %	-		

Примечания:

- 1) Затраты на иммобилизацию РАО (форма отходов) приняты по данным [23].
- 2) Данные по затратам на создание буфера, ограждающих конструкций, подстилающего и покрывающего экранов составлены на основе сметной документации на ПЗРО в г. Озёрск, материалов ОБИН на ПЗРО в Северо-Западном территориальном округе, а также на основе исследований [19, 20, 24].
- 3) Затраты на контейнеры рассчитаны для четырех типов контейнеров: КМЗ; НЗК-150-1,5П; КРАД-1,36, КРАД-3,0 на основании технико-коммерческих предложений поставщиков данных контейнеров.

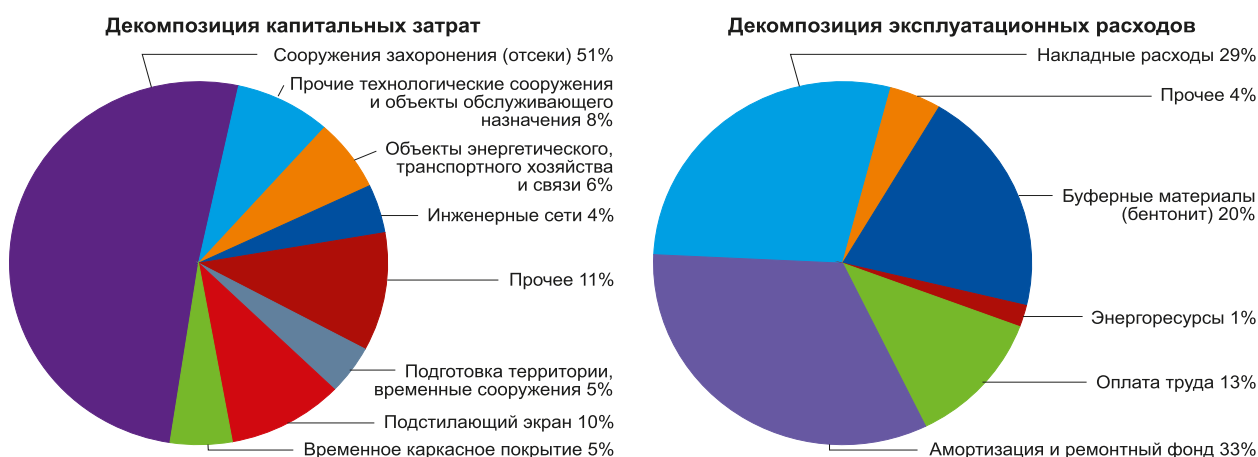


Рис. 4. Декомпозиция капитальных и эксплуатационных затрат приповерхностного ПЗРО

В соответствии с представленными данными в конструкции приповерхностного ПЗРО наблюдается многократное дублирование барьеров, особенно в части функции удержания радионуклидов. При должном качестве прочих барьеров (например, контейнеров) может быть рассмотрен вариант с оптимизацией затрат на ограждающие конструкции в связи с тем, что на возведение данного барьера требуется более половины капитальных затрат на строительство ПЗРО и до 25% от суммы затрат на возведение/приобретение всех барьеров. Возможно, для захоронения НАО целесообразно заместить ограждающие конструкции буферными материалами на основе глин. Подобные технологии предлагались в [25], а также широко используются при захоронении ОНАО.

В целом адекватную экономическую оценку различных конструкций ПЗРО можно осуществить, выполнив расчет сметной стоимости для каждого варианта. Однако все известные методы составления смет, включая аналоговый, требуют в первую очередь серьезной инженерной проработки, которую логично осуществлять для наиболее перспективных (то есть уже отобранных) решений.

Об отборе наиболее перспективных решений по материалам и конструкциям ИББ

С учетом того факта, что задача захоронения низко- и среднеактивных отходов реализуется за рубежом уже несколько десятилетий и наработан богатый международный опыт в данном вопросе, на сегодняшний день нет необходимости делать полную комплексную оценку безопасности и экономики для всех возможных комбинаций материалов и конструкций ИББ. Несмотря на отсутствие четких требований в нормативах РФ по выбору материалов и конструкций ИББ, решить первоначальную задачу отбора наиболее перспективных вариантов можно, систематизировав данные международных практик и используя уже выполненные исследования на данную тему (1 этап отбора).

При выборе референтных технологий в части материалов и конструкций ИББ необходима адаптация решений к условиям площадок размещения ПЗРО в РФ. Для потенциальных площадок на территории ФГУП ПО «Маяк», АО «СХК», в Красноярском крае, Архангельской области необходимы решения, компенсирующие сложные климатические условия и особенности гидрогеологии площадок. В частности, необходимо обратить особое внимание

на морозоустойчивость ИББ (при наземном размещении ПЗРО) и обеспечение барьерами надежной гидроизоляции.

С учетом анализа зарубежных практик захоронения [3–5], изучения рекомендаций и исследований по выбору ИББ [26–30] в табл. 2 предлагаются наиболее перспективные, по мнению авторов, материалы и конструкции ИББ (выделены цветом).

Для данных материалов требуется конкретизация целого ряда параметров, которые необходимо определять в процессе выполнения комплексной оценки безопасности.

Для бентонитового буфера, например, это такие параметры, как:

- содержание основного минерала — монтмориллонита, отвечающего за противодиффузионные и сорбционные свойства и содержание примесей, которые могут негативно сказываться на эволюции системы;
- емкость катионного обмена;
- индекс свободного набухания и проч.

По результатам выбора оптимального решения могут быть созданы предпосылки для совершенствования нормативной базы в области захоронения РАО, в том числе в части требований к контейнерам для захоронения и буферным материалам.

Заключение

Предложен метод выбора инженерных барьеров безопасности и конструкций ПЗРО на основе системного подхода. Метод заключается:

- в создании матрицы решений¹;
- определении критериев выбора решений¹;
- экспертном отборе¹;
- проведении комплексной оценки безопасности отобранных вариантов (стадия ТЭИ)²;
- оценке стоимости захоронения для решений, удовлетворяющих требованиям нормативных документов²;
- выборе наиболее приемлемого варианта по результатам выполненных расчетов и оценок²;
- оптимизации выбранного варианта³.

Для проведения расчетов миграции и сценариев эволюции ПЗРО, а также экономических оценок предложены решения по отбору наиболее перспективных вариантов ИББ, в том числе по возможному отказу/оптимизации избыточных барьеров безопасности.

¹ Предложения сделаны в настоящей статье.

² Целесообразно осуществлять на стадии технико-экономических исследований.

³ Целесообразно осуществлять на стадии проектирования.

Приведены данные по вкладу каждого ИББ в стоимость всей системы ИББ, что может быть полезным для решения задач оптимизации барьеров.

Очевидно, что для комплексной оценки безопасности и экономики возможных конструкций ПЗРО, определения оптимальных требований к материалам требуется взаимодействие научного сообщества, проектировщиков и производственных компаний — производителей контейнерного оборудования и буферных материалов.

Авторы выражают надежду на широкую кооперацию в данном направлении.

Литература

1. Федеральный закон от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».
3. The management of radioactive waste. A description of ten countries / R. Lidskog, A. Andersson: SKB Report, 2002.
4. International low level waste disposal. Practices and facilities: Report of U.S. Department of Energy, 2011.
5. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 24–32.
6. Романов В. Н. Системный анализ для инженеров. СПб: СЗГТУ, 2006. 186 с.
7. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: IAEA Specific Safety Guide № SSG-23, IAEA, Vienna, 2012.
8. РБ-117-16 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».
9. Волкова В. И., Денисов А. А. Основы теории систем и системного анализа. СПб: СПбГТУ, 2001. 512 с.
10. Материалы обоснования лицензии на сооружение (реконструкцию) пункта хранения радиоактивных отходов, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО». URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 20.04.2020).
11. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, городской округ, ЗАТО Северск. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 20.04.2020).
12. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский городской округ. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 20.04.2020).
13. ГОСТ Р 52037-2003. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования.
14. НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.
15. ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования.
16. ГОСТ Р 50927-96. Отходы радиоактивные битумированные. Общие технические требования.
17. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.
18. The application of ALARRP to Radiological risk. A nuclear industry good practice guide: Report of Industry Radiological Protection Coordination Group (IRPCG). URL: https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF%20documents/IRPCG/Application_of_ALARP_to_Radiological_Risk.pdf (дата обращения 20.04.2020).
19. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Стоимость захоронения РАО: зарубежные оценки // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 46–55.
20. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs. Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.
21. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities // IAEA Report, Vienna, 2004.
22. Шарафутдинов Р. Б., Савельева Е. А., Свительман В. С. и др. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 4 (90). С. 1–14.
23. Абрамов А. А., Дорофеев А. Н., Дерябин С. А. и др. РАО в Приволжье разложили по схеме // Атомный эксперт. 2016. № 3-4 (45-46). С. 40-47.
24. Zaccai H., Kunsch P. Radwaste storage and disposal cost assessment in various European countries // Assessment and comparison of waste

management system costs for nuclear and other energy sources. IAEA Technical Report, 1994.

25. Гупало Т. А., Прозоров Л. Б., Глаголенко Ю. В. ПЗРО в Приволжском федеральном округе: предпроектные работы // Атомная стратегия 2.0. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/40647> (дата обращения 20.04.2020).

26. Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste: IAEA-TECDOC-1255, Vienna, 2001.

27. White M., Baldwin T., Hicks T. and others. Engineered Barrier Materials for Geological Disposal Facilities: Galson Sciences LTD, UK. 2008.

28. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е. и др. Современное состояние в разработках и

использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71—84.

29. Rustick J. H. An Integrated Systems Approach to Performance Assessment of Near Surface Disposal Facilities for Low Level Radioactive Waste Management. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Graduate School of Vanderbilt University, USA, Nashville, 2016.

30. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Состояние и основные направления создания парка контейнеров для кондиционирования и захоронения радиоактивных отходов // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 3 (81). С. 18—29.

Информация об авторах

Павлов Дмитрий Игоревич, руководитель направления отдела по обращению с РАО и ООС Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» — «ВНИПИЭТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Ильина Ольга Александровна, директор по развитию, ООО «Компания Бентонит» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 12, стр. 1, офис 24), e-mail: ilina@bentonit.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Павлов Д. И., Ильина О. А. О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 54—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.

ON A SYSTEM APPROACH TO THE SELECTION OF SAFETY BARRIERS FOR THE DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE CLASS 3 AND 4

Pavlov D. I.¹, Ilina O. A.²

¹Saint-Petersburg branch of JSC “FCNIVT “SNPO “ELERON” — “VNIPIET”, Saint-Petersburg, Russia

²Bentonite Company Ltd, Moscow, Russia

Article received on June 19, 2020

The article describes different designs and materials of engineered safety barriers (ESB) for radioactive waste disposal facilities, systematizes the functions and technical specifications of EBS and based on a system approach proposes safety barrier materials and designs for the disposal of radioactive waste class 3 and 4.

Keywords: radioactive waste, surface and near surface disposal facilities, engineered safety barriers, containers for radioactive waste disposal, bentonite, system approach.

References

1. Federalnyj zakon ot 11 iulya 2011 g. No. 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatел'nye akty Rossijskoj Federacii" [Federal Law of July 11 2011 No. 190-FZ "On radioactive waste management and amendment of some acts of law of the Russian Federation"]].
2. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 19.10.2012 No. 1069 "O kriteriyah otneseniya tverdykh, zhidkih i gazoobraznykh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriyah otneseniya radioaktivnykh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalyaemym radioaktivnym othodam i kriteriyah klassifikacii udalyzemykh radioaktivnykh othodov" [Decree of the Government of the Russian Federation of 19 October 2012, no. 1069 "On the criteria of designation of solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, criteria of radioactive waste designation as special radioactive waste and removable radioactive waste and criteria of classification of removable radioactive waste"]].
3. Lidskog R., Andersson A. The management of radioactive waste. A description of ten countries. SKB Report, 2002.
4. International low level waste disposal. Practices and facilities. Report of U.S. Department of Energy, 2011.
5. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Tekhnologii okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov: evropejskiy opyt i tendentsii [Technologies of radioactive waste disposal: European experience and trends]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4(5), pp. 24–32.
6. Romanov V. N. Sistemnyy analiz dlya inzhenerov [System analysis for engineers]. St. Petersburg, NWGTU Publ., 2006. 186 p.
7. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Specific Safety Guide No SSG-23, IAEA, Vienna, 2012.
8. RB-117-16 Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispolzovanii atomnoy energii "Otsenka dolgoversmennoy bezopasnosti punktov pripoverkhnostnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov" [Safety Guide for the use of nuclear energy "Long-term Safety Assessment of near-surface radioactive waste disposal"]].
9. Volkova V. I., Denisov A. A. Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and system analysis]. St. Petersburg, GTU Publ., 2001. 512 p.
10. Materialy obosnovaniya litsenzii na sooruzhenie (rekonstruktsiyu) punkta khraneniya radioaktivnykh otkhodov, prednaznachennogo dlya zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov otdeleniya "Novoural'skoe" filiala "Severskiy" FGUP "NO RAO" [Materials for the justification of the license for the construction (reconstruction) of a radioactive waste storage facility for the disposal of radioactive waste, Novouralskoye branch of the Seversky branch of FSUE "NO RWM"]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
11. Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie pripoverkhnostnogo punkta zakhroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov, Tomskaya oblast', gorodskoy okrug, ZATO Seversk [Justification materials for the license for the placement and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Tomsk Region, urban district ZATO Seversk]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
12. Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie pripoverkhnostnogo punkta zakhroneniya tverdykh radioaktivnykh otkhodov 3 i 4 klassov, Chelyabinskaya oblast', Ozerskiy gorodskoy okrug [Substantiation materials of a license for the placement and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Chelyabinsk Region, Ozyorsk City District]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
13. GOST R 52037-2003. Mogil'niki pripoverkhnostnye dlya zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov. Obshchie trebovaniya [Near-surface disposal facilities for radioactive waste. General requirements].
14. NP-093-14 Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhroneniya [Acceptance criteria for radioactive waste disposal].
15. GOST R 51883-2002. Otkhody radioaktivnye tsementirovannyye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Cemented radioactive Waste. General technical requirements].
16. GOST R 51883-2002. Otkhody radioaktivnye bitumirovannyye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Bitumen radioactive Waste. General technical requirements].
17. NP-055-14. Zakhronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements].
18. The application of ALARRP to Radiological risk. A nuclear industry good practice guide. Report of Industry Radiological Protection Coordination Group (IRPCG). URL: https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF%20documents/IRPCG/Application_of_ALARP_to_Radiological_Risk.pdf.
19. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Stoimost' zakhroneniya RAO: zarubezhnye otsenki [The cost of radwaste disposal: a foreign assessment]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 46–55.
20. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs. Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.

21. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. IAEA Report, Vienna, 2004.
22. Sharafutdinov R. B., Savel'eva E. A., Svitel'man V. S. et al. Metodicheskie aspekty ucheta osobennostey, sobytiy i protsessov prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya pri obosnovanii dolgovremennoy bezopasnosti sistemy zakhoroneniya RAO [Methodological aspects of accounting of features, events and processes of natural and man-induced origin in justification of long-term safety of radioactive waste disposal system]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2018, no. 4 (90), pp. 1–14.
23. Abramov A. A., Dorofeev A. N., Deryabin S. A. et al. RAO v Privolzh'e razlozhili po skheme [Radioactive waste in the Volga region was laid out according to the scheme]. *Atomnyy ekspert — Nuclear expert*, 2016, no. 3–4 (45–46), pp. 40–47.
24. Zaccai H., Kunsch P. Radwaste storage and disposal cost assessment in various European countries. Assessment and comparison of waste management system costs for nuclear and other energy sources. IAEA Technical Report, 1994.
25. Gupalo T. A., Prozorov L. B., Glagolenko Yu. V. PZRO v Privolzhskom federal'nom okruge: predproektnye raboty [Radioactive waste disposal in the Volga Federal district: pre-project work]. *Atomnaya strategiya 2.0. — Atomic strategy 2.0*. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/40647>.
26. Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA-TECDOC-1255, Vienna, 2001.
27. White M., Baldwin T., Hicks T., and others. Engineered Barrier Materials for Geological Disposal Facilities. Galson Sciences LTD, UK, 2008.
28. Il'ina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E. et al. Sovremennoe sostoyanie v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'erov bezopasnosti na ob'ektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii [State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84.
29. Rustick J. H. An Integrated Systems Approach to Performance Assessment of Near Surface Disposal Facilities for Low Level Radioactive Waste Management. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Graduate School of Vanderbilt University, USA, Nashville, 2016.
30. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Sostoyanie i osnovnye napravleniya sozdaniya parka konteynerov dlya konditsionirovaniya i zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [The state and main directions of creating a fleet of containers for conditioning and disposal of radioactive waste]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2016, no. 3 (81), pp. 18–29.

Information about the authors

Pavlov Dmitriy Igorevich, Team Leader of Saint-Petersburg branch of JSC “FCNIVT “SNPO “ELERON” — “VNIPIET” (55, Dibunovskaya st., St. Petersburg, 197183, Russia), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Ilina Olga Aleksandrovna, R&D Director, Bentonite Company Ltd (office 24, 12/1 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), e-mail: ilina@bentonit.ru.

Bibliographic description

Pavlov D. I., Ilina O. A. On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4. *Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 54–65. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.