

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



САМОЙЛОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СИСТЕМНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ ПО
БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВОК ПО ОБРАЩЕНИЮ С РАО НА
ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. т. н. И. И. Линге

МОСКВА – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	2
Введение.....	4
Глава 1. Основные направления оптимизации технологий обращения с РАО.....	11
1.1 Современное состояние системы обращения с РАО, образующимися при эксплуатации и ВЭ объектов ядерной техники.....	13
1.2 Требования к проведению системной оптимизации	21
1.3 Итерационный подход.....	27
1.4 Постановка цели и задач исследования	30
Глава 2. Определение приоритетных направлений оптимизации технологических решений	31
2.1 Общий подход к скринингу.....	31
2.2 Скрининг жизненного цикла РАО	35
2.2.1 Скрининг жизненного цикла вновь образующихся РАО	35
2.2.2 Скрининг жизненного цикла накопленных РАО	40
2.2.3 Скрининг жизненного цикла РАО от вывода из эксплуатации.....	44
2.3 Причины возникновения и содержание потенциала зон оптимизации.....	46
2.4 Выделение приоритетных направлений оптимизации.....	69
2.5 Выводы по главе 2	75
Глава 3. Оптимизация обращения с РАО подлежащими захоронению в централизованных ПЗРО.....	76
3.1 Функциональное разделение критериев классификации и критериев приемлемости и расширение классификации РАО для целей захоронения	76
3.2 Захоронение долгоживущих РАО на средних глубинах	79
3.3 Захоронение повышенных активностей короткоживущих РАО	91
3.4 Дифференцированный подход для отдельных долгоживущих радионуклидов с учетом их радиологической опасности и миграционной способности	94

3.5	Установление принципов классификации смешанных по радионуклидному составу РАО	97
3.6	Критерии приемлемости.....	99
3.7	Выводы по главе 3	103
	Глава 4. Выработка и обоснование предложений по технологически изолированным зонам оптимизации.....	105
4.1	Возврат отходов в хозяйственное использование (ЗО-1).....	105
4.2	Отсутствие необходимых регламентаций эксплуатации пунктов размещения и консервации особых РАО (ЗО-4).....	111
4.3	Иные зоны локальной оптимизации (ЗО-3, ЗО-5, ЗО-6)	114
4.4	Выводы по главе 4	115
	Заключение	117
	Список сокращений	120
	Список литературы.....	122
	Основные публикации по теме диссертации.....	134

Введение

Актуальность темы исследования

Объекты ядерного топливного цикла (далее ЯТЦ), в том числе по добыче урановых руд, их переработке, производству топлива, атомные станции и предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива, формировались в условиях, инициировавших во многом упрощенные подходы к обеспечению безопасности обращения с РАО [1]. По мере накопления знаний и опыта сформировалась система обращения с РАО, ключевыми особенностями которой являлось отсутствие требований по захоронению. Это привело к тому, что РАО предприятий ЯТЦ почти никогда не вывозились за пределы промышленной площадки. В отношении РАО образовывавшихся в народном хозяйстве были установлены более жесткие требования – РАО транспортировались на региональные спецкомбинаты.

Отсутствие обязательных требований по кондиционированию привело к широкому распространению практик:

- хранения ТРО в специальных сооружениях (хранилищах) либо с применением отдельных методов переработки, либо совсем без них;
- организации грунтовых могильников, в том числе на участках с неблагоприятными гидрогеологическими условиями, а в отдельных случаях и практики использования непроектных могильников РАО, где также применялось размещение «навалом»;
- хранения ЖРО высокой и средней активности в специальных емкостях, или размещением ЖРО в приповерхностных водоемах-хранилищах ЖРО.

Начиная с 60-х годов прошлого века на трех предприятиях стала осуществляться практика закачки ЖРО в подземные пласты-коллекторы.

Наилучшим образом вопросы обращения с РАО решались на АЭС, где хранилища РАО на АЭС имели систему ИББ, которая в основном обеспечивала локализацию РАО в пределах предназначенного для их хранения объектов.

В сфере учета и регламентирования безопасности обращения с РАО дела обстояли несколько лучше. Начиная с 70-х годов формируется система государственного контроля, которая помимо системы санитарных норм и правил в области обращения с РВ и РАО включает в себя прообраз системы государственного учета и контроля РВ и РАО. В период 1980-84 гг. Госкомстат СССР вводит формы государственной отчетности «4-ос» и «2-тп» для отражения информации по сбросам и выбросам РВ в окружающую среду и по образованию отходов. В 2005

году, после введения действие федеральных норм и правил [2] СГУК РВ и РАО стала близка к современному состоянию.

В целом система обращения с РАО была ориентирована на безопасность персонала и населения в настоящий момент времени, без учета вопросов долгосрочной безопасности. Системные стимулы к совершенствованию методов обращения с РАО, включая глубокую переработку, отсутствовали. В подобных условиях изменение практики обращения в соответствии с международно признанными подходами могло начаться только под влиянием новых нормативных требований.

Ключевой точкой изменения подходов к обращению с РАО стала ратификация Российской Федерацией Объединенной конвенции [4] в конце 2005 года. Она дала импульс к формированию принципиально новой нормативно-правовой базы. Разработка замысла, обсуждение и согласование законопроекта проходило в период 2008-2010 гг., а в 2011 году новый закон [6] вступил в силу.

В статье 10 закона установлено, что в России создается Единая государственная система обращения с РАО (далее ЕГС РАО) для «организации и обеспечения безопасного и экономически эффективного обращения с радиоактивными отходами, в том числе их захоронения». Порядок и сроки создания ЕГС РАО были установлены постановлением Правительства РФ от 19 ноября 2012 г. N 1185 «Об определении порядка и сроков создания единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами». В соответствии с этим постановлением первый этап был завершен 1 января 2015 г. В рамках первого этапа была осуществлена разработка нормативной и организационной основ ЕГС РАО, а также проведена первичная регистрация радиоактивных отходов и мест их размещения для определения стратегических решений по ЗСЖЦ РАО и мест их размещения. Таким образом, на момент начала диссертационного исследования (2014 год) в рамках развития ЕГС РАО начали реализовываться первые шаги по переходу к реальной практике захоронения РАО.

В условиях изменения сложившихся подходов практически по всем направлениям деятельности в области обращения с РАО необходима настройка системы, сформированной, главным образом, на основе общих требований по захоронению РАО, уже с учетом оценок безопасности на долгосрочный период, реальной практики обращения с РАО и фактических возможностей трансформации технологических цепочек и установок. В наибольшей степени и по всем критериям (объемы РАО, репутационные риски для экспорта технологий и т. д.) эта задача актуальна для объектов ядерного топливного цикла.

Научно-техническая литература по тематике оптимизации обращения с РАО на момент начала диссертационного исследования, как правило, была представлена работами по конкретным процессам и установкам. Наиболее значимыми из них были работы специалистов АО «ВНИИНМ», ФГУП «РАДОН», АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина». Вопросы системной оптимизации, под которой понимается устранение имеющихся несоответствий между принципами и требованиями обеспечения безопасности и технологическими решениями на всех стадиях обращения с РАО в организациях ЯТЦ России, практически не рассматривались, что и определило актуальность исследования.

Цель работы. Целью работы является разработка и обоснование безопасности и экологической приемлемости предложений по оптимизации технологических решений по обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла.

Анализ ситуации показал, что для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить требования и граничные условия оптимизации технологических решений;
- провести анализ ряда существующих и перспективных технологических цепочек обращения с РАО на предприятиях ядерного топливного цикла;
- выявить зоны оптимизации (ситуации несоответствия реализуемых или планируемых технологических решений по обращению с РАО принципам безопасности, фактической опасности РАО или лучшим по безопасности и эффективности решениям) и определить причины их возникновения;
- определить приоритетные зоны оптимизации (далее ЗО) для выработки мер по совершенствованию технологических и организационных решений;
- разработать меры по корректировке технологических или организационных решений по обращению с РАО, в том числе для конкретных ресурсоемких проектов, и обосновать их безопасность и экологическую приемлемость.

Научная новизна работы.

Анализ деятельности по обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла выполнен по всем стадиям – от образования, до захоронения. Идентифицированы 16 потенциальных ЗО, в отношении которых установлены причины их возникновения, предложены

способы повышения эффективности деятельности и проведено ранжирование по потенциальному эффекту от их разрешения, что обеспечивает системность мер по оптимизации.

Методами обоснования долговременной радиационной и экологической безопасности по базовым и альтернативным типам сценариев эволюции ПЗРО была разработана согласованная система повышения эффективности деятельности по захоронению, включающая:

- обоснование критериев классификации удаляемых РАО для целей их захоронения;
- расчетный алгоритм установления оптимизированных критериев приемлемости для захоронения РАО;
- расчетный алгоритм загрузки РАО в ПЗРО.

Проведены расчетные исследования и полученные новые данные:

- по уровню воздействия применения загрязненных материалов (цементосодержащие и др.) при консервации поверхностных водоемов-хранилищ ЖРО на скорость распространения радионуклидов в окружающей среде и радиационную безопасность персонала;
- по оценке допустимого содержания долгоживущих радионуклидов в РАО, допустимых для приповерхностного захоронения и захоронения на средней глубине.

Практическая значимость работы определяется разработкой общих рекомендаций по корректировке технологических решений и нормативно-правового регулирования деятельности по обращению с РАО, направленных на повышение эффективности деятельности по обращению с РАО и их конкретным развитием для отдельных нормативных документов и крупных объектов размещения РАО.

В ходе выполнения диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

- определено 16 зон оптимизации деятельности по обращению с РАО и выделены приоритетные 9 зон, дающие наибольшую экономию ресурсов;
- предложен подход к ограничению перечня короткоживущих радионуклидов, определяющих необходимость захоронения в ПЗРО на средней глубине и ПГЗРО;
- разработаны предложения по расширению номенклатуры классов удаляемых РАО;
- предложена корректировка критериев классификации для отдельных радионуклидов с учетом их характеристик;
- обоснована безопасность использования загрязненных материалов при консервации водоема В-17 ФГУП «ПО «Маяк».

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были использованы в рамках подготовки предложений Госкорпорации «Росатом» по корректировке Федерального закона «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3], постановления Правительства Российской Федерации [21], ОСПОРБ [37], при разработке федеральных норм и правил [42] и руководства по безопасности [102], а также при реализации ряда ресурсоемких проектов по выводу из эксплуатации и обращению с РАО, реализованных в рамках ФЦП ЯРБ-2.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке подхода к оценке эффективности деятельности по обращению с РАО;
- проведении проблемно-ориентированного анализа деятельности по обращению с РАО в новых нормативно-правовых условиях и формировании перечня зон оптимизации в области обращения с РАО;
- оценке потенциального влияния выявленных зон оптимизации на эффективность ЕГС РАО;
- постановке и применении результатов решения расчетных задач по:
 - миграционному моделированию распространения радионуклидов при захоронении РАО в приповерхностных ПЗРО;
 - миграционному моделированию распространения радионуклидов при захоронении РАО в ПЗРО, размещенных на средней глубине;
 - геохимическому и миграционному моделированию распространения радионуклида ^{90}Sr при консервации приповерхностного водоема-хранилища В-17 ФГУП «ПО «Маяк» с использованием цемент содержащих материалов;
- разработке предложений по согласованной корректировке системы ПЗРО и критериев классификации удаляемых РАО;
- разработке алгоритмов установления оптимизированных критериев приемлемости для захоронения РАО и загрузки РАО в ПЗРО на основании сценарной оценки безопасности и характеристик РАО;
- разработке предложений по совершенствованию нормативно-правового регулирования деятельности в области обращения с РАО.

Основные положения, выносимые на защиту:

- а) Положение о приоритетности системной оптимизации в сравнении с оптимизацией проектирования и эксплуатации конкретных установок по обращению с РАО;
- б) Перечень приоритетных зон оптимизации в области обращения с РАО;
- в) Предложения по развитию номенклатуры классов удаляемых РАО и корректировке критериев классификации удаляемых РАО в целях захоронения;
- г) Расчетные алгоритмы установления оптимизированных критериев приемлемости для захоронения РАО и загрузки РАО в ПЗРО;
- д) Предложения по возможности и безопасности использования загрязненных материалов при консервации пунктов размещения особых РАО.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

- Использованием при проведении миграционного моделирования аттестованного расчетного средства (GeRa/V1);
- Публикацией основных полученных результатов в реферируемых изданиях и рассмотрением на российских и международных научных конференциях;
- Результатами рассмотрения предложений по совершенствованию нормативно-правовой базы в области обращения с РАО на заседаниях НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» и секции № 1 по направлению «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» и Координационной межведомственной комиссии по развитию ЕГС РАО, созданной распоряжением директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 14 российских и международных конференциях и семинарах, заседании НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом», 2 заседаниях секции № 1 по направлению «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 Госкорпорации «Росатом», 2 заседаниях Координационной межведомственной комиссии по развитию ЕГС РАО, созданной распоряжением директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 12 статей в специализированных изданиях, включая 4 статьи в журналах по перечню ВАК Минобрнауки

России, 1 монография, 1 препринт и 4 доклада на российских и международных конференциях и семинарах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 107 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 130 страницы основного текста, включая 20 таблиц и 24 рисунка, в том числе графики.

Глава 1. Основные направления оптимизации технологий обращения с РАО

Уровни образования РАО и их пригодность к эффективному, то есть обеспеченному релевантной системой защитных барьеров, захоронению являются одними из ключевых эксплуатационных характеристик современных объектов ядерной техники. В ЯТЦ России в условиях большого объема накопленных РАО оптимизация деятельности по обращению с РАО становится не только вопросом повышения эффективности конкретного объекта ядерной техники, но и крупной государственной задачей. На её решение ориентирована государственная политика в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности [5]. Российский и зарубежный опыт показывают [6], что приведение накопленных РАО в безопасное состояние потребует еще несколько десятилетий и крупных финансовых ресурсов, исчисляемых сотнями млрд рублей. Указанные обстоятельства определяют актуальность повышения эффективности всех технологических решений по обращению с РАО, в том числе собственно установок по переработке РАО и пунктов их хранения РАО всех типов. При этом выбор методов оптимизации существенным образом зависит от уровня зрелости системы обращения с РАО.

Ратификация Объединенной конвенции [4], разработка и вступление в силу Федерального закона «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3] обозначили новый этап в деятельности по обращению с РАО, а именно этап развития. Среди ключевых изменений в области обращения с РАО:

- обязательность захоронения всех образующихся РАО (за исключением не вполне определенного круга короткоживущих, которые могут быть безопасно выдержаны до распада за приемлемое время);
- принятие международно признанного принципа к финансированию деятельности по захоронению на основе подхода «загрязнитель платит»;
- создание Национального оператора как организации, ответственной за деятельность по захоронению РАО (в ее широком понимании, включая проектирование и сооружение ПЗРО, а также осуществление периодического радиационного контроля) и собственно системы захоронения РАО;
- определение части накопленных РАО как особых, то есть подлежащих захоронению в месте нахождения РАО.

Процесс трансформации деятельности по обращению с РАО начался с создания организационно-правовых элементов новой системы, в соответствии с которыми в будущем должна осуществиться перенастройка технологических процессов обращения с РАО. Причем длительность процесса технологического переоснащения составит не менее 10-20 лет, а решение вопросов по накопленным РАО может занять 50-100 лет. Такая продолжительность обусловлена необходимостью не только технологического переоснащения и переориентации практической деятельности в соответствии с новыми принципами и целью, в качестве которой закон [3] (статья 10) устанавливает «организацию и обеспечение безопасного и экономически эффективного обращения с радиоактивными отходами, в том числе их захоронения», но и настройки нормативно-правовых основ. Очевидно, что такая задача требует согласованного развития всех элементов ЕГС РАО с учетом интересов всех участников деятельности по обращению с РАО и решения более широкого круга оптимизационных задач. Во многих случаях, прежде чем решать задачу оптимизации эксплуатационных характеристик установок по обращению с РАО в отношении конкретного потока РАО предстоит определить, а должен ли данный поток РАО поступать на эту установку? И нет ли более эффективного по стоимости и такого же или более безопасного способа обращения? Подобный подход определим как системную оптимизацию, которую целесообразно решать уже не в рамках какого-либо конкретного технологического передела, а по более крупным сущностям – производственным комплексам или промышленным площадкам предприятий в целом и с учетом всех компонент ЕГС РАО.

Анализ технологических решений по обращению с РАО, образующимися при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ядерной техники, должен осуществляться с учетом всей совокупности существующих граничных условий (уже реализованные технологические решения, нормативно-правовое регулирование, экономические факторы и т. д.).

Рассматривая технологическую составляющую ЕГС РАО можно выделить три вида граничных условий, оказывающих влияние на ее формирование. Это:

- нормативно-правовые основы;
- финансовая модель ЕГС РАО;
- информационная основа ЕГС РАО.

Существует определенная возможность корректировки граничных условий. В отношении нормативных требований учет практики их применения является стандартной практикой, хотя и отягощенной длительностью процесса и особенностями восприятия изменений. Пересмотр иных

граничных условий сопряжен с большими сложностями и неопределённостями, особенно в части формирования финансовой модели ЕГС РАО по причинам, лежащим вне технологических решений. При выработке совокупности оптимальных технических решений в качестве одного из граничных факторов следует также учитывать интересы основных участников ЕГС РАО, в качестве которых следует рассматривать: эксплуатирующие организации, в результате деятельности которых образовались РАО; национальный оператор по захоронению РАО; специализированные организации; органы регулирования безопасности использования атомной энергии; орган государственного управления в области обращения с радиоактивными отходами.

В отношении накопленных РАО ситуация в основном та же. Исключение составляют: отсутствие интересов национального оператора при работах с особыми РАО и еще более широкая возможность для оптимизации в отношении их пунктов хранения, предусмотренная статьей 12 Объединенной конвенции, в которой формулируются подходы к обеспечению безопасности существующих установок.

1.1 Современное состояние системы обращения с РАО, образующимися при эксплуатации и ВЭ объектов ядерной техники

К началу 2014 г, а именно этот период можно определить как начало диссертационного исследования, сложилась следующая ситуация по различным инфраструктурным подсистемам (компонентам) системы обращения с РАО:

- нормативно-правовое регулирование: вступил в силу Федеральный закон, регулирующий основные принципы обращения с РАО [3], разработаны основные подзаконные акты, регулирующие отдельные аспекты обращения с РАО, включая финансовое обеспечение деятельности по их захоронению;
- финансовая модель: утверждены тарифы на захоронение РАО, создан механизм накопления средств в СРФ для финансирования деятельности по захоронению РАО на основе прогнозов образования и условных технологических цепочек кондиционирования РАО;
- информационная основа деятельности по обращению с РАО для:

1) РАО, образующихся при эксплуатации объектов ядерной техники: проведена первичная регистрация РАО, в результате которой определены (в большинстве случаев) стратегические решения по обращению с накопленными РАО, сформированы прогнозы

образования РАО на основании модельных технологических цепочек обращения с РАО, функционирует СГУК РВ и РАО;

2) РАО, образующихся при ВЭ объектов ядерной техники: частично сформированы предварительные оценки объема РАО от ВЭ объектов ядерной техники в рамках ФЦП ЯРБ-2.

- система захоронения РАО: сформированы инвестиционная и производственная программы НО РАО на основании прогнозов образования РАО, утверждена схема территориального планирования ПЗРО, реальная практика по захоронению отсутствует (за исключением захоронения ЖРО в ПГЗЖРО);
- технологические переделы РАО на предприятиях: соответствуют устоявшейся практике обращения с эксплуатационными РАО, ориентированной на обеспечение текущей безопасности, при наличии мотивации к снижению платежей за захоронение РАО в рамках действующей финансовой модели.

Таким образом, из пяти составляющих ЕГС РАО:

- одна была создана фактически с нуля (финансовая модель);
- две сформированы частично (нормативно-правовое регулирование и информационная основа деятельности по обращению с РАО);
- одна в начальной стадии формирования (система захоронения РАО);
- одна почти полностью соответствует предыдущей модели обращения с РАО, нацеленной на долгосрочное хранение эксплуатационных РАО (технологические переделы РАО на предприятиях).

Ситуация усугублялась тем [7, 8], что установление принципа «загрязнитель платит» помимо введения финансовой ответственности за захоронение РАО также привело к дополнительным и разнонаправленным стимулам у участников ЕГС РАО.

Рассмотрим основные факторы, определяющие деятельность участников ЕГС РАО по обращению с РАО.

Организации, в результате деятельности которых образовались РАО

В первую очередь организации исходят из необходимости экономической эффективности своей деятельности, что требует минимизации расходов на обращение с РАО, как одной из статей

затрат в себестоимости выпускаемой продукции. В качестве драйверов эффективности можно рассматривать следующие:

- тарифы на захоронение РАО;
- объемы образования кондиционированных РАО;
- стоимость переработки РАО;
- требования к кондиционированным РАО (критерии приемлемости для захоронения);
- логистические затраты.

В качестве временного драйвера можно также рассматривать возможность размещения части новых РАО в имеющиеся пункты размещения и консервации особых РАО. Отметим, что драйверы не являются независимыми, так объемы кондиционированных РАО и стоимость переработки находятся в обратной зависимости: глубокая переработка стоит дороже, но снижает итоговое количество РАО. Поэтому организации вынуждены искать компромисс с учетом экономических факторов.

В части критериев приемлемости организации заинтересованы в максимально «мягких» требованиях к кондиционированным РАО, которые позволят применять более простые методы переработки РАО, а также минимизировать затраты на контроль качества процесса кондиционирования (включая паспортизацию).

Логистические затраты организации в основном определяются схемой размещения ПЗРО, для повышения экономической эффективности деятельности в области обращения с РАО (и в целом) объекты окончательной изоляции должны размещаться как можно ближе к промышленным площадкам или непосредственно на них.

При этом в качестве мотивации для организации стоит рассматривать также иные факторы, не связанные с экономической эффективностью напрямую. В первую очередь стоит отметить «экологическую чистоту» производства. В ряде случаев формирование требований к системе обращения с РАО в организациях происходит в рамках задачи обеспечения приемлемой, с точки зрения общественности и международного сообщества (в том числе и потенциальных заказчиков продукции), практики обращения с РАО. Так, в АО «ТВЭЛ» идет планомерная работа по отказу от практики размещения ЖРО в хвостохранилищах и пульпоохранилищах и последующего захоронения, хотя с точки зрения принципа оптимизации радиационной защиты (без учета международной конкурентной среды) это не всегда оправдано.

В связи с многообразием технологических процессов практические решения по обращению с РАО, наиболее выгодные для организаций, могут иметь принципиально различный характер. Например, если свободные объемы пункта хранения РАО близки к исчерпанию, то организация заинтересована в скорейшей передаче отходов ФГУП «НО РАО» на захоронение. Однако в случае, если извлечение РАО сопряжено со значительными радиационными рисками и/или финансовыми затратами, то для организации предпочтительной является стратегия долговременного хранения РАО перед их переработкой, с целью снижения уровня удельной активности короткоживущих радионуклидов.

Определенными особенностями обладают организации, не относящиеся к организациям, эксплуатирующим особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты. Они, также как и ЭО, заинтересованы в снижении расходов на обращение с РАО. Но, с учетом того, что оплата захоронения РАО осуществляется ими непосредственно при передаче отходов национальному оператору, такие организации могут быть заинтересованы в том, чтобы отсрочить передачу, если хранение образующихся РАО непосредственно на объекте не связано с большими затратами. Если это невозможно, то такие организации будут заинтересованы окончательно избавиться от имеющихся РАО. Вместе с тем, в отсутствие развернутой системы ПЗРО единственно доступной практикой является передача на хранение в иную организацию, например, в ФГУП «РосРАО». Что же касается передачи кондиционированных РАО на захоронение национальному оператору, то возникает определенный дисбаланс между установленными в законе [3] сроками промежуточного хранения (5 лет), и отсутствующими возможностями захоронения, что может создавать у таких организаций ощущение несправедливости финансово-организационной модели. Отметим, что мировой опыт говорит о необходимости учитывать интересы мелких производителей РАО и даже создавать для них льготные условия во избежание случаев утери ОЗРИ и РАО и других негативных последствий.

Национальный оператор по обращению с РАО

Интересы ФГУП «НО РАО» иные. Поскольку ФГУП «НО РАО» является в принципе безубыточной организацией, вопросы экономической эффективности ее касаются исключительно в силу административных механизмов управления со стороны органа управления обращением с РАО. При этом ФГУП «НО РАО» несет ответственность за сооружение ПЗРО и их безопасность на стадии эксплуатации, закрытия, а также после закрытия. Это приводит к сдвигу интересов ФГУП «НО РАО» в сторону более жестких требований к РАО, подлежащих

захоронению, как в части их физико-химических характеристик, так и в части иных требований, включая транспортно-технологические решения в отношении упаковок с РАО.

Специализированные организации

Деятельность по обращению с РАО для них является не обременением, а услугой, оказываемой заказчику. Это приводит к их стремлению максимально загрузить имеющиеся мощности по переработке/транспортировке РАО и сформировать наиболее благоприятную среду для этого, в том числе в области нормативно-правового регулирования. В частности критерии приемлемости по их мнению должны отражать фактически достигнутые параметры технологических процессов переработки РАО и не требовать значительных капитальных затрат на модернизацию инфраструктуры по переработке, а требования к промежуточному хранению РАО, должны быть максимально жесткими (для РАО в отношении которых созданы мощности по переработке) и т. д.

Органы регулирования безопасности использования атомной энергии

В первую очередь органы регулирования ориентированы на исключение новых угроз безопасности. Это приводит к консервативному подходу при оценке ими предлагаемых методов обращения с РАО, включая нормативно-правовое регулирование деятельности по обращению с РАО (например, критерии приемлемости), что зачастую вступает в противоречие с экономическими интересами ЭО.

Орган государственного управления в области обращения с РАО

Функции органа государственного управления в области обращения с РАО законом [3] возложены на Госкорпорацию «Росатом», которая с учетом цели создания ЕГС РАО (см. статью 10 закона [3]) обязана обеспечивать экономическую эффективность обращения с РАО. В этой связи Госкорпорация «Росатом» должна обеспечить сбалансированный учет интересов всех участников ЕГС РАО и минимизировать совокупные затраты на обращение с РАО.

Матрица влияния на отдельные аспекты обращения с РАО интересов различных участников ЕГС РАО представлена в таблице 0.1.

Таблица 0.1 – Матрица влияния интересов участников ЕГС РАО на отдельные аспекты обращения с РАО

Аспект обращения с РАО	Заинтересованность участников ЕГС РАО ¹			
	Эксплуатирующая организация	ФГУП «НО РАО»	Специализированные организации	Органы регулирования безопасности
Технологии переработки (кондиционирования)	<ul style="list-style-type: none"> – Минимизация объемов кондиционированных РАО; – Наиболее «мягкие» требования к характеристикам кондиционированных РАО 	Максимально жесткие требования к характеристикам кондиционированных РАО	<ul style="list-style-type: none"> – Соответствуют имеющимся технологиям переработки; – Развитие мощностей по переработке за счет целевого финансирования 	Ориентация на существующие технологии переработки с тенденцией к ужесточению требований
Транспортно-технологические параметры упаковок с РАО	<ul style="list-style-type: none"> – Максимально гибкие; – Минимальная стоимость 	<ul style="list-style-type: none"> – Строго регламентированные; – Максимальная надежность 	– Используемые (или изготавливаемые) в организации	Обязательная сертификация.
Срок промежуточного хранения РАО	В зависимости от: <ul style="list-style-type: none"> – Наличия свободных мощностей хранения; – Технологической 	Не имеет	– Стремление к сокращению в целях загрузки производственных мощностей	Не имеют (с ограничениями в рамках процессов лицензирования деятельности)

¹ Не рассматривается орган управления обращением с РАО, который определяют политику с учетом интересов всех заинтересованных сторон с целью выполнения требований безопасности и минимизации расходов.

Продолжение таблицы 1.1

Аспект обращения с РАО	Заинтересованность участников ЕГС РАО			
	Эксплуатирующие организации	Национальный оператор по захоронению РАО	Специализированные организации	Органы регулирования безопасности
	готовности к работам по кондиционированию; Характеристик РАО			
Схема размещения ПЗРО	Размещение ПЗРО в регионе размещения объекта (максимально разветвленная сеть ПЗРО).	Минимизация количества ПЗРО и ориентация на приемлемость размещения объекта для субъектов РФ	Не имеют	Минимизация количества ПЗРО с тенденцией к ужесточению требований к условиям размещения
Паспортизация РАО	По учетным данным СГУК РВ и РАО и по данным технологического контроля	В соответствии с международно признанными подходами, положениями закона [3] и ФНП в области использования атомной энергии	В соответствии с имеющимся аппаратурно-методическим и метрологическим обеспечением	В соответствии с положениями закона [3] и ФНП в области использования атомной энергии

Данные таблицы 0.1 показывают, что участники ЕГС РАО могут иметь по отдельным вопросам принципиально различные интересы. Эта ситуация не уникальна, упоминание об этом содержится в международных рекомендациях [9-11], что приводит, например, к рекомендациям по итерационному установлению критериев приемлемости РАО для захоронения с учетом производителей отходов, организации, осуществляющей их захоронение, а также органов регулирования безопасности.

Учитывая тесную взаимосвязь основных инфраструктурных подсистем ЕГС РАО и специфику интересов основных участников ЕГС РАО, общая оптимизация технологических аспектов обращения с РАО и связанных с ними нормативно-правовых ограничений на основе требований безопасности и эффективности становится крайне актуальной. В целях диссертационного исследования назовем её системной оптимизацией. Она должна предшествовать оптимизации конкретных установок по обращению с РАО или режимов их эксплуатации, определяя ее целеполагание и граничные условия с учетом технологических взаимосвязей. В некоторых случаях проведение частной оптимизации технологических решений исходя из статических граничных условий (без проведения системной оптимизации) может привести к обратному эффекту. Ограничимся лишь одним примером. Исходя из действующих критериев классификации [21] РАО, содержащие смесь долгоживущих и короткоживущих радионуклидов, классифицируются на основании суммарной удельной активности. В таком случае, если по удельной активности короткоживущих радионуклидов отходы относятся к САО, а по удельной активности долгоживущих радионуклидов относятся к ОНРАО, то отходы, содержащие смесь радионуклидов, будут относиться к классу 2. При этом, если провести фракционирование РАО (даже предполагая, что объем каждой из фракций будет равен исходному объему РАО), то захоронение фракционированных РАО станет более экономически выгодным. Долгоживущая фракция при этом будет относиться к классу 4, а короткоживущая фракция будет относиться к классу 3.

Очевидно, что реального влияния на сложность технологических решений по захоронению (а, следовательно, и удельную стоимость) в данном случае фракционирование не оказывает, а определяемая таким образом экономическая эффективность решения основывается на особенностях (недостатках) действующей классификации, к которой привязаны тарифы. В случае критериев классификации, которые будут ориентированы на оценку безопасности, стоимость захоронения совокупности фракционированных РАО увеличится за счет увеличения объема, то есть скажется в обратном направлении от предполагаемого. Решаться подобная проблема должна корректировкой критериев

классификации, в данном случае введением правила классификации смешанных по радионуклидному составу РАО, что является частью системной классификации.

Таким образом, системная оптимизация должна выявить потенциальные зоны оптимизации в области обращения со всеми потоками РАО, от эксплуатации или ВЭ крупных объектов ядерной техники, разработать и обосновать предложения по устранению имеющихся проблем или снижению их негативного воздействия и создать необходимые условия для последующей оптимизации конкретных установок по обращению с РАО.

1.2 Требования к проведению системной оптимизации

В качестве первого требования определим возможность сопоставления мер оптимизации по воздействию на эффективность ЕГС РАО. При этом нормативного или правового определения эффективности системы обращения с РАО (или механизма ее определения) не существует, что ставит задачу разработки меры эффективности.

Как правило, под эффективностью понимается некий функционал, от затрат на какую-либо деятельность и от достигаемых результатов этой деятельности. Наиболее простым выражением эффективности является простое отношение результатов к затратам. Применительно к эффективности ЕГС РАО, находящейся в стадии развития, необходимо уточнение определения результата деятельности.

Один из возможных вариантов – рассматривать эффективность как степень соответствия комплексу условий, часть из которых может являться бинарной (например, соответствие требованиям безопасности, в частности, радиационной), часть может быть представлена в виде функции, зависящей от одного или несколько параметров (например, стоимость полного цикла обращения с РАО).

В качестве таких критериев эффективности ЕГС РАО определим следующий набор условий:

1) Охват организационно-финансовой моделью РАО. Для всех типов накопленных и вновь образующихся РАО должны быть приняты решения по полному циклу обращения с ними, в том числе его финансовому обеспечению;

2) Для каждого типа вновь образующихся РАО должна быть организована технологическая цепочка, дающая должный уровень безопасности на всех стадиях обращения с ними. Для отдельных типов РАО допускается отложенное решение в случае

отсутствия эффективных и/или безопасных способов обращения с ними, тем не менее, при наличии таких типов РАО эффективность ЕГС РАО снижается;

3) Суммарные затраты на обращение с загрязненными материалами по всем технологической цепочке обращения, включая захоронение, с ними должны быть минимальны. Эта цепочка должна предусматривать широкий набор вариантов завершающей стадии жизненного цикла, в том числе на территории промышленной площадки, где РАО образовались, если речь идет об РАО с относительно коротким периодом потенциальной опасности или незначительным уровнем опасности. При минимизации объема образования РАО следует в полной мере использовать возможность включения загрязненных материалов в хозяйственную деятельность. Под сферу действия ЕГС РАО не должны включаться материалы и вещества, в отношении которых вопрос о возможности последующего использования до конца не решен. Для материалов, отнесенных к РАО ошибочно или вследствие отсутствия технологий по их использованию на момент образования отходов, должна быть предусмотрена возможность их исключения из системы в случае выявления ошибки или появления новой технологии их использования.

Исходя из выше приведенных критериев, эффективность можно представить в виде следующего функционала:

$$E = \frac{\sum_i K_{орг-фин}^i \cdot K_{техн}^i \cdot \frac{ИНО_i^4 \cdot AC_i \cdot \sum_k A_k^i \cdot P_k}{СП_i}}{\sum_i S_{\Sigma}^i}, \quad (1)$$

где $K_{орг-фин}^i$ - коэффициент охвата i -го потока РАО организационно-финансовой моделью;

$K_{техн}^i$ - степень охвата i -го потока РАО технологическими решениями по обращению с ними, включая их хранение и захоронение;

S_{Σ}^i - затраты на реализацию полного цикла обращения с РАО, включая их захоронение;

IHO_i - параметр «Идентификатор неопределенности отходов», который характеризует состояние материалов, содержащих радионуклиды, включая наличие организационных и технических мер по мониторингу их состояния для i -го потока РАО.

AC_i - параметр, учитывающий агрегатное состояние материалов, содержащих радионуклиды, i -го потока РАО;

A_k^i - активность k -го радионуклида в i -м потоке РАО;

P_k - относительный потенциал радиологической опасности для k -го радионуклида;

$СП_i$ - параметр, характеризующий стабильность состояния материалов, содержащих радионуклиды.

Множитель вида $\frac{IHO_i^4 AC_i \cdot \sum_k A_k^i \cdot P_k}{СП_i}$ в формуле (1) представляет собой

коэффициент потенциальной опасности ЯРОО, в котором исключен параметр, отвечающий за характеристики инженерных барьеров безопасности объекта. Более подробная информация о порядке его определения и подходов к его применению приведена, например, в публикациях [12-14]. Приведем краткое описание порядка определения параметров, кратко поясняя, какой эффект дает его рост.

Учет стабильности состояния материалов, содержащих радионуклиды, осуществляется за счет параметра СП, который характеризует время гарантированного безопасного состояния в случае прекращения контроля за состоянием объекта. Чем меньше значение параметра, тем более опасными являются отходы (СП для постоянного контроля – 1, еженедельного – 10^2 , ежегодного – 10^4).

Параметр ИНО определяет степень потенциальной опасности материалов, численное значение изменяется в диапазоне от 2 до 100 (более опасное состояние материалов характеризуется большим значением параметра). В качестве критериев, которыми руководствуются при определении данного параметра, выбраны следующие:

- подверженность физической деградации материалов, содержащих радионуклиды;
- химическая активность материалов, содержащих радионуклиды;
- наличие упаковки, локализующей материалы, содержащие радионуклиды;

- наличие информации о характеристиках материалов;
- наличие мониторинга за состоянием материалов, содержащих радионуклиды.
- Порядок определения параметра ИНО приведен на рисунке 0.1.

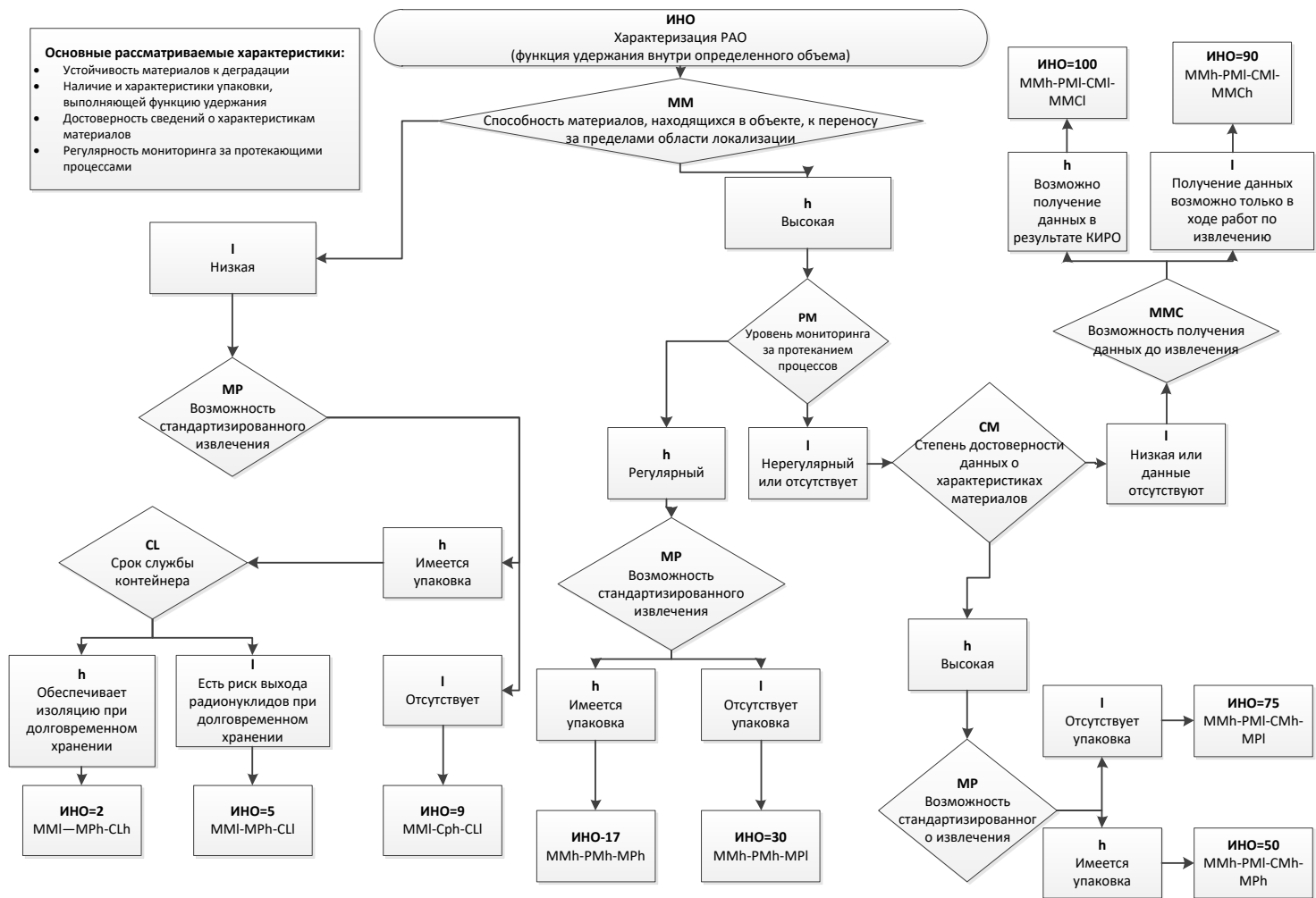


Рисунок 0.1 – Порядок определения параметра ИНО

Параметр АС определяется агрегатным состоянием материалов (газы и жидкости – 1, пыль, поверхностные загрязнения – 0,1, монолитные твердые вещества – 10^{-6}). Практический опыт применения КПО для большой совокупности ЯРОО, полученный при проведении инвентаризации ЯРОО и ранжировании объектов при формировании перечня мероприятий ФЦП ЯРБ-2 [16, 17] позволял предположить, что выработанный способ определения эффективности обеспечит выполнение первого требования.

Предложенная мера эффективности деятельности по обращению с РАО, в том числе размещению и сооружению ПЗРО, и технологиям обращения с РАО на предприятиях одновременно учитывает несколько аспектов. Первый – это минимизация расходов на соответствующую полную цепочку обращения с РАО или отдельный этап, если он необходим, включающий как минимизацию расходов ЭО на обращение с вновь образующимися РАО, так и на обращение с накопленными РАО. Второе – обеспечение возможности (инфраструктурной и технологической и организационно-финансовой) захоронения всех накопленных и вновь образующихся РАО в заданном временном интервале.

В качестве второго требования к системной оптимизации деятельности по обращению с РАО были определены граничные условия. Системная оптимизация должна была охватить:

- все этапы обращения с РАО на площадках объектов ядерного топливного цикла, включая их сортировку и отнесение к РАО, промежуточное хранение, переработку и кондиционирование;
- все этапы жизненного цикла объектов ЯТЦ, в том числе эксплуатацию и вывод из эксплуатации;
- все технологии долговременного хранения и захоронения РАО (определение типа ПЗРО для захоронения, а также логистические решения – оптимальные сроки хранения и условия транспортировки).

Третьим требованием к системной оптимизации было определено включение в сферу оптимизации нормативно-правовой базы. В этой области было выделено два признака эффективности:

1) Исключение ситуаций, когда действующая нормативная и организационная база ЕГС РАО приводит к несоразмерным опасности действиям. Например, когда инициируются работы по подготовке к захоронению РАО с чрезвычайно малым периодом потенциальной опасности, или, когда короткоживущие РАО направляются на захоронение в ПЗРО, рассчитанный на существенно большие сроки обеспечения безопасности и т. д.

2) Исключение ситуаций, когда потоки РАО «выпадают» из системы и не обеспечиваются требуемыми технологиями обращения или финансовыми средствами. Этот признак эффективности схож с традиционным понятием «результативности», фактически характеризующим степень решения поставленных перед системой задач.

1.3 Итерационный подход

Заданное предложенным способом (формула № 1) определение эффективности ЕГС РАО включает в себя степень охвата технологическими и организационно-финансовыми условиями РАО и в целом позволяет реализовать все установленные требования к системной оптимизации, оставляя открытым вопрос о приоритетах.

Очевидно, что при проведении первичной оптимизации в первую очередь сфокусироваться надо на основных потоках РАО. Отметим также, что множители, входящие в функционал (1) в широком диапазоне могут рассматриваться как независимые и в первом приближении выражаются линейными соотношениями. Это позволяет осуществлять оптимизацию итерационно – по отдельным этапам обращения или по отдельным потокам РАО.

Анализ технологических цепочек обращения с РАО и последующее выявление ситуаций несоответствия реализуемых технологических решений по обращению с РАО фактической опасности РАО или лучшим по безопасности и эффективности решениям целесообразно проводить с применением структурной модели жизненного цикла РАО.

При формировании структурной модели жизненного цикла РАО будем руководствоваться принципом разумной достаточности. Т. е. модель должна быть достаточно подробной для анализа рассматриваемых эффектов и явлений, но не обременена деталями, усложняющими работу с ней и при этом не дающих никаких преимуществ для целей исследования. По этой причине процесс выявления приоритетных направлений оптимизации целесообразно осуществлять в следующем порядке:

На первом этапе проводится предварительный скрининг структурной модели жизненного цикла РАО (накопленных и вновь образующихся) и формируется предварительный перечень проблемных моментов, которые препятствуют эффективному обращению с РАО. На следующем этапе определяются приоритетные направления оптимизации с учетом потенциального влияния на эффективность деятельности по обращению с РАО и при необходимости проводится их группировка по предметной области. Для каждого из таким образом определенных проблемных моментов в дальнейшем проводится выработка и обоснование возможных способов их разрешения с ориентацией на лучшие технологические решения в данной области и адекватные инструменты оценки и обоснования безопасности.

Таким образом, в ходе проведения системной оптимизации необходимо провести первичный скрининг соответствия технологической деятельности по обращению с РАО современным подходам к обоснованию безопасности и экологической приемлемости ядерных технологий и определить зоны оптимизации. А затем выработать оптимальный способ их решения исходя из целей повышения эффективности системы в целом и с вовлечением в процесс оптимизации содержания нормативно-правовых условий и характеристик основных потоков РАО. При этом также необходимо обеспечить безусловное выполнение основополагающих принципов безопасности и установленных норм. В качестве принципов безопасности необходимо использовать международно признанные, установленные в документе МАГАТЭ [15], в особенности на такие как:

а) Эксплуатация установок и деятельность, связанные с радиационными рисками, должны приносить общие положительные результаты. При применении данного подхода к деятельности по обращению с РАО следует учитывать, что РАО – это неотъемлемая часть ядерных технологий.

б) Необходимо оптимизировать защиту, чтобы обеспечить наивысший уровень безопасности, который может быть реально достигнут.

в) Меры по контролю за радиационными рисками должны обеспечивать, чтобы ни одно физическое лицо не подвергалось неприемлемому риску нанесения вреда.

г) Нынешние и будущие население и окружающая среда должны быть защищены от радиационных рисков.

д) Защитные меры по уменьшению имеющихся или нерегулируемых радиационных рисков должны быть обоснованы и оптимизированы.

Несмотря на ограничение круга рассмотрения (предприятия ЯТЦ, включая АЭС) объем ситуаций подлежащих рассмотрению чрезвычайно велик. Поэтому оптимизацию деятельности по обращению с РАО следует осуществлять покомпонентно (по основным типам производств с учетом специфики конкретного производства) с учетом требований по захоронению на всех стадиях обращения. Очевидно, что таким образом может быть решена только первая фаза оптимизации. В рамках неё должны быть определены все условия для реализации технологических переделов РАО, а в дальнейшем, в рамках второй, когда определена наилучшая стратегия и схема, должны оптимизироваться непосредственно сами технологические установки по обращению с РАО и/или режимы их эксплуатации. Данной фазе оптимизации должна предшествовать повторная оценка эффективности. На этом же этапе могут быть рассмотрены вопросы оптимизации обращения с РАО на предприятиях иных отраслей экономики.

1.4 Постановка цели и задач исследования

С учетом изложенного цель диссертационного исследования определим следующим образом: разработка и обоснование безопасности и экологической приемлемости предложений по оптимизации технологических требований к обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла.

Проведенный в рамках данной главы анализ ситуации показал, что для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать требования и граничные условия оптимизации (решена в разделах 1.2 и 1.3 настоящей главы);
- провести анализ технологических цепочек обращения с РАО на предприятиях ядерного топливного цикла с учетом указанных требований и граничных условий;
- выявить зоны оптимизации, то есть ситуации несоответствия реализуемых или планируемых технологических решений по обращению с РАО принципам безопасности (фактической опасности РАО) или лучшим по безопасности и эффективности решениям и определить причины их возникновения;
- определить приоритетные зоны оптимизации для выработки меры по оптимизации технологических и организационных решений;
- предложить и обосновать безопасность, включая долговременную, и экологическую приемлемость предлагаемых мер по оптимизированным технологическим или организационным решениям по обращению с РАО, в том числе на конкретных ресурсоемких примерах.

Глава 2. Определение приоритетных направлений оптимизации технологических решений

В рамках настоящей главы представлены общие подходы к регулярному анализу технологических циклов обращения с РАО (скринингу) и результаты проведенного скрининга жизненного цикла РАО вновь образующихся при эксплуатации или ВЭ объектов ЯТЦ и накопленных РАО и определения операционных зон с признаками потенциала развития. В разделе 2.3 проанализированы основные причины появления зон оптимизации и основные меры по их ликвидации. В разделе 2.4. на основе предложенных в разделах 1.2 и 2.1 аналитических выражений для определения эффективности ЕГС РАО определены высокорейтинговые направления оптимизации.

2.1 Общий подход к скринингу

При скрининге рассматриваются все стадии жизненного цикла РАО и предполагается, что ЭО действуют в соответствии со сложившимися практиками, а новации применяются только в том случае, если они предусмотрены новыми регулируемыми требованиями. При этом стадии и операционные зоны рассматриваются на предмет соответствия принципам безопасности, а нормативные требования к стадиям и операциям анализируются на предмет обоснованности и полноты охвата деятельности по обращению с РАО. В случае выявления стадий и операционных зон, для которых указанные признаки не выполняются, они включаются в перечень элементов для оптимизации.

В качестве основы для рассмотрения вопросов экономической эффективности будем использовать выражение [2], обращая внимание на не включение потока РАО в организационно-финансовую модель ЕГС РАО или неоптимальные технические решения. В последнем случае необходимо детализировать структуру затрат на полный цикл обращения с РАО (множитель S_{Σ} в выражении (2)).

Суммарные затраты на весь цикл обращения с РАО можно представить в следующем виде:

$$S_{\Sigma} = S_{sort}(V_{\Sigma}, C_{sort}) + S_{ClearM}(V_{ClearM}, C_{disposal}^{ClearM}, C_{logistic}^{ClearM}) + S_{ContM}(V_{ContM}, C_{storage}^{ContM}, C_{disposal}^{ContM}, C_{logistic}^{ContM}) + \sum_i S_{RW}^i(V_{RW}^i, C_{storage}^{RW,i}, C_{disposal}^{RW,i}, C_{logistic}^{RW,i}, C_{repr}^{RW,i}) - P_{Reuse}(V_{Reuse}, C_{repr}, D_{material}), \quad (2)$$

где S_{sort} - затраты на предварительную переработку РАО, включая сортировку, зависящие от общего объема отходов и удельной стоимости предварительной переработки (V_{Σ}, C_{sort} соответственно).

S_{ClearM} - затраты на обращение с отходами, не загрязненными радионуклидами выше уровней неограниченного использования, зависящие от объема чистых отходов и удельной стоимости их утилизации и транспортировки ($V_{ClearM}, C_{disposal}^{ClearM}, C_{logistic}^{ClearM}$ соответственно);

S_{ContM} - затраты на обращение с отходами, загрязненными радионуклидами выше уровней неограниченного использования но ниже критериев отнесения к РАО (далее ОНАО), зависящие от объема таких отходов и удельных стоимостей их хранения, утилизации и транспортировки ($V_{ContM}, C_{storage}^{ContM}, C_{disposal}^{ContM}, C_{logistic}^{ContM}$ соответственно);

S_{RW}^i - затраты на обращение с РАО i -го типа (класса) по всем стадиям жизненного цикла, включая их захоронение, зависящие от объема таких отходов и удельных стоимостей их хранения, захоронения и транспортировки и переработки ($V_{RW}^i, C_{storage}^{RW,i}, C_{disposal}^{RW,i}, C_{logistic}^{RW,i}, C_{repr}^{RW,i}$ соответственно);

P_{Reuse} - доход от использования загрязненных материалов в хозяйственной деятельности, зависящий от объема таких материалов, удельной стоимости их переработки для перевода в вид, подлежащий дальнейшему использованию и удельных исключенных затрат на закупку чистых исходных материалов ($V_{Reuse}, C_{repr}, D_{material}$ соответственно).

Величины $S_{ClearM}, S_{ContM}, P_{Reuse}$ и их составляющие $C_{disposal}^{ClearM}, C_{disposal}^{ContM}, C_{logistic}^{ClearM}, C_{logistic}^{ContM}$ и $C_{storage}^{ContM}$ не относятся к обращению с РАО, однако в ряде случаев потребуется их рассмотрение.

Помимо объемных характеристик материальных потоков РАО и иных отходов на эффективность обращения с РАО сильное влияние оказывают различного рода удельные стоимости по отдельным операциям: $C_{sort}, C_{disposal}^{RW,i}, C_{logistic}^{RW,i}, C_{repr}^{RW,i}, C_{repr}, D_{material}$. Некоторые из них являются взаимозависимыми, как например, затраты на переработку РАО, которые зависят

от последующей реализации чистых или условно чистых материалов. Важно, что величины $C_{disposal}^{RW,i}$ и $C_{logistic}^{RW,i}$ можно считать условно независимыми от иных обстоятельств.

Стоимость логистических затрат для потока РАО определяется в основном схемой размещения ПЗРО, которая может приниматься исходя из различных интересов, включая социальную приемлемость того или иного решения.

Стоимость захоронения РАО $C_{disposal}^{RW,i}$ определяется целым комплексом параметров, включая макроэкономические, и анализировалась автором [19]. В рамках действующей организационно-финансовой системы ЕГС РАО она выражается посредством тарифов, установленных на захоронение РАО. Основной принцип установления тарифов – безубыточность деятельности НО РАО, который должен обеспечить захоронение всех образующихся (за исключением отдельных категорий) РАО. Фактически ставится задача по оценке затрат на деятельность по захоронению различных типов РАО за период прогнозирования и формирования тарифа на захоронение РАО таким образом, чтобы на конец прогнозного периода обеспечить баланс между затратами и накопленными средствами в СРФ № 5.

При расчете сначала определяется так называемая необходимая валовая выручка НО РАО (сглаженная с учетом индекса роста потребительских цен). Она определяется по формуле:

$$НВВ_{\%j} = \begin{cases} \frac{(R_{\Sigma} + R_{\Sigma\%} - S_{\Phi}) * V_m}{V_m + \sum_{i=m+1}^n V_i (\prod_{k=m}^i ИПЦ_k)}, \text{ при } j = m \\ \frac{(R_{\Sigma} + R_{\Sigma\%} - S_{\Phi}) * V_j * \prod_{k=m+1}^j ИПЦ_k}{V_m + \sum_{i=m+1}^n V_i (\prod_{k=m}^i ИПЦ_k)}, \text{ при } j > m \end{cases}, \quad (3)$$

где: m – год начала периода расчета тарифа;

n – год окончания периода расчета тарифа;

R_{Σ} – общая сумма на периоде расчета тарифа необходимых для осуществления захоронения РАО расходов, руб.;

S_{Φ} – прогнозное количество средств в специальном резервном фонде на дату окончания предыдущего расчетного периода.

$НВВ_j$ – необходимая валовая выручка года j , находящегося в периоде от m до n , руб.;

V_j – объем оплачиваемых РАО в году j , куб. м;

V_m – объем оплачиваемых РАО в году m , куб. м;

ИПЦ $_k$ – индекс потребительских цен в году k .

$R_{\Sigma\%}$ – общая сумма расходов на погашение процентов по кредиту на периоде расчета тарифа, руб.

После определения необходимой валовой выручки определение тарифа производится простым делением НВВ по конкретному классу отходов на объем оплачиваемых в этом году отходов. Получаемый тариф имеет размерность руб. за кубический метр РАО соответствующего класса. Диапазон изменения тарифа – от десятков тыс. рублей для класса 4, до величин порядка миллиона рублей за РАО класса 1, однозначно определяют принципиальную важность обоснованной по безопасности адресации к конкретному классу.

В дальнейшем, при рассмотрении структурных моделей жизненного цикла РАО будем выделять основные составляющие функционала эффективности, на которые оказывает влияния та или иная стадия жизненного цикла РАО и учитывать потенциал их оптимизации посредством корректировок технологических решений и граничных условий их реализации.

Скрининг будем проводить на основе упрощенной структурной модели (схемы) полного жизненного цикла РАО от образования или хранения для накопленных и до их захоронения). Рассмотрение проведем для 3 типов РАО – вновь образующихся при эксплуатации объектов ЯТЦ по проектному назначению, накопленных РАО и РАО, образующихся при выводе из эксплуатации объектов ЯТЦ. Объектом рассмотрения будем считать поток РАО, предполагая, что он стабильный во времени, по источнику происхождения и относительно стабильный по радионуклидному составу. По каждой стадии жизненного цикла РАО дадим краткую характеристику, отметим возможность альтернативных решений и выделим зоны оптимизации (ЗО-1, ЗО-2 и т. д.). При необходимости отметим критично важные нормативные документы. При анализе этих схем будем учитывать, что некоторые из стадий на практике еще не реализовывались, а некоторые будут реализовываться очень нескоро, но расходы на их реализацию будем считать неизбежными.

2.2 Скрининг жизненного цикла РАО

2.2.1 Скрининг жизненного цикла вновь образующихся РАО

Для анализа примем структурную модель жизненного цикла вновь образующихся РАО, состоящую из 9 стадий (рис. 2.1).

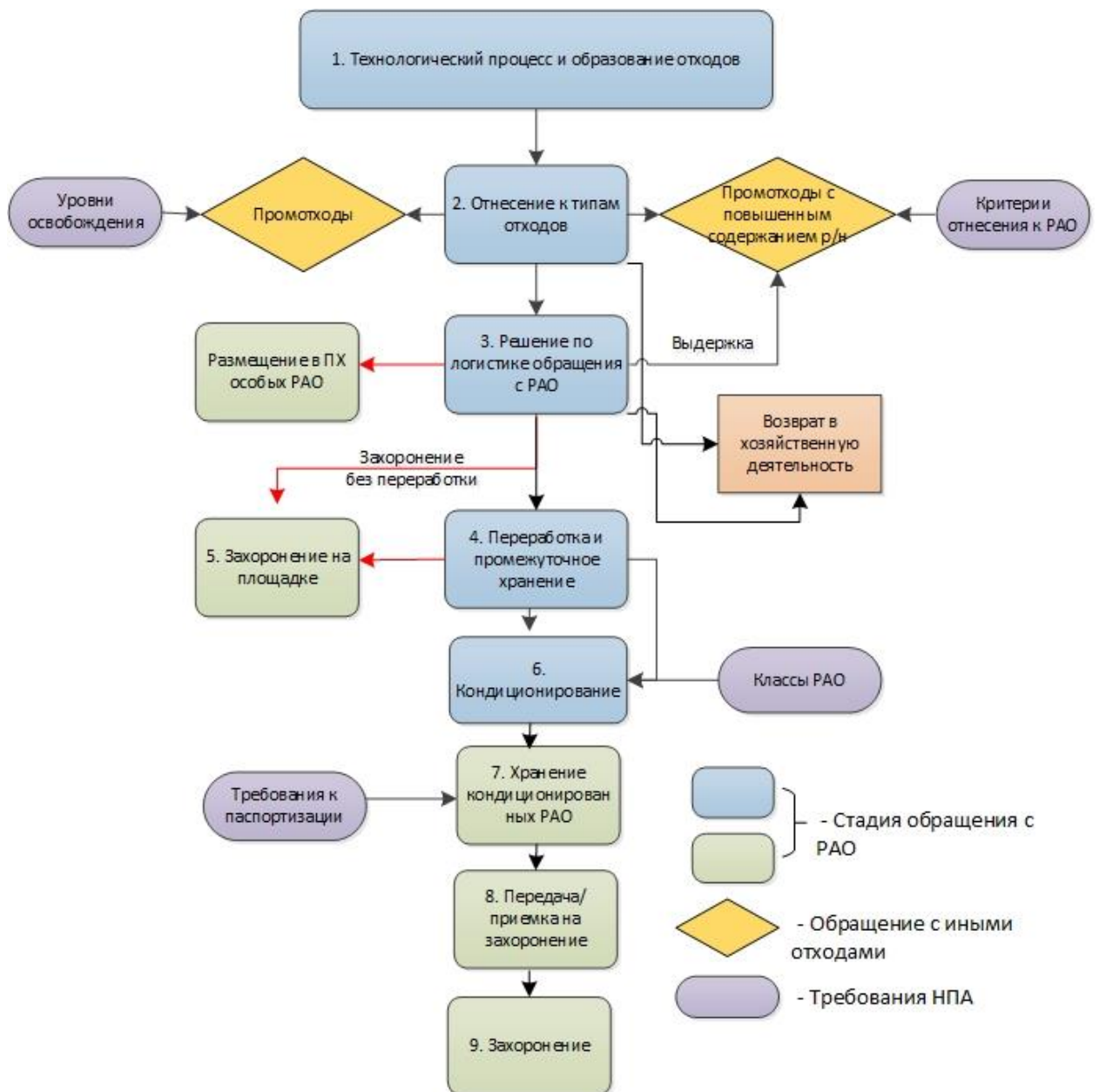


Рисунок 2.1 – Упрощенная структурная модель жизненного цикла РАО

Проиллюстрируем широкий спектр возможных решений в рамках каждой из стадий жизненного цикла.

Стадия 1. Технологический процесс. Существующий парк производств ЯТЦ включает все варианты, в том числе те, при создании которых тема РАО не рассматривалась вообще, и те, при создании которых образование РАО реально минимизировалось. На стадии проектных разработок находятся технологии, которые специально формируются для минимизации объема и опасности РАО [20]. Вмешательство в организацию технологического процесса по производству продукции, как правило, очень проблематично. Исключения составляют технологические процессы вывода из эксплуатации, которые будут рассмотрены отдельно. В процессах производства ЯТЦ необходимо выделить ЗО-1. Она существует благодаря норме ст. 21 закона [3], которая позволяет отложить принятие решения отнесения к РАО как минимум на один год. Дословно она устанавливает обязанность ежегодно определять возможность дальнейшего использования образующихся отходов и относить их к РАО в случае невозможности дальнейшего использования. Таким образом, способ реализации стадии 1 оказывает влияние на общий объем отходов.

Стадия 2. Разделение отходов на три группы – промотходы, ОНАО и РАО – это ЗО-2. Эффективная организация процессов в ЗО-2 – один из наиболее сильных способов повышения эффективности. Общего решения нет, поскольку все зависит от затрат на стоимость дезактивации, разделение потоков РАО и соотношения стоимостей захоронения. Опыт показывает, что при минимизации общего объема отходов и стоимости захоронения можно отказаться от разделения отходов с очень низкой активностью. Во Франции, например, регулирующая основа способствовала созданию оператором по захоронению (ANDRA) пункта захоронения для всех промышленных отходов ЯТЦ. С учетом фактора географического размещения объектов ЯТЦ России и широкого набора зрелых по возрасту производств, для ЯТЦ России лучшим способом явится установление гибкой системы в которой организация может выбирать подходящий по экономике вариант [18]. При этом формирование системы захоронения отходов различных категорий и соответствующей классификации РАО для захоронения является отдельной проблемой и будет рассмотрено позднее.

Критерии отнесения отходов к РАО установлены в [21]. С учетом скорой корректировки этого документа [22] и идей включения ОНАО в состав РАО [23-24] задачу

сохранения существующего положения вещей определим как ЗО-3. Документов регламентирующих эту процедуру или дающих указания на необходимость рассмотрения возможности повторного использования отходов нет. Это является причиной большого количества ситуаций, когда материалы относятся к РАО. На этом этапе в рамках принятой модели определяется распределение отходов по категориям, то есть параметры V_{ClearM} , V_{ContM} , V_{RW}^i . Также выбранные способы предварительной переработки определяют удельную стоимость предварительной переработки C_{sort} .

Стадия 3. Решение по стратегии обращения с потоком РАО. Оно определяет дальнейшие стадии и полную стоимость обращения с РАО. Стандартная стратегия – это передача РАО на переработку и последующее централизованное захоронение. На многих предприятиях ЯТЦ пока возможно размещение в ПРОРАО, созданных именно для таких отходов. Порядок или критерии принятия подобных решений не регламентирован, то есть эти потоки за рамками финансовой модели ЕГС РАО. Экономическая эффективность данной опции позволяет определить нормативное её закрепление как зону оптимизации ЗО-4. Возможность возврата отходов в хозяйственное пользование при появлении новых технологий наверно возможно, но оно должно реализовываться на более ранней стадии (в ЗО-1). Решения, принятые на данной стадии обращения, определяют следующие параметры: $C_{disposal}^{RW,i}$, $C_{logistic}^{RW,i}$, $C_{repr}^{RW,i}$, V_{Reuse} , C_{repr}^{Reuse} .

Стадия 4. Переработка и промежуточное хранение. На данном этапе могут проводиться дополнительная сортировка и/или переработка РАО для обеспечения требований по промежуточному хранению или захоронению на площадке. Данный шаг выделен из процедуры кондиционирования отходов для захоронения в централизованном ПЗРО, поскольку он может, например, не требовать отверждения ЖРО или упаковки ТРО и отличаться характером требований к РАО. Регламентируется данный этап ФНП [25-28], устанавливающими общие правила безопасности при обращении с РАО. В целом, данная стадия позволяет изменить распределение отходов по категориям для отдельных потоков за счет дополнительной сортировки РАО, а также радиоактивного распада. Следовательно, в качестве факторов, определяемых на данной стадии, следует рассматривать V_{ClearM} , V_{ContM} , V_{RW}^i . В качестве перспективной зоны оптимизации (ЗО-5) можно определить исключение данной стадии как самостоятельной с оптимизацией существующих требований для короткоживущих РАО.

Стадия 5. Захоронение на площадке. Является частным и опциональным случаем захоронения РАО, который по сравнению с захоронением в централизованном ПЗРО имеет следующие особенности: параметры ПЗРО могут быть полностью адаптированы под потребности организации, включая транспортно-технологические схемы; процесс проектирования ПЗРО и технологической цепочки переработки РАО сосредоточен в эксплуатирующей организации. Данный этап обращения с РАО возможен только для перечня ЭО, который установлен постановлением [29]. В настоящее время он этими организациями не реализуется, в том числе в силу недоработанности нормативной базы. Определим это обстоятельство в качестве ЗО-6. Реализация стадии определяет стоимость захоронения и фактически исключает необходимость перевозки РАО к централизованному ПЗРО. Следовательно, в качестве факторов, на которые оказывает влияние данная стадия жизненного цикла РАО, следует рассматривать $C_{disposal}^{RW,i}$, $C_{logistic}^{RW,i}$, $C_{repr}^{RW,i}$.

Стадия 6. Объемы кондиционирования РАО в перспективе должны расти. В настоящее время выраженным тормозом на этом пути является частичная несогласованность двух критичных для данной стадии документов [30, 58] между собой, оторванность планирования деятельности по захоронению от сложившейся практики обращения с РАО. Это приводит к сложностям при рассмотрении вопросов захоронения ряда РАО, таких как ионнообменные смолы, солевой плав, образующийся на АЭС в результате глубокого упаривания ЖРО, битумированные отходы и т. д. Создание отдельных объектов захоронения в ПЗРО и/или выработка отдельных требований к данным отходам с учетом их объемов и характеристик могла бы существенно упростить вопрос их захоронения. Одна из причин сложившейся ситуации, что ответственность за установление и применение соответствующих процедур несут разные организации. Классификация удаляемых РАО для захоронения в соответствии с законом [3] определяется правительством РФ [21], критерии приемлемости и технологии кондиционирования должны устанавливаться на итерационной взаимосогласованной основе, при этом ответственность за кондиционирование лежит на ЭО, а заказчиком проектирования централизованного ПЗРО является НО РАО. При этом критерии приемлемости РАО для захоронения в РФ являются двухуровневыми. ФНП в ОИАЭ [30] устанавливают общие критерии приемлемости, которым должны соответствовать все кондиционированные РАО. Для каждого ПЗРО предусмотрены также частные критерии приемлемости, которые устанавливают требования к РАО для захоронения в конкретном ПЗРО. С точки зрения

технологий обращения с РАО данная стадия и регулирующие её документы являются ключевыми, поскольку определяют класс и иные характеристики РАО, а также тип ПЗРО, а следовательно и пункт назначения последующей перевозки РАО. Оптимизацию классификации РАО для целей захоронения с одновременным устранением имеющихся коллизий между классификацией, и критериями приемлемости обозначим как зону оптимизации ЗО-7, а процесс развития критериев приемлемости с учетом возможности обоснования безопасности существующих практик, то есть, расширения рамок частных критериев приемлемости, как ЗО-8. В рамках же этой зоны оптимизации лежит и задача по оптимизации контейнерного парка, используемого для захоронения РАО. В настоящий момент общие критерии приемлемости [30] устанавливают опосредованные требования к контейнеру (через требования к механической прочности, изолирующей способности и защитным свойствам упаковки РАО). При этом установлено требование о обязательности в отношении контейнеров оценки соответствия в соответствии с законодательством Российской Федерации и требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, а также допускается установление требований непосредственно к контейнерам в рамках проекта ПЗРО.

Дополнительного внимания заслуживает процесс паспортизации РАО, где в качестве основной проблемы следует выделить необходимость адекватного установления перечня определяемых характеристик, в том числе и в части радионуклидного состава РАО. Этот перечень должен быть достаточным для обоснования безопасности захоронения и не нести дополнительных обременяющих позиций. Вопрос оптимизации перечня радионуклидов, которые должны определяться при паспортизации определим как ЗО-9.

Стадия 6 оказывает влияние на $C_{disposal}^{RW,i}$, $C_{logistic}^{RW,i}$, $C_{repr}^{RW,i}$. В результате оптимизации следует ожидать существенного снижения первой из них, возможно сокращение и второй. Стоимость переработки может и возрасти.

Стадия 7. Хранение кондиционированных РАО Этот этап может быть заключительным в зоне ответственности ЭО или осуществляться в специализированной организации. Принципиальным моментом являются обеспечение безопасных условий хранения и исполнение требований его документального сопровождения. Возможные коллизии в части достоверности и полноты паспорта РАО определим как ЗО-10.

Стадия 8. Передача/приемка на захоронение. Этот шаг предваряет осуществление захоронения РАО. Принципиальный момент на этом шаге – проверка соответствия данным на РАО указанным в паспорте, которую должен осуществить НО РАО как организация, принимающая РАО на захоронение. По содержанию решаемых при этом задач это ЗО-10.

Стадия 9. Процесс захоронения РАО определен как размещение РАО в ПЗРО без намерения их извлечения (согласно терминологическому словарю МАГАТЭ [31] и закону [3]). Процесс создания инфраструктуры захоронения находится в начальной стадии. В рамках диссертационного исследования сосредоточимся на вопросах типов ПЗРО, это зона оптимизации (ЗО-11). В отношении влияния на функционал эффективности данная стадия будет определять $C_{disposal}^{RW,i}$, $C_{logistic}^{RW,i}$, $C_{repr}^{RW,i}$.

Таким образом, по результатам скрининга структурной модели с вновь образующимися (далее эксплуатационными) РАО на 9 стадиях жизненного цикла РАО выделено 11 зон оптимизации (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Зоны оптимизации обращения с эксплуатационными РАО

Номер зоны	Область оптимизации
ЗО-1	Ежегодное отнесение к не подлежащим дальнейшему использованию отходам
ЗО-2	Разделение отходов на промотходы, ОНАО и РАО
ЗО-3	Сохранение существующего нормативного разграничения РАО и ОНАО
ЗО-4	Нормативное закрепление возможности размещения РАО в ПХОРАО
ЗО-5	Ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО
ЗО-6	Захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО
ЗО-7	Оптимизация критериев классификации РАО для захоронения
ЗО-8	Расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости
ЗО-9	Перечень учитываемых радионуклидов
ЗО-10	Контроль за соответствием РАО критериям приемлемости
ЗО-11	Размещение и проектирование ПЗРО

2.2.2 Скрининг жизненного цикла накопленных РАО

Для анализа была принята структурная модель жизненного цикла из 9 стадий (рис. 2.2). В части накопленных РАО можно отметить, что некоторые из стадий совпадают со

схемой обращения с вновь образующимися РАО, если они отнесены к удаляемым. Принципиальными особенностями накопленных РАО и их жизненного цикла являются: большие и очень большие объемы в каждом пункте их размещения, неопределенности с их характеристиками, возможность захоронения на месте при соблюдении определенных критериев и несколько дополнительных стадий жизненного цикла, а именно преобразование ПРОРАО в ПКРАО, а затем в ПЗРО.

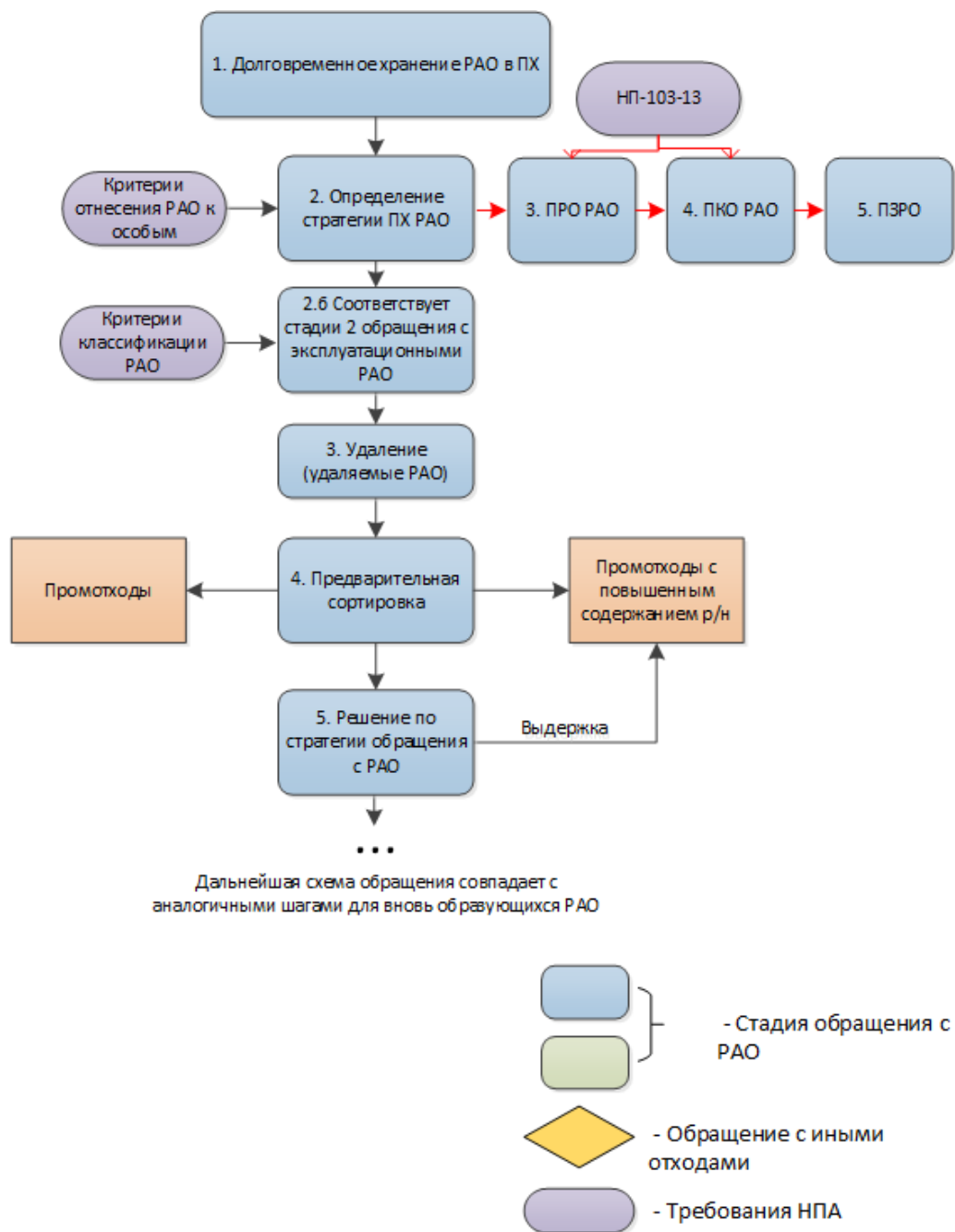


Рисунок 2.2 – Упрощенная структурная модель жизненного цикла накопленных PAO

Опишем более подробно соответствующие стадии.

Стадия 1. Долговременное хранение PAO, в том числе не переработанных. В этом состоянии находятся PAO отнесенные в период первичной регистрации к особым PAO, а также PAO находящиеся в пунктах долговременного хранения, в том числе с отложенными решением и пункты хранения PAO, отнесенных к удаляемым, но не имеющих ясных

перспектив на удаление в ближайшие десятилетия. Несмотря на большой опыт долговременного хранения, имеется значимый потенциал снижения издержек на его осуществление, в том числе на ведение всех видов мониторинга (ЗО-12).

Стадия 2. Определение завершающей стадии жизненного цикла ПХ (отнесение РАО к особым или удаляемым). Основные возможности оптимизации (ЗО-13) связаны со снятием действующих нормативных ограничений [21] и изменением порядка отнесения к особым. В первую очередь, это смягчение или исключение предусмотренных [21] критериев по размещению и происхождению РАО, которые не соответствуют принципам безопасности (защиты от существующего облучения должна быть оптимизирована). Вторую – повышение ответственности принятия решений по отнесению к удаляемым как более обременительных для федерального бюджета. Данная стадия является определяющей для формирования затрат на обращение с накопленными РАО. С точки зрения функционала эффективности она оказывает значение на такие факторы, как $C_{disposal}^{RW,i}$, $C_{repr}^{RW,i}$, $C_{logistic}^{RW,i}$.

Стадии 3–5. Захоронение на месте. В этом случае ПХРАО должен быть последовательно преобразован в ПКОРАО и в ПЗРО с соответствующим развитием барьеров безопасности для обеспечения безопасности персонала и населения. С учетом того, что при консервации пунктов размещения особых РАО часто требуются большие объемы материалов засыпки целесообразно рассматривать использование для их создания радиоактивно загрязненных материалов, которые в таком случае не должны рассматриваться не как РАО, а как материалы ограниченного пользования. Таким образом, данная стадия оказывает влияние на $C_{disposal}^{RW,i}$, V_{Reuse} , C_{repr}^{Reuse} . Решаемая по данной ЗО задача близка задачам, решаемым в ранее выделенной ЗО-1. Возможна также и ранее выделенная оптимизация расходов на безопасное содержание (ЗО-12)

Стадия 2б. В случае отнесения РАО к удаляемым РАО стадии жизненного цикла совпадают с ранее рассмотренными. Исключение составляет стадия удаления РАО. Согласно требованиям ФНП, регламентирующих работы по ВЭ ПХ РАО, извлечение РАО должно осуществляться на этапе подготовке к ВЭ в рамках лицензии по эксплуатации. Этот подход оправдан, когда речь идет об упорядоченном хранении РАО в контейнерах, для которых предусмотрена штатная транспортно-технологическая схема перемещения. В этом случае это рутинная производственная процедура, не требующая разработки технологических регламентов. Однако большинство ПХ представляет собой грунтовые

могильники, хвостохранилища и иные сооружения неупорядоченного хранения РАО различной активности без штатных средств выгрузки РАО. В такой ситуации основная сложность и потенциальная опасность работ заключается именно в извлечении РАО, следовательно, гораздо логичнее процедуры по извлечению РАО включать в состав проектной документации по ВЭ. Тем более, что, к примеру, для грунтовых траншей и могильников процедура извлечения РАО и ВЭ логически неразделимы, так как ближние слои вмещающего грунта и покрывающего экрана могут относиться к категории РАО по уровню удельной активности. Указанную коллизию определим как ЗО-14. Организация работ на данной стадии окажет значительное влияние на материальные потоки материалов V_{ClearM} , V_{ContM} , V_{rw}^i .

Все последующие стадии обращения с накопленными РАО аналогичны ранее рассмотренным стадиям 2-9 для эксплуатационных РАО.

Таким образом, по результатам скрининга обращения с накопленными РАО выделено три зоны оптимизации (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Зоны оптимизации обращения с накопленными РАО

Номер зоны	Область оптимизации
ЗО-12	Содержание объектов долговременного хранения РАО
ЗО-13	Критерии отнесения к особым РАО
ЗО-14	Обращение с РАО при ВЭ ПХ РАО

2.2.3 Скрининг жизненного цикла РАО от вывода из эксплуатации

Рассмотрение разрабатываемых проектов вывода из эксплуатации наиболее интересно [32-33], поскольку отличия в полной, включая захоронение РАО, стоимости работ могут достигать порядковых величин в случае реализации оптимизации и без неё. В наибольшей степени это проявляется при выборе конечного состояния объекта. Если выбран вариант «зеленой лужайки», то расходы наиболее велики. Понятно, что в ряде случаев такой вариант неизбежен, главным образом при ВЭ объектов, расположенных в населенных пунктах. Однако в большинстве случаев, в том числе и в особенности, на промышленных площадках крупных предприятий ЯТЦ подобный подход представляется нерациональным. В этом случае необходима оптимизация, включающая выбор конечного состояния объекта, и должный оборот загрязненных материалов [34] позволяет кратно снизить объем образования РАО и, следовательно, затрат на обращение с ними.

Организация технологического процесса ВЭ оказывает влияние в первую очередь на общий объем отходов, а также на распределение отходов между чистыми, содержащими радионуклиды в количествах ниже критериев отнесения к РАО, и РАО (V_{Σ} , V_{ClearM} , V_{ContM} , V_{rw}^i).

Для анализа была принята структурная модель жизненного цикла РАО от ВЭ, которая представляет собой структурную модель жизненного цикла для вновь образующихся РАО, в которой стадия технологического процесса заменена на две стадии, характерные для работ по ВЭ.

Стадия 1. Стратегия ВЭ. Данная стадия является во многом определяющей, поскольку именно на ней определяется объектовая концепция ВЭ и задается конечное состояние объекта, которое в общем случае может принципиально отличаться: пункт хранения РАО (включая ПЗРО), выведенный из эксплуатации и не освобожденный от радиационного контроля объект ЯТЦ, или радиационный источник, а в самом крайнем случае реализации подхода «зеленой лужайки» – территория неограниченного использования. Вариант ВЭ, предполагающий консервацию объекта в целом или его части, на практике реализуется, но по факту эта реализация сопровождается определенными нормативными неясностями, в том числе по проблеме возможности оставления вновь образованных РАО в качестве особых. Аналогичная проблема существует и с промышленными отходами с повышенным содержанием радионуклидов. Эту и ряд иных нормативных неясностей определим как ЗО-15.

Стадия 2. Тактика демонтажных и дезактивационных работ. Принято считать, что рациональным является следующая последовательность: сначала демонтируются слабозагрязненные конструкции и оборудование, а затем более загрязненные. По российскому и зарубежному опыту [32] эта задача более сложна и является предметом оптимизации, в том числе и с учетом оптимизации обращения с РАО (ЗО-16).

Дальнейшие стадии этапы жизненного цикла совпадают со стадиями для вновь образующихся РАО.

Таким образом, по результатам скрининга обращения с РАО при ВЭ выделено две дополнительных зоны оптимизации (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Зоны оптимизации обращения с накопленными РАО

Номер зоны	Область оптимизации
ЗО-15	Создание новых объектов размещения особых РАО
ЗО-16	Определение тактики демонтажных и дезактивационных работ

2.3 Причины возникновения и содержание потенциала зон оптимизации

ЗО-1 – Ежегодное отнесение к не подлежащим дальнейшему использованию отходам. Причина – длительный опыт функционирования в режиме полного отсутствия или минимальных плат за образование отходов. Уже в первые годы после установления тарифов и введения обязательных отчислений оплата за образование РАО в организациях, обязанных производить эти отчисления, снизилась на десятки процентов. Расширение горизонта рассмотрения возможностей последующего использования таких материалов с уровня цеха на уровень предприятия в целом или группы предприятий и с горизонта планирования в 1 год на горизонт 5-10 лет позволит в перспективе снизить образование РАО еще на 10-15 %. Очевидные перспективы связаны с возможностью использования загрязненного металла для производства металлопродукции для сооружения ОИАЭ или для контейнеров для захоронения РАО, а также использование измельченных строительных конструкций в качестве материалов для создания ИББ для ПЗРО или пунктов консервации особых РАО. Рассматривая такие возможности, будем пользоваться понятиями отходы и загрязненные материалы (ЗМ), имея в виду материалы, содержащие радиоактивные вещества, в том числе на уровнях выше ПЗУА, находящиеся на стадии отнесения к РАО или уже отнесенные ранее, для которых обоснована возможность использования в хозяйственной деятельности в настоящее время или ближайшем будущем.

Применение ЗМ для производства металлопродукции с остаточным загрязнением обсуждается достаточно часто [35], в основном с апелляцией к зарубежному опыту. Проработка данного предложения показала [36], что в случае её реализации для повторного использования в атомной промышленности, а не в целях неограниченного использования, наиболее технически сложной задачей является создание специального металлургического оборудования малой мощности (сталепрокатного или чугунолитейного).

Другая перспективная идея по применению загрязненных материалов в литературе освещена существенно меньше, хотя в отношении малых уровней загрязнения практикуется давно, например в СанПиН [37] установлены допустимые уровни загрязнения для строительных материалов, применяемых при дорожном строительстве. Эта идея

заключается в применении загрязненных материалов для засыпки пустот (котлованов) выводимых из эксплуатации зданий и сооружений, консервации водоемов-хранилищ, использования их как буферных материалов при закрытии ПЗРО и т. д. Учитывая стоящие перед ЕГС РАО задачи, в ближайшие годы и десятилетия потребуется большой объем таких материалов. Их применение требует относительно простых технологических решений (измельчения исходного материала), однако сопряжено с кропотливыми обоснованиями долговременной безопасности.

Применение загрязненных материалов для реабилитации площадок при ВЭ должно быть увязано с планируемым конечным состоянием площадки при ВЭ, которое зачастую не определено. В этом плане важно, что по ряду объектов с участием автора начаты работы по комплексному планированию облика площадки в будущем [36]. В отношении ПХ особых РАО ситуация более простая, их конечный статус – ПЗРО, причем содержащаяся в них активность заведомо должна многократно превышать активность используемых при сооружении ИББ загрязненных материалов.

Типичным примером возможного использования ЗМ при консервации ПХ особых РАО является закрытие акваторий приповерхностных хранилищ ЖРО. Из созданных в период с 1948 по 1966 гг. [38] и имеющихся на ПО «Маяк» (г. Озерск, Челябинская область), Сибирском химическом комбинате (г. Северск, Томская область) и Горно-химическом комбинате (г. Железногорск, Красноярский край) объектов более половины объектов подлежат консервации (9 из 13 объектов общим объемом около 400 млн м³). Несмотря на то, что закрытию подлежат наиболее компактные объекты, а на ряде объектов такая работа уже реализована (В-9 ФГУП «ПО «Маяк», Б-2 и Б-1 АО «СХК» [8], 354 на ФГУП «ГХК»), потенциал применения ЗМ исчисляется миллионами кубометров. Только в отношении объекта В-17 ФГУП «ПО «Маяк», закрытие акватории которого запланировано на ближайшие годы, общие потребности в материалах для закрытия превышают 200 тысяч кубометров. Перевод объектов В-3 и В-4 в пункты консервации особых РАО на том же предприятии согласно стратегии [39], состоится позже и потребует еще большего количества материалов.

В работе [40] приведены аргументы, показывающие, что отнесение к особым РАО поверхностных ПХ ЖРО более чем обосновано по всем критериям радиационной безопасности. Это преимущество многократно усиливается при закрытии акватории с применением ЗМ. Первый этап работ по закрытию таких объектов традиционно предусматривал использование скальных грунтов или специальных бетонных конструкций.

Тема применения ЗМ от ВЭ и реабилитации детально не исследовалась, хотя и идеи, и намерения в ряде организаций рассматривались, а на В-9 в прошлом частично реализовывались [8]. На очевидность выгод применения ЗМ при консервации пунктов хранения особых РАО указывалось еще в работе [41]. В настоящее время ситуация улучшилась: при разработке федеральных норм и правил [42], в их итоговую редакцию, в том числе и с участием диссертанта, было включено положение о возможности размещения РАО (п. 14), что косвенным образом позволяет использовать ЗМ при консервации пунктов размещения особых РАО, определяя данный процесс как размещение РАО.

На прямое использование ЗМ существуют ограничения, установленные в санитарных правилах ОСПОРБ 99/2010 [37]. Этими правилами допускается использование ЗМ и изделий при условии, что ожидаемая индивидуальная годовая эффективная доза облучения при планируемом виде их использования не превышает 10 мкЗв (п. 3.11.1). Соответствующие значения удельных активностей для ряда ситуаций рассчитаны и представляют собой величины, применяемые в качестве уровней активности неограниченного использования (УАНИ). То есть, возможность неограниченного использования определяется допустимыми удельными активностями радионуклидов, которые установлены для твердых материалов (ограничение на техногенные радионуклиды согласно приложению 3 к ОСПОРБ [37]) и для металлов и изделий из них (ограничение по основным долгоживущим радионуклидам согласно приложению 4 [37]).

Ограниченное использование допускается при величинах удельной активности радионуклидов, не превышающих значения минимально значимых удельных активностей (МЗУА), установленных НРБ-99/2009 [43], что также должно обеспечить соблюдение требования о непревышении индивидуальной годовой эффективной дозы облучения в 10 мкЗв в более ограниченном наборе сценариев. Разрешения в этом случае являются адресными, и выдаются в форме санитарно-эпидемиологического заключения, в котором указывается вид разрешенного использования конкретного количества материала. Такие материалы подлежат обязательному радиационному контролю.

В целом, к основным пробелам санитарно-гигиенического нормирования в рассматриваемой сфере можно отнести следующие:

- 1) Уровни удельной активности, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов (приложение 3 ОСПОРБ-99/2010), приводятся лишь

для техногенных радионуклидов. На отдельных переделах ЯТЦ загрязнение обусловлено только природными радионуклидами. Таким образом, уровни удельной активности, при которых допускается неограниченное использование материалов и веществ, образующихся при добыче и переработке урановых руд, и содержащих природные радионуклиды, не регламентированы.

2) Отсутствует однозначное указание на возможность обоснования иных значений активности при непревышении допустимого дозового критерия. Отсутствуют также конкретные указания по сценариям, которые необходимо рассматривать при таком обосновании, в том числе на площадке объекта использования атомной энергии, где круг лиц, на которых оказывается воздействие, ограничен персоналом в течение срока сохранения институционального контроля, а доступ населения и утрата знаний о характеристиках материалов может произойти только после истечения периода контроля.

Пробелы могут быть устранены, причем в полном соответствии с требованиями основных требований безопасности МАГАТЭ GSR part 3 [44]. Для этого в рамках актуализации санитарно-гигиенического нормирования следует внести изменения в ОСПОРБ [37] следующие изменения:

- установить однозначную возможность повторного использования материалов с удельной активностью радионуклидов выше МЗУА при обосновании безопасности их использования;
- определить в качестве основного критерия отдельные нормы допустимого радиационного воздействия на персонал и население;
- установить требования к сценариям, принимаемым во внимание при обосновании дозового воздействия.

Их внесение приведет к расширенному вовлечению ЗМ в хозяйственную деятельность и сократит как расходы на обращение с РАО, так и затраты на закупку необходимых чистых материалов.

Рассматривая вопрос разработки методов обоснования безопасности и экологической приемлемости технологий применения загрязненных материалов при консервации пунктов размещения особых РАО следует установить общие подходы и основные вопросы, которые должны сопровождать соответствующие технологии. Как и в случае отнесения к особым РАО [47], упор должен делаться в первую очередь на аспектах безопасности. Основной

вопрос в этом случае – совместимость физико-химических характеристик дополнительных и основных материалов хранилища РАО. Следовательно, требуются дополнительные работы, включая и экспериментальное исследование отдельных свойств и процессов.

С участием автора показано [40], что в общем случае следует исходить из следующих четырёх основных условий:

- общая активность ЗМ должна быть существенно ниже накопленной в водоемехранилище ЖРО;
- применение ЗМ должно быть экономически эффективным.
- применяемые ЗМ не должны оказывать недопустимого влияния на эксплуатационную безопасность объекта и безопасность окружающей среды и населения после приведения объекта в конечное состояние.
- применение ЗМ должно обеспечить радиационную защиту персонала на уровне, не ниже достигнутого.

Далее выполнение данных положений будет показано на примере работ по консервации водоема-хранилища В-17 ФГУП «ПО «Маяк».

ЗО-2 – Разделение отходов на промотходы, ОНАО и РАО. Причин существования данной ЗО как минимум четыре. Первая аналогична появлению ЗО-1. Вторая – отсутствие системы доступных пунктов захоронения ОНАО и промотходов с оптимизированными тарифами. Третья – чрезмерная детализация требований нормативно-правовой базы, не опирающейся на практический опыт обращения с РАО. Наиболее яркий пример – задание предельных уровней содержания каждого радионуклида в [21]. Их исполнение уже приводит и будет приводить к затратам, не связанным с обеспечением безопасности. Целесообразно во всех количественных критериях, установленных на уровне подзаконных актов или ФНП в ОИАЭ допускать отклонение от установленных критериев на основании обоснования оценки безопасности или установления их в документах более низкого уровня. В этом случае появляется возможность более тщательного финансово-экономического обоснования более эффективных решений при обращении с РАО. Например, отходы АО «ЧМЗ» относятся к РАО на основании превышения их удельной активности значения ПЗУА, установленного для природного урана менее чем в 1,2-1,5 раза. При этом U-238 в хвостохранилищах завода – это не природный уран, а прошедший многочисленные переделы материал, где уран переведен в практически нерастворимую форму, то есть

обладает существенно меньшей радиологической опасностью, чем природный уран, для которого и установлены все радиологические нормативы [46].

Четвертая – требование инструментального контроля. В большинстве своем проведение инструментального контроля необходимо лишь для нестационарных потоков отходов категорий ОНРАО и НАО, и для РАО, образующихся в результате работ по обслуживанию или выводу из эксплуатации зданий и сооружений. Эксплуатационные отходы категории САО и ВАО могут быть уверенно отнесены к категории РАО на основании данных по источнику происхождения (технологии, то есть фактически на стадии 1).

Наиболее распространенным инструментальным методом, применяемым для отнесения отходов к категории РАО, являются радиометрические измерения плотности потока альфа- и бета-частиц с загрязненной поверхности. Данная практика сложилась исторически под воздействием двух факторов: простота реализации и ориентация на безопасность персонала при обращении с РАО. Для оценки радиационного воздействия на персонал выше обозначенные методы контроля вполне достаточны, и именно поэтому они были использованы в качестве критериальных оценок отнесения к РАО отходов согласно санитарным нормам [45] до 1999 года (в дальнейшем применялись для отнесения к РАО отходов неизвестного состава).

ЗО-3 - Сохранение существующего нормативного разграничения РАО и ОНАО.

Причина в игнорировании целевого назначения ЕГС РАО, а именно захоронения наиболее опасных отходов и потенциала иных систем обеспечения безопасности, в том числе радиационной. Несостоятельность опасений авторов идеи включения ОНАО в состав ЕГС РАО и ожидаемые издержки от её реализации детально изложены в работе [18].

ЗО-4 - Нормативное закрепление возможности размещения РАО в ПХОРАО. В

настоящее время эта практика должным образом не урегулирована – плата за размещение РАО не установлена, лимиты устанавливаются несистемным образом. В зарубежной практике на подобные объекты, как правило, в полном объеме распространяются требования и рекомендации по существующим установкам и ситуациям существующего облучения, в отношении которых необходимость оптимизации радиационных рисков подчеркивается отдельно [52-53]. Следовательно, если прекращение размещения РАО не повлияет значительным образом на радиационное воздействие объекта на население,

персонал и окружающую среду и не сопряжено со значительными издержками, целесообразно продолжать размещение РАО в подобных объектах.

Как правило аргументы против подобной практики, сводились к требованию повторного обоснования отнесение таких ПХ к особым, поскольку критериальные параметры, определяющие отнесение к особым РАО, определяются комбинацией характеристик РАО и ПХ, в котором они размещены, при этом отсутствует порядок признания вновь образующихся РАО особыми, поскольку все разработанные методики, порядок регистрации РАО в качестве особых были ориентированы на проведение первичной регистрации, которая проводилась только для накопленных РАО. Далее будет показано, что выполнение критериальных параметров будет, в основном, определяться геометрическими характеристиками ПХ особых РАО.

Решения по данной ЗО связаны установлением нормативных требований к эксплуатации ПХ особых РАО (с учетом их преобразования в ПЗРО) и включением этого потока РАО в модель финансирования.

ЗО-5 – Ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО. Причина появления ЗО – историческая традиция долгосрочного хранения РАО и игнорирования расходов на хранение. Законом [3] было установлено требование об ограничении срока промежуточного хранения, в течение которого образовавшиеся удаляемые РАО должны быть приведены в соответствие критериям приемлемости. Логика требования понятна – введение в практику процесса кондиционирования. Все организации разделялись на 2 категории: организации, эксплуатирующие ЯРОО, и организации, не эксплуатирующие ЯРОО. Предполагалось, что организации, эксплуатирующие ЯРОО, могут в течение длительного времени обеспечить безопасное обращение с РАО, так как имеют для этого необходимую технологическую, инфраструктурную и кадровую основы, а установление срока промежуточного хранения будет регулироваться органом управления. Для второй категории вводился единый срок промежуточного хранения – 5 лет, который должен был предупредить возможность накопления значительных количеств РАО в организациях, не имеющих полномасштабной инфраструктуры по обращению с РАО и системы физической защиты.

Отметим, что несомненная правильность подобного подхода к ограничению срока промежуточного хранения превратилась в проблему за счет того, что приказом [54] был

введен единый срок промежуточного хранения для организаций, эксплуатирующих ЯРОО, равный 10 годам. Для большей части РАО подобный срок представляется достаточным для проведения технологических работ по кондиционированию. Однако, есть основания считать подобный подход необоснованным по критериям безопасности, например, для короткоживущих РАО. С течением времени активность РАО снижается, что позволяет избежать затрат на их кондиционирование.

Очевидно, что точка нахождения минимума затрат зависит от комплекса факторов: радионуклидного состава РАО, характеристик ПХ РАО, критериев приемлемости для соответствующих РАО и т. д. В такой ситуации представляется оптимальным предусмотреть возможность установления дифференцированного срока промежуточного хранения РАО (причем в рамках одной ЭО для разных типов РАО могут быть установлены разные сроки) с целью снижения общих затрат на обращение с ними. Очевидно, что такой срок должен коррелировать с жизненным циклом соответствующих объектов ЭО и всей площадки в целом, должен быть обоснован и согласован органом регулирования безопасности в рамках стандартной процедуры лицензирования деятельности.

Следовательно, в качестве способа оптимизации в данном случае следует определить установление дифференцированных сроков промежуточного хранения РАО с учетом технологических особенностей обращения с ними.

ЗО-6 - Захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО. Статьей 27 закона [3] предусмотрен упрощенный порядок захоронения наиболее безопасной категории РАО – ОНРАО. В развитии положения данной статьи было выпущено распоряжение Правительства РФ [29], устанавливающее перечень организаций, которым разрешено осуществлять захоронение РАО в ПЗРО, размещенных на используемых ими земельных участках. Однако реальная практика применения положений статьи 27 закона [3] до настоящего времени отсутствует.

Следовательно, в качестве пути оптимизации в данном случае следует определить облегчение процедуры принятия решений по размещению подобных ПЗРО их эксплуатации и исключения или упрощения процедуры передачи ПЗРО ОНРАО в ведение Национального оператора по обращению с РАО.

ЗО-7 - Оптимизация критериев классификации для захоронения. Проблематика классификации удаляемых РАО для захоронения является многоплановой, поскольку

пронизывает практически все этапы обращения с РАО. Исходя из классификации удаляемых РАО определяется тип ПЗРО, в котором должно осуществляться захоронение РАО, а следовательно, и критерии приемлемости, включая требования, обусловленные транспортно-технологическими операциями (тип контейнера, масса и пр.). То есть уже на этапе первичной сортировки РАО необходимо принимать во внимание критерии классификации для выбора соответствующей технологической цепочки обращения.

Проблема классификации удаляемых РАО широко обсуждается в отрасли. Международно принятый подход к классификации РАО для целей захоронения [48] заключается в минимизации затрат на захоронение РАО при безусловном выполнении требований безопасности населения и окружающей среды. Схематично он представлен на рисунке 2.3.

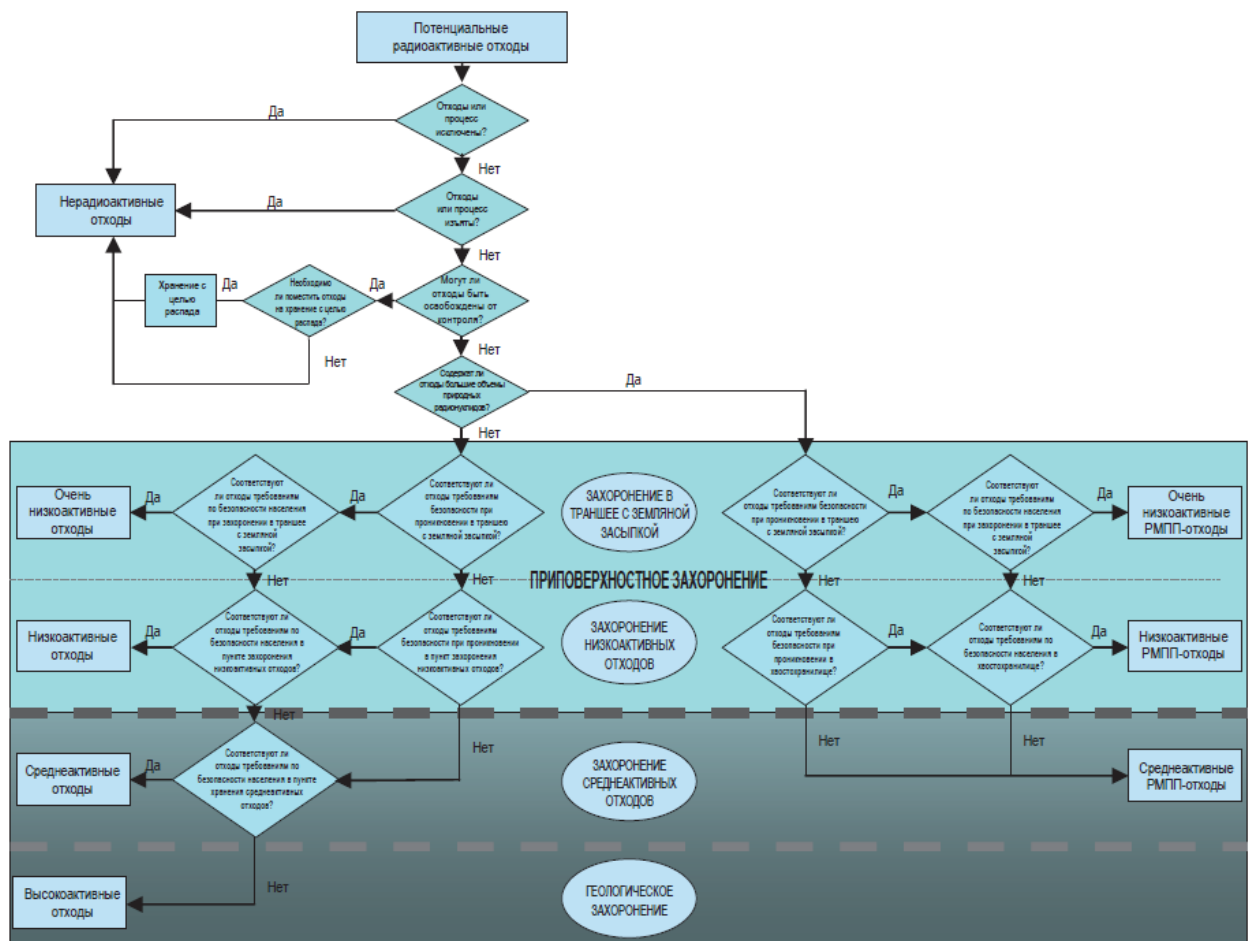


Рисунок 2.3 – Подход к классификации РАО [48]

Концептуально его можно выразить следующим образом: то, что можно захоронить на небольшой глубине, не стоит размещать в более глубоких ПЗРО. Действующая сегодня классификация [21] приводит к крупным финансовым издержкам, необоснованным с точки зрения принципов безопасности. Рассмотрим их подробнее.

Первая проблема – отсутствие согласованности двух критериев: отнесения к классам удаляемых РАО и отнесения отходов к РАО. Первый установлен [21] в форме суммарной активности бета-, альфа-излучающих радионуклидов и ТУЭ, второй установлен в виде значений ПЗУА в форме удельной активности отдельных радионуклидов. ПЗУА определены для каждого из радионуклидов на основе анализа сценариев облучения. Диапазон значений этой величины – от 1 до 10^5 Бк/г. Это означает, что радиологическая опасность каждого радионуклида условно учтена с использованием не только типа, но и всех других характеристик распада. Этот учет можно назвать очень условным, поскольку предусмотренные сценарием условия не соответствуют условиям размещения в ПЗРО, а в критериях участвуют все, в том числе сверхкороткоживущие радионуклиды. В критериях классификации удаляемых РАО I в качестве границ классов РАО используются значения кратные упрощенным критериям отнесения к РАО отходов неизвестного состава, исторически используемым в санитарных нормах. Применение различных подходов приводит к возникновению парадоксальных ситуаций для ряда практически значимых радионуклидов (рисунок 2.4), когда их удельные активности соответствуют 3-му и даже 2-му классу РАО, хотя и не превышают значение ПЗУА.

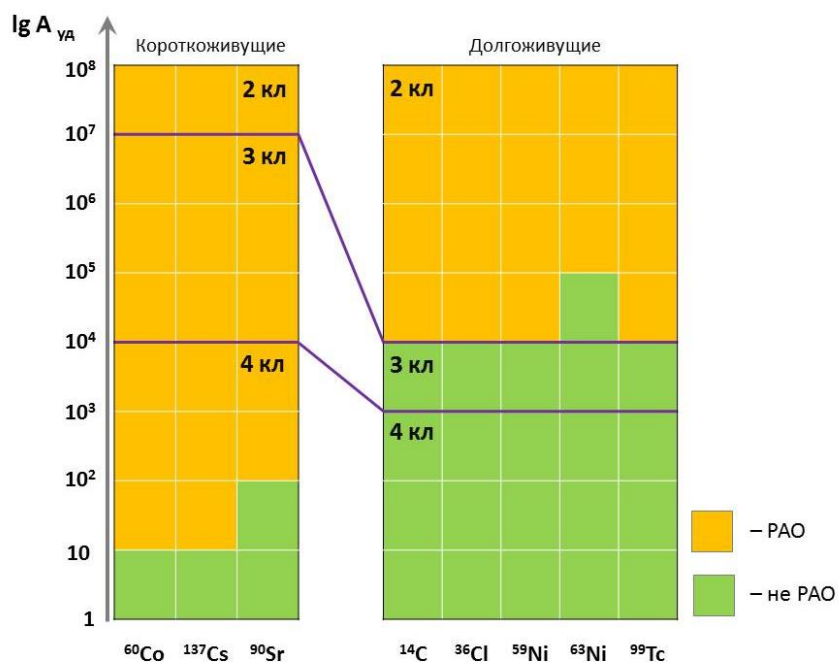


Рисунок 2.4 – Критерии классификации и критерии отнесения к РАО для отдельных радионуклидов

В итоге материал с концентрацией 0,9 ПЗУА для ряда радионуклидов (никель-63, никель-59 и пр.) – это не РАО, а материал с концентрацией 1,1 ПЗУА – уже не просто РАО, а РАО класса 2, тариф на захоронение которых в ~ 15 раз выше, чем тариф для класса 4. В результате ЭО вынуждены оплатить, а затем и разместить на захоронение в соответствующий ПЗРО материал, радиологическая опасность которого крайне низка и соответствует значениям РАО очень низкой активности.

Второй аспект – недостаточная детализация периода полураспада радионуклидов. Все радионуклиды делятся на две категории – долгоживущие (период полураспада более 31 года) и короткоживущие (период полураспада менее 31 года). Таким образом, в одну категорию попадают и радионуклиды с периодом полураспада ~ 30 лет, и с периодами полураспада ~ 5 и ~ 1 года несмотря на то, что различия в эффекте радиоактивного распада для данных радионуклидов на длительных временах (характерных для оценки безопасности захоронения) принципиально различаются. Радионуклиды с периодом полураспада менее года, видимо, в принципе не должны фигурировать в классификации РАО для захоронения, а в действующей классификации и реальной практике они доминируют.

Третий аспект – классификация ОЗРИ, в которой используется категория опасности, то есть мера возможного вреда вследствие утраты контроля над единичным источником в

настоящий момент времени. Понятно, что эти сценарии принципиально отличаются от сценария захоронения РАО. В итоге: не учитывается период полураспада радионуклида; критерий привязан к абсолютному значению активности ОЗРИ, а не к удельной активности, как это сделано для остальных типов РАО. Это ведет к отнесению к одному классу различных по опасности отходов (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Значения активности ОЗРИ, соответствующие отнесению к классу 2 и соответствующие им удельные активности при цементировании одного источника в одном литре компаунда

Радионуклид	Активность отнесения к классу 2, Бк	Удельная активность при цементировании, Бк/г	Удельная активность при цементировании через 100 лет, Бк/г	Удельная активность при цементировании через 300 лет, Бк/г
⁵⁷ Со	$7 \cdot 10^{11}$	$\sim 3,5 \cdot 10^8$	< 1	-
⁶⁰ Со	$3 \cdot 10^{11}$	$\sim 1,5 \cdot 10^8$	$\sim 3 \cdot 10^2$	< 1
¹³⁷ Сs	$1 \cdot 10^{12}$	$\sim 5,0 \cdot 10^8$	$\sim 5 \cdot 10^7$	$\sim 5 \cdot 10^4$

Из представленных данных видно, что подобный подход к классификации ОЗРИ требует отнесения к классу 2 даже РАО, удельная активность которых через 100 лет (срок сохранения изолирующей способности контейнера для РАО класса 3 по нормам [30]) будет нулевой.

Учитывая, что количество ОЗРИ, образующихся ежегодно, составляет $\sim 40\,000$ шт./год, а общее количество уже накопленных ОЗРИ составляет ~ 3 млн штук [50], можно утверждать, что действующая классификация ведет к неоправданным дополнительным затратам на их захоронение.

Возможное решение указанной проблемы – выделение ОЗРИ в отдельную категорию РАО с выработкой отдельных критериев классификации, и применения уже существующих и хорошо зарекомендовавших себя установок для их захоронения.

Таким образом, анализ ЗО-7 показывает первоочередность коренной переработки критериев классификации на основе принципов безопасности. При этом можно выделить два аспекта оптимизации (корректировка численных критериев классификации ЗО-7.1 и выделение отдельного класса для ОЗРИ с учетом технологических особенностей обращения с ними ЗО-7.2). Отметим, что ЗО-7.2 естественным образом вливается в более общую ЗО-11.

30-8 – Расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости. В рекомендациях МАГАТЭ [11,55-56] по тематике критериев приемлемости РАО для захоронения, указано, что процедура их установления должна носить итерационный характер с участием всех заинтересованных сторон, а сами критерии основываться на оценке безопасности. Этот подход не в полной мере вошел в отечественную практику. В соответствии с нормами [30] в настоящее время критерии приемлемости имеют двухуровневую систему: общие (устанавливают номенклатуру характеристик РАО, к которым могут устанавливаться требования для обеспечения безопасности захоронения, а также устанавливают требования к отдельным характеристикам РАО различных классов) и частные (устанавливают требования к захоронению РАО в конкретном ПЗРО).

Это приводит к практическим трудностям: установление критериев приемлемости для захоронения в конкретном ПЗРО, согласно ФНП, является прерогативой ФГУП «НО РАО». Это означает, что определять их будет НО РАО и организация, осуществляющая проектирование ПЗРО. При этом возможны два варианта. Национальный оператор предусматривает требования для проектирования, которые не могут быть выполнены, как это было в 2019 году при проектировании ПЗРО 3 и 4 классов [57]. Или при определении критериев приемлемости для ПЗРО реализуется консервативный подход, и затраты на захоронение РАО возрастают.

В настоящий момент развития ЕГС РАО нормативное регулирование игнорирует фактическую номенклатуру РАО, либо исходит из достигнутых показателей методов кондиционирования, а не из реальных требований обеспечения безопасности, что приводит, с одной стороны, к формированию дифференцированных по методам требований, ориентированных на конкретные технологии [58], а с другой стороны, к единым требованиям ко всем РАО вне зависимости от применяемых методов [30]. На самом деле уже на текущем этапе развития ЕГС РАО следует проводить дифференцированное установление требований к различным видам отходов с учетом их характеристик и реального влияния на протекание различных сценариев эволюции ПЗРО. Это позволит уйти от задачи приведения характеристик специфических отходов к установленным ранее требованиям и заменить ее задачей анализа создания безопасного объекта захоронения для таких РАО. Отметим также, что, как и при отнесении отходов к РАО, в этом случае очень важную роль играют данные по радионуклидному составу РАО.

Проблематике контейнеров для захоронения посвящено достаточно много публикаций, например, монография [103], статьи [104-106]. В целом в данном направлении стоит задача определить оптимальный из доступных контейнеров с учетом характеристик РАО. Наибольший потенциал в данном направлении имеется для случая захоронения ОНРАО на площадках предприятий, когда отсутствие перевозок на значительные расстояния, а также возможность создания уникального проекта ПЗРО позволяет подойти к данному вопросу наиболее гибко, например, существенно увеличить объем контейнеров для увеличения их полезного объема при требуемых защитных свойствах.

Дополнительными сдерживающими факторами являются: требования к сертификации контейнера, а также требования проекта ПЗРО, в котором могут быть предусмотрены ограничения, в том числе, на размер контейнеров. В качестве возможных несогласованных нормативных требований можно рассматривать, пожалуй, только требования к контейнерам для захоронения РАО в ПЗРО по сроку сохранения изолирующей способности (не менее 1000 лет). В целом установление подобных требований к системе ИББ, к которым относится контейнер, может быть необходимым. Однако в ряде концепций захоронения отходов подобного рода предусматривается использование дополнительных упаковочных комплектов непосредственно на территории ПЗРО, что, учитывая положения ФЗ-190 [3] об обязанности эксплуатирующей организации обеспечить приведение РАО к критериям приемлемости, следует рассматривать уже не как процесс кондиционирования, а процесс эксплуатации ПЗРО. В такой ситуации было бы правильным ориентироваться на технические решения конкретного ПЗРО, исключив соответствующие требования из общих критериев приемлемости [30].

В целом выбор контейнера для захоронения РАО, а также способы размещения РАО с использованием дополнительных экранирующих зависят от конкретных характеристик РАО. При этом следует избегать использования контейнеров с очевидно избыточными защитными свойствами для конкретного типа РАО на основе применения аналогичных решения для принципиально иных типов РАО. Такая ситуация частично сложилась, например, на ГХК [107]. В целом все нормативные условия для принятия взвешенных решений по выбору типа контейнера для захоронения созданы.

30-9 – Перечень учитываемых радионуклидов. Радионуклидный состав и активность РАО традиционно считаются одними из важнейших параметров. В России

практика контроля радионуклидов в РАО была ориентирована на достижение трех основных целей:

- радиационная безопасность персонала;
- контроль и учет;
- ядерная безопасность.

Вопросам, возникающим на стадиях захоронения РАО, в том числе более глубокой характеристики радионуклидного состава, даже в научном сообществе долгое время не было уделено должного внимания в силу объективных причин. Ориентация на захоронение РАО предъявила принципиально иные требования к контролю их радионуклидного состава. Однако до настоящего времени, несмотря на ряд имеющихся проработок [59-60], состояние аналитического контроля радионуклидного состава РАО кардинально не изменилось, контроль содержания ряда долгоживущих, в особенности труднодетектируемых, радионуклидов не проводится.

Очевидно, что требования к определению радионуклидного состава РАО для захоронения должны быть основаны на принципе разумной достаточности: то есть контролироваться должен не весь перечень радионуклидов из нормативного документа [21], а только те радионуклиды (в дальнейшем радиологически значимые радионуклиды), которые определяют требования безопасности. Причем на различных стадиях обращения с РАО (хранение, транспортировка, захоронение и др.) к радиологически значимым будут относиться различные радионуклиды. Отметим, что понятия «радиологически значимые радионуклиды» строго не определено. В настоящей работе под ним будем понимать группу радионуклидов с суммарным вкладом в мощность дозы более 99 % для выбранного сценария обращения с РАО и соответствующего ему пути воздействия на персонал или население.

Для оценки радиационного воздействия кондиционированных РАО на персонал в ходе нормальной эксплуатации ПЗРО наиболее важны гамма-излучающие нуклиды, причем, чем выше выход гамма-излучения и его энергия, тем большую значимость радионуклида в рамках оценки безопасности. Для анализа аварийных ситуаций, связанных с распространением радионуклидов за пределы упаковки, во внимание необходимо принимать как внешнее облучение, так и внутреннее. Это приводит к смещению перечня радионуклидов в сторону тех, которые обладают наибольшими дозовыми коэффициентами

при ингаляционном поступлении и заглатывании радионуклидов (в т. ч. поступлении с пищей) в организм человека. После захоронения РАО при рассмотрении базового сценария эволюции системы ПЗРО потенциальным источником облучения человека будет являться загрязненная вода и продукты питания. Некоторое поступление радионуклидов в окружающую среду может происходить за счет нарушения защитных свойств матрицы РАО, упаковки и систем защиты ПЗРО. При этом от момента образования РАО до момента их потенциального воздействия на население может пройти сто, тысяча и десятки тысяч лет.

Таким образом, при оценке долгосрочной безопасности ПЗРО необходимо принимать во внимание не столько радионуклидный состав РАО при их образовании, сколько состав РАО, который будет соответствовать периоду и сценарию потенциального радиологического воздействия на персонал и население. В работе [61] с участием автора было показано, как кардинально изменяется перечень радиологически значимых радионуклидов для активационных РАО, образующихся при ВЭ энергоблоков АЭС (см. рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Радиологически значимые радионуклиды на различных этапах жизненного цикла РАО

Анализ материалов первичной регистрации РАО показывает, что для РАО АЭС в регистрационных формах всего указывалось наличие только 15 радионуклидов. Однако подобное значительное число контролируемых радионуклидов не должно вводить в

заблуждение, поскольку детальность данных по радионуклидному составу крайне неоднородна. На рисунке 2.6 представлено распределение наличия радионуклидов в зависимости от объема накопленных РАО АЭС.

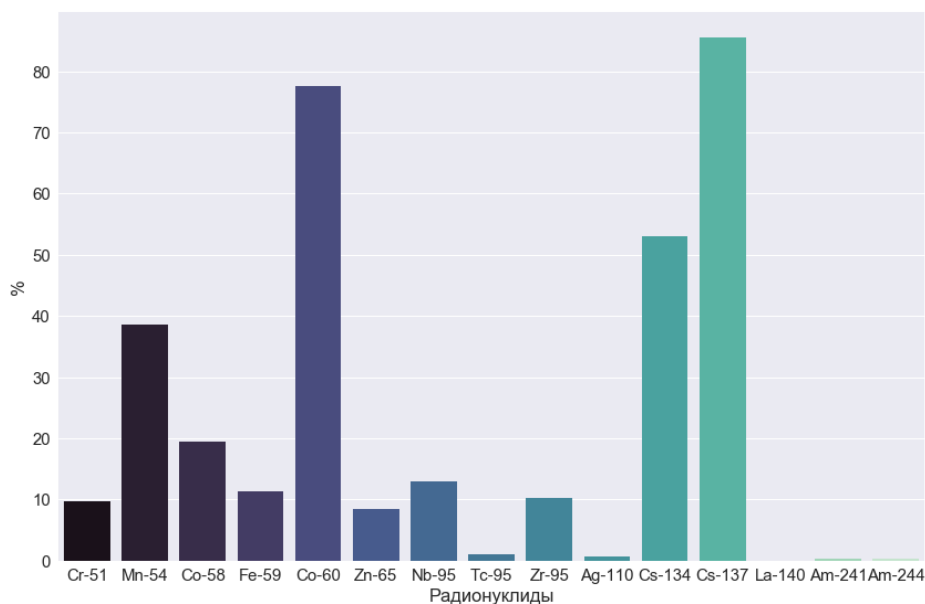


Рисунок 2.6 – Распределение наличия радионуклидов в зависимости от объема РАО

Как видно из представленных данных, для основного объема РАО указано лишь содержание 4 радионуклидов (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{134}Cs и ^{137}Cs). Это объясняется двумя факторами:

- сложившейся на АЭС практикой характеристики РАО с помощью гамма-спектрометрических измерительных приборов, которые, с одной стороны, являются относительно простыми, а с другой позволяют получить данные по тем радионуклидам, которые вносят вклад во внешнее облучение персонала;
- отсутствием нормативных требований в части характеристики радионуклидного состава РАО.

На этапе размещения, сооружения и даже начальном этапе эксплуатации ПЗРО отсутствие подобной информации не представляет нерешаемую проблему. По мере накопления информации о реальных характеристиках РАО можно в рамках пересмотра критериев приемлемости учесть консервативные интервальные оценки содержания радионуклидов в РАО, уже размещенных в ПЗРО, при этом для вновь размещаемых РАО могут быть установлены и более жесткие требования. Фактически это будет аналог подхода, примененного во Франции, где в приповерхностном ПЗРО (Aube) наряду с

короткоживущими НАО были размещены РАО в виде облученного графита, относящиеся к категории долгоживущих НАО. Это привело к установлению чрезвычайно жестких требований по содержанию быстро мигрирующего радионуклида ^{36}Cl . Предельное содержание данного радионуклида в РАО, размещаемых в этом ПЗРО, согласно критериям приемлемости составляет не более 5 Бк/г (при ПЗУА не более 10^4 Бк/г), что объясняется его относительно высоким содержанием в графитовых РАО.

Тем не менее, во избежание установления подобных чрезмерно жестких требований необходимо как можно раньше включать в оценку безопасности ПЗРО и соответственно установление критериев приемлемости данные по более полному радионуклидному составу РАО. И чем раньше это будет выполнено, тем меньше вероятность неэффективного использования объемов ПЗРО.

ЗО-10. Контроль за соответствием РАО критериям приемлемости. Перечень параметров РАО, которые определяют возможность безопасного захоронения РАО в ПЗРО достаточно широк и содержит в себе как требования к радионуклидному составу РАО и их физико-химическим свойствам. Отметим, что невозможность полного контроля за приемлемые сроки и с приемлемыми затратами характеристик РАО фактически не подвергается сомнению – РАО содержат ряд трудно детектируемых радионуклидов, не определяемых неразрушающими методами, а к матрице предъявляют требования по стойкости компаунда при множественных термических циклах и т. д.

Очевидно, что стремление создать в рамках ЕГС РАО систему четко разграниченной ответственности привело к формальному закреплению заведомо невыполнимых обязанностей по контролю характеристик уже кондиционированных РАО. Путь к разрешению данной проблемы лежит в рамках уже устоявшихся правил системы менеджмента качества, дополненных сложившимся регулированием в области системы обеспечения единства измерений. По сути – оптимизация в данном направлении должна подразумевать нахождение оптимального баланса между вероятностями ошибок первого и второго рода (гипотеза – соответствие РАО критериям приемлемости).

ЗО-11 – размещение и проектирование ПЗРО. В силу особенностей рассмотрения и обсуждения критериев классификации единственным нормативным указанием для разработки инвестиционной программы НО РАО стала классификация, определенная [21], в которой отсутствовал класс ОНРАО и был допущен ряд иных недостатков. Практически

единственным указанием на тип захоронения стала глубина залегания ПЗРО (более 100 м, менее 100 м, на одном уровне с земной поверхностью), которая, во-первых, трактуется неоднозначно, а, во-вторых, объединяет в одну категорию принципиально разные типы захоронения (приповерхностное и на средней глубине). С учетом запроса на минимизацию затрат в качестве типового объекта стало захоронение РО на небольшой глубине, а тип захоронения на средней глубине был фактически вычеркнут из системы планирования.

Структура системы ПЗРО

Структура системы ПЗРО тесно связана с классификацией удаляемых РАО для целей захоронения. Согласно рекомендациям МАГАТЭ [48] классификация определяется на основе оценок безопасности захоронения, которые опираются на принятую систему ПЗРО. Так, например, в Германии все РАО подлежат геологическому захоронению [32], что определяет отсутствие классификации РАО для целей захоронения [51].

В общем случае степень сложности структуры по обращению с РАО, включая их захоронение, зависит от сложности и разносторонности ситуации с накопленными и образующимися РАО. В случае РФ ситуация является наиболее сложной, так как присутствует полный спектр ядерных технологий и объектов ядерной техники, являющихся источниками образования РАО и значительный объем накопленных РАО. Эти факторы наряду с практическими сложностями размещения ПЗРО (в основном в силу социальных причин) предопределяет необходимость создания наиболее развернутой структуры ПЗРО. Представление о структуре ПЗРО, представленное в GSG-1 [48] и основанное на глубине залегания является упрощенным. Возможность безопасного захоронения РАО определяется не только глубиной, но также и характеристиками вмещающих пород. Обоснование безопасности ПЗРО может быть представлено как анализ двух совокупностей сценариев: сценариев связанных с распространением радионуклидов в геологической среде и сценариев вторжения в систему ПЗРО (техногенное воздействие на систему захоронения, приводящее непосредственно к контакту с РАО). При этом предполагается, что в течение определенного времени сценарии второго типа не могут быть реализованы, поскольку осуществляется административный контроль, исключающий такую возможность [49]. Результат оценки безопасности по сценариям первого типа зависит в основном от гидрогеологических условий размещения (помимо характеристик РАО). Результат оценки безопасности по сценариям второго типа помимо характеристик РАО зависит от вероятности вторжения (определяется, в том числе, глубиной залегания ПЗРО), а также

объемом извлекаемых РАО и факторами разбавления РАО при их извлечении, которые также косвенно определяются глубиной залегания. Учитывая, что предельно допустимое содержание долгоживущих радионуклидов в приповерхностных ПЗРО определяется, как правило, именно сценариями вторжения, то логика градации ПЗРО по глубине их залегания логична. Кроме того, по мере роста глубины залегания ПЗРО можно предъявлять также и более строгие требования к гидрогеологическим характеристикам площадки размещения.

В рамках действующей в России классификации РАО (и, соответственно, инфраструктуры по созданию ПЗРО) [21] упоминаются различия по глубине: глубинное (глубина залегания более 100 м); приповерхностное, размещенное на глубине менее 100 м; приповерхностное, размещенное на одном уровне с земной поверхностью. При этом ПЗРО на средней глубине и расположенные в непосредственной близости от земной поверхности формально не разделены, что дало основание для проектирования приповерхностных ПЗРО, которые не рассматривают ПЗРО на средней глубине как необходимый элемент системы захоронения, что, на взгляд автора, является ошибочным решением.

На рисунке 2.7 схематично показано соответствие действующей и предлагаемой структуры ПЗРО (и соответствующей им номенклатуры классов удаляемых РАО).

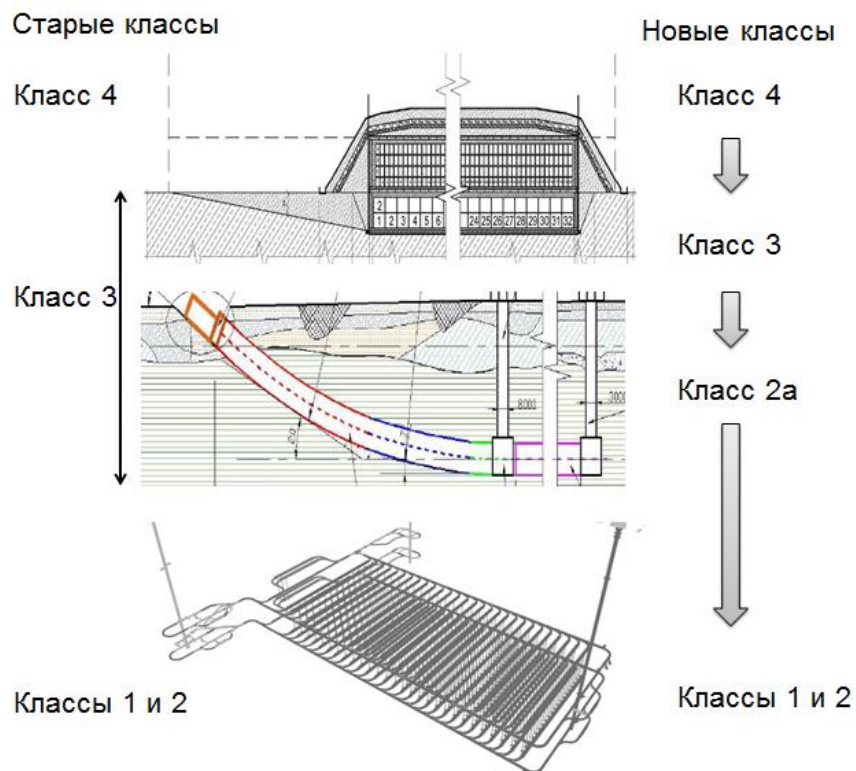


Рисунок 2.7 – Предложения по установлению номенклатуры ПЗРО и классов удаляемых РАО

Отметим, что в создание ПЗРО нового типа целесообразно только в том случае, если оно позволит осуществить захоронение РАО, которые в настоящий момент планируются к захоронению в ПЗРО с соответствующими тарифами. С учетом имеющегося международного опыта наиболее перспективным видом РАО для данного типа ПЗРО является облученный графит, а также многие иные отходы, относимые в настоящее время к классу 2.

ЗО-12 - Содержание объектов долговременного хранения РАО. В отношении оптимизации деятельности по хранению РАО речь может идти лишь о снятии избыточных мер и несоразмерных опасности требований к ним. Избыточность может быть обусловлена разными причинами – вплоть до отсутствия должной актуализации эксплуатационной документации. Вопросы оптимизации в данной ЗО должны рассматриваться с учетом всех конкретных обстоятельств. Опыт показывает на наличие потенциала оптимизации практически во всех случаях.

ЗО-13 – Критерии отнесения к особым РАО. Ограничения по происхождению и местоположению РАО – основные недостатки соответствующих критериев [21].

Ограничение на местоположение может быть объяснено природоохранными опасениями. В отношении ограничений по происхождению рациональных причин нет. Ситуация детально исследована и описана [47, 62, 63]. В качестве одной из дополнительных задач следует определить изменение процедуры пересмотра результатов первичной регистрации на основании экспертизы принятых ранее решений. Во многих случаях РАО были отнесены к удаляемым по желанию эксплуатирующей организации, то есть без ответственного учета затрат и выгод, и вследствие неготовности ЭО к подготовке обосновывающих материалов. Данный вопрос также рассмотрен в научной литературе [62].

ЗО-14 - Обращение с РАО при ВЭ ПХ. Причина появления зоны оптимизации в историческом разрыве между периодом создания большого количества приповерхностных могильников РАО и водоемов-хранилищ ЖРО и периодом формирования основной нормативной базы, в рамках которой под хранением подразумевалось уже размещение с возможностью извлечения. Удаление РАО задача сугубо технологическая и ситуативная. Как и в ЗО-12 оптимизация должна в полной мере учитывать реальные характеристики РАО, ПХ, предлагаемых методов извлечения и многое другое. При этом, будучи не критично зависимой от квалификации персонала данный шаг может подлежать значительной оптимизации за счет более гибкого управления трудовыми ресурсами [64]. По технологической составляющей зона близка к ЗО-2, отличаясь лишь объектом деятельности по обращению (накопленные, а не вновь образующиеся РАО).

ЗО-15 - Создание новых объектов размещения особых РАО. Данная зона оптимизации произрастает из положений части 2 статьи 26 190-ФЗ [190-ФЗ], которая запрещает *«сооружение промышленных объектов и создание промышленных технологий, если это заведомо приводит к образованию особых радиоактивных отходов»*. Данная норма была ориентирована на исключение возможности создания таких сложных (с точки зрения их заключительной стадии жизненного цикла) объектов как поверхностные водоемы-хранилища и т. д. Однако она стала трактоваться и как запрет на реализацию концепции захоронения на месте, если пункты хранения (или установки) не были зарегистрированы как пункты размещения особых РАО в рамках первичной регистрации. Тем не менее отметим, что по факту реализация данной стратегии может быть осуществлена путем «полноценного» создания ПЗРО, что, конечно, создает дополнительные сложности с процессом принятия решения о размещении, проектированием, но по факту означает лишь более длительные процедуры на

подготовительном периоде и возрастание затрат на разработку и согласование проектной и иной документации. Учитывая, что подавляющее большинство объектов, которые на данном этапе предполагается выводить из эксплуатации по варианту захоронение на месте обладают статусом пункты размещения или пункты консервации особых РАО рассмотрение данной зоны оптимизации оставим за рамками диссертационной работы.

30-16 - Определение тактики демонтажных и дезактивационных работ.

Оптимальная тактика зависит от ряда условий, из которых ключевое значение имеют: характеристики радиационного загрязнения объекта (уровни и радионуклидный состав), геометрические характеристики объекта, определяющие условия проведения работ, технологические взаимосвязи с иными объектами, в том числе используемыми при проведении работ по ВЭ, а также доступное финансирование. Часто противопоставляются сценарии немедленного демонтажа и отложенного демонтажа. Безусловно, время выдержки существенным образом влияет на стоимость демонтажных и дезактивационных работ, и его оптимальное значение должно быть определено на основе сравнения ежегодных затрат на эксплуатацию объекта в режиме окончательного останова и выгод, получаемых за счет снижения радиационных полей в месте проведения демонтажных и дезактивационных работ (возможность применения более простых методов, увеличение длительности пребывания персонала и т. д.). Однако его влияние нельзя переоценивать. Это, как правило, 10-15 % от стоимости работ.

Гораздо более важны вопросы технологической настройки работ с учетом фактических характеристик оборудования и строительных конструкций, такие как определение оптимальной толщины снимаемого слоя при механической дезактивации строительных сооружений, порядок проведения оперативного радиационного контроля для определения необходимости повторной дезактивации, применение оптимизированных контрольных критериев для выбора той или иной технологической цепочки обращения с РАО и т. д. Отметим, что никаких нормативных или иных ограничений, препятствующих эффективной работе в данной части нет, и вопрос стоит исключительно о создании стимулирующих условий для проектанта и организаций, выполняющих работы по ВЭ, оптимальным образом выполнять соответствующие работы (проектирование технологий и их реализация), что лежит в основном в организационной области.

2.4 Выделение приоритетных направлений оптимизации

Для сформированного первичного перечня зон оптимизации (см. таблицы 2.1-2.3) на основе предложенного в разделах 1.2 и 2.1 способа была выполнена предварительная оценка влияния соответствующих технологических и организационных мер на эффективность ЕГС РАО. Отметим, что за время диссертационного исследования ряд мер уже был выработан, в том числе с участием автора, и не требует дополнительного вариантного анализа или их разрешения уже находится исключительно в финансово-экономической, правовой или административной областях. Это относится к зонам оптимизации ЗО-12, ЗО-13, ЗО-15, ЗО-16.

Для оценки эффективности оставшихся зон оптимизации были предложены сценарии (таблица 2.5), которые в ряде случаев носили частный характер, но, тем не менее, позволяли судить о масштабе эффектов. В качестве исходных данных для оценки сценариев были использованы фактические данные [65-67] или собственные оценки автора. Оценка проводилась в основном для РАО накопленных и вновь образующихся на АС. По ЗО-3 оценка проведена на данных предприятий, предоставивших данные в рамках работы рабочей группы для подготовки предложений по совершенствованию нормативного правового обеспечения деятельности по обращению с промышленными отходами, содержащими радиоактивные вещества, созданной по инициативе Госкорпорации «Росатом» [70]. Для ЗО-1 оценка проведена для консервации водоема В-17, а оценка для ЗО-4 – для варианта размещения шламов АО «АЭХК» в пульпоохранилища АО «СХК».

Результаты оценки изменения функционала эффективности для каждой из обозначенных зон оптимизации (таблица 2.6) дополнены рейтингами.

Таблица 2.5 – Описание рассматриваемых сценариев оптимизации для оценки влияния на эффективность ЕГС РАО

№ 3О	Исходные данные для оценки
3О-1	Потенциальный объем применяемых материалов - 200 000 м ³ , иные данные из [40].
3О-2	Предположение о том, что оптимизированные методы разделения РАО и промышленных отходов на 10% сокращают объем образования ОНРАО.
3О-3	В рамках рабочей группы для подготовки предложений по совершенствованию нормативного правового обеспечения деятельности по обращению с промышленными отходами, содержащими радиоактивные вещества [71], принято, что в случае внесения подобных изменений стоимость обращения возрастет на 9 000 рублей/м ³ . Объемы соответствующих отходов также приняты согласно представленным данным с исключением накопленных объемов АО ЧМЗ, которые при отнесении таких отходов к РАО потенциально будут относиться к особым.
3О-4	Примем снижение затрат на обращение с РАО в случае обеспечения возможности их захоронения в ПХ-1,2 согласно [66] равными 4,6 млрд рублей. Совокупная стоимость обращения с РАО оценивается ~6 млрд рублей.
3О-5	Оценку влияния оценим исходя из потенциального эффекта от выдержки РАО АЭС, относящихся к категории ОНРАО. При проведении соответствующих оценок будем исходить из соотношения ОНРАО и НАО в кондиционированных РАО класса 4 как 50:50, затраты на обращение с РАО до их захоронения примем равными ~0,4 от всей суммы затрат на их обращение (согласно усредненным данным локальных стратегий обращения с РАО на АЭС). Затраты на хранение РАО, относящихся к категории ОНРАО примем равными ~1 тыс. рублей/год согласно данным [67]. Примем, что переход от стратегии захоронения к стратегии выдержки в течение ~ 30 для ~ 50 % наименее активных ОНАО позволит исключить их из категории РАО, что приведет к возможности их захоронения на полигоне промышленных отходов на территории АЭС, а также исключить затраты на кондиционирование и доставку к централизованному ПЗРО.
3О-6	Примем, что стоимость обращения с РАО, включая их захоронение, снизится в 2 раза за счет ориентации проектных решений ПЗРО на конкретные РАО, исключения транспортных расходов, а также обеспечения захоронения РАО в неупакованном виде.

30-7	Для РАО, образующихся и накопленных на АС, типичным примером является радионуклид ^{63}Ni , содержание которого достаточно высоко [60] и с хорошей точностью определяется через содержание реперного радионуклида ^{60}Co . Наличие данного радионуклида требует отнесения РАО на основании критериев [21] к более высоким классам. Экономические оценки введения дифференцированных критериев классификации для данного радионуклида приведены в [65]. Показано, что внесение соответствующих корректировок позволяет снизить стоимость захоронения более чем на 30 млрд рублей.
30-8	Принят вариант совместного размещения РАО уранового производства и РАО АС (перечень радионуклидов в РАО является непересекающимся) в одном ПЗРО в соотношении 50\50 допустимые активности долгоживущих радионуклидов для оптимизированных критериев приемлемости будут увеличены вдвое относительно исходных, оцененных исходя из предположения о равномерном распределении радионуклидов по всем упаковкам РАО. Это означает, что часть РАО более высокого класса может быть безопасна размещена в ПЗРО. Экономический эффект оценен для захоронения ~ 10 % класса 2 в ПЗРО для классов 3 и 4.
30-9	Принято, что стоимость «оптимизированной» процедуры паспортизации составляет 5 тыс. рублей за упаковку с РАО [68]. В случае излишней детализации радионуклидного состава РАО стоимость возрастает на порядок (оценено как соотношении стоимости типового аналитического оборудования гамма-спектрометр и масс-спектрометр).
30-10	Экономический эффект оценен исходя из приведенных ранее предположений о стоимости проведения измерений характеристик РАО (4б), увеличения стоимости проведения измерений упаковки РАО НО РАО вдвое за счет того, что при проведении измерений НО РАО будет обращаться с готовой упаковкой (необходимость пробоотбора и последующей герметизации упаковки) Предотвращенный объем контроля по углубленной схеме принят в 10 % от общего объема.
30-11	1. ПЗРО для облученного графита на основе данных работы [69], показывающих, что применение концепции приповерхностного захоронения (на средней глубине) графитовых РАО позволит сократить затраты в ~2 раза, а также позволит снизить транспортные расходы на 10 млрд рублей. 2. ПЗРО для ОЗРИ. Приняты: годовое образование – 40 тыс. шт. [50]; типовая схема – цементирование (1 л на 1 ОЗРИ). В отношении стоимости обращения сделаем также консервативное предположение о снижении затрат ~ в 2 раза за счет создания специализированного объекта захоронения и отсутствия необходимости кондиционирования.
30-14	Для РАО АС принято, что оптимизированные методы разделения РАО и промышленных отходов позволят сократить на ~10 % общее количество ОНРАО.

Таблица 2.6 – Результаты оценки влияния отдельных мероприятий на эффективность ЕГС РАО

№	Операционная зона	$\frac{ИНО_i^4 \cdot AC_i \cdot \sum_k A_k^i \cdot P_k}{СП_i}$	$S_i^{до}$, млн руб.	$E_i^{до}$, млн руб. ⁻¹	$S_i^{после}$, млн руб.	$E_i^{посл}$, млн руб. ⁻¹	δE , %	Рейтинг эфф-ти
3О-1	Ежегодное отнесение к не подлежащим дальнейшему использованию отходам	1,02E+03	2,80E+03	3,64E-01	2,50E+02	4,08E+00	1,40E+00	9
3О-2	Разделение отходов на промотходы, ОНАО и РАО	3,39E+02	5,25E+04	6,46E-03	5,21E+04	6,51E-03	2,17E-01	12
3О-3	Нормативное разграничение отходов ОНАО и РАО	6,32E+02	1,23E+04	5,14E-02	1,35E+03	4,68E-01	6,30E+00	3
3О-4	Нормативное закрепление возможности размещения РАО в ПХОРАО	1,57E+04	5,80E+03	2,71E+00	1,10E+03	1,43E+01	2,61E+00	6
3О-5	Ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	1,15E+05	7,48E-02	1,65E+00	7,8
3О-6	Захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	1,13E+05	7,61E-02	2,78E+00	5
3О-7	Оптимизация критериев классификации РАО для захоронения	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	5,22E+04	1,65E-01	5,53E+01	1
3О-8	Расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	1,11E+05	7,75E-02	3,94E+00	4
3О-9	Перечень учитываемых радионуклидов	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	1,15E+05	7,48E-02	1,65E+00	7,8

ЗО-10	Контроль за соответствием РАО критериям приемлемости	8,60E+03	1,18E+05	7,29E-02	1,17E+05	7,35E-02	5,44E-01	10
ЗО-11	Размещение и проектирование ПЗРО. Создание ПЗРО на средней глубине	5,57E+03	4,57E+04	1,22E-01	2,20E+04	2,53E-01	1,47E+01	2
	Размещение и проектирование ПЗРО. Создание объекта захоронения для ОЗРИ	5,86E+00	1,30E+02	4,51E-02	6,50E+01	9,02E-02	3,52E-02	13
ЗО-14	Обращение с РАО при ВЭ ПХ РАО	8,26E+03	6,55E+04	1,26E-01	6,50E+04	1,27E-01	2,71E-01	11

Определив, таким образом, высокорейтинговые зоны оптимизации как те, для которых относительное изменение эффективности ЕГС РАО превышает 1 % (1-9), перейдем в рамках последующих двух глав к техническим решениям по совершенствованию системы обращения с РАО в определенных приоритетных зонах оптимизации и обоснуем их безопасность и экологическую приемлемость. Уже отмеченная ранее взаимозависимость мер оптимизации побуждает рассмотреть предлагаемые меры в составе двух групп. В первой (глава 3) будут рассмотрены меры по повышению эффективности обращения с РАО подлежащими удалению в централизованные ПЗРО (ЗО-7, ЗО-8, ЗО-9 и ЗО-11). Во второй (глава 4) – меры по различного рода отдельным ситуациям, включая обращения с особыми РАО (ЗО-1, ЗО-3, ЗО-4, ЗО-5, ЗО-6).

2.5 Выводы по главе 2

На основе рассмотрения структурных моделей жизненного цикла накопленных и вновь образующихся РАО были определены потенциальные зоны оптимизации деятельности по обращению с РАО, характерные для различных стадий обращения (общее количество выявленных ЗО – 16). По всем ЗО на практике фиксируются осложнения. Анализ причин их возникновения показывает, что основными являются:

- Устоявшаяся практика обращения, которая сложилась в условиях отсутствия экономических стимулов к снижению объемов образования РАО и ориентации на долговременное хранение;
- Несовершенство нормативно-правового регулирования деятельности по обращению с РАО, в том числе заключающееся в чрезмерной детализации нормативных требований, не вытекающей из практики обращения с РАО.

Ряд из выявленных зон оптимизации (4 зоны оптимизации) на момент проведения диссертационного исследования уже находился исключительно в финансово-экономической, правовой или административной областях, и не требует выработки и обоснования технических решений. В отношении остальных с целью выявления приоритетных зон, требующих выработки технических решений и обоснования их безопасности, был проведен анализ их потенциального влияния на деятельность по обращению с РАО в соответствии с предложенным в рамках главы 1 подходом к оценке эффективности ЕГС РАО. Такая оценка была проведена для 12 зон оптимизации. Приняв в качестве критерия значимости превышение относительного изменения эффективности величины, равной 0,01 (или 1 %), в качестве приоритетных зон было определено 9 зон оптимизации. В дальнейшем по каждой из них будут предложены технологические решения по повышению эффективности и проведено их обоснование с точки зрения безопасности. В рамках главы 3 будут рассмотрены меры по повышению эффективности обращения с РАО, подлежащими удалению в централизованные ПЗРО (ЗО-7, ЗО-8, ЗО-9 и ЗО-11). В рамках главы 4 рассматриваются решения для отдельных ситуаций, включая обращение с особыми РАО (ЗО-1, ЗО-3, ЗО-4, ЗО-5, ЗО-6).

Глава 3. Оптимизация обращения с РАО подлежащими захоронению в централизованных ПЗРО

Вся цепочка обращения с удаляемыми РАО от первичной сортировки до захоронения взаимосвязана и зависит от двух обстоятельств: конечных требований к кондиционированному РАО и технических возможностей (определение активности радионуклидов, разделения РАО на отдельные компоненты, и т. д.). В целом, для предприятий ЯТЦ и АЭС характерна стабильность потоков РАО. Она нарушается только в случае ведения ремонтных работ на отдельных установках или при закрытии и модернизации производств. При этом, рассматривая основные потоки РАО, в качестве ключевых точек оптимизации следует определить ЗО-7 (классификация для целей захоронения) и ЗО-11 (структура ПЗРО). Отметим, что данные зоны оптимизации неразрывно связаны также и с иными: ЗО-8 (критерии приемлемости) и ЗО-9 (перечень учитываемых радионуклидов).

Предлагаемые меры по оптимизации дают согласованное решение в отношении зон ЗО-7 и ЗО-11 с дальнейшим анализом их влияния на иные зоны. Рассмотрение вопросов оптимизации критериев классификации проведем с применением рамочных оценок безопасности и демонстрацией их на примере ряда радионуклидов, для которых действующая классификация создает основные трудности. При этом будем ориентироваться на сценарии долгосрочной безопасности после чего проведем анализ влияния аварийных сценариев при эксплуатации ПЗРО на их значения.

3.1 Функциональное разделение критериев классификации и критериев приемлемости и расширение классификации РАО для целей захоронения

Рассматривая оптимизацию критериев классификации, следует, в первую очередь, исходить из задач, которые она должна решать. В соответствии с принятыми принципами построения ЕГС РАО классификация РАО для захоронения имеет двойное назначение. Первое – определение исходных данных для проектирования ПЗРО, а второе – организация финансовой модели обращения с РАО, то есть установление тарифов на захоронение [72-74]. В соответствии с первым система классификации определяет объемы и характеристики РАО, которые рассматриваются при проектировании ПЗРО. Последующая разработка проекта ПЗРО и его экспертиза дадут критерии приемлемости РАО и в этой части критерии классификации по факту играют роль «нулевого» приближения критериев приемлемости.

Второе назначение критериев классификации обусловлено принятой организационно-финансовой моделью деятельности по захоронению РАО, в соответствии с которой к

классам удаляемых РАО привязана система платежей. Это определяет ряд особенностей системы (необходимость прозрачного и однозначного определения класса РАО, установление единых правил классификации для различных потребителей услуг по захоронению РАО [75], ограничения на радикальную перестройку номенклатуры классов т. д.). В этой части критерии классификации в форме классов и привязанных к ним тарифов, дают основные исходные данные для оптимизации системы обращения в эксплуатирующих организациях, небольшие коррективы в которую могут внести вопросы стоимости переработки и перевозки РАО к ПЗРО.

В условиях многих взаимосвязей понятна необходимость установления критериев классификации на итерационной основе, что является одним из основных положений нормативных документов МАГАТЭ [56]. Текущий вариант классификации предусматривает определение класса в зависимости от удельной активности по группам радионуклидов (для альфа-излучателей за исключением трансурановых радионуклидов, бета-излучателей и трансурановых радионуклидов) и от периода полураспада (короткоживущие и долгоживущие). Он решил первоочередную задачу – позволил сформировать и наполнять специальный резерв по обращению с РАО и позволил приступить к проектированию и сооружению ПЗРО, не создав, правда должных стимулов для отделения ОНРАО и предопределив ряд проблем при обосновании безопасности ПЗРО. В рамках следующей итерации по определению критериев классификации, реализуемой в период размещения и проектирования ПЗРО целесообразно установить критерии классификации на основании рамочных оценок безопасности, которые будут приближены к будущим критериям приемлемости за счет учета основных сценариев эволюции ПЗРО. И на последующем этапе, после сооружения всех ПЗРО, критерии классификации могут быть установлены на основе разработанных критериев приемлемости для конкретных ПЗРО с использованием созданной инфраструктуры.

Модель взаимодействия критериев классификации и критериев приемлемости представлена на рис. 3.1.

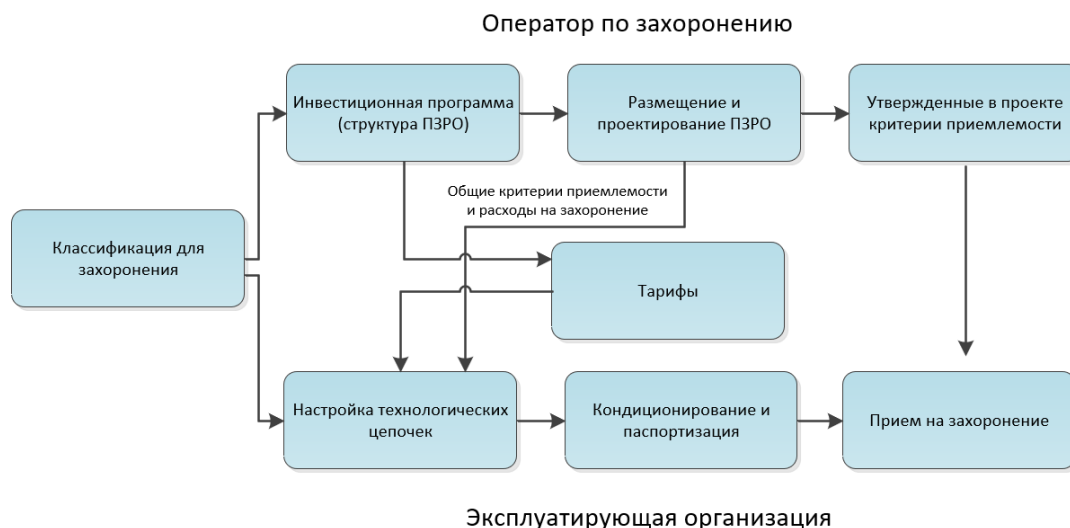


Рисунок 3.1 – Взаимосвязь критериев классификации и мер по оптимизации

Предложение о разделении предназначений классификации РАО и критериев приемлемости было сформулировано в работе [41], поддержано решением НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» и вошло в разработанный Ростехнадзором проект постановления Правительства о внесении изменений, хотя и с небольшой модификацией в форме целевых установок. Аргументы в пользу полноценной реализации меры содержатся в материалах Госкорпорации «Росатом» [76], подготовленных с участием автора.

В качестве первоочередной меры по повышению эффективности обращения с эксплуатационными и удаляемыми накопленными РАО было предложено расширить систему классификации (рис. 3.2). Подобное расширение должно стимулировать национального оператора к созданию новых типов захоронения – ПЗРО на средних глубинах и ПЗРО для захоронения ОНРАО.

		Новые классы	РАО
<u>ПГЗРО</u>	Класс 1		
	Класс 2 + Класс 2.1	Класс 2.1	РАО для захоронения на средней глубине (графит, активированные конструкционные элементы, ...)
<u>ППЗРО</u>	Класс 3		
	Класс 4 + Класс 7	Класс 7	ОНРАО
<u>ПГЗЖРО</u>	Класс 5		РАО, образующиеся при добыче минерального сырья
<u>ХХ ППГХО+...</u>	Класс 6		
	+ Класс 6.2	Класс 6.2	
	+ Класс 6.3	Класс 6.3	РАО, образующиеся при добыче органического сырья
	Класс 8	Класс 8	ОЗИИИ, подлежащие захоронению в специализированном объекте захоронения

Рисунок 3.2 – Предлагаемая структура классов

В отношении эффективности отдельного захоронения ОНРАО ситуация достаточно прозрачна – количество накопленных короткоживущих РАО с относительно небольшим периодом потенциальной опасности велико, а выгода – как минимум в 2-3 раза меньшая стоимость в сравнении с захоронением РАО класса 4 [89].

3.2 Захоронение долгоживущих РАО на средних глубинах

Безопасность и экологическую приемлемость данного технологического решения обоснуем на примере облученного графита, который будет образовываться при ВЭ энергоблоков РБМК, АМБ, ЭГП, а также части ПУГР, условия размещения которых не позволяют реализовать вариант ВЭ «захоронение на месте». Общий объем подлежащего удалению и захоронению оценивается в 40-50 тысяч тонн [77]. На данный момент стратегия обращения с реакторным графитом находится на стадии разработки, по уровню активности данный тип РАО относится к классу 2 удаляемых РАО и подлежит захоронению в пунктах глубинного захоронения. Тем не менее, в мире уже активно прорабатывается захоронение таких РАО в приповерхностных пунктах захоронения, в том числе рассматривается вариант захоронения графитовых РАО на средней глубине (от 50 до 200 м). Например, ANDRA (Франция) провела исследование, согласно которому лучшим вариантом захоронения графитовых РАО является захоронение в стабильных глиняных формациях при толщине глинистого пласта не менее 50 м [78]. Реакторный графит, согласно французской

классификации удаляемых РАО, относится к классу долгоживущих низкоактивных отходов. Великобритания планирует такой объект на глубине не менее 30 м от поверхности земли. Концепция такого ПЗРО включает шахту, облицованную бетоном, в которой стена и плита основания из армированного бетона выступают в качестве многобарьерной системы безопасности. Цементированные РАО в контейнерах размещаются в шахте, а оставшиеся зазоры залить цементным раствором до получения единого монолита. Надшахтная камера также подлежит закладке, а на поверхности пункта захоронения сооружается курган для снижения объема инфильтрации воды внутрь ПЗРО [79]. Учитывая общий объем накопленного в стране графита даже обеспечение захоронения только этого вида РАО обусловит целесообразность создания специализированного ПЗРО.

В рамках обоснования проведем анализ типовых сценариев эволюции ПЗРО с учетом радиационных характеристик облученного графита.

В настоящий момент реализован ряд работ, направленных на оценку характеристик графитовых РАО. Так, в рамках работы [80] были получены данные по радионуклидному составу графитовой кладки энергоблока № 1 ЛЭАС (см. таблицу 3.2.). Однако приведенные данные содержат только гамма-излучающие примеси, что обусловлено применяемым методом исследований (гамма-спектрометрия).

Таблица 3.1 – Радионуклидный состав и удельная активность графитовой кладки энергоблока № 1 ЛЭАС [80]

Радионуклидный состав	Удельная активность, Бк/г
^{137}Cs	5,46E+02
^{134}Cs	3,08E+02
^{46}Sc	5,90E+02
^{60}Co	1,85E+03
^{181}Hf	3,60E+02
^{95}Nb	3,50E+02
^{95}Zr	1,80E+02
^{182}Ta	1,10E+02
^{192}Ir	7,00E+01
^{194}Sb	6,50E+01

Этот перечень с учетом международного опыта оценки долговременной безопасности ПЗРО [99] должен быть дополнен данными по содержанию долгоживущих радионуклидов с высокой миграционной способностью в природных системах. Это ^{14}C и ^{36}Cl , которые и определяют основной вклад в потенциальное воздействие на население после захоронения РАО, но при этом не определяются при гамма-спектрометрических измерениях.

Радионуклид ^{14}C вносит более 95 % в активность графитовых РАО, образуется в реакторном графите в основном по двум нейтронным реакциям: $^{13}\text{C}(n\gamma)^{14}\text{C}$ и по реакции $^{14}\text{N}(np)^{14}\text{C}$, что приводит к тому, что его удельная активность прямо пропорциональна флюенсу тепловых нейтронов. Радионуклид ^{36}Cl образуется в результате активации примесных элементов реакторного графита, имеет гораздо меньшую активность, но обладает гораздо более значительным периодом полураспада (301000 лет), а также высокой способностью к миграции в геологических формациях, что приводит к необходимости его учета при проведении оценок долговременной безопасности. Средняя удельная активность ^{36}Cl в образцах облученного графита РБМК-1000, согласно [80], составляет $1,1 \cdot 10^3$ Бк/г, ^{14}C – $1,0 \cdot 10^5$ Бк/г. Аналогичные значения для графита активной зоны ПУГР составляют $2,0 \cdot 10^4$ и $\sim 2,0 \cdot 10^6$ Бк/г соответственно [80].

Исходя из примерно равного количества графита в промышленных и энергетических реакторах, а также приведенных выше значений удельной активности, в качестве исходных данных для проведения оценки примем следующие средние значения удельной активности (таблица 3.2) радиологически значимых радионуклидов ^{14}C и ^{36}Cl .

Таблица 3.2 – Удельная активность ^{14}C и ^{36}Cl в графитовых РАО

Радионуклид	Удельная активность облученного графита, Бк/г
^{14}C	1,0E+06
^{36}Cl	1,0E+04

Как отмечалось ранее, в рамках оценки долговременной безопасности рассматриваются два типа сценариев:

- Базовые сценарии эволюции (нормальное протекание естественных процессов на территории размещения ПЗРО).
- Альтернативные сценарии эволюции (внешнее воздействие природного или техногенного характера на площадке размещения ПЗРО).

Конкретный перечень рассматриваемых сценариев и их численные параметры в общем случае зависят от окружающей среды, в которой размещен ПЗРО, а также от возможных событий и процессов, которые могут инициировать выход радионуклидов и их последующее влияние на окружающую среду и человека.

Отметим, что во всех странах критерием приемлемости дозового воздействия на население в результате реализации базового сценария является годовая эффективная доза облучения критической группы населения. При этом сами численные значения критерия

могут отличаться в различных странах или рекомендациях международных организаций (см. таблицу 3.3).

Таблица 3.3 – Годовая эффективная доза облучения критической группы населения в случае реализации базового сценария. Международный опыт

Страна/Документ	Доза, мкЗв
Россия [81]	10
США [82]	250
Великобритания [83]	300
Швеция [84]	100
МАГАТЭ (SSR-5) [55]	300
МКРЗ, публикация 81 [85]	300

В Российской Федерации подход к проведению оценки базового сценария установлен на основе дозового критерия – годовой эффективной дозы облучения критической группы населения, под которой понимается группа людей, которые могут получить самую высокую годовую дозу. В соответствии с ОСПОРБ-99/2010 [37] годовая эффективная доза облучения критической группы населения от ПЗРО не должна превышать 10 мкЗв, что является существенно более консервативным требованием по сравнению со стандартами МАГАТЭ (300 мкЗв/год). Подобное ужесточение требований по сравнению с международными рекомендациями приводит к дополнительным затратам на захоронение РАО. Представляется целесообразным впоследствии изменить данное значение в рамках гармонизации национального регулирования с международными рекомендациями (одна из задач в области государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности [5]). При этом возможно применение дифференцированного подхода:

- использование существующего ограничения 10 мкЗв/год на период, когда имеющиеся неопределенности по моделируемым процессам незначительны (до ~300 лет);
- использование ограничения 300 мкЗв/год на период, когда моделирование процессов распространения радионуклидов затрудняется вследствие неопределенности исходных данных и подлежит консервативной оценке.

Оценка долговременной безопасности в случае развития альтернативного сценария в мировой практике проводится также на основе оценки годовой дозы. В российской практике в рамках системы федеральных норм и правил в области использования атомной энергии установлены требования по ограничению значения обобщенного риска. Так, в пункте 14 НП-055-14 [88] утверждается, что ПЗРО удовлетворяет требованиям безопасности после его закрытия, если при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера на площадке размещения ПЗРО для

критической группы населения не будет превышено граничное значение обобщенного риска, установленного санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности.

Обобщенный риск представляет собой произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением (п. 2.3 НРБ [43]). Таким образом, для обоснования безопасности захоронения по сценариям проникновения в соответствии с нормативными документами следует провести численную оценку вероятности вторжения. Провести обоснованную оценку вероятности подобного события на временном масштабе в миллионы лет представляется крайне нетривиальной задачей, которая возложена в настоящий момент на организацию, разрабатывающую проект ПЗРО, неотъемлемой частью которого является оценка долговременной безопасности. Более того, МКРЗ в публикации 81 [85] прямо указывает, что любые прогнозы о величине рисков вторжения зависят от предположений о будущем поведении человека. А поскольку не существует научной основы для прогнозирования вероятности будущих действий человека, нецелесообразно включать вероятности таких событий в количественную оценку долговременной безопасности. Международная практика оценок безопасности в целом полностью соответствует такому подходу, хотя сами значения дозового критерия также отличаются, как и для случая оценки базового сценария эволюции (см. таблицу 3.4). В рамках работ по проектированию приповерхностных ПЗРО это уже представляло определенную сложность, и было обсуждено на заседании секции НТС № 10 Госкорпорации Росатом. Очевидно, что работа по гармонизации санитарных правил и нормативов в области деятельности по обращению с РАО предстоит в будущем, в рамках данной работы будем исходить из дозового ограничения для альтернативных сценариев, равного 1 мЗв.

Таблица 3.4 – Годовая эффективная доза облучения критической группы населения в случае развития альтернативного сценария. Международный опыт

Документ	Доза, мЗв
МКРЗ, публ. 81 [85]	От 10 до 100
МАГАТЭ (SSR-5) [55]	От 1 до 20
США (классификация) [82]	5
NEA OECD [86]	5

Таким образом, для оценки долгосрочной безопасности захоронения долгоживущих РАО, которые, согласно текущей классификации, относятся к классу 2 удаляемых РАО, в приповерхностном пункте захоронения, примем дозовые ограничения на базовый и альтернативные сценарии эволюции согласно таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Годовая эффективная доза облучения критической группы населения для базового и альтернативного сценариев

Сценарий	Дозовый критерий, мЗв
Базовый	0,01
Альтернативные	1,0

Анализ базового сценария эволюции ПЗРО на средней глубине

При анализе базового сценария эволюции принципиальное значение имеют гидрогеологические условия площадки размещения объекта захоронения. Рассмотрим этот вопрос на примере концепции ПЗРО, разработанной для площадки вблизи г. Сосновый Бор, недалеко от территории Ленинградского отделения ФГУП «РосРАО». При этом отметим, что аналогичные объекты могут быть сооружены и на других потенциальных площадках, например, в Калмыкии [90].

Для оценки базового сценария эволюции был применен аттестованный расчётный код (ПК) GeRa/V1. Расчетная гидрогеологическая модель площадки размещения ПЗРО, созданная с его помощью, представлена на рисунке 3.3.

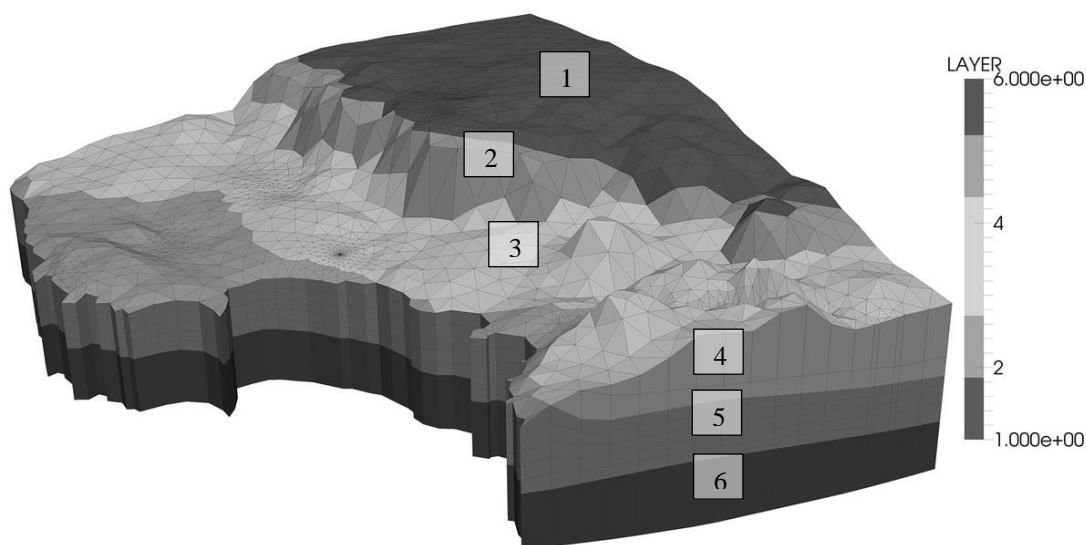


Рисунок 3.3 – Трёхмерная модель для ПЗРО в районе г. Сосновый бор

При проведении моделирования предполагалось, что захоронение графитовых РАО происходит в верхнекотлинские глины (модельный слой 5), это означает, что изначально преобладает процесс диффузии из глин в вышележащий (модельный слой 4), а также в нижележащий (модельный слой 6) водоносные горизонты. Абсолютные отметки и размеры ПЗРО были приняты следующими: нижняя отметка соответствует – 57 м, верхняя отметка соответствует – 43 м, высота ПЗРО равна 14 м. Данные размеры ПЗРО были выбраны

согласно нижеследующим рисункам (рисунки 3.4–3.5). В модели задавался только основной тоннель длиной 1000 м, без учёта наклонного хода.

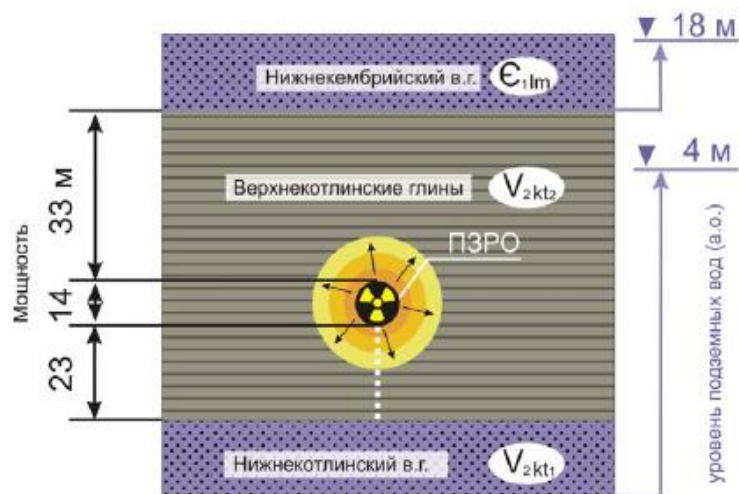


Рисунок 3.4 – Расположение сооружения захоронения между водоносными горизонтами [87]

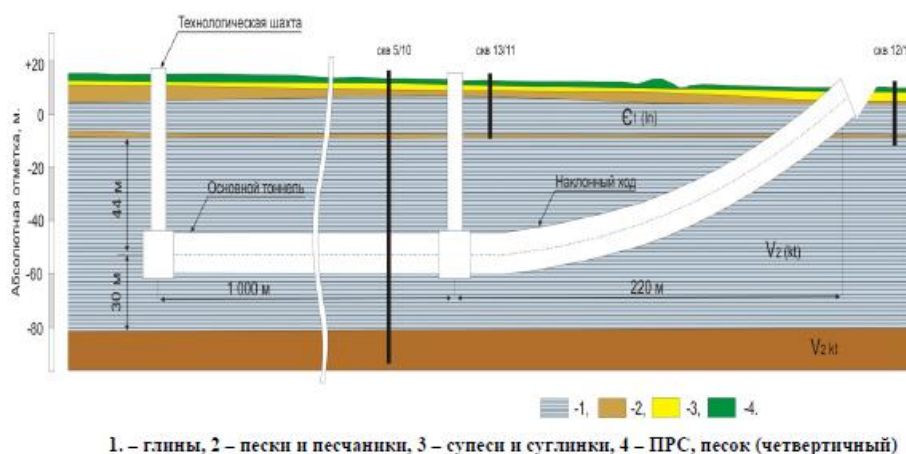


Рисунок 3.5 – Профильный разрез ПЗРО [87]

Для построения численной модели выхода ^{14}C и ^{36}Cl используются данные о скорости их выщелачивания из графита. По определению эта величина представляет собой отношение активности радионуклида, перешедшего в раствор с 1 см^2 поверхности графита в течение суток, к удельной активности данного радионуклида в графите:

$$R = - \frac{1}{SA_{y0}^0} \frac{dA}{dt} \Big|_{t=0}, \quad (4)$$

где A – активность образца, Бк;

S – площадь открытой геометрической поверхности образца, см^2 ;

A_{y0}^0 – удельная активность радионуклида в исходном образце, Бк/кг.

Примем, что доля выхода радионуклида в единицу времени является константой (т. е. динамика выхода задается экспоненциальным законом):

$$\lambda_2 = -\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \text{const}, \quad (5)$$

где λ_2 – доля выхода в единицу времени обозначена как (1/сут).

Соответственно:

$$\left. \frac{dA}{dt} \right|_{t=0} = -\lambda_2 A_0, \quad (6)$$

где A_0 – начальная активность.

Подставив (7) в (5), учитывая, что $A_0 = mA_{y0}^0$ (m – масса графита) получим следующее выражение:

$$R = \frac{\lambda_2 m}{S}. \quad (8)$$

Следовательно, значение доли выхода радионуклидов из РАО в единицу времени будет определяться следующим выражением:

$$\lambda_2 = \frac{RS}{m} \quad (9)$$

Для того чтобы посчитать эту величину нужно оценить площадь свободной поверхности графитовых блоков. Компоновка захоронения не известна, но с некоторой долей консерватизма общая площадь, с которой потенциально будет выщелачиваться ^{36}Cl , соответствует сумме площадей поверхностей графитовых блоков, составляющих РАО. Исходя из данного консервативного допущения, получаем следующее выражение:

$$S = N \cdot S_1 = \frac{m/\rho}{d^2 h} \cdot (2d^2 + 4dh). \quad (10)$$

Здесь S_1 – площадь поверхности одного блока, N – количество блоков, $\rho = 1.7$ г/см³ – плотность графита, d и h – геометрические характеристики графитового блока (указаны в таблице 3.6).

Для учета в полученном выражении радиоактивного распада используем уравнение, описывающее изменение активности рассматриваемых радионуклидов в исходных РАО:

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda_1 A - \lambda_2 A \quad (11)$$

где λ_1 – константа распада (1/сут).

Решение уравнения (12) дает зависимость активности РАО в ПЗРО от времени:

$$A = A_0 e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (13)$$

Из формулы (10) следует, что интенсивность выхода ^{14}C и ^{36}Cl в раствор зависит от времени следующим образом:

$$U = \lambda_2 A_0 e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (11)$$

Параметры, определяющие долю выхода радионуклидов ^{14}C и ^{36}Cl в единицу времени, согласно формулам 3–11, представлены в таблице 3.6. Скорость выщелачивания для указанных радионуклидов принята согласно [80].

Таблица 3.6 – Параметры для определения доли выхода ^{14}C и ^{36}Cl

Параметр	Значения для ^{14}C	Значения для ^{36}Cl
Сечение графитового блока, мм	250×250	
Высота блока, мм	600	
Масса графита, т	60000	
Плотность графита, г/см ³	1,7	
Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут)	2·10 ⁻⁶	1.2·10 ⁻⁴ г/(см ² ·сут)
Удельная активность, Бк/г	10 ⁶	1.0·10 ⁴ Бк/г
Период полураспада ^{14}C , лет	5760	301 000 лет

В результате проведенного моделирования были получены зависимости концентрации рассматриваемых радионуклидов в грунтовой воде от времени (см. рисунок 3.6).

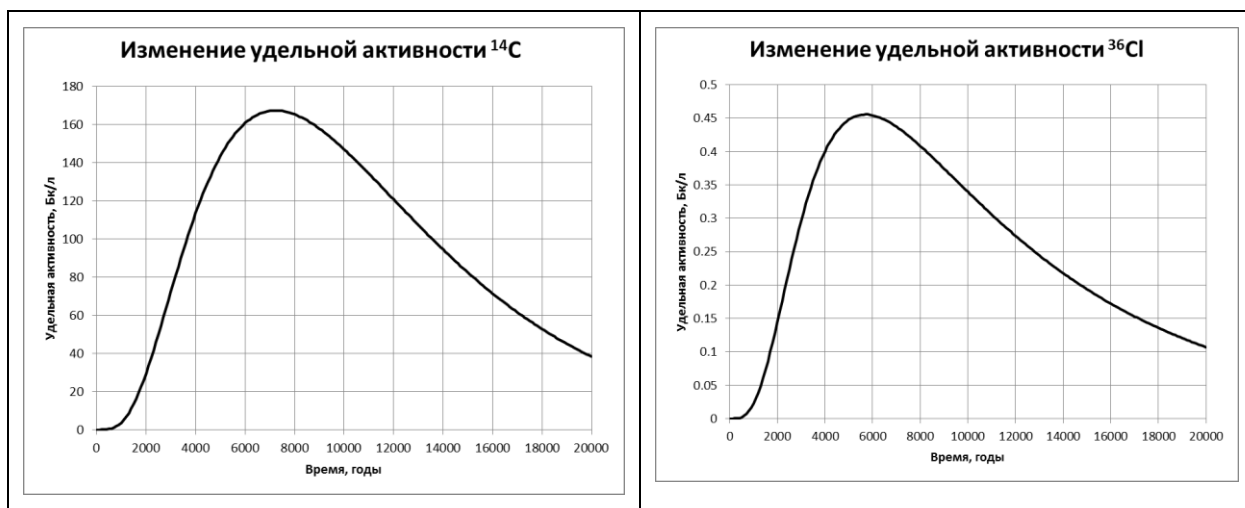


Рисунок 3.6 – Результаты миграционного моделирования (концентрации р/н в грунтовой воде в точке мониторинга на границе с Финским заливом)

Полученные результаты расчетов показывают, что при захоронении 60000 тонн облученного графита значение удельной активности радиологически значимых радионуклидов в грунтовой воде в точке мониторинга не будет превышать значения 0,1 УВ, которое соответствует дозовому критерию 10 мкЗв/год при потреблении питьевой воды.

Анализ альтернативных сценариев эволюции ПЗРО на средней глубине, связанных с непредумышленным вторжением человека

Типичный подход к формированию альтернативных сценариев эволюции включает в себя составление полного перечня возможных сценариев, их предварительный анализ и ранжирование, определение релевантных и их дальнейшая оценка с использованием численных параметров, в том числе, определенных экспертным образом. Так, например, МАГАТЭ [49] использует схему процесса обоснования безопасности, которая представлена на рисунке 3.7. В данной схеме отражены основные компоненты, принимаемые во внимание при разработке альтернативных сценариев эволюции.

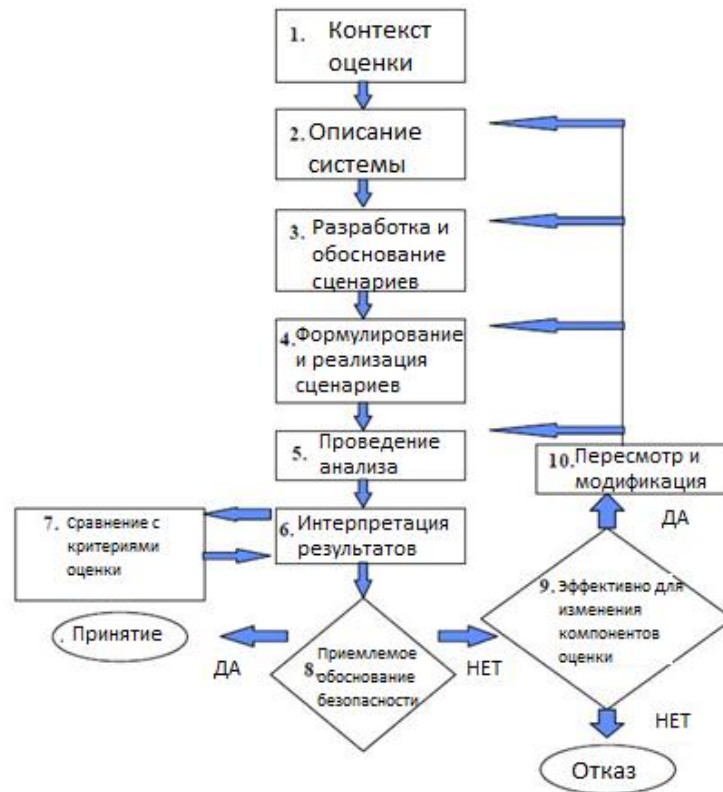


Рисунок 3.7 – Процесс обоснования безопасности [49]

Самостоятельная разработка альтернативных сценариев эволюции и определение ее численных параметров является трудоемкой задачей. В аналогичных работах, реализованных международными группами экспертов, были получены результаты [49, 82, 86] для нескольких сценариев вторжения: проживание человека на площадке закрытого ПЗРО; сооружение автодороги; ведение сельскохозяйственной деятельности на площадке ПЗРО. Самым полным по количеству рассматриваемых сценариев является технический документ МАГАТЭ [49]. Рассматриваемые работы отличаются детальностью и по другим параметрам, например, по перечням радионуклидов, принимаемых во внимание при проведении оценки долговременной безопасности, так, например, документ NEA OECD [86] не рассматривает следующие радионуклиды: ^3H , ^{41}Ca , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{60}Co , ^{93}Zr , ^{151}Sm , ^{228}Ra , ^{232}Th , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}Pu , ^{242}Cm . Аналогичный документ по разработке критериев классификации для низкоактивных РАО США [82] не учитывает радионуклиды ^{41}Ca , ^{93}Zr , ^{241}Pu .

В целом, наиболее детальным среди представленных перечней является перечень радионуклидов МАГАТЭ, поскольку он ориентирован на все виды отходов, в том числе содержащих радионуклиды, которые используются в медицинских, промышленных и исследовательских целях, так и отходов, образующихся в ядерном топливном цикле и в

результате ВЭ ЯРОО. Принимая во внимание вышеупомянутые преимущества технического документа МАГАТЭ [49] при оценке альтернативных сценариев примем его в качестве основы. Стоит отметить, что для приповерхностного ПЗРО камерного типа при дозовом ограничении 1 мЗв в работе МАГАТЭ и работе, проведенной рабочей группой НЕА OECD, наблюдается соответствие в пределах одного порядка оцененных предельных значений удельной активности [49] с поправкой на различие принятого значения периода институционального контроля (500 лет для документа МАГАТЭ [49] и 300 лет для отчета НЕА OECD) для большинства рассматриваемых радионуклидов, за исключением ^{14}C и ^{99}Tc . Расхождения для данных радионуклидов обусловлены разницей в значениях дозовых коэффициентов, использованных в различных работах.

В качестве рассматриваемого альтернативного сценария для ПЗРО примем вторжение в тело ПЗРО при проведении буровых работ. При извлечении части РАО в результате бурения будет происходить их перемешивание с незагрязненными грунтами, удельная активность извлеченных материалов была определена по формуле:

$$A_{\text{int}} = A_m \cdot e^{-\lambda t_1} \cdot dil, \quad (12)$$

где A_m – удельная активность i -го радионуклида в РАО в ПЗРО в момент его закрытия, Бк/кг;

λ – постоянная радиоактивного распада, 1/год;

t_1 – время, спустя которое произошло вторжение, год;

dil – коэффициент разбавления РАО нерадиоактивными материалами.

Коэффициент разбавления, являющийся соотношением количества РАО и нерадиоактивных материалов, попадающих в результате экскавации, не определялся характеристиками ПЗРО. Дозовая нагрузка, которой подвергается персонал в результате выполнения работ, оценивалась по формуле:

$$Dose = A_{\text{int}} \cdot [Q_{\text{soil}} DF_{\text{ing}} + DF_{\text{ext}} + b_r \cdot dust \cdot DF_{\text{inh}}] \cdot t_2, \quad (13)$$

где A_{int} – удельная активность, с которой сталкивается рабочий, Бк/кг;

Q_{soil} – попадание частиц почвы внутрь человека с дыханием, кг/ч;

DF_{ing} – дозовый коэффициент поступления радионуклидов внутрь с пищей, Зв/Бк;

DF_{ext} – дозовый коэффициент внешнего облучения, Зв/ч · Бк/кг;

b_r – скорость дыхания, м³/ч;

dust – вес частиц в единице объема вдыхаемого воздуха кг/ м³;

DF_{inh} – дозовый коэффициент поступления радионуклидов с воздухом, Зв/Бк;

t₂ – продолжительность облучения, час.

Для оценки было сделано предположение о бурении 10 скважин глубиной 100 м. В таком случае ~ 10 % от извлеченной почвы предположительно будут составлять РАО, а соответствующий коэффициент разбавления РАО в данных условиях будет составлять 0,1. Остальные параметры, используемые в расчете, также примем согласно данному источнику: срок институционального контроля – 500 лет; скорость дыхания рабочего – 1,2 м³/ч; скорость непреднамеренного попадания частиц почвы внутрь человека – 3,4E-05 кг/ч; вес частиц в единице объема вдыхаемого воздуха – 1,0E-06 кг/м³.

Результаты расчетов удельной активности извлеченных при бурении материалов (табл. 3.7) и доз облучения от внутреннего поступления частиц загрязненной почвы и пыли (табл. 3.8) дали возможность высказать суждение о безопасности подобного сценария.

Таблица 3.7 – Удельная активность извлеченных РАО с учетом разбавления

Радионуклид	Удельная активность, Бк/г
³⁶ Cl	9,99E+02
¹⁴ C	9,41E+04

Таблица 3.8 – Оценка дозы от внутреннего поступления частиц загрязненной почвы и пыли

Радионуклид	От поступления частиц почвы, Зв/год	От поступления с воздухом, Зв/год	Всего от внутреннего поступления, мЗв/год
³⁶ Cl	9,41E-06	4,64E-07	0,01
¹⁴ C	2,25E-04	1,24E-05	0,24

Дозовое воздействие на работников при таком альтернативном сценарии эволюции ПЗРО определяется ¹⁴C. При этом допустимая величина предельной удельной активности ¹⁴C в случае приповерхностного ПЗРО составляет 5E+06 Бк/г при предельном значении годовой дозы, равном 1 мЗв. Следовательно, захоронение графитовых РАО возможно на средней глубине для альтернативного сценария эволюции ПЗРО и принятого дозового критерия (1 мЗв/год), что подтверждает целесообразность включения в структуру ПЗРО в Российской Федерации ПЗРО на средней глубине.

3.3 Захоронение повышенных активностей короткоживущих РАО

Интуитивно понятно, что в ПЗРО, рассчитанный на обеспечение безопасности захоронения радионуклидов ^{137}Cs или ^{90}Sr , можно размещать радионуклиды с меньшими периодами полураспада в больших активностях. Однако ситуация с обоснованием безопасности несколько сложнее. Для обоснования потребуется использование понятия периода институционального контроля, под которым понимается срок, в течение которого осуществляется контроль над площадкой размещения, что делает невозможным реализацию сценариев вторжения в систему захоронения. В целом оценка подобного срока субъективна, так как по факту означает утерю информации о размещении ПЗРО. В среднем по разным подходам длительность периода институционального контроля оценивается от 100 до 500 лет [82]. Отметим, что в [49] указано, что в течение данного срока ИББ ПЗРО должны эффективно выполнять, как минимум, индикационные функции. Понятие наиболее актуально для радионуклидов с периодом полураспада порядка ~30 лет и менее. Для ряда простых типов ПЗРО такие сценарии просчитаны, как например, в работе [49] для ПЗРО траншейного типа, где анализировались дозы облучения и определялись предельные значения удельной активности для ряда короткоживущих радионуклидов в РАО при различных сроках сооружения автодороги, то есть после утраты конституционного контроля (рис. 3.8).

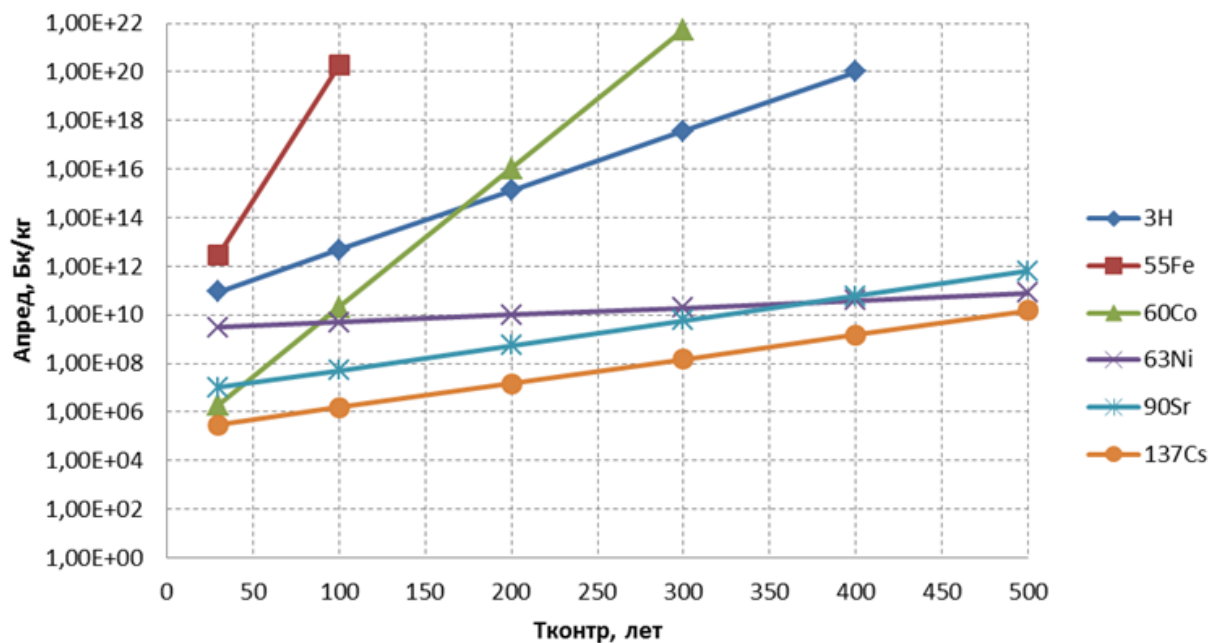


Рисунок 3.8 – Зависимость предельной удельной активности РАО при сценарии вторжения в систему ПЗРО траншейного типа при сооружении автодороги от периода институционального контроля

Понятно, что чем меньше период полураспада, тем выше предельная активность. В случае периода институционального контроля ~500 лет с ограничений на содержание

радионуклидов с периодом полураспада менее 15 лет не накладывается вовсе. Тем не менее, ограничения на такие радионуклиды возможны по операционным и аварийным сценариям. В таблице 3.9 приведен ряд типовых рассматриваемых сценариев во время эксплуатации ПЗРО [49] и проведена оценка потенциального влияния их на установление критериев приемлемости классификации для короткоживущих радионуклидов.

Таблица 3.9 – Влияние операционных сценариев на критерии приемлемости

Сценарий	Влияние на установление критериев классификации
Прямое облучение работников	Определяется, в основном, гамма-излучающими радионуклидами (для РАО категории САО и ниже). Может быть компенсировано применением специальных защитных контейнеров и транспортно-технологическими решениями ПЗРО, а также сроком хранения РАО в ЭО. Может ограничить содержание гамма-излучающих радионуклидов в ячейках, предназначенных для захоронения слабоактивных отходов.
Воспламенение ячейки захоронения	Возможно только для горючих неомонолических РАО. Учитывая, что в рамках ФНП [30] установлены требования по омоноличиванию и упаковке РАО, сценарий может установить требования к критериям классификации для РАО, захораниваемых в неупакованном и неомонолическом виде.
Рассыпание части РАО при проведении транспортно-технологических операций при размещении.	Возможно для неомонолических РАО. Может быть компенсировано применением специальных транспортно-технологических решений ПЗРО.

Как видно из представленных данных, ограничения на содержание р/н с периодом полураспада менее 15 лет должны включаться в критерии приемлемости в основном для неомонолических РАО, захораниваемых в неупакованном виде, то есть для РАО класса 4.

Таким образом, несмотря на определенные ограничения, связанные с аварийными сценариями, существующие сегодня ограничения на активность короткоживущих радионуклидов могут быть смягчены, в том числе на порядки.

Одновременно данные результаты позволяют существенно сократить перечень радионуклидов, подлежащих контролю в РАО с точки зрения оценки долговременной безопасности. Например, в постановлении [21] приведены значения ПЗУА для 207 радионуклидов (не включая актиниды) в РБ по подтверждению выполнения критериев приемлемости [101] в качестве рекомендуемых к определению радионуклидов указан перечень из 21 (не включая актиниды) радионуклидов. В то же время исключение из рассмотрения радионуклидов с периодом полураспада менее 15 лет позволяет ограничить перечень радионуклидов (за исключением актинидов) 17 радионуклидами.

3.4 Дифференцированный подход для отдельных долгоживущих радионуклидов с учетом их радиологической опасности и миграционной способности

В главе 2 было отмечено, что для ряда радионуклидов – мягких бета-излучателей существует коллизия, когда при превышении ПЗУА на 1 Бк РАО классифицируются как класс 2. Предлагается ликвидировать эту коллизия на основе анализа допустимого содержания урана и плутония, а также короткоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в приповерхностных ПЗРО, предназначенных для захоронения РАО классов 3 и 4 и, достаточно близких к типовому пункту захоронения, рассмотренному в [49]. За основу были приняты результаты оценки предельного содержания, определяемые сценариями вторжения согласно данным [49] (см. таблицу 3.10) для сценария сооружения дороги и ПЗРО с развитой системой ИББ.

Таблица 3.10 – Оценка предельно допустимого содержания отдельных радионуклидов по сценарию сооружения автодороги

Радионуклид	Допустимая удельная активность, Бк/кг
^{14}C	1.E+09
^{36}Cl	4.E+05 ¹
^{59}Ni	1.E+10
^{63}Ni	2.E+11
^{90}Sr	2.E+12
^{99}Tc	9.E+08
^{137}Cs	2.E+10
^{235}U	9.E+05
^{238}U	2.E+06
^{239}Pu	2.E+05
^{240}Pu	2.E+05
Примечание: 1) Оценено по методологии [49]	

Для оценки базового сценария эволюции ПЗРО были проведены расчеты с использованием аттестованного расчётного кода (ПК) GeRa/V1. В качестве модельного ПЗРО рассматривался ПЗРО, проектируемый для Челябинской области. При моделировании была проведена разработка модели ближней зоны, а также фильтрационная и миграционная модели дальней зоны (рис. 3.9–3.10).

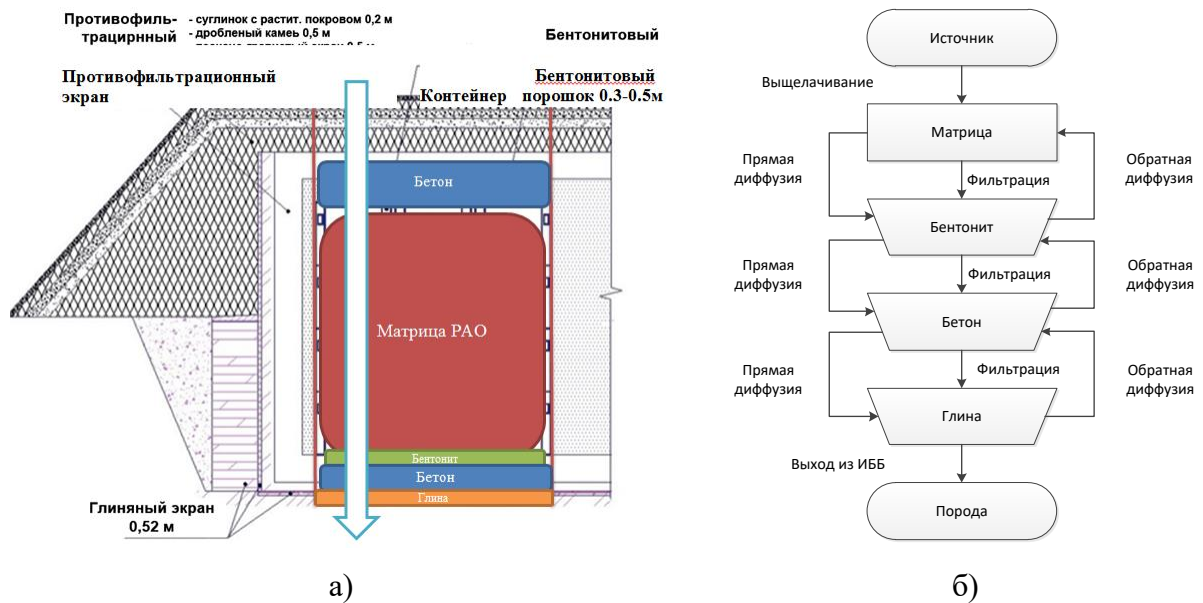


Рисунок 3.9 – Модель ближней зоны: а) принципиальная схема системы ИББ ПЗРО; б) моделируемые процессы переноса радионуклидов

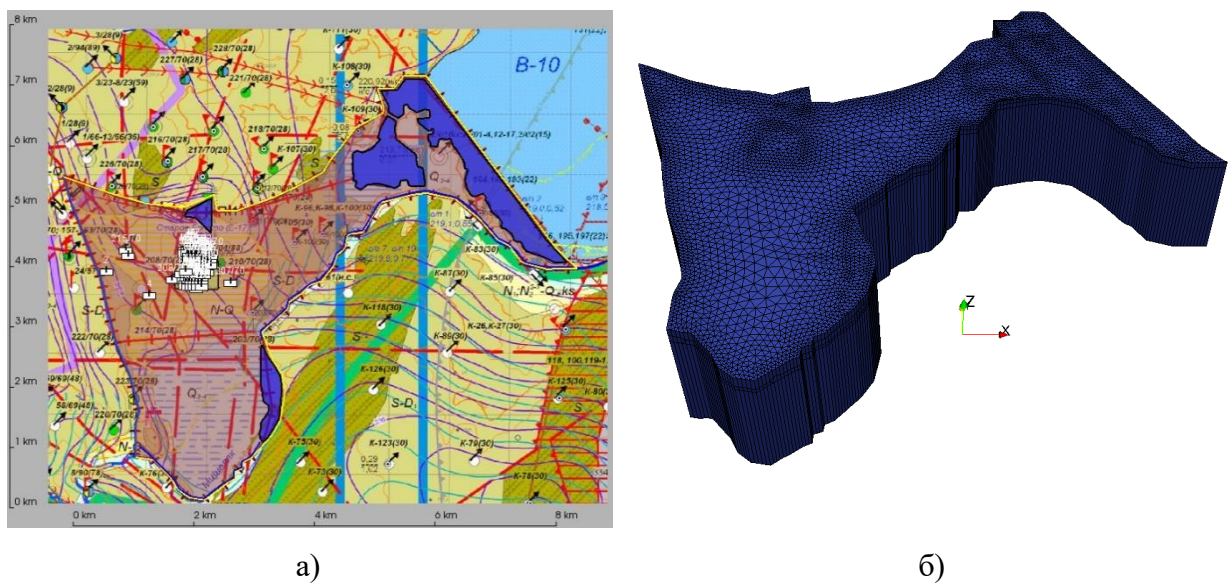


Рисунок 3.10 – Модель дальней зоны: а) границы модели; б) расчетная сетка

При проведении моделирования в качестве исходной активности каждого радионуклида в ПЗРО принималась величина 10^{10} Бк. Далее проводилось моделирование миграции радионуклидов в геологической среде с целью определения временной зависимости концентрации радионуклидов в грунтовой воде в точке разгрузки в ближайший по направлению фильтрации поверхностный водоем и определялись предельно допустимые активности радионуклидов в ПЗРО по формуле:

$$A_{\max}^i = 0,1 \cdot \frac{UB_i}{C_{\max}^i}, \quad (14)$$

где UB_i – уровень вмешательства в питьевой воде для i -го радионуклида;

C_{\max}^i – максимальная концентрация радионуклида в грунтовой воде в точке мониторинга.

Оцененные таким образом предельные активности соответствуют годовой дозе в 10 мкЗв для населения, потребляющего питьевую воду из колодца, расположенного в точке мониторинга.

Результаты проведенных оценок приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Максимально допустимые активности радионуклидов в ПЗРО

Радионуклид	Допустимая активность, Бк	Допустимая удельная активность ¹ , Бк/г
¹⁴ C	8E+12	8,00E+01
³⁶ Cl	4E+13	4,00E+02
⁵⁹ Ni	4E+19	4,00E+08
⁶³ Ni	>1E+25	>1,00E+14
⁹⁰ Sr	>1E+25	>1,00E+14
⁹⁹ Tc	1E+14	1,00E+03
¹³⁷ Cs	>1E+25	>1,00E+14
²³⁵ U	1E+11	1,00E+00
²³⁹ Pu	2E+18 ²	2,00E+07
Примечание: 1) Оценена для 50 000 м ³ РАО при плотности 2 г/см ³ 2) Определяется активностью продукта распада ²³⁵ U		

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы, относительно установления критериев классификации удаляемых РАО:

1) Содержание радионуклида ⁶³Ni, который в настоящее время является наиболее проблемным с точки зрения действующей классификации [21] для РАО АС в силу достаточно высокого содержания и длительного периода полураспада, ограничено только по альтернативному сценарию. При этом допустимый уровень его содержания значительно выше действующего в настоящий момент значения (верхняя граница для класса 3 составляет 10⁴ Бк/г) и составляет ~10⁸ Бк/г.

2) Сравнивая относительный вклад в дозовую нагрузку для различных сценариев изотопов урана и плутония можно отметить их близость для сценариев вторжения и существенно меньшую опасность изотопов плутония по сравнению с изотопами урана при базовом сценарии эволюции. Это прямо противоположно принципам

действующей классификации, в рамках которой для плутония установлены более жесткие ограничения, что следует устранить в рамках ее корректировки.

3) В не самых оптимальных гидрогеологических условиях (к которым относится площадка размещения ПЗРО в Челябинской области) наиболее существенным образом проявляют себя ограничения по содержанию быстромигрирующих радионуклидов (^{14}C , ^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{235}U). Попытка установить критерии классификации или критерии приемлемости для данных радионуклидов предполагая равномерное их содержание в РАО приводит к чрезмерно жестким требованиям по их содержанию (на уровне отнесения к РАО или даже ниже). Предлагается решать данную проблему посредством учета реальной номенклатуры РАО. Кроме того отметим, что проведение расчетов для иных площадок, обладающих более качественными гидрогеологическими условиями для размещения ПЗРО, приведут к установлению не столь жестких требований.

3.5 Установление принципов классификации смешанных по радионуклидному составу РАО

На практике РАО, как правило, содержат несколько радионуклидов. Определим подход к классификации РАО смешанного радионуклидного состава с учетом изложенных ранее результатов рамочной оценки сценариев эволюции ПЗРО. Обсуждая проблематику классификации смешанных по радионуклидному составу РАО будем учитывать принципы классификации [48], в соответствии с которыми в более технически сложные ПЗРО следует размещать только те отходы, которые не могут быть безопасно размещены в более простые сооружения. В таком подходе для каждого класса фактически устанавливается только верхняя граница активности (или удельной активности), снизу каждый класс ограничен верхней границей предыдущего класса, либо критериями отнесения отходов к РАО (для наименее опасного класса отходов). Далее в рамках рассмотрения проблематики будем иметь в виду именно верхние границы классов.

Ранее было показано, что содержание радионуклидов в РАО может быть ограничено различными сценариями: базовым, связанным с миграцией радионуклидов в геологических породах, или альтернативными, связанными с непредумышленным вторжением человека в систему захоронения. Предположим, что для каждого из радионуклидов, присутствующих в РАО, установлен критерий классификации для рассматриваемого класса по активности (удельной или суммарной) - $A_{\max, \text{баз}}^i$ (по базовому сценарию) или $A_{\max, \text{втор}}^i$ (по сценарию вторжения).

Альтернативные сценарии связаны, как правило, с непосредственным контактом РАО и человека, осуществляющего вторжение в систему захоронения. В такой ситуации все радионуклиды одновременно оказывают радиологическое воздействие на человека. Следовательно, классификационный критерий должен формироваться как сумма отношений:

$$K = \sum_i \frac{A_{i, \text{стор}}}{A_{\text{max}, \text{стор}}^i} < 1, \quad (15)$$

где $A_{i, \text{стор}}$ – активность (удельная) i -го радионуклида, предельное значение которого ограничено по сценариям вторжения.

Ситуация с базовым сценарием эволюции иная. Мигрируя по геологическим породам радионуклиды, будут задерживаться ими с различной степенью, которая зависит как от характеристик самого радионуклида, так и от характеристик геологических пород и грунтовых вод. В результате различные радионуклиды могут оказывать максимальное воздействие на человека в разное время. При этом радионуклиды одного химического элемента будут мигрировать с одинаковой скоростью, как и радионуклиды, которые являются несорбируемыми в данных условиях.

В такой ситуации классификационный критерий, ограничивающий активность (удельную) сверху, будет формироваться в следующем виде:

$$K = \max \left\{ \left(\sum_j \frac{A_j}{A_{\text{max}, \text{баз}}^j} \right)_i + Z_j(A_1, A_2, \dots) \right\} < 1, \quad (16)$$

где A_j – удельная активность j -го радионуклида i -го химического элемента или группы несорбируемых радионуклидов.

Z_j – «поправочная» функция, зависящая в общем случае от радионуклидного состава РАО и гидрогеологических характеристик площадки объекта, область значения которой лежит в диапазоне от 0 до 1, учитывающая частичное перекрытие пиков концентраций различных радионуклидов.

Поскольку в РАО могут одновременно присутствовать одновременно радионуклиды, ограниченные по базовому и по альтернативному сценарию, то при проведении классификации необходимо проверять выполнение обоих условий.

Отметим, что распространение принципа классификации (15-1) на радионуклиды, ограниченные по базовому сценарию, будет более консервативным. Учитывая

организационно-финансовые аспекты классификации, на взгляд автора, целесообразно ограничиться упрощенным подходом к классификации смешанных по радионуклидному составу РАО (15-1), ограничив применение выражения (15-2) только рамками определения критериев приемлемости для конкретного ПЗРО, для которого в рамках оценки долгосрочной безопасности могут быть установлены как предельно допустимые активности радионуклидов по базовому сценарию, так и параметр Z .

3.6 Критерии приемлемости

В рамках данного подраздела определим основные способы оптимизации критериев приемлемости для захоронения РАО в конкретном ПЗРО за счет логистических решений по захоронению. В настоящий момент в России предполагается создание 7 ПЗРО для ТРО различного типа в разных регионах. Подобное разнообразие ПЗРО и условий их размещения открывает широкое пространство для оптимизации логистических решений. При этом под оптимизацией логистических решений понимается не сокращение транспортных расходов (которые могут являться лишь одним из рассматриваемых факторов), а определение оптимальной схемы захоронения РАО с учетом характеристик ПЗРО, включая условия их размещения. В дальнейшем будет показано, что формирование такой оптимальной схемы (далее будем называть ее стратегией захоронения) окажет также позитивное влияние и на предшествующие технологически связанные этапы обращения с РАО.

Определим основные подходы к выбору оптимальных логистических решений и соответствующих критериев приемлемости РАО для захоронения исходя из сформированных ранее подходов к определению предельно допустимых содержаний радионуклидов в РАО различных классов (подлежащих захоронению в различных ПЗРО) на основе анализа сценариев эволюции двух типов: базового и альтернативных. В рамках данной задачи сначала определим основные факторы определяющие процесс формирования стратегии захоронения и их влияние, а в дальнейшем проведем формализацию принципов построения оптимальной стратегии захоронения и определим основные технические и нормативные решения, необходимые для решения данной задачи.

В таблице 3.12 рассмотрены основные технологические решения, которые могут рассматриваться как инструмент формирования стратегии захоронения.

Таблица 3.12 – Механизмы оптимизации критериев приемлемости системы ПЗРО

Техническое решение	Описание эффекта на определение критериев приемлемости
Захоронение РАО с высоким содержанием долгоживущих радионуклидов, содержание которых ограничивается по базовому сценарию, в ПЗРО размещенных в более благоприятных гидрогеологических условиях.	Позволяет «разгрузить» ПЗРО с высокой радиологической емкостью по долгоживущим радионуклидам от РАО, обладающих высокими уровнями активности короткоживущих радионуклидов или хорошо сорбирующихся радионуклидов.
Размещение в одном ПЗРО РАО непересекающегося радионуклидного состава (в части радионуклидов ограниченных по базовому сценарию).	Позволяет наиболее оптимальным образом использовать мощности ПЗРО, достигая предела радиологической емкости объекта по различным радионуклидам, ограниченным по базовому сценарию.
Размещение РАО различного уровня активности в одной ячейке захоронения (или в близлежащих) с целью снизить среднюю активность РАО, рассматриваемых при анализе сценария вторжения.	Позволяет снизить среднюю активность РАО, оказывающих радиологическое воздействие при реализации сценариев вторжения в систему захоронения.

Очевидно, что оптимальной с точки зрения эффективности загрузки ПЗРО является такая, при которой обеспечивается полное использование радиологической емкости по всем рассматриваемым сценариям. Рассматривая в качестве цели ЕГС РАО захоронение всех образующихся отходов, можно ввести численный критерий, определяющий качество использования ПЗРО, как

$$F_{ПЗРО} = \sum_{i,j} \frac{V_j \cdot C_{j,баз}^i}{A_{max,баз}^i} + \frac{1}{\sum_j V_{ячейки,j}} \cdot \sum_{i,j} \frac{V_{ячейки,j} \cdot C_{j,стоп}^i}{C_{max,стоп}^i}, \quad (17)$$

где $C_{j,баз}^i$ – объемная концентрация j -го радионуклида, ограниченного по базовому сценарию в j -й упаковке;

$A_{max,баз}^i$ – максимальная активность i -го радионуклида, ограниченного по базовому сценарию;

V_j – объем j -й упаковки РАО;

$V_{ячейки,j}$ – объем ячейки захоронения или группы упаковок РАО, рассматриваемых при анализе сценария вторжения;

$C_{j,стоп}^i$ – объемная концентрация i -го радионуклида, ограниченного по сценарию вторжения в j -й ячейке захоронения или группе упаковок РАО, рассматриваемых при анализе сценария вторжения;

$C_{\text{max,втор}}^i$ – максимальная объемная концентрация i -го радионуклида, ограниченного по сценарию вторжения.

В случае, когда известны характеристики всех упаковок РАО, а также проведен полноценный анализ безопасности ПЗРО формирование стратегии захоронения РАО должно исходить из необходимости максимизации средневзвешенных значений данного функционала для различных ПЗРО. Формирование стратегии захоронения позволяет дополнительно осуществить оптимизацию процедуры паспортизации. Определив состав РАО, подлежащих захоронению, можно сократить перечень радионуклидов, подлежащих определению учтя их реальный вклад в заполнение радиологической емкости. Так, захоронение значительного объема РАО урановых производств совместно с РАО АЭС приведет к нецелесообразности контроля содержания урана в РАО АЭС, поскольку подавляющая часть активности урана, определяющая долговременную безопасность ПЗРО по данному радионуклиду, будет приходиться на иные РАО. Аналогичный вывод можно сделать и относительно совместного захоронения РАО АЭС и РАО плутониевых веток химико-металлургических производств (в отношении изотопов плутония и ^{241}Am).

В настоящий момент каждый из обозначенных факторов в выражении (16) обладает существенной неопределенностью, что не позволяет провести полноценный анализ (ранее была подробно рассмотрена проблема недостаточности данных по радионуклидному составу). Проблемы в части обоснования безопасности захоронения также известны (см., например, обсуждение проблемы оценки долговременной безопасности на секции № 1 НТС 10 от 15.12.2019 г.). Следовательно, внедрение соответствующего подхода должно осуществляться итерационно. На данном уровне готовности исходных данных следует реализовать первичную оптимизацию за счет учета уже понятных факторов, а в дальнейшем по мере накопления информации реализовывать полноценное формирование стратегии захоронения.

Из имеющегося на настоящий момент опыта передачи РАО на захоронение можно получить данные по распределению по активности внутри упаковок с РАО одного производства, которые можно использовать при установлении критериев приемлемости.

Предположим, что в рамках оценки долговременной безопасности установлена предельная удельная активность для РАО, которые могут быть захоронены в конкретном ПЗРО. При проведении оценки предполагалось, что упаковки с РАО имеют одинаковую активность ($C_{\text{равн}}$). На самом деле упаковки распределены по активности с определенной зависимостью. Значит, рассматривая $C_{\text{равн}}$ как критерий приемлемости (удельная

активность менее – можно захранивать, более – нельзя), мы необоснованно исключаем ряд упаковок более высокой активности, активность которых могла бы быть компенсирована более низкой активностью других упаковок, активность которых менее $C_{равн}$.

В работе [89] представлены результаты анализа опыта принятия РАО на захоронение, в рамках которого, в том числе, рассматривались данные по распределению упаковок переданных РАО по активности. Исходя из этих данных построены зависимости, которые позволяют оценить влияние фактора разброса упаковок с РАО по активности для заданного типа РАО (класс 3 РАО АС) на установление критериев приемлемости. Установлено, что зависимость отношения среднего значения активности РАО в диапазоне от значения верхней границы рассматриваемого диапазона (рис. 3.11) является линейной. Это означает, что доля упаковок, приходящаяся на более высокие значения активности, снижается с ростом активности. При этом, чем более высокие активности рассматриваются, тем более значим данный фактор.

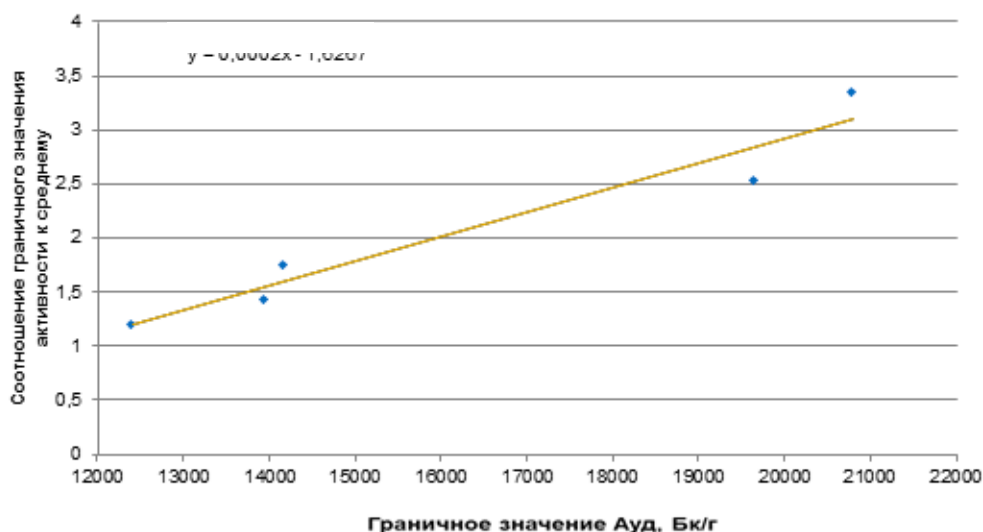


Рисунок 3.11 – Зависимость отношения среднего значения удельной активности упаковок с РАО по диапазону от верхней границы диапазона

Полученная зависимость позволяет ввести поправочный коэффициент для значения критерия приемлемости с учетом реального распределения упаковок с РАО по активности, смягчив предъявляемые требования к РАО.

Рассматривая вопросы создания нормативных условий для проведения оптимизации в части разработки и установления критериев приемлемости следует отметить, что в соответствии с ФНП [30] критерии приемлемости РАО для захоронения устанавливаются в проектной документации ПЗРО. Учитывая условия реализации работ по проектированию ПЗРО (частичное или полное отсутствие данных, требуемых для полноценной оптимизации

критериев приемлемости) следует допустить их корректировку в рамках эксплуатации ПЗРО на основе вновь выявляемых данных по характеристикам РАО, предполагаемым к захоронению в ПЗРО и фактическим данным по характеристикам упаковок РАО, принятых на захоронение.

3.7 Выводы по главе 3

Предложены решения по оптимизации захоронения РАО в централизованных ПЗРО. В основе выработки решений лежало согласованное изменение системы классификации и структуры ПЗРО (ЗО-7 и ЗО-11 соответственно) на основе рассмотрения целевой функции системы классификации с дальнейшим развитием предложений по установлению критериев приемлемости и перечню учитываемых радионуклидов (ЗО-8 и ЗО-9 соответственно). Для этого были выработаны: предложения по разграничению сфер действия системы классификации удаляемых РАО для захоронения и критериев приемлемости РАО для захоронения: система классификации дает исходные данные для проектирования ПЗРО и служит основой финансовой модели деятельности по захоронению, в то же время критерии приемлемости должны быть сосредоточены в области обоснования безопасности конкретного объекта захоронения с учетом характеристик поступающих РАО.

В основу предложений по корректировке классификации была положена идея по расширению номенклатуры классов с учетом технологических особенностей захоронения РАО. Анализ мирового опыта и планов по захоронению, рекомендаций МАГАТЭ говорит о целесообразности выделения, как минимум нескольких дополнительных классов: класса для ОНРАО, класса для захоронения ОЗИИ, а также класса для РАО, подлежащих захоронению на средней глубине, с внесением соответствующих изменений в структуру системы ПЗРО. При этом если в случае ОЗИИ и ОНРАО понятны типы РАО, подлежащие к отнесению к соответствующим классам, то в случае с захоронением РАО на средней глубине необходимо определить, помимо реакторного графита, и иные типы РАО, которые в настоящий момент подлежат захоронению в ПЗРО, но при этом могут быть безопасно захоронены на средней глубине.

На основе рассмотрения двух типов сценариев эволюции (базовый и альтернативные) показана возможность безопасного захоронения РАО в виде облученного графита на средней глубине в глиняных формациях. Для оценки базового сценария эволюции были проведены геомиграционные расчеты распространения основных быстро мигрирующих радионуклидов, определяющих потенциальную опасность по базовому сценарию (^{36}Cl и

¹⁴C). В рамках оценки альтернативных сценариев воздействия использовалась методология, приведенная в [49]. Оценки по обоим типам сценариев показали, что в случае введения нормативных ограничений на различные сценарии, соответствующих рекомендациям МАГАТЭ и МКРЗ, захоронение облученного графита на средней глубине безопасно. Учитывая объем РАО соответствующего типа, полученные результаты подтверждают целесообразность соответствующих изменений структуры ПЗРО и классификации.

С применением аналогичной методологии показано, что в случае принятия периода институционального контроля в 500 лет исключается необходимость учета радионуклидов с периодом полураспада менее 15 лет при классификации омоноличенных РАО и, при определенных условиях для неомоноличенных РАО. Предлагаемое решение существенно сокращает перечень контролируемых радионуклидов (без учета актинидов с 206 согласно постановлению [21] до 17).

Показано, что для приповерхностного ПЗРО находящегося в непосредственной близости к земной поверхности (аналог планируемых к созданию ПЗРО для РАО классов 3 и 4), для отдельных радионуклидов могут быть установлены гораздо более мягкие критерии классификации. Так для радионуклида ⁶³Ni верхняя граница класса 3 может быть увеличена с 10⁴ Бк/г до 2·10⁸ Бк/г. В отношении радионуклидов плутония также было показано, что их допустимое содержание ограничивается по сценариям вторжения и в два раза превышает значения, установленные в действующей классификации.

Предложен механизм смягчения критериев приемлемости для конкретного ПЗРО за счет учета фактических характеристик принимаемых на захоронение РАО. Показано, что даже частичная реализация предложенного подхода (учет распределения отходов, переданных на захоронение, по активности) позволит кратно смягчить критерии приемлемости по допустимой активности долгоживущих радионуклидов. Отметим, что для полноценной реализации оптимизационных возможностей также требуется корректировка ФНП [30] в части допущения корректировки критериев приемлемости в рамках эксплуатационной документации ПЗРО.

Глава 4. Выработка и обоснование предложений по технологически изолированным зонам оптимизации

4.1 Возврат отходов в хозяйственное использование (ЗО-1)

В главе 2 была определена зона оптимизации ЗО-1 и критерии обоснования целесообразности, безопасности и экологической приемлемости применения РАО или ЗМ в технологиях консервации водоемов-хранилищ ЖРО. Напомним, что они касались: активности ЗМ, экономической эффективности, влияния на эксплуатационную безопасность и долгосрочную безопасность окружающей среды и населения.

Основные компоненты метода обоснования указанных условий при использовании ЗМ покажем на примере консервации водоема В-17 ФГУП «ПО «Маяк». Очевидно, что в случае В-17 условие непревышения активности ЗМ над накопленной активностью заведомо выполняется, при удельной активности ЗМ до 1000 Бк/г. Даже в этом случае добавленная активность 200 тыс. тонн ЗМ будет составлять менее 1 % от накопленной. Экономическая целесообразность также бесспорна. Вопросы безопасности в части влияния дополнительных материалов на долгосрочную безопасность и на радиационную безопасность персонала не так очевидны.

В качестве потенциальных материалов, которые могут быть использованы на В-17, будем в соответствии с требованиями федеральных норм и правил [42] рассматривать материалы, образующиеся при:

- демонтаже зданий и сооружений радиохимического производства;
- реабилитации радиационно загрязненных территорий в районе расположения водоема или радиохимического производства.

При демонтаже будут массово образовываться материалы в виде измельченных строительных конструкций (бетона или кирпича), а также фрагменты технологического оборудования (как правило, на основе стали). При реабилитации – грунты или измельченная (мульчированная) растительность. Влияние этих материалов будет различным. В работе [40] с участием автора показан принципиально различный вклад металлических материалов и целлюлозосодержащих материалов (мульчированной растительности) на потенциальную скорость миграции радионуклидов в грунтах.

Наиболее логичным видится применение цементосодержащих материалов, которыми можно замещать часть измельченного скального грунта. Применение таких материалов, как правило, приводит к подщелачиванию воды, что может перевести некоторые радионуклиды

в менее подвижные формы. С другой стороны, попадание избыточного Са из бетона может способствовать снижению K_d таких радионуклидов, как Sr, следовательно данный эффект требует соответствующего учета при определении целесообразности их применения.

Схематически перечень процессов, которые необходимо учитывать при полномасштабном обосновании безопасности использования материалов при консервации водоема-хранилища, можно разбить на 7 составляющих (рисунок 4.1).

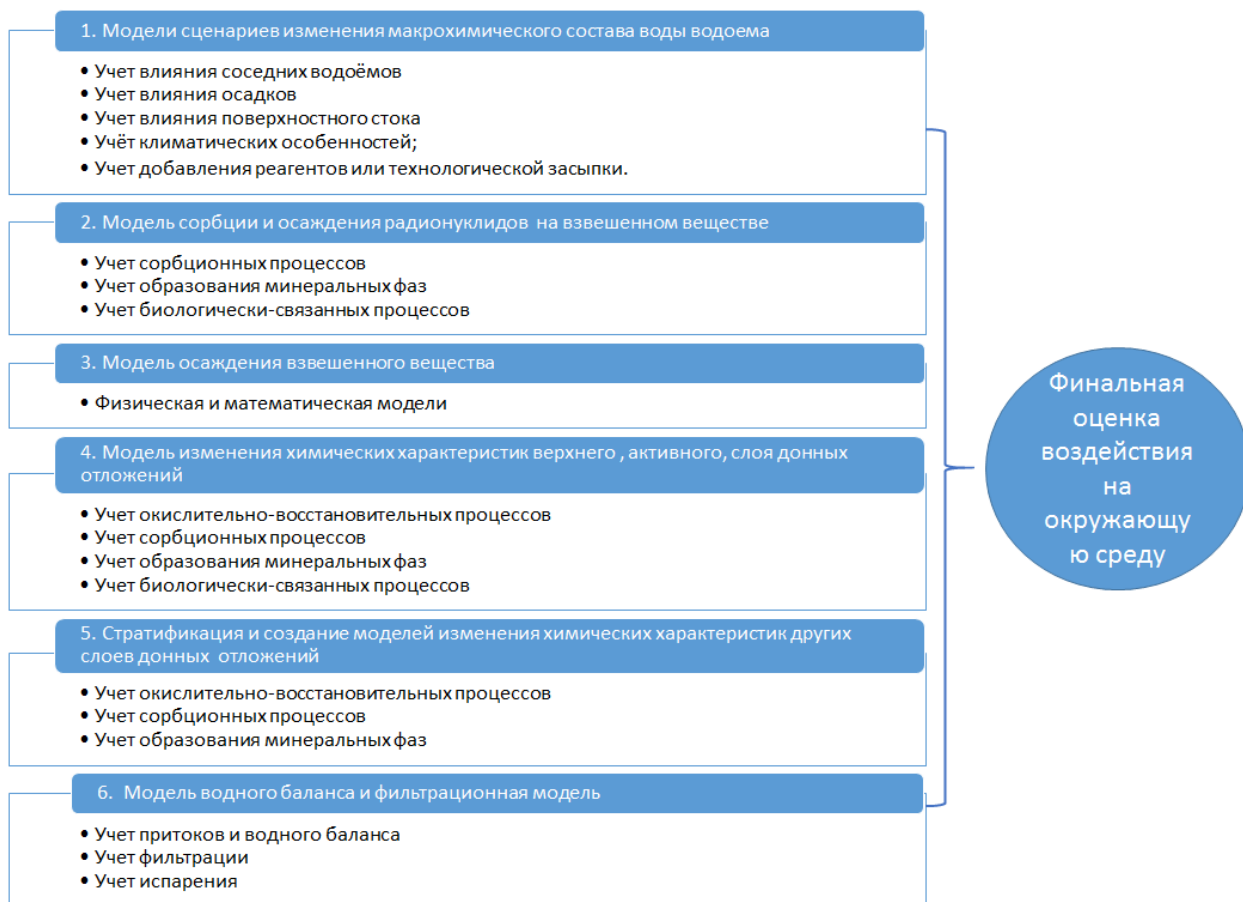


Рисунок 4.1 – Перечень процессов в системе вода – взвешенное вещество – донные отложения, которые необходимо учитывать при обосновании безопасности водоемов

Использование бетонных материалов в качестве засыпки акватории водоема-хранилища в общем случае отразится на соответствующих процессах посредством некоторого повышения рН вследствие растворения слагающих бетон фаз (обогащения водной фазы кальцием).

Для оценки масштаба их влияния на долгосрочную безопасность В-17 были проведены расчеты изменения скорости миграции радионуклидов с учетом модели радионуклидного загрязнения воды и донных отложений водоема В-17. Среди

радионуклидов особое внимание было уделено радионуклидам ^{90}Sr и ^{99}Tc , которые наиболее подвижны. С учетом практически отсутствующей сорбции у ^{99}Tc рассматривать изменение скорости его миграции при изменении химического режима вод водоема, вследствие размещения в нем бетонных изделий не имеет смысла. В работе [91], например, показано, что Tc(VII) обладает весьма малой способностью задерживаться на исследованных грунтах: значение K_d ^{99}Tc изменялось в диапазоне 0,5–6,0 $\text{см}^3/\text{г}$ и не зависело от минералогического состава грунта. Изменение концентрации ^{99}Tc в подземных водах при удалении от источника определяется фильтрационной дисперсией, а переносится ^{99}Tc в основном в анионной форме. Грунты долины р. Мишеляк обладают низкой сорбционной способностью по отношению к ^{99}Tc , поэтому не являются защитным барьером на пути в открытую гидрографическую сеть [91].

В отношении ^{90}Sr с участием автора [40] был проведён расчетный анализ с использованием модели радионуклидного загрязнения водоема (см. рисунок 4.2), разработанной на основе доступных данных по характеристикам водоема [92–95].

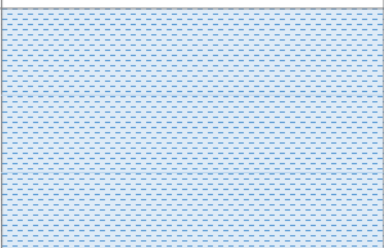







Мощность, см	Колонка	Слой	Радионуклидный состав слоя : уд. активность, Бк/л
200		Поверхностный слой воды	^{137}Cs : 2,8E+04; ^{134}Cs : 4,5E+02; ^{60}Co : 6,1E+01; ^{90}Sr : 1,9E+05; ^3H : 2,3E+06; альфа-излучатели: 70
		Средний слой воды	^{137}Cs : 2,4E+04; ^{134}Cs : 3,3E+02; ^{90}Sr : 4,8E+05; ^3H : 3,8E+06; альфа-излучатели: 40
		Придонный слой воды	^{137}Cs : 2,5E+05; ^{90}Sr : 5,5E+05; ^3H : 2,9E+06; альфа-излучатели: 40
5		Ил	^{90}Sr : 1,5E+09; ^{137}Cs : 1,7E+08; альфа-излучатели: 1,0E+08
5		Ил	^{90}Sr : 2,4E+09; ^{137}Cs : 2,9E+08; альфа-излучатели: 6,4E+07
20		Суглинок	^{90}Sr : 1,9E+08; ^{137}Cs : 7,3E+07; альфа-излучатели: 1,0E+05
10		Суглинок	^{90}Sr : 9,3E+07; ^{137}Cs : 7,3E+06
10		Суглинок	^{90}Sr : 5,0E+07; ^{137}Cs : 1,5E+07
10		Суглинок	^{90}Sr : 1,6E+07; ^{137}Cs : 2,6E+05
15		Суглинок	^{90}Sr : 1,1E+07; ^{137}Cs : 2,4E+05

Рисунок 4.2 –Стратификация активности водоёма В-17

Моделирование проводилось с использованием расчетного комплекса DESTRUCT [96] и модуля геохимического моделирования PhreeqC 2.18 [97] для четырех сценариев,

отличающихся степенью использования цементосодержащих материалов при консервации водоема и принятого консерватизма в расчетах:

- сценарий 1 – базовый, использование только природного щебня при консервации водоема;
- сценарий 2 – реалистичный, использование 50 % цементосодержащих материалов при консервации водоема;
- сценарий 3 – консервативный, использование 100 % цементосодержащих материалов при консервации водоема;
- сценарий 4 – ультраконсервативный, двухкратное превышение концентрации Са в воде над уровнем, который соответствует применению при засыпке акватории 100 % цементосодержащих материалов.

Полученные результаты расчета показали незначительное увеличение скорости миграции (удельная активность ^{90}Sr в грунтовой воде выросла на 10 и 20 % соответственно к концу периода моделирования) при реалистичном и консервативном сценариях использования бетонных материалов при консервации водоема-хранилища В-17 (см. рисунок 4.3).

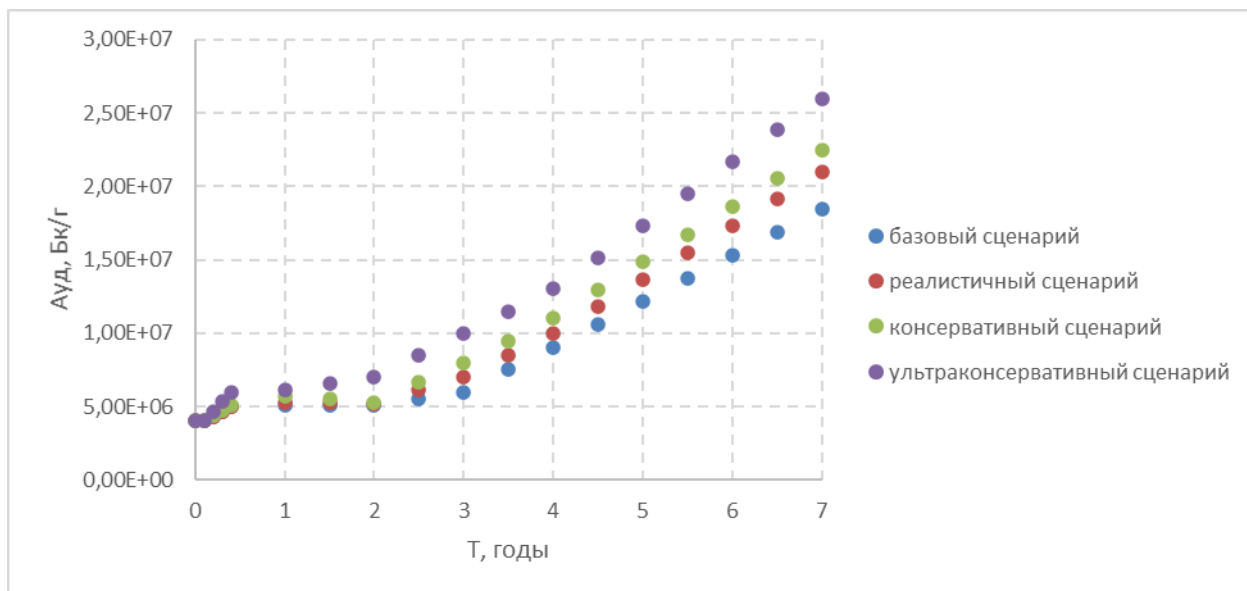


Рисунок 4.3 – Результаты расчетов по ПК PhreeqC 2.18

Полученные результаты означают незначительное влияние на долговременную безопасности при использовании ЗМ в виде вторичных цементосодержащих материалов для проведения работ по засыпке акватории водоема В-17. Отметим, что такие результаты обусловлены во многом спецификой гидрогеологических характеристик водоема, который

является искусственным и будет осушаться по мере фильтрации воды, снижая тем самым степень подщелачивания. Для других водоемов влияние может быть существенно выше и обоснование безопасности должно осуществляться, в том числе на основании данных экспериментального исследования процессов, определяющих долговременную безопасность (см. рисунок 4.1).

Также отметим, что еще одним вопросом является обеспечение структурной стабильности системы ИББ. В отличие от природных материалов, которые обладают стабильностью структуры, цементосодержащие материалы будут деградировать с течением времени, что может приводить к нарушению целостности барьеров на периодах времени более 100 лет. Это может приводить к возникновению дополнительных ограничений на количество используемых вторичных материалов при консервации и правилам их размещения (учет усадки соответствующих материалов и т. д.).

Несмотря на указанные особенности, основные элементы методологии обоснования применения дополнительных материалов можно считать определенными.

Для оценки влияния использования ЗМ при закрытии акватории В-17 на радиационную безопасность персонала при ведении работ предлагается проведение модельных расчетов. В работе соответствующие расчеты выполнялись с помощью расчетно-прогностического комплекса CORIDA [98]. Кратко их опишем, имея в виду, что расчетный инструментарий может быть иным.

В качестве источника облучения рассматривался радионуклид ^{137}Cs , который вносит основной вклад в гамма-излучение для объекта В-17, и значим для ЗМ отходов радиохимического и реакторного производств.

С учетом размеров В-17 основной вклад в мощность дозы будет вносить загрязненная область, расположенная в непосредственной близости от точки, в которой рассчитывается мощность дозы. Для расчетов часть водоема была представлена в виде цилиндра, состоящего из различных слоев материалов. Были рассмотрены несколько возможных источников ионизирующего излучения: загрязненные илы водоема (в которых накоплена основная активность); загрязненная вода водоема (в непосредственной близости от которой будет располагаться персонал, проводящий работы по консервации водоема); ЗМ, которые используются при проведении работ по консервации.

Результаты расчетов показали, что основной вклад в мощность дозы над поверхностью водоема дает загрязненная вода, вследствие относительно небольшой

проникающей способности гамма-излучения с энергией 662 кэВ в воде (длина свободного пробега ~ 11 см при средней глубине водоема 2 м).

Расчетная оценка влияния применения ЗМ при консервации водоема проводились исходя из следующего сценария проведения работ: акватория засыпается вначале загрязненными бетонными конструкциями (до отметки 235,5), после чего отсыпается 0,5 м чистого щебня до отметки 236,0. Исходя из средней глубины водоема 2 м, рассчитывалась мощность дозы, обусловленная излучением бетонной засыпки высотой 150 см. В качестве покрывающих слоев были приняты чистая вода толщиной 50 см (вариант 1, соответствует завершению первого этапа засыпки акватории с применением ЗМ) и чистый щебень толщиной 0,5 м (вариант 2, соответствует завершению второго этапа засыпки акватории). Поскольку активность бетона может изменяться в широком диапазоне, расчет мощности дозы, соответствующей удельной активности используемого бетона 1 Бк/г для последующего пересчета на фактическую активность бетона. При проведении расчетов распределение излучения в бетонной засыпке задавалось равномерно распределенным с изотропным угловым распределением. Также для сравнения была проведена расчетная оценка мощности дозы в базовом варианте (обусловленная загрязненной водой в исходном состоянии водоема).

Результаты расчета МЭД для всех модельных вариантов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета мощности дозы для различных вариантов моделирования

Вариант	Базовый	1	2
Расчетная МЭД, мкЗв/час	6,3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$

Из полученных результатов видно, что наиболее критичным вариантом является 2 (до отсыпки чистого щебня), при этом даже при удельной активности бетонной засыпки до 10^3 Бк/г дополнительная мощность дозы на водной поверхности не превысит 3 мкЗв/час, а дополнительная мощность дозы над полностью засыпанной акваторией не будет превышать 0,1 мкЗв/час. Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии значимого влияния использования ЗМ (вплоть до уровня отнесения материалов к НАО) на радиационную безопасность персонала, осуществляющего работы по закрытию.

Отметим, что вышеизложенные оценки, обосновывающие безопасность данного решения справедливы также для ЗО-4 при размещении дополнительных РАО в виде измельченных строительных конструкций в пунктах размещения особых РАО.

4.2 Отсутствие необходимых регламентаций эксплуатации пунктов размещения и консервации особых РАО (ЗО-4)

Как отмечалось ранее, для данной проблематики характерны два аспекта:

- экономический, а именно реализация положения ФЗ-190 «загрязнитель платит»;
- технологический, направленный на обеспечение безопасности (включая долговременную) ПХ особых РАО.

Первый аспект относительно легко решается в рамках организационно финансовой модели ЕГС РАО введением соответствующей платы за размещение отходов. При этом, в качестве такой платы следует исходить не из установленных тарифов для удаляемых РАО (как практиковалось в отдельных случаях), а специального тарифа, учитывающего стоимость последующих работ по закрытию объекта и его переводу в ПЗРО, а также соотношение между количеством накопленных РАО (федеральная собственность) и вновь размещаемых РАО (собственность эксплуатирующей организации).

Анализ второго аспекта проведем с учетом известных подходов [68] к обоснованию согласно постановлению [21] критериальных параметров отнесения накопленных РАО к особым. Рассмотрим модели, которые применены в [68]. Затраты для сценария удаления РАО могут быть представлены как независимые от объема накопленных РАО: разработка проектной документации, создание необходимой инфраструктуры (косвенная зависимость от необходимой мощности) и линейно зависящие от объема РАО: извлечение, кондиционирование, перевозка и захоронение РАО. Таким образом, затраты на реализацию стратегии удаляемых РАО можно представить в виде монотонно возрастающей функции следующего вида:

$$M_{\text{удал}} = A_{\text{удал}} \cdot V_{\text{РАО}} + B_{\text{удал}}, \quad (18)$$

где $A_{\text{удал}}$ – совокупный показатель стоимости работ по удалению РАО, руб./м³;
 $B_{\text{удал}}$ – условно постоянные затраты на проектирование работ, создание необходимой инфраструктуры для удаления РАО, руб.;
 $V_{\text{РАО}}$ – объем РАО в ПХ, м³.

Из таких же соображений зависимость стоимости работ по консервации особых РО может быть представлена в виде монотонно возрастающей функции следующего вида:

$$M_{\text{конс}} = A_{\text{конс}} \cdot S_{\text{РАО}} + B_{\text{конс}}, \quad (19)$$

где $A_{\text{конс}}$ – совокупный показатель стоимости работ по созданию дополнительных барьеров безопасности, руб./м²;

$S_{РАО}$ – общая площадь создаваемых барьеров безопасности при консервации объекта, m^2 ;

$B_{удал}$ – условно постоянные затраты на проектирование работ, создание необходимой инфраструктуры для консервации объекта, руб.

Тогда критерий отнесения к особым РАО может быть представлен в следующем виде

$$A_{удал} \cdot V_{РАО} + B_{удал} > A_{конс} \cdot S_{РАО} + B_{конс}, \quad (20)$$

или

$$A_{удал} \cdot V_{РАО} - A_{конс} \cdot S_{РАО} > B_{конс} - B_{удал} \quad (21)$$

Проверку выполнения данного соотношения можно осуществлять с использованием различных механизмов, например, на основании исторических данных по уровням заполнения объектов и объемам размещения РАО. В качестве примера проведем анализ неравенства на основе данных по пульпохранилищам АО «СХК» ПХ-1, в которые на момент проведения диссертационного исследования продолжается размещение РАО в виде пульпы, а также прорабатывается вопрос размещения дополнительных объемов РАО в виде загрязненного оборудования, а также пульп и шламов, в настоящий момент размещенных в иных объектах.

На рисунках 4.4 и 4.5 показаны общий вид водоема ПХ-1 АО «СХК» и его цифровая модель и также зависимости объема размещенных РАО от площади поверхности и отношения объема у поверхности для различных отметок.

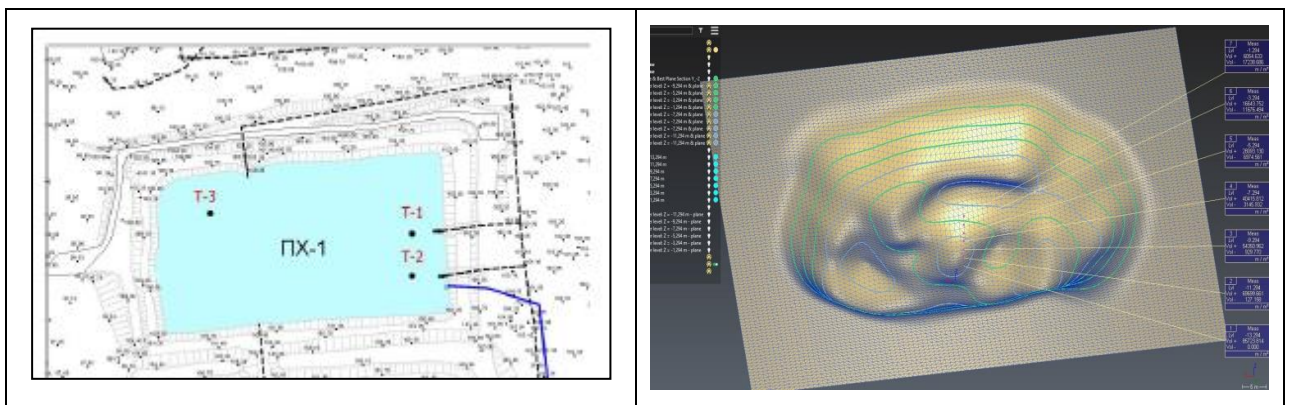


Рисунок 4.4 – Общий вид водоема (а) и цифровая модель (б) ПХ-1 АО «СХК»

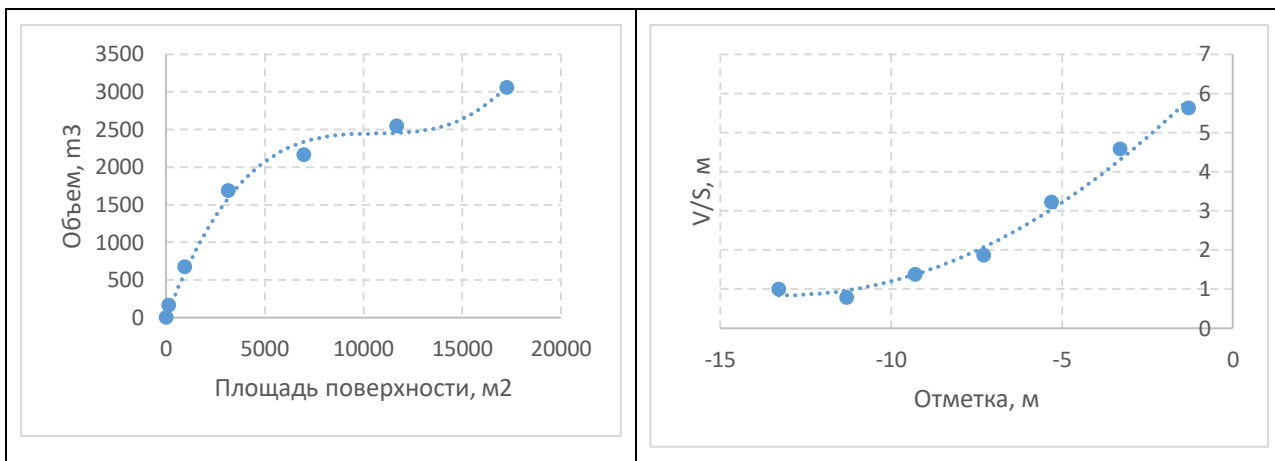


Рисунок 4.5 – Зависимость объема размещенных РАО от площади их поверхности (а) и отношения объема размещенных РАО к площади их поверхности от отметки (б) для ПХ-1 АО «СХК»

Как видно из представленных зависимостей, относительное изменение объема при размещении дополнительных РАО больше или равно относительному изменению площади покрывающих барьеров безопасности, которые необходимо создать для перевода его в безопасное состояние, что означает выполнение неравенства (21) при размещении дополнительных объемов РАО.

Аналогичные доводы можно провести и с оценками доз и рисков потенциального облучения при реализации стратегий извлечения и захоронения на месте, которые описываются аналогичными моделями в [68]. Следовательно, с точки зрения положений закона [3] и постановления Правительства [21] обращение с РАО, размещаемыми в ПХ особых РАО, должно осуществляться на тех же принципах, что и с накопленными РАО, то есть они должны подлежать захоронению на месте.

Помимо выполнения принципов радиационной защиты (в формулировках критериальных параметров постановления [21]) следует также обеспечить и совместимость накопленных и вновь размещаемых РАО. Под совместимостью следует понимать как отсутствие химических процессов, приводящих к тепловыделению или газовыделению, которые могут повлиять на безопасность эксплуатации ПЗРО, на текущий момент, так и отсутствие коллоидосодержащих веществ, которые могут привести к повышенной скорости миграции радионуклидов в долгосрочной перспективе. Радионуклидный состав размещаемых РАО при этом может быть различным, однако с учетом того, что нуклиды мигрируют с различной скоростью в различных условиях следует обосновывать долговременную безопасность с учетом радионуклидного состава РАО для всех сценариев, подлежащих рассмотрению в рамках обоснования безопасности объекта.

К настоящему времени изложенные подходы частично реализованы с участием диссертанта в рамках НП-103-17 [42], которые устанавливают категории ПХ особых РАО и требования к их безопасной эксплуатации. В рамках данных норм и правил допускается размещение РАО в ПХ особых РАО (п. 14). В целом реализация предлагаемых решений в части ЗО-4 позволит добиться важного качественного эффекта для ЕГС РАО, а именно полноты охвата всех потоков РАО.

4.3 Иные зоны локальной оптимизации (ЗО-3, ЗО-5, ЗО-6)

Ситуация с ЗО-3 (сохранение нормативного разграничения между промышленными отходами с повышенным содержанием радионуклидов и РАО) достаточно подробно изложена в [18], где приведен достаточно широкий набор аргументов против идеи включения категории промышленных отходов с повышенным содержанием радионуклидов в категорию РАО. Не повторяя приведенные там аргументы, лишь кратко отметим возможные нормативные решения, которые позволят снизить негативное влияние возможной реализации этой идеи на практику обращения с РАО. Эти решения также требуют устранения дополнительных нормативных барьеров, часть из них может быть устранена в рамках корректировки технических нормативных актов (федеральных норм и правил в области использования атомной энергии) за счет введения отдельных требований по обращению с такими отходами. Однако проблематика захоронения требует и законодательных корректировок, в частности изменения положения статьи 48.1 пункт 1 части 1 Градостроительного кодекса Российской Федерации [100], согласно которому все ПЗРО относятся к особо опасным и технически сложным объектам. Такое отнесение предъявляет очевидно завышенные требования к конструкции соответствующих объектов, что сказывается на затратах на соответствующий этап обращения.

В большом количестве конкретных практических ситуаций возможности оптимизации по ЗО-5 и ЗО-6 тесно связаны с конкретными производственными условиями, определяющими экономическую эффективность различных решений. В первую очередь следует обеспечить нормативно-правовую возможность реализации различных решений, которые могут оказаться оптимальными. Это в полной мере относится к зонам оптимизации ЗО-5 (ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО) и ЗО-6 (захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО). Так, например, в ЗО-5 решающим фактором будет являться затраты на хранение РАО до снижения их удельной активности ниже уровней отнесения отходов к РАО. Данный фактор определяется как экономическими аспектами деятельности предприятия, так и конкретным

радионуклидным составом РАО. В такой ситуации решение следует оставить за эксплуатирующей организацией, обеспечив нормативно-правовую возможность реализации оптимального решения (в данном случае – обеспечение долговременной выдержки РАО для их распада за счет внесения изменений в сроки промежуточного хранения) установленные законом [3] или приказом [54].

Для практического внедрения захоронения ОНРАО на площадках эксплуатирующих организаций (ЗО-6) необходимо определить особый порядок перехода права собственности на такие ПЗРО, обеспечив законодательную возможность их эксплуатации предприятием без передачи национальному оператору. Это требует корректировки положений статьи 40 закона [3]. Реализация соответствующих решений позволит создавать ПЗРО, максимально учитывающие технологические особенности обращения с РАО, например создание ячеек захоронения для крупногабаритного оборудования без его фрагментации, создание ИББ, учитывающих особенности химического и радионуклидного состава РАО и т. д. Также для данной зоны следует реализовать предложения в части корректировки положений Градостроительного кодекса [100], которые предлагались для ЗО-3.

4.4 Выводы по главе 4

Для оптимизации решений по зоне ЗО-1 на примере предстоящих работ по консервации водоема В-17 ФГУП «ПО «Маяк» показаны основные возможности и ограничения применения ЗМ от работ по выводу из эксплуатации. В качестве основных компонент обоснования показаны расчеты по оценке влияния используемых вторичных материалов на скорость миграции радионуклидов. В том числе определены подходы к определению перечня учитываемых радионуклидов и определены допустимые пределы влияния. В рассмотренном случае в качестве ключевого радионуклида определен ^{90}Sr . При этом увеличение концентрации радионуклида в водоносном горизонте под водоемом В-17 не превысит 10 % при частичном замещении природного щебня загрязненными материалами. Проведенными расчетами также показано, что дозы, обусловленной применением загрязненных материалов при консервации водоема, не влияют на радиационную нагрузку на персонал при закрытии акватории.

Для размещения РАО в ПРОРАО показано, что критерии отнесения РАО к особым (в части оценки доз на персонал и затрат) определяются геометрическими характеристиками объекта, следовательно, подтверждение выполнения соответствующих критериев для объектов, в которых осуществлялось размещение РАО после их отнесения к ПРОРАО,

возможно с использованием цифровых моделей. Выполнение критериев продемонстрировано для пульпохранилища ПХ-1 АО «СХК».

По зоне оптимизации ЗО-3 определено содержание компенсирующих мер для снижения негативного эффекта включения промышленных отходов с повышенным содержанием радионуклидов в категорию РАО: корректировку системы ФНП с разработкой отдельных требований к ОНАО, и корректировку Градостроительного кодекса [100].

В части ЗО-5 (ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО) и ЗО-6 (захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО) показано, что выработка технических решений должны осуществляться эксплуатирующими организациями на основе оценки стоимости затрат с учетом локальных особенностей ситуации.

Заключение

Анализом практических трудностей, сопровождающих функционирование ЕГС РАО, показано, что оптимизации параметров и технологических режимов установок по обращению с РАО должна предшествовать системная оптимизация. Её проведение для объектов ядерного топливного цикла определено целью диссертационного исследования, а в отношении собственно процесса оптимизации были выработаны требования, граничные условия и процедура оценки эффективности технологических решений в рамках ЕГС РАО.

Скринингом всех стадий обращения с РАО установлено 16 потенциальных зон оптимизации. Из них выделено 9 наиболее сильно влияющих на эффективность функционирования ЕГС РАО. В порядке рейтинга это: оптимизация критериев классификации РАО для захоронения (ЗО-7); размещение и проектирование ПЗРО (ЗО-11); нормативное разграничение отходов ОНАО и РАО (ЗО-3); расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости (ЗО-8); захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО (ЗО-6); нормативное закрепление возможности размещения РАО в ПХОРАО (ЗО-4); ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО (ЗО-5); перечень учитываемых радионуклидов (ЗО-9); ежегодное отнесение к не подлежащим дальнейшему использованию отходам (ЗО-1). В отношении них установлены основные причины их возникновения, определены и обоснованы меры по оптимизации.

Решения, направленные на согласованную оптимизацию ЗО-7, ЗО-8, ЗО-9 и ЗО-11 с учетом технологических взаимосвязей, впервые в России разработаны на основе оценки безопасности сценариев эволюции ПЗРО. В качестве основных, практически значимых предложений определены:

- Разграничение сферы действия критериев классификации и критериев приемлемости РАО для захоронения;
- Расширение номенклатуры удаляемых классов, в том числе для захоронения на средней глубине для захоронения долгоживущих РАО, включая облученный графит; ОНРАО; ОЗРИ;
- Сокращение перечня радионуклидов и введение дифференцированных по нуклидам критериев классификации, учитывающих их особенности;

- Установление оптимизированных критериев приемлемости РАО и формирование алгоритма размещения РАО в ПЗРО захоронения на основании сценарной оценки безопасности и фактических характеристик РАО.
- Выработка решений по ЗО-1 и ЗО-4 и их обоснование проводилась для ресурсоемких работ по консервации водоемов-хранилищ ЖРО В-17 ФГУП «ПО «Маяк» и ПХ-1,2 АО «СХК».

Для водоема В-17 ФГУП «ПО «Маяк» получены новые данные по влиянию замены чистого щебня на цементсодержащие отходы на скорость миграции. Показано, что при использовании отходов до 100 тыс. тонн не наблюдается значимого увеличения скорости миграции радионуклида ^{90}Sr , для которого это влияние будет наибольшим. Показано также практическое отсутствие дополнительных доз облучения персонала.

По зоне оптимизации ЗО-4 обоснована возможность оценки выполнения критериев отнесения размещаемых РАО к особым на основании анализа геометрических характеристик объектов. Применение данного подхода для объекта ПХ-1 АО «СХК» показало, что при дополнительном размещении РАО в указанном объекте по-прежнему будут выполняться критерии отнесения объекта к ПРОРАО, а размещение дополнительных РАО возможно без изменения программы или концепции вывода из эксплуатации объекта.

По ЗО-3 определены меры по корректировке нормативно-правовой базы для снижения негативного эффекта включения промтоходов с повышенным содержанием радионуклидов в категорию РАО. В части ЗО-5 и ЗО-6 предложено ориентироваться на исключение избыточных нормативно-правовых ограничений, а выработка самих технических решений должны осуществляться эксплуатирующими организациями на основе оценки стоимости затрат с учетом реалий конкретных производств.

Полученные результаты использованы и учтены: при подготовке предложений Госкорпорации по корректировке Федерального закона «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190-ФЗ [3], постановления Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1061 [21], ОСПОРБ-99/2010 [37], при разработке федеральных норм и правил НП-103-17 «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» [42] и руководства по безопасности РБ-154-19 «Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий

ядерного топливного цикла» [102], а также при реализации ряда ресурсоемких проектов по выводу из эксплуатации и обращению с РАО.

Список сокращений

АМБ	– «атом большой мирный» водографитовый каналный реактор
АО	– акционерное общество
АО «АЭХК»	– акционерное общество «Ангарский электро- химический комбинат»
АО «СХК»	– акционерное общество «Сибирский химический комбинат»
АО «ЧМЗ»	– акционерное общество «Чепецкий металлургический завод»
АС	– агрегатное состояние
АЭС	– атомная электро- станция
ВЭ	– вывод из эксплуатации
ЕГС	– единая государственная система
ЖРО	– жидкие радиоактивные отходы
ЗМ	– загрязненные материалы
ЗСЖЦ	– завершающая стадия жизненного цикла
ЗО	– зона оптимизации
ИББ	– инженерные барьеры безопасности
ИНО	– идентификатор неопределенности отходов
ИПЦ	– индекс потребительских цен
КИРО	– комплексное инженерное и радиационное обследование
КПО	– комплексный показатель опасности
ЛАЭС	– Ленинградская атомная электро- станция
МАГАТЭ	– международное агентство по атомной энергии
МЗУА	– минимально значимые удельные активности
МКРЗ	– международная комиссия по радиационной защите
МЭД	– мощность эквивалентной дозы
НРБ	– нормы радиационной безопасности
НО РАО	– национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами
НПА	– нормативный правовой акт
НТС	– научно-технический совет
ОИАЭ	– объект использования атомной энергии
ОЗИИИ	– отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения
ОЗРИ	– отработавший закрытый радиоактивный источник
ОНРАО	– очень низко активные радиационные отходы
ОСПОРБ	– основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
ОЯТ	– отработанное ядерное топливо
ПГЗРО	– пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
ПЗРО	– пункт захоронения радиоактивных отходов
ПЗУА	– предельно значимые удельные активности
ПКОРАО	– пункты консервации особых радиоактивных отходов
ПО «Маяк»	– производственное объединение «Маяк»
ППЗРО	– пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов
ПРОРАО	– пункт размещения особых радиоактивных отходов
ПУГР	– промышленный уран-графитовый реактор
ПХ	– пункт хранения
ПХОРАО	– пункт хранения особых радиоактивных отходов
РАО	– радиоактивные отходы

РБМК	– реактор быстрый многоканальный
РВ	– радиоактивные вещества
РМ	– радиационный мониторинг
РМПШ	– радиоактивные материалы природного происхождения
РФ	– Российская Федерация
САО	– средне активные отходы
СГУК	– система государственного учета и контроля
СП	– стабильности параметр
ТРО	– твердые радиоактивные отходы
УАНИ	– уровни активности неограниченного использования
ФГУП	– Федеральное государственное унитарное предприятие
ФГУП «ГХК»	– Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»
ФЗ	– Федеральный закон
ФНП	– Федеральные нормы и правила
ФЗЦП ЯРБ	– Федеральная целевая программа ядерной и радиационной безопасности
ХХ ППГХО	– хвостохранилище «Приаргунского производственного горно-химического объединения»
ЭГП	– энергетический графито-водный гетерогенный реактор канального типа
ЭО	– эксплуатирующая организация
ЯРОО	– ядерный радиационно опасный объект
ЯТЦ	– ядерный топливный цикл

Список литературы

1. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. — Под общей редакцией Е. В. Евстратова, А. М. Агапова, Н. П. Лаверова, Л. А. Большова, И. И. Линге. — 2012 г. — 356 с. — Т1.
2. НП 067-05. Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации.
3. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ "Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
4. Федеральный закон от 04.11.2005 № 139-ФЗ "О ратификации Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами".
5. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. приказом Президента РФ 1 марта 2012 г. № Пр-539).
6. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России. — Под общей редакцией Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И. — 2013 г. — 392 с. — Т 2.
7. Абрамов А. А., Дорофеев А. Н., Дерябин С. А. Развитие ЕГС РАО в рамках работ по федеральной целевой программе обеспечения ядерной и радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 8—24.
8. Абрамов А. А., Дорофеев А. Н. Современное состояние и перспективы развития системы обращения с РАО в Российской Федерации // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 10—21.
9. Predisposal management of radioactive waste. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2009. p. ; 24 cm. — (IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X ; no. GSR Part 5).
10. Near surface disposal facilities for radioactive waste. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. p. ; 24 cm. — (IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X ; no. SSG-29).

11. Geological disposal facilities for radioactive waste : specific safety guide. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. p. ; 24 cm. — (IAEA safety standards series,, ISSN 1020–525X ; no. SSG-14).
12. Хамаза А. А. Рискоориентированный подход в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности // Радиация и риск, 2015, т. 24, № 4, с. 87—97
13. Бирюков Д. В., Ведерникова М. В., Савкин М. Н. и др. Практические потребности развития методологии анализ риска для заключительных стадий жизненного цикла // Радиация и риск, 2015, № 2, с. 116—130.
14. Бакин Р. И., Бирюков Д. В., Илюшкин А. И. и др. Ранжирование источников радиационного риска. Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2014-07, 2014.
15. International Atomic Energy Agency. Fundamental safety principles. Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006.
16. Большов Л. А., Линге И. И., Абалкина И. Л. и др. К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России // Ядерная и радиационная безопасность, 2014, № 3 (73), с. 3—13.
17. Решение НТС № 10 ГК «Росатом» «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность» по вопросу «Результаты работ по инвентаризации ЯРОО и первичной регистрации РАО, включая оценку снижения риска в результате реализации ФЦП ЯРБ», 8 июля 2015 года.
18. Абрамов А. А., Большов Л. А., Гаврилов П. М., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Линге И. И., Мокров Ю. Г., Печкуров А. В., Уткин С. С. Об идеях расширения системы обращения с РАО на промышленные отходы, содержащие техногенные радионуклиды // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 6—13.
19. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработать научно-аналитическое обеспечение государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов», шифр 13-У12-02 (промежуточный) в соответствии с Государственным контрактом от 25.11.2013 № СЛ-13-23/227 по этапу 2. «Разработать предложения по разработке финансово-экономической модели установления и корректировки тарифов на захоронение радиоактивных отходов» (регистрационный номер результата НИР – 05814813-13-У12-02-2). – Москва, ИБРАЭ РАН, 2015.

20. Лопаткин Александр Викторович. Топливный цикл крупномасштабной ядерной энергетики России на принципах топливного и радиационного баланса и нераспространения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2013.

21. 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».

22. Дорофеев А. Н. О ходе работ по развитию нормативно-правовой базы в области обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 6–13.

23. Иванов Е. А., Шаров Д. А., Курындин А. В. Актуальные проблемы классификации удаляемых твердых радиоактивных отходов, образующихся при использовании атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 2 (88). С. 11—23.

24. Иванов Е. А., Шаров Д. А., Демьяненко М. В., Шарафутдинов Р. Б., Курындин А. В. О некоторых проблемах обращения с промышленными отходами, содержащими техногенные радионуклиды // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 3 (93). С. 1—11.

25. НП-002-15. Правила безопасности при обращении с радиоактивными отходами атомных станций.

26. НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности.

27. НП-020-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности.

28. НП-058-14. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения.

29. Распоряжение Правительства РФ от 7 декабря 2015 г. № 2499-р Об утверждении перечня организаций, в результате осуществления деятельности которых по добыче и переработке урановых руд образуются радиоактивные отходы, и организаций, эксплуатирующих особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты

и осуществляющих деятельность, в результате которой образуются очень низкоактивные радиоактивные отходы, которые могут осуществлять захоронение указанных отходов в пунктах захоронения радиоактивных отходов, размещенных на земельных участках, используемых такими организациями.

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

31. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты, МАГАТЭ, Вена, 2007.

32. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий : Т. 1. / под общ. ред. И. И. Линге и А. А. Абрамова. — М: ИБРАЭ РАН, 2017 г. — 336 с : ил. — ISBN: 978-5-9907220-6-4 (в пер.)

33. Аннотационный отчет по государственному контракту от 12.09.2017 г. № Д.4ш.244.20.17.1082 «Создание и внедрение нормативно-методических и организационных инструментов управления программными мероприятиями и ядерно и радиационно опасными объектами наследия в целях повышения эффективности управления программными мероприятиями федеральной целевой программы «Обеспечения ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года в обеспечение мероприятия Мониторинг эффективности реализации программных мероприятий, включая вариантное прогнозирование состояния ядерной и радиационной безопасности на долгосрочный период, нормативное и информационное обеспечение реализации Программы» (промежуточный). Задача 6. Систематизация данных по ядерно и радиационно опасным объектам ядерного наследия. Этап 2.

34. Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге И. И., Самойлов А. А. Оптимизация обращения с загрязненными материалами и РАО в пределах промышленных площадок // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 6—17.

35. Блохин П. А., Ванеев Ю. Е. «Оценка возможности повторного использования металлических отходов, содержащих радионуклиды». Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной Российской конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» г. Москва – г. Обнинск, 22—25 сентября 2015 г. – г. Обнинск: НОУ ДПО «ЦИПК Росатома»; 2015 – с. 177.

36. Аннотационный отчет о работе по государственному контракту от 26.07.2019 г. № Д.4ш.244.20.19.1046 «Разработка и обоснование механизмов повышения эффективности мероприятий Программы на основе комплексного анализа реализации Программы и оценки текущего и перспективного состояния промышленных площадок размещения ядерно и радиационно опасных объектов» в обеспечение мероприятия «Мониторинг эффективности реализации программных мероприятий, включая вариантное прогнозирование состояния ядерной и радиационной безопасности на долгосрочный период, нормативное и информационное обеспечение реализации Программы» Задача 2. Разработка и параметризация информационно-цифровых моделей для обоснования безопасности оптимальных конечных состояний объектов и пилотных площадок в рамках работ по ВЭ и проведение расчетов для использования в рамках обоснования безопасности работ при разработке проектов, а также подготовки ООБ по ВЭ ЯРОО наследия. Этап 1. Том 2.

37. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).

38. Алексахин Р. М., Булдаков Л. А., Губанов В. А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л. А. Ильина, В. А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.

39. Стратегический мастер-план решения проблем Теченского каскада водоёмов ФГУП "ПО "Маяк" / ИБРАЭ РАН и др. – Утв. генеральным директором Госкорпорации "Росатом" 15.02.2016.

40. Самойлов А. А., Болдырев К. А., Мокров Ю. Г. Подходы к оптимизации консервации водоёма-хранилища В-17 // Вопросы радиационной безопасности., 2019. № 1. С. 25–35.

41. Дорофеев А. Н., Линге И. И., Самойлов А. А., Шарафутдинов Р. Б. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 23–32.

42. НП-103-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» ().

43. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

44. Radiation protection and safety of radiation sources : international basic safety standards. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. p. ; 24 cm. — (IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X ; no. GSR Part 3).

45. ОСП-72/87. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений.

46. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. / В. А. Баженов, Л. А. Булдаков, И. Я. Василенко и др.; Под редакцией В. А. Филова и др. – Л.: Хими, 1990. 464 с. ISBN 5-7245-0216-X.

47. Особые радиоактивные отходы / Под общ. ред. И. И. Линге. – М.: ООО "САМ полиграфист", 2015. – 240 с.

48. IAEA General Safety Guide № GSG-1 «Classification of Radioactive Waste».

49. IAEA-TECDOC-1380. Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities. IAEA, 2003.

50. Пятый национальный доклад Российской Федерации «О выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами» к шестому Совещанию Договаривающихся сторон по рассмотрению национальных докладов в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами (Австрия, г. Вена, 21 мая – 1 июня 2018 г.)

51. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Report of the Federal Republic of Germany for the Sixth Review Meeting in May 2018 (Austria, Vienna, 21 of May – 1 of June 2018).

52. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М. Ф. Киселёва и Н. К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

53. Статья 12. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Ратифицирована Федеральным законом РФ от 4 ноября 2005 года № 139-ФЗ.

54. Приказ Госкорпорации «Росатом» от 07.07.2014 № 1/24-НПА «Об утверждении сроков промежуточного хранения РАО и объемов таких отходов для

организаций, эксплуатирующих особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты».

55. Захоронение радиоактивных отходов, Конкретные требования безопасности № SSR-5: Нормы МАГАТЭ по безопасности. — МАГАТЭ, Вена. — 2011.

56. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-23, IAEA Safety Standards. — IAEA, Vienna. — 2012.

57. Решение секции № 1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом» от 12 апреля 2019 г.

58. НП-019-15. Сбор, переработка и кондиционирование жидких радиоактивных отходов Требования безопасности.

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

60. Пырков И. В., Тимофеева Е. Б., Тихонов И. И., Шаров Д. А. и др. Внедрение технологии радионуклидного вектора на Нововоронежской АЭС // Материалы МНТК Росэнергоатом. 2014.

61. Блохин П. А., Самойлов А. А. Радиологическое обоснование контроля содержания радионуклидов в контексте обеспечения долговременной безопасности пунктов захоронения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. Т. 62. № 4. С. 17—23.

62. Линге И. И., Ведерникова М. В., Савкин М. Н., Самойлов А. А. Перспективы обращения с особыми радиоактивными отходами // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 6. С. 321—324.

63. Бочаров К. Г., Михеев С. В., Ведерникова М. В. Перспективы работ по накопленным РАО в организациях Топливной компании АО «ТВЭЛ» // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 85—92.

64. Иванов В. К. и др. Риск-ориентированный подход к оптимизации радиологической защиты персонала группы А Госкорпорации «Росатом»: формирование критических групп // «Радиация и риск». 2017. Том 26. № 3. С. 19—27.

65. Отчет о работе по государственному контракту от 17.07.2017 № Н.Д.4ш.244.20.17.1066 «Разработка предложений по совершенствованию финансово-организационной модели управления обращением с радиоактивными отходами, в том числе их захоронением» Этап 2. Предложения по повышению эффективности нормативно-правовой среды системы обращения с РАО. Том 3.

66. Отчет о работе по договору № 11/11784-Д от 31.05.2019 «Обоснование долговременной безопасности решений по оптимизации схемы обращения с РАО при консервации пульпохранилищ ПХ-1, ПХ-2»

67. Аннотационный отчет о работе по государственному контракту от 26.07.2019 г. № Д.4ш.244.20.19.1046 «Разработка и обоснование механизмов повышения эффективности мероприятий Программы на основе комплексного анализа реализации Программы и оценки текущего и перспективного состояния промышленных площадок размещения ядерно и радиационно опасных объектов» в обеспечение мероприятия «Мониторинг эффективности реализации программных мероприятий, включая вариантное прогнозирование состояния ядерной и радиационной безопасности на долгосрочный период, нормативное и информационное обеспечение реализации Программы» Задача 3. Разработка и обоснование предложений по повышению эффективности мероприятий Программы, связанных с обращением (хранение, извлечение, кондиционирование, переработка, передача на захоронение) с накопленными РАО и поддержанием в безопасном состоянии остановленных ЯРОО наследия до момента начала работ по ВЭ, и аналогичных мероприятий на период 2031-2050 гг. на основе детализированного финансово-экономического анализа и обоснования оптимальной стоимости соответствующих работ. Этап 1.

68. Абалкина И. Л., Барчуков В. Г., Бочкарев В. В., Ведерникова М. В., Дорогов В. И., Кочетков О. А., Крышев И. И., Линге И. И., Панченко С. В., Савкин М. Н., Уткин С. С. Научно-техническое пособие по подготовке обосновывающих материалов для принятия решения об отнесении радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам. Версия 2.0. ИБРАЭ РАН, 2014. 157 с.

69. Дорофеев А. Н., Комаров Е. А., Захарова Е. В., Волкова А.Г., Линге И.И., Иванов А. Ю., Уткин С. С., Павлюк А. О., Котляревский С. Г. К вопросу захоронения реакторного графита // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 18—30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.

70. Распоряжение ГК «Росатом» № 1-1.4/645-Р от 26.08.2019 «О создании рабочей группы для подготовки предложений по совершенствованию нормативно правового обеспечения деятельности по обращению с промышленными отходами, содержащими радиоактивные вещества в количествах, не соответствующих критериям отнесения к радиоактивным отходам».

71. Письмо ГК «Росатом» № 1-1.4/6386-ИВК-ДСП от 12.02.2020 «О проведении анализа предложений по совершенствованию нормативно-правового обеспечения по обращению с промышленными отходами, содержащими РВ».

72. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработать научно-аналитическое обеспечение государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов», этап 2 (промежуточный) «Разработать предложения по разработке финансово-экономической модели установления и корректировки тарифов на захоронение радиоактивных отходов» в соответствии с Государственным контрактом от 25.11.2013 № СЛ-13-23/227.

73. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработать научно-аналитическое обеспечение государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов», этап 3 (промежуточный) «Разработать предложения по научно-методическому и организационно-техническому обеспечению реализации функций по установлению тарифов на захоронение радиоактивных отходов и контролю за их применением» в соответствии с Государственным контрактом от 25.11.2013 № СЛ-13-23/227.

74. Постановление Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 1249 «О порядке государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов».

75. Федеральный закон от 17 августа 1995 г. N 147-ФЗ "О естественных монополиях".

76. Письмо исх. № 1-2/44372 от 24.09.2019 ГК «Росатом» в Ростехнадзор.

77. Аннотационный отчет о научно-исследовательской работе по государственному контракту от 19.02.2018 № Н.4д.241.20.18.1018 «Проведение расчетов в отношении радиационных и экологических аспектов реализации мероприятий Программы и комплексная оценка состояния ядерной и радиационной безопасности. Этап 2018—2020 гг.» Этап 4.

78. Grevoz A. «Disposal options for low-level long lived waste in France», Disposal of Low Activity Radioactive Waste (Proc. Int. Symp. Cordoba, Spain, 2004), IAEA, Vienna (2005).
79. Александрова Т. А., Блохин П. А., Самойлов А. А., Курьиндин А. В. Анализ данных по радионуклидному составу РАО в контексте оценки долговременной безопасности их захоронения // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 44—51.
80. АО «ОДЦ УГР». Отчет о НИР «Разработка технологических решений по переработке элементов графитовой кладки для снижения класса РАО» в обеспечении мероприятия «Разработка и практическое использование при выводе из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов и новых высокоэффективных установок». Этап 1 Государственного контракта от 19.04.2016 № Н.4д.21.(2.7).16.1047.
81. РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии "Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов".
82. NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, Part 61 — licensing requirements for land disposal of radioactive waste.
83. The United Kingdom's sixth national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the safety of spent fuel and radioactive waste management, 2017.
84. Sweden's sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, 2017.
85. ICRP, 1998. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28 (4).
86. Shallow Land Disposal of Radioactive Waste. Reference Levels for the Acceptance of Long-Lived Radionuclides. A report by an NEA Expert Group, 1986.
87. Оценка воздействия на окружающую среду «Сооружение радиационного источника в филиале «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» (Ленинградское отделение)», 2015 г.
88. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»

89. Гиневец Е. В., Тихонова А. А., Дорофеев А. Н., Иванов А. Ю., Александрова Т. А., Дроздов В. В. Информационное обеспечение управления работами по обращению с РАО в рамках ФЦП ЯРБ-2 // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 28—35. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-28-35.
90. Дорофеев А. Н. «Реализация первого этапа создания единой государственной системы обращения с РАО, планы на будущее» // ГК «Росатом», 09.11.2015.
91. Ровный С. И., Иванов И. А., Стукалов П. М. и др. Загрязнение подземных вод технецием-99 в районе размещения водоёмов-хранилищ жидких радиоактивных отходов озеро Карачай и Старое Болото // Вопросы радиационной безопасности. 2007. № 3. С. 17–27.
92. Пряхин Е. А. и др. Некоторые показатели состояния биоты водоёма В-17. Пилотные исследования // Вопросы радиационной безопасности. 2009. № S (специальный выпуск: Радиоэкология водных систем). С. 86–91.
93. Стукалов П. М., Симкина Н. А. Промышленный водоём ПО "Маяк" Старое Болото. Результаты комплексного обследования 2000 г. // Вопросы радиац. безопасности. 2003. № 1. С. 59–68.
94. Стукалов П. М. Радиоактивное загрязнение промышленного водоёма "ПО "Маяк" Старое Болото. Обзор результатов исследовательских работ (1949–2006 годы). Ч. 1 / Библиотека журнала "Вопросы радиационной безопасности", № 10. – Озерск: РИЦ ВРБ, 2007. – 136 с.
95. Пряхин Е. А., Тряпицына Г. А., Дерябина Л. В. и др. Современное состояние экосистем водоёмов В-11, В-10, В-4, В-17 и В-9 ПО "Маяк" // Вопросы радиац. безопасности. 2011. – Спецвыпуск. – С. 5–23.
96. Болдырев К. А., Крючков Д. В, Мартынов К. В. и др. Разработка расчетных методов оценки миграции радионуклидов за пределы ИББ с учетом их эволюции: Препринт / ИБРАЭ РАН, № ИБРАЭ-2017-11. – М.: ИБРАЭ РАН, 2017. – 23 с.
97. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's guide to PHREEQC (VERSION 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. – Denver, Colorado, 1999.
98. Блохин П. А., Блохин А. И., Ванеев Ю. Е. и др. Программный комплекс КОРИДА для прогнозирования характеристик источников ионизирующих излучений и

создаваемых ими радиационных полей: Препринт / ИБРАЭ РАН, № IBRAE-2018-06. – М.: ИБРАЭ РАН, 2018. – 16 с.

99. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Progress in Radioactive Graphite Waste Management, IAEA-TECDOC-1647, IAEA, Vienna (2010).

100. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ.

101. РБ-155-20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по порядку, объему, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения.

102. РБ-154-19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла.

103. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности: монография / Под редакцией Сорокина В.Т. – М.:Логос, 2012.

104. Радченко М. В., Кормилицына Л. А., Матюнин Ю. И., Могулян В. Г. Многоцелевые упаковки для радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1. — С. 74—84.

105. Сорокин В.Т., Демин А.В., Кашеев В.В., Гатауллин Р.М., Меделяев И.А. Радиационные аспекты использования контейнеров нзк-150-1,5п при кондиционировании радиоактивных отходов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. - № 2 (76)-2015, С. 3—10.

106. Сорокин В.Т., Демин А.В., Кашеев В.В., Ирошников В.В., Гатауллин Р.М., Меделяев И.А., Перегудов Н.Н., Шарафутдинов Р.Б. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности // Ядерная и радиационная безопасность. – 2013, - № 2 (68)-2013, С. 15-23.

107. Мацеля В.И. Обращение с РАО 2 класса на ФГУП «ГХК». Доклад на НТС №10, ИБРАЭ РАН 16.10.2019

Основные публикации по теме диссертации

1. Самойлов А. А., Бирюков Д. В., Ведерникова М. В. и др. Практические потребности развития методологии анализа риска для заключительной стадии жизненного цикла. Радиация и риск. 2015. № 2. С. 116–130.
2. Линге И. И., Ведерникова М. В., Савкин М. Н., Самойлов А. А. Перспективы обращения с особыми радиоактивными отходами. Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 6. С. 321-324.
3. Иванов В. К., Горский А. И., Корело А. М., Максютков М. А., Туманов К. А., Самойлов А. А., Бирюков Д. В., Ильясов Д. Ф. Минимизация радиационных рисков персонала в ситуациях планируемого облучения на примере выполнения работ по ликвидации объектов ядерного наследия. Радиация и риск. 2017. Т. 26. № 4. С. 7–21.
4. Савельева-Трофимова Е. А., Самойлов А. А. Человеческий фактор как источник риска для долговременной безопасности пунктов захоронения отходов атомной энергетики. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 5. С. 122–130.
5. Абалкина И. Л., Бирюков Д. В., Самойлов А. А. и др. Инвентаризация ядерно и радиационно опасных объектов: ожидаемые результаты и перспективы их использования. Препринт №IBRAE-2014-05. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2014. 39 с.
6. Особые радиоактивные отходы. / Под общей редакцией И.И. Линге. М.: ООО «САМ полиграфист», 2015. 240 с.
7. Самойлов А. А., Уткин С. С. Оптимизация вывода из эксплуатации пунктов долговременного хранения радиоактивных отходов. Сборник тезисов 10-й юбилейной Российской научной конференции, г. Москва – г. Обнинск, 22–25 сентября 2015 г. – г. Обнинск НОУ ДПО «ЦИПК Росатома», 2015. с. 187-189.
8. Линге И. И., Самойлов А. А. Возможности оптимизации нормативного регулирования единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами. Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 4 (84). С. 12–20.
9. Блохин П. А., Самойлов А. А. Радиологически значимые радионуклиды в составе РАО АЭС в контексте долговременной безопасности В сборнике: Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики Материалы IV научно-практической конференции. Под ред. М. И. Орловой, Е. Е. Ежовой. 2017. С. 22–25.

10. Блохин П. А., Самойлов А. А. Радиологическое обоснование контроля содержания радионуклидов в контексте обеспечения долговременной безопасности пунктов захоронения. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. Т. 62. № 4. С. 17-23.
11. Самойлов А. А., Блохин П. А., Болдырев К. А., Уткин С. С., Семенов М. А., Коновалов В. Ю. Методический подход к определению радиологически значимых радионуклидов для оценки долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3 (87). С. 21–31.
12. Дорофеев А. Н., Линге И. И., Самойлов А. А., Шарафутдинов Р. Б. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО. Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 22—31.
13. Ремизов М. Б., Козлов П. В., Борисенко В. П., Дементьева И. И., Блохин П. А., Самойлов А. А. Разработка алгоритма оценки радионуклидного состава остеклованных ФАО ФГУП «ПО «Маяк» для цели их безопасного захоронения. Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 102–110.
14. Александрова Т. А., Блохин П. А., Самойлов А. А. Анализ радионуклидного состава РАО: долгосрочная безопасность и нормативные требования. В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018 сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. Севастополь, 2018. С. 60–63.
15. Александрова Т. А., Блохин П. А., Самойлов А. А., Курьиндин А. В. Анализ данных по радионуклидному составу РАО в контексте оценки долговременной безопасности их захоронения. Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 44–51.
16. Бирюков Д.В., Блохин П.А., Самойлов А.А., Фролова О.Б. Анализ работ по переработке ОЯТ в контексте требований к окончательной изоляции РАО / сборник тезисов IX Российской конференции с международным участием «Радиохимия 2018», 17-21 сентября 2018 г., г. Санкт-Петербург. 2018. -536 с.
17. Самойлов А. А., Болдырев К. А. Подходы к оптимизации консервации водоема-хранилища В-17. Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 1 (93). С. 25–35.
18. Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге И. И., Самойлов А. А. Оптимизация обращения с загрязненными материалами и РАО в пределах промышленных площадок. Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 6—17.