

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
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**

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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук
Линге Игорь Иннокентьевич.

Официальные оппоненты: Чесноков Александр Владимирович, доктор технических наук, ученый секретарь управления «Реабилитация» ККРН НИЦ «Курчатовский институт»;

Кашеев Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, директор отделения Высокотехнологического научно-исследовательского института неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Защита состоится 23 декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://www.ibrae.ac.ru/contents/305/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Объекты ядерного топливного цикла, в том числе по добыче урановых руд, их переработке, производству топлива, атомные станции и предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива, являются основными источниками образования РАО. В силу исторических причин сформировалась система обращения с РАО, ключевыми особенностями которой были ориентация на текущую безопасность и отсутствие требований по захоронению. По мере накопления информации стало очевидным, что проблемы в области обращения с РАО в рамках текущей системы неразрешимы, а прогнозируемые тенденции к их резкому росту могут привести к кризису в отрасли. Ключевым событием, побудившим к принципиальным изменениям подходов к обращению с РАО, стала ратификация Российской Федерацией Объединенной конвенции в конце 2005 года. Это дало дополнительный импульс к формированию принципиально новой нормативно-правовой базы. В 2011 году вступил в силу Федеральный закон № 190 «Об обращении с радиоактивными отходами», который предусматривает создание Единой государственной системы обращения с РАО (далее ЕГС РАО) для «организации и обеспечения безопасного и экономически эффективного обращения с радиоактивными отходами, в том числе их захоронения». Первый этап создания системы (разработка нормативной и организационной основ, первичная регистрация РАО) завершен 1 января 2015 г. Таким образом, на момент начала диссертационного исследования (2014 год) в рамках развития ЕГС РАО начали реализовываться первые шаги по переходу к новой практике захоронения РАО.

В условиях изменений сложившихся подходов практически по всем направлениям деятельности в области обращения с РАО требуется настройка системы с учетом новых знаний, например, оценок безопасности захоронения РАО и реальной практики обращения с РАО.

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.

Цели и задачи исследования

Цель диссертационного исследования – разработка и обоснование безопасности и экологической приемлемости предложений по оптимизации технологических решений по обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- определение требований и граничных условий оптимизации технологических решений;
- анализ ряда существующих и перспективных технологических цепочек обращения с РАО на предприятиях ядерного топливного цикла;
- выявление зон 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 определение причин их возникновения;
- определение приоритетных зон оптимизации (далее ЗО) для выработки мер по усовершенствованию технологических и организационных решений;
- разработка мер по корректировке технологических или организационных решений по обращению с РАО, в том числе для конкретных ресурсоемких проектов, и обоснование их безопасности и экологической приемлемости.

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 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 рекомендаций по корректировке технологических решений и нормативно-правового регулирования, направленных на повышение эффективности деятельности по захоронению РАО, и их конкретным развитием для отдельных нормативных документов и крупных объектов размещения особых РАО.

В ходе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

- определены 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 при подготовке предложений Госкорпорации «Росатом» по корректировке Федерального закона «Об обращении с РАО» № 190-ФЗ, постановления Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1061, ОСПОРБ-99/2010, при разработке федеральных норм и правил НП-103-17 «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» 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», а также при реализации ряда ресурсоемких проектов по выводу из эксплуатации и обращению с РАО.

Основные положения, выносимые на защиту

Положение о приоритетности системной оптимизации в сравнении с оптимизацией проектирования и эксплуатации конкретных установок по обращению с РАО;

Перечень приоритетных зон оптимизации в области обращения с РАО;

Предложения по развитию номенклатуры классов удаляемых РАО и корректировке критериев классификации удаляемых РАО в целях захоронения;

;

Предложения по возможности и безопасности использования загрязненных материалов при консервации пунктов размещения особых РАО.

Степень достоверности

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 тематических 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», Координационной межведомственной комиссии по развитию ЕГС РАО, созданной распоряжением директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО.

Личный вклад автора заключается 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.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации докладывались на следующих мероприятиях:

- XVI научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 23–24 апреля 2015 г.;
- X юбилейная Российская конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» г. Москва – г. Обнинск, 22–25 сентября 2015 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий», г. Москва, 23-24 марта 2016 г.;

- 43-я Международная конференция по обращению с радиоактивными отходами (Waste Management Conference 2017), Финикс (США), 5–9 марта 2017 г.;
- Научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования РАО при приведении к критериям приемлемости», г. Санкт-Петербург, 26–30 июня 2017 г.;
- Научная конференция «Зарождение радиоэкологии, ее развитие и роль в обеспечении радиационной безопасности природной среды и человека», г. Озерск, 10–12 октября 2017 г.;
- IV научно-практическая конференция с международным участием «Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики», г. Калининград, 19–20 октября 2017 г.;
- 11-я международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018), г. Москва, 23–24 мая 2018 г.;
- IX Российская конференция с международным участием «Радиохимия 2018», г. Санкт-Петербург, 17–21 сентября 2018 г.;
- XIX научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 22–23 ноября 2018 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018», г. Севастополь, 24–27 сентября 2018 г.;
- Второй научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов при приведении к критериям приемлемости», г. Санкт-Петербург, 05–09 июня 2019 г.;
- Третий научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», г. Санкт-Петербург, 24–28 июня 2019 г.;
- 13-я школа-семинар «Организационное и правовое обеспечение двух систем: СГУК РВ и РАО и ЕГС РАО», г. Сочи, 02–07 сентября 2019 г.

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 132 страницы основного текста, включая 20 таблиц и 24 рисунка, в том числе графики.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её основная цель, задачи, научная новизна, практическая

значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации.

Глава 1. Последовательно представлены все аспекты, необходимые для формулировки цели и задач исследования, путей их решения.

В разделе 1.1 проведен анализ текущего состояния различных элементов ЕГС РАО и интересов ее участников. Приведен пример ситуации, когда оптимизация технологических решений по переработке РАО в противоречивых нормативно-правовых условиях дает отрицательный результат с точки зрения экономики и безопасности. С учетом этого утверждается, что оптимизацию в отношении отдельных технологических решений по конкретным установкам и пределам ЯТЦ необходимо предварить системной оптимизацией. Основными задачами системной оптимизации определяются две: 1) выявление потенциальных зон оптимизации в области обращения со всеми потоками РАО, в том числе от эксплуатации или ВЭ крупных объектов ядерной техники; 2) разработка и обоснование безопасности и экологической приемлемости предложений по устранению имеющихся проблем или снижению их негативного воздействия для создания необходимых условий для последующей оптимизации конкретных технологий и установок по обращению с РАО.

В разделе 1.2 определены основные требования к проведению системной оптимизации и её граничные условия. В качестве основных требований определены следующие:

сопоставимости, то есть возможности сравнения решений по воздействию на эффективность ЕГС РАО;

полноты охвата этапов и потоков, то есть охвата всех этапов обращения с РАО на ОИАЭ, находящихся на различных стадиях жизненного цикла, а также деятельности по долговременному хранению и захоронению РАО;

минимизации суммарных затрат на обращение с загрязненными материалами по всей технологической цепочке обращения, включая захоронение.

Показано, что в зону системной оптимизации целесообразно включить все вновь образующиеся и накопленные РАО на предприятиях ЯТЦ России, а также нормативно-правовые документы, регулирующие обращение с ними.

Для сопоставления мер оптимизации по воздействию на эффективность предложено использовать функционал следующего вида:

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

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

$K_{техн}^i$ – коэффициент 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 и др. параметры – величины, позволяющие определить потенциальную опасность объекта размещения РАО. Соответствующий подход в различных вариациях применяется в мире¹ и России².

В разделе 1.3 показана необходимость итерационной реализации оптимизационного процесса. На первом этапе следует провести анализ деятельности по обращению с РАО на всех предприятиях ЯТЦ России с выделением проблемных зон, в дальнейшем следует провести их приоритизацию и группировку с учетом технологических связей. Далее должны быть предложены технологические решения, соответствующие лучшим практикам в данной области и проведено обоснование их соответствия современным требованиям долгосрочной безопасности и экологической приемлемости.

В разделе 1.4, завершающем постановочную главу, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

В главе 2 показано, каким образом были определены приоритетные направления оптимизации.

Для этого в разделе 2.1 описаны основные допущения и подходы при проведении скрининга стадий обращения с РАО. Кратко их отметим:

эксплуатирующие организации действуют в соответствии со сложившимися практиками, а новации применяются только в том случае, если они предусмотрены новыми регулирующими требованиями;

стадии и операционные зоны рассматриваются на предмет соответствия принципам безопасности, а нормативные требования к стадиям и операциям – на предмет обоснованности и полноты охвата деятельности по обращению с РАО. В случае если указанные условия не выполняются, формируется зона оптимизации (ЗО).

Для оценки экономической эффективности используется выражение (1), включающее суммарную стоимость обращения с потоком РАО и включение потока РАО в организационно-финансовую модель ЕГС РАО. С целью определения потенциальных направлений оптимизации рассматривается детализированная структура затрат на полный цикл обращения с РАО.

В разделе 2.2 представлены результаты скрининга, выполненного для вновь образующихся (эксплуатационных), накопленных на объектах ЯТЦ РАО и для РАО от вывода из эксплуатации объектов ЯТЦ. Скрининг проводился на основе достаточно детальных структурных моделей жизненного цикла эксплуатационных (рисунок 1-а) и накопленных РАО (рисунок 1-б).

¹ Nuclear Decommissioning Authority - The Radiological Hazard Potential: A Progress Measure for Nuclear Cleanup, doc № EGR009, July 2006.

² 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.

| Зона оптимизации | Область оптимизации |
|------------------|--|
| ЗО-8 | Расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости |
| ЗО-9 | Перечень радионуклидов, учитываемых при определении класса удаляемых РАО |
| ЗО-10 | Контроль за соответствием РАО критериям приемлемости |
| ЗО-11 | Размещение и проектирование ПЗРО |
| ЗО-12 | Содержание объектов долговременного хранения РАО |
| ЗО-13 | Критерии отнесения к особым РАО |
| ЗО-14 | Обращение с РАО при ВЭ пунктов хранения РАО |
| ЗО-15 | Создание новых объектов размещения особых РАО |
| ЗО-16 | Определение тактики демонтажных и дезактивационных работ |

В разделе 2.3 исследованы содержание зон оптимизации и причины их возникновения, среди которых ключевыми являются следующие: длительный опыт работы в режиме отсутствия платы за образование отходов, чрезмерная детализация требований нормативно-правовой базы, не опирающейся на практический опыт обращения с РАО и оценки безопасности.

Рассмотрим причины и содержание наиболее показательных примеров ЗО:

ЗО-7 - Оптимизация критериев классификации для захоронения.

Наиболее яркой демонстрацией недостатков классификации удаляемых РАО является несогласованность двух критериев: классификации удаляемых РАО и отнесения отходов к РАО (рисунок 2).

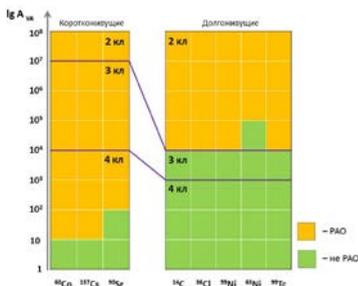


Рисунок 2 – Критерии классификации и критерии отнесения к РАО для отдельных радионуклидов

Первый установлен в форме суммарной удельной активности бета-, альфа-излучающих радионуклидов и трансурановых элементов, второй установлен в виде значений предельно значимой удельной активности (ПЗУА). В результате для некоторых радионуклидов удельные активности могут соответствовать классу 3 и даже 2, хотя и не превышать значения ПЗУА.

Основным направлением оптимизации является внедрение международно принятого подхода к классификации РАО (рисунок 3), который позволит исключить имеющиеся несоответствия.

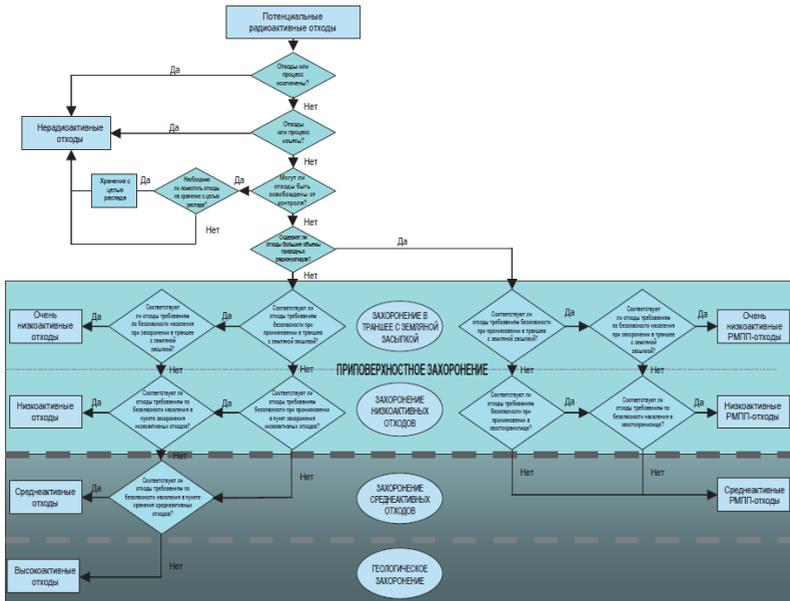


Рисунок 3 – Подход к классификации РАО согласно рекомендаций МАГАТЭ

30-8 – Расширение рамок (смягчение) частных критериев приемлемости.

В рекомендациях МАГАТЭ указано, что процедура установления критериев приемлемости должна носить итерационный характер с участием всех заинтересованных сторон на основе оценки безопасности. Этот подход не в полной мере вошел в отечественную практику, что приводит к возможности реализации двух негативных сценариев: установление требований к проектированию, которые не могут быть выполнены, или реализация консервативного подхода с возрастанием затрат на захоронение.

Решение ситуации – дифференцированное установление требований к различным отходам на основе обоснования долгосрочной безопасности.

30-9 – Перечень радионуклидов, учитываемых при определении класса удаляемых РАО.

Радионуклидный состав и активность РАО являются определяющими параметрами для формирования дальнейшей стратегии обращения с отходами. В России практика контроля радионуклидов в РАО ориентировалась на эксплуатационные требования, не рассматривая вопросы захоронения РАО. Это неверно, так как до момента потенциального воздействия РАО на население после захоронения могут пройти десятки тысяч лет, следовательно, и перечень радионуклидов, определяющих долговременную безопасность, может кардинально отличаться от перечня, определяющих эксплуатационную (рисунок 4).



Рисунок 4 – Радиологически значимые радионуклиды активационных РАО АЭС

Следовательно, следует установить оптимизированный перечень контролируемых радионуклидов с учетом возможных механизмов дозового воздействия РАО при различных сценариях эволюции ПЗРО.

30-11 – Размещение и проектирование ПЗРО.

Единственным нормативным указанием для структуры ПЗРО в настоящий момент является действующая классификация удаляемых РАО, где объединены в одну категорию принципиально разные типы захоронения (приповерхностное и на средней глубине). С учетом запроса на минимизацию затрат ПЗРО на средней глубине фактически был исключен из структуры типов ПЗРО.

Основное направление оптимизации в данной зоне – установление более гибкой номенклатуры классов РАО с учетом рекомендаций МАГАТЭ и технологических особенностей различных потоков РАО.

Кратко отметим направления оптимизации иных зон:

30-1 – Ежегодное отнесение к не подлежащим дальнейшему использованию отходам: использование отходов от вывода из эксплуатации при консервации пунктов хранения особых РАО (ПХОРАО) и закрытии ПЗРО;

30-2 – Разделение отходов на промотходы, ОНАО и РАО: определение минимально достаточных методических и инструментальных решений, позволяющих экономически эффективно разделять отходы различного вида.

30-3 – Сохранение существующего нормативного разграничения РАО и ОНАО: исключение необоснованного расширения сферы действия ЕГС РАО;

30-4 – Нормативное закрепление возможности размещения РАО в ПХОРАО: включение таких отходов в модель финансирования;

30-5 – Ликвидация стадии промежуточного хранения с оптимизацией требований для короткоживущих РАО: установление дифференцированных сроков промежуточного хранения РАО с учетом технологических особенностей обращения с ними.

30-6 – Захоронение ОНРАО на промышленной площадке ЭО: исключение или упрощение процедуры передачи соответствующих ПЗРО в ведение Национального оператора.

30-10 – Контроль за соответствием РАО критериям приемлемости: реализация возможностей системы менеджмента качества.

30-12, 13, 14, 15, 16 - создание мотивации для организаций для поиска решений, максимально соответствующих условиям конкретных производств и снятию отдельных несоразмерных регулирующих требований.

В разделе 2.4 представлены исходные данные и результаты сравнительного анализа влияния мер по оптимизации на эффективность ЕГС РАО.

В заключении к главе 2 приведены краткие выводы, включающие перечень приоритетных зон оптимизации, сгруппированных согласно наличию технологических взаимосвязей, следующим образом:

- группа 1 – зоны оптимизации в отношении РАО, подлежащих захоронению в централизованных ПЗРО (30-7, 30-8, 30-9 и 30-11);
- группа 2 – зоны оптимизации по различного рода отдельным ситуациям, включая обращение с особыми РАО (30-1, 30-3, 30-4, 30-5, 30-6).

Глава 3. В главе предложены и обоснованы решения по оптимизации обращения с РАО, подлежащими удалению в централизованные ПЗРО в 30-7, 30-8, 30-9 и 30-11.

В разделе 3.1 показана необходимость разграничения сфер критериев классификации и критериев приемлемости по их функциональному назначению: определение исходных данных для оплаты захоронения, то есть функционирования финансовой модели ЕГС РАО, обеспечивающей финансирование проектирования, сооружения и эксплуатации ПЗРО (классификация) и предъявление требований к РАО, подлежащих захоронению в конкретном ПЗРО (критерии приемлемости). На последующих этапах развития ЕГС РАО после создания всей необходимой инфраструктуры по захоронению критерии классификации должны быть актуализированы уже на основании разработанных критериев приемлемости для всей совокупности ПЗРО.

Первоочередная мера по оптимизации – более детальная структура классов, включающая класс ОНРАО, класс для захоронения на средней глубине, а также классы для отдельных потоков РАО: отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения (небольшой объем источника, локализация радионуклидов, узкий перечень радионуклидов), РАО от добычи и переработки минерального и органического сырья (большой объем образования, природные радионуклиды).

В разделе 3.2 показаны основные составляющие обоснования долгосрочной безопасности захоронения долгоживущих РАО на средней глубине. Расчеты выполнены на примере облученного графита, который в текущей классификации отнесен к РАО класса 2.

В рамках анализа базового сценария (нормальная эволюция ПЗРО) проведено моделирование распространения долгоживущих и слабосорбируемых (т.е. наиболее опасных) радионуклидов ^{14}C и ^{36}Cl . Для моделирования использовался расчетный код GeRa\VI, в котором создана модель ПЗРО на основе концепции, разработанной для площадки вблизи г. Сосновый Бор (рисунок 5).

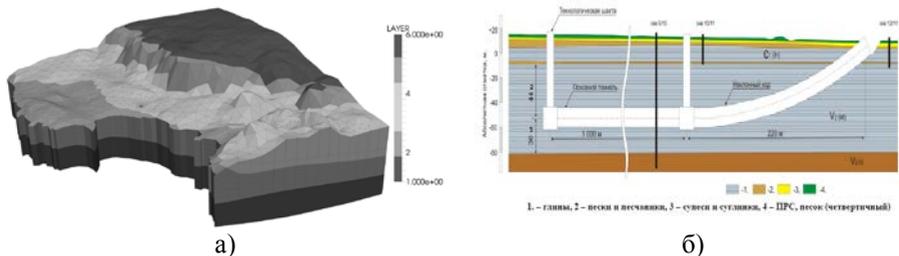


Рисунок 5 – Трехмерная модель для ПЗРО в районе г. Сосновый Бор (а) и профильный разрез ПЗРО (б)

Полученные результаты расчетов показали, что при захоронении даже 60 тыс. тонн облученного графита (т.е. всего объема графита РБМК и ПУГР) значение удельной активности радиологически значимых радионуклидов в грунтовой воде в точке мониторинга не будет превышать значений 0,1 уровня вмешательства (УВ).

В качестве альтернативного сценария в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ выбран сценарий непредумышленного вторжения (бурение скважин) в систему захоронения спустя более чем 500 лет после закрытия ПЗРО, то есть после утери институционального контроля. Его анализ проведен на основе методологии технического документа МАГАТЭ «Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities». Результаты оценки дозы от основных долгоживущих радионуклидов ^{14}C и ^{36}Cl составили 0,24 и 0,01 мЗв/год соответственно, что не превышает принятого дозового критерия (1 мЗв/год). Полученные результаты показывают перспективность выделения отдельного класса для захоронения на средней глубине и возможность отнесения облученного графита к данному классу.

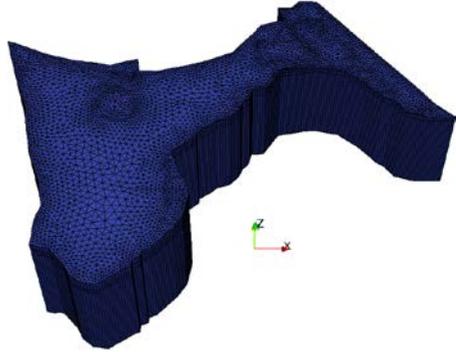
В разделе 3.3 показаны оценки допустимого содержания короткоживущих радионуклидов в зависимости от принятой длительности сохранения институционального контроля. Показано, что содержание короткоживущих радионуклидов с периодом полураспада менее 15 лет практически не ограничено с точки зрения долговременной безопасности при длительности институционального контроля до 500 лет. Это позволяет на порядок смягчить критерии классификации для таких радионуклидов, а также существенно ограничить перечень контролируемых радионуклидов (до 17, не включая актиниды).

В разделе 3.4 обоснованы предельно допустимые значения удельной активности для отдельных долгоживущих радионуклидов в приповерхностном ПЗРО. Для оценки базового сценария использовался расчетный код GeRa\VI и

модель ПЗРО на основе концепции, разработанной для площадки вблизи г. Озерск (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6 – Модель дальней зоны: а) – границы модели; б) – расчетная сетка

Анализ сценария вторжения проводился с использованием подходов, аналогичных использованным в подразделе 3.2. Результаты анализа показали, что в ряде случаев именно альтернативные сценарии дают более жесткие ограничения на емкость ПЗРО.

Таблица 2 – Максимально допустимые удельные активности радионуклидов в приповерхностном ПЗРО

| Радионуклид | Допустимая удельная активность для базового сценария ¹ , Бк/г | Допустимая удельная активность для альтернативного сценария ² , Бк/г |
|-------------------|---|---|
| ¹⁴ C | 8,00E+01 | 1,0E+06 |
| ³⁶ Cl | 4,00E+02 | 4,0E+02 ³ |
| ⁵⁹ Ni | 4,00E+08 | 1,0E+7 |
| ⁶³ Ni | >1,00E+14 | 2,0E+8 |
| ⁹⁰ Sr | >1,00E+14 | 2,0E+9 |
| ⁹⁹ Tc | 1,00E+03 | 9,0E+5 |
| ¹³⁷ Cs | >1,00E+14 | 2,0E+7 |
| ²³⁵ U | 1,00E+00 | 9,0E+2 |
| ²³⁹ Pu | 2,00E+07 ⁴ | 2,0E+2 |
| Примечания: | 1) Оценена для 50 000 м ³ РАО при плотности 2 г/см ³ 2) Сооружение автодороги 3) Определено по методологии технического документа МАГАТЭ «Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities» 4) Определяется накоплением продукта распада - ²³⁵ U | |

В результате расчетов показана возможность установления существенно более мягких (в том числе на порядки) критериев классификации для ряда радионуклидов (⁵⁹Ni, ⁶³Ni, ⁹⁰Sr, ²³⁹Pu).

В разделе 3.5 определены правила классификации смешанных по радионуклидному составу РАО исходя из сценария, который ограничивает содержание конкретного радионуклида. На текущем этапе развития ЕГС РАО рекомендуется для всех типов сценариев использовать критериальное выражение вида

$$K = \sum_i \frac{A_i}{A_{max}^i} < 1, \quad (2)$$

По мере развития оценок долговременной безопасности для радионуклидов, содержание которых ограничено по базовому сценарию, можно переходить к критериальному выражению следующего вида:

$$K = \max \left\{ \left(\sum_j \frac{A_j}{A_{max, баз}^j} \right)_i + Z_j(A_1, A_2, \dots) \right\} < 1, \quad (3)$$

где $Z_j(A_1, A_2, \dots)$ – поправочная функция, учитывающая смещение распределения концентраций различных химических элементов при их воздействии на население и окружающую среду.

В разделе 3.6 определены подходы к формированию оптимизированной системы критериев приемлемости на основании оценки безопасности по различным сценариям эволюции ПЗРО на основе численного критерия, определяющего качество использования радиологической емкости ПЗРО:

$$F_{ПЗРО} = \sum_{i,j} \frac{V_j \cdot C_{j, баз}^i}{A_{max, баз}^i} + \frac{1}{\sum_j V_{ячейки, j}} \cdot \sum_{i,j} \frac{V_{ячейки, j} \cdot C_{j, втор}^i}{C_{max, втор}^i}, \quad (4)$$

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

$A_{max, баз}^i$ – максимальная активность i -го радионуклида, ограниченная 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;

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

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

Среди основных выводов по главе (раздел 3.7) отметим:

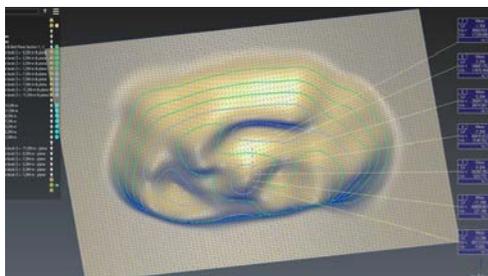
- необходимость согласованного изменения структуры ПЗРО и номенклатуры классов удаляемых РАО (РАО, подлежащие захоронению на средней глубине; ОНРАО; отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения; РАО от добычи и переработки минерального и органического сырья);
- потенциальную возможность безопасного захоронения РАО в виде облученного графита на средней глубине в глиняных формациях;
- целесообразность существенного сокращения перечня радионуклидов, ограничивающих возможность приповерхностного захоронения;

- возможность смягчения критериев классификации для ряда долгоживущих радионуклидов: от 2 (изотопы плутония) до 10^4 (для ^{63}Ni) раз.

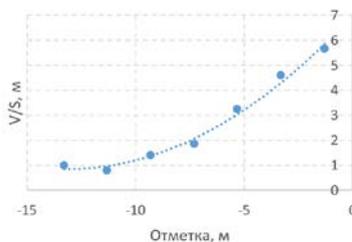
Глава 4 содержит предложения по технологически изолированным зонам оптимизации, то есть отдельным пунктам размещения (консервации) особых РАО.

В разделе 4.1 обоснована возможность применения загрязненных материалов, образующихся при выводе из эксплуатации объектов радиохимического производства при консервации водоема-хранилища ЖРО В-17 (ФГУП «ПО «Маяк»). Проведенное геохимическое моделирование показало, что несмотря на то, что повышение концентрации кальция в воде приводит к увеличению скорости миграции ^{90}Sr , частичное использование вторичных цементсодержащих материалов при консервации водоема не приведет к недопустимому увеличению скорости миграции (концентрация радионуклида в подстилающем водоносном горизонте увеличится не более чем на 10 % при использовании в качестве засыпки до 50 % вторичных материалов. Значительного дополнительного дозового воздействия на персонал, проводящий работы по консервации водоема, также не будет.

В разделе 4.2 показана возможность распространения критериальных оценок по отнесению РАО к особым РАО на вновь размещаемые на основании данных по геометрическим характеристикам ПХ (изменение площади поверхности в зависимости от объема размещенных РАО). Показано выполнение соответствующих критериев для объекта ПХ-1 АО «СХК».



а)



б)

Рисунок 7 – Цифровая модель ПХ-1 АО «СХК» (а) и отношение объема размещенных РАО к площади их поверхности от отметки (б)

Раздел 4.3 посвящен рекомендациям по совершенствованию нормативно-правового режима обращения с РАО для зон оптимизации ЗО-3, ЗО-5, ЗО-6. Среди предложенных изменений: корректировка положений 190-ФЗ, разрешающие эксплуатацию ПЗРО для ОНРАО организациями до момента их закрытия, корректировка Градостроительного кодекса в части исключения таких ПЗРО из особо опасных и технически сложных объектов и введение дифференцированных сроков промежуточного хранения.

Раздел 4.4 содержит краткие выводы по главе 4, основными из которых являются:

- возможность применения загрязненных материалов в ограниченном объеме (до 100 000 т) от работ по выводу из эксплуатации при консервации водоема В-17 ФГУП «ПО «Маяк» при их удельной активности до 10^3 Бк/г;
- возможность распространения оценок критериальных параметров при отнесении РАО к особым для накопленных РАО на вновь размещаемые на основе анализа геометрических характеристик объекта, а также соответствие РАО, дополнительно размещаемым в ПХ-1 АО «СХК», соответствующим критериям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

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 снижения влияния: 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 долгосрочной безопасности захоронения для различных сценариев эволюции ПЗРО. В качестве основных, практически значимых предложений определены:

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, смягчающих ограничения по удельной активности для приповерхностного захоронения от 2 раз (изотопы плутония) до 10^4 раз (для ^{63}Ni) раз;

Установление оптимизированных критериев приемлемости РАО и формирование алгоритма 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 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.

Полученные результаты использованы и учтены при подготовке предложений Госкорпорации «Росатом» по корректировке Федерального закона «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190-ФЗ, постановления Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1061, ОСПОРБ-99/2010, при разработке федеральных норм и правил НП-103-17 «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» 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», а также при реализации ряда ресурсоемких проектов по выводу из эксплуатации и обращению с РАО.

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., Максютлов 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., Курындин 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.

Самойлов Андрей Анатольевич

Системная оптимизация и обоснование решений по безопасной эксплуатации установок по обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ...
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.

115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66