



Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2019-03

Preprint IBRAE-2019-03

**И. Л. Абалкина, Л. А. Большов, И. В. Капырин, И. И. Линге,
Е. А. Савельева, В. С. Свительман, С. С. Уткин**

**ОБОСНОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ И РАО
НА 10 000 И БОЛЕЕ ЛЕТ: МЕТОДОЛОГИЯ И
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**

Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. ОБОСНОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ И РАО НА 10 000 И БОЛЕЕ ЛЕТ: МЕТОДОЛОГИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ. Препринт ИБРАЭ № 2019-03 — М: ИБРАЭ РАН, 2019. — 40 с. — Библиогр.: 84 назв. — 81 экз.

Аннотация

В работе описываются основные аспекты методологии обоснования долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения РАО и ОЯТ. Показано, что несмотря на очевидные особенности этой проблемы, связанные, в первую очередь, с длительными временами, необходимая прогностическая способность (отношение характерных длительностей протекания релевантных процессов к периоду потенциальной опасности этих объектов), по крайней мере, не превышает потребностей задач, связанных с обоснованием безопасности реакторных установок.

Основное внимание уделено формированию перечня особенностей, событий и процессов, влияющих на развитие ПГЗРО, комбинации на их основе различных сценариев эволюции, а также расчетного инструментария. Отдельно рамочно рассмотрен вопрос управления знаниями.

Материал изложен с учетом особенностей развития соответствующих зарубежных проектов и может быть полезен широкому кругу специалистов, занимающимся вопросами обоснования долговременной безопасности ядерных технологий.

Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. RADIOACTIVE WASTE AND SPENT NUCLEAR FUEL DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL LONG-TERM SAFETY ASSESSMENT FOR 10 000 YEARS AND OVER: METHODOLOGY AND THE CURRENT STATE. Preprint IBRAE-2019-03 — Moscow: Nuclear Safety Institute, 2019 — 40 p. — Bibliogr: 84 items.

Abstract

This paper considers the main aspects of the safety case methodology for deep geological disposal of radioactive waste and spent nuclear fuel. The paper shows that the required predictive capability associated foremost with the large timeframes is at least does not exceed similar requirements for safety analysis of reactor facilities.

The main focus is the analysis of the list of significant for deep geological disposal Features, Events, Processes, development of the relevant evolution scenarios based on this list and corresponding computation tools for their assessment. The associated knowledge management issues are also touched upon.

The material takes into account the best international practices and could benefit a wide range of experts in the area of nuclear fuel cycle long-term safety analysis.

Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние

*Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А.,
Свительман В. С., Уткин С. С.*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: +7(495) 955-22-31, электронная почта: svitelman@ibrae.ac.ru

Содержание

Введение	4
1 Общая методология обоснования долговременной безопасности.....	5
1.1 Safety case и safety assessment	6
1.2 Принцип многобарьерности и функции безопасности.....	6
1.3 Неопределенности и робастность, базовый и альтернативные сценарии.....	7
1.4 Природные аналоги	9
1.5 Обоснование долговременной безопасности и принятие решений	10
2 Особенности, события и процессы (ОСП – FEPs).....	10
3 О расчетных моделях, используемых для оценки безопасности ПГЗРО	13
4 Зарубежный опыт	24
4.1 Финляндия: началось сооружение	24
4.2 Швеция: процедура получения лицензии на сооружение.....	25
4.3 Франция: подача документов для получения лицензии на сооружение планируется в 2020 г.	25
4.4 США: невыполненные обязательства государства.....	26
4.5 Роль подземных исследовательских лабораторий	28
4.6 Выводы по зарубежному опыту	29
5 Управление знаниями.....	29
5.1 База знаний	30
5.2 Публикации	34
Заключение	35
Список использованных источников	37

*Тот факт, что безопасное захоронение РАО будет когда-либо сочтено проблематичным, стало бы большим сюрпризом для пионеров геологического захоронения, которые считали, что пункт захоронения может быть со-
оружен группой инженеров с несколькими «...должным образом подготовленными геологами»[1, 2].*

Введение

В России и нескольких десятках стран мира ведется содержательная работа по углубленной проработке вопросов захоронения долгоживущих РАО и ОЯТ в глубоких геологических формациях [3, 4]. Естественно, что текущие стадии этих работ в разных странах отличаются друг от друга. В России ведется подготовка работ к сооружению подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), 15 таких ПИЛ в разных странах уже эксплуатируются. В нескольких странах прогресс наиболее существенен – реализуются или начинаются стадии лицензирования объектов геологического захоронения. Уникальность объектов предопределяет сложность этого процесса. В нем участвуют, помимо органов регулирования в области использования атомной энергии, органы регулирования в сфере недропользования, охраны окружающей среды, которые в том числе в силу политических мотивов не могут обойтись без запроса дополнительных экспертиз. В некоторых случаях чисто политическими обстоятельствами в полной мере формируется отношение к такому рода объектам, как например, в США и Германии.

Деятельность по созданию объектов захоронения РАО может быть определена как регулируемая на высоком уровне. 78 стран, в том числе Россия, ратифицировали Объединенную конвенцию о безопасности обращения с обработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [5]. Объединенная конвенция дает определение понятия захоронение – оно означает помещение отработавшего топлива или радиоактивных отходов в соответствующую установку без намерения их изъятия. Вопросам захоронения ОЯТ и РАО посвящено значительное количество документов МАГАТЭ. В большинстве ведущих подобные работы стран приняты специальные законы и иные нормативно-правовые акты. В Российской Федерации вопросы захоронения РАО регулируются несколькими десятками нормативно-правовых актов.

Несмотря на это среди ряда специалистов в области ядерных технологий бытует мнение о невозможности убедительного доказательства долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО. Это мнение нашло отражение и в Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года [6]. Также распространено мнение о большей эффективности долговременного хранения ОЯТ и РАО и об отсутствии в мире практического опыта захоронения ОЯТ, долгоживущих отходов средней и высокой активности.

Целью настоящей работы является краткий обзор методологии обоснования безопасности с акцентом на долговременное прогнозирование. Основным инструментом прогнозирования, как и в случае создания новых реакторных установок, являются расчетные модели и программы. При этом для задач долговременного прогнозирования приходится рассматривать существенно большие в сравнении с реакторными программами диапазоны времени. Проиллюстрируем отсутствие принципиального значения этого обстоятельства. Опасные процессы в реакторной установке могут развиваться в диапазонах времен от секунд до часов при сроке эксплуатации установок в почти столетие, то есть соотношение, характеризующее необходимую прогностическую способность (1: 5 000 000). Опасные процессы в системе захоронения развиваются за годы и десятилетия при расчетах на период до миллиона лет (1:100 000). Близость регулирующих требований к прогнозированию различных объектов отражается и в практической идентичности требований к аттестации предназначенных для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии программных средств [7].

В первом разделе последовательно изложены общие вопросы методологии обоснования (раздел 1). Завершает этот раздел краткий перечень принципиальных черт методологии. Аналогичные резюме присутствуют и в других разделах работы.

Отличительной чертой, характеризующей полноту обоснования безопасности захоронения, является принятый на международном уровне обширнейший перечень событий и процессов, которые должны быть проанализированы с применением расчетного инструментария. Эти вопросы кратко рассмотрены в разделе 2. Отметим, что относительно новым отечественным нормативным документом (НП-100-17 [8]) этот перечень в основном охватывается.

В разделе 3 даны примеры проведения долговременных расчетов, которые ложатся в основу обоснования безопасности, но не являются его завершением. Обратим внимание на две особенности содержания этого раздела. Основная особенность – это перечень радионуклидов, в отношении которых проводятся рас-

четы на длительные и сверхдлительные времена. Среди них нет подавляющего большинства актинидов из [9], которые гарантированно остаются в ближней зоне захоронения. Это обстоятельство проверено на практике – на объекте Карачай и на полигонах закачки ЖРО в пласты-коллекторы.

В разделе 4 очень кратко приведена актуальная информация по нескольким странам, где прогресс в области захоронения ОЯТ наиболее выражен, и также кратко представлена информация по нескольким странам, где этот процесс затормозился.

В разделе 5 кратко представлена актуальная информация по интеграции знаний и научным публикациям, характеризующим состояние дел по российскому проекту.

В заключение работы обобщены резюме по основным разделам работы.

1 Общая методология обоснования долговременной безопасности

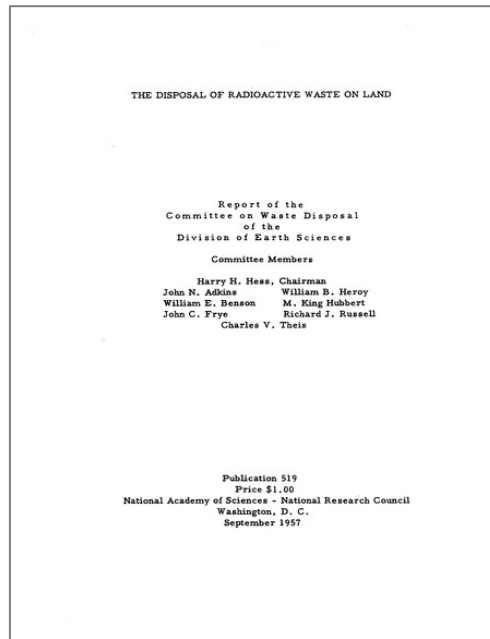


Рисунок 1 – Обложка первого отчета по тематике захоронения РАО, 1957 год [2].

За прошедшие десятилетия отношение к атомной энергетике заметно изменилось, пройдя путь от оптимистично-романтического к рационально- (а порой и иррационально-) скептическому. Нынешний взгляд на решение проблем обращения с РАО можно охарактеризовать как прагматичный – он основан на накопленном мировым сообществом опыте, как позитивном, так и негативном (рисунок 2).

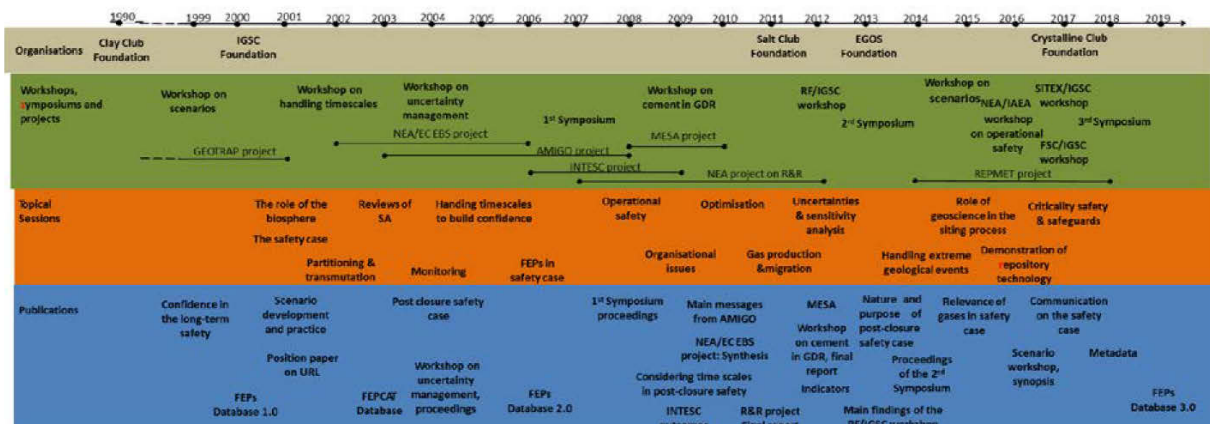


Рисунок 2 – История рассмотрения вопросов обоснования долговременной безопасности пунктов захоронения РАО профильной международной рабочей группой Комитета по обращению с радиоактивными отходами АЯЭ ОЭСР [10]

В современной международной практике обоснование безопасности пункта захоронения РАО – сложная мультидисциплинарная задача, которая решается выполнением определенных процедур и путем систематического анализа всех возможных событий и процессов, которые могут повлиять на характеристики системы захоронения [11, 12].

1.1 Safety case и safety assessment

В результате такого анализа формируется досье обоснования долговременной безопасности (Safety case) [13, 18, 20] – «интеграция аргументов и доказательств, которые описывают, количественно выражают и обосновывают безопасность и степень уверенности в безопасности пункта геологического захоронения».

Две неотъемлемые части Safety case – это (рисунок 3):

- информация, лежащая в основе оценки безопасности (assessment basis), т. е. описание результатов характеристики системы захоронения (включая вмещающую геологическую среду), анализ релевантных для долговременной эволюции конкретного пункта захоронения факторов (особенностей, событий и процессов) [12], и
- непосредственно оценка безопасности (safety assessment), т. е. результаты численного анализа опасностей, связанных с пунктом захоронения и способность площадки и конструкции захоронения обеспечивать функции безопасности и удовлетворять техническим требованиям [18].



Рисунок 3 – Обобщенная схема работ по формированию Safety case (адаптирована из [19])

Пункты захоронения размещаются и проектируются таким образом, чтобы обеспечить защиту человека и окружающей среды от рисков, связанных с долгоживущими РАО.

Для этого пункт захоронения должен обеспечивать следующие функции безопасности:

- удержание радионуклидов (внутри матрицы отходов, упаковки, пункта захоронения);
- изоляцию отходов от доступной биосферы и существенное сокращение вероятности и всех возможных последствий непреднамеренного вмешательства человека.

Как и для реакторных технологий, ключевой вызов в процессе разработки safety case для пунктов захоронения РАО связан с необходимостью учета множества релевантных особенностей, событий и процессов с различными характерными временами. Эти факторы, характерные для них неопределенности, их возможное влияние на эволюцию пункта захоронения должны быть идентифицированы, оценены и представлены в отчете об обосновании безопасности: Phenomena identification and ranking table (PIRT) в составе Safety Analysis Report в реакторной терминологии и Features, events and processes (FEP) в Safety case для пунктов захоронения РАО.

1.2 Принцип многобарьерности и функции безопасности

Ключевым аспектом безопасности является соблюдение принципа многобарьерности. Это означает, что удержание и изоляция радионуклидов за счет множественных механизмов на различных временных масштабах обеспечивается и вмещающей средой, и элементами системы инженерных барьеров.

Согласно положениям требований безопасности МАГАТЭ SSR-5 «Захоронение радиоактивных отходов» [18] «в случае геологического захоронения радиоактивных отходов изоляция обеспечивается, прежде всего, вмещающей геологической формацией», а функция удержания по большей части обеспечивается «характеристиками формы и упаковками отходов...», а также вмещающей окружающей средой и геологической формацией». Система инженерных барьеров безопасности (ИББ) состоит из целого ряда компонентов – это форма отходов, контейнеры с отходами, материал забутовки, герметизации и заупорки.

Общепринятая практика – это определение функций безопасности для каждого элемента системы захоронения и обоснование их выполнения [21]. Естественно, что комбинация функций безопасности, достигаемых отдельными барьерами, для каждого проекта оказывается в какой-то степени уникальной в зависимости от особенностей площадки, принятой концепции, критериев приемлемости РАО, требований заинтересованных сторон и т. д. [22]. Функция, закрепляемая за каждым элементом системы инженерных барьеров при его проектировании в соответствии с той или иной концепцией захоронения, будет определяться в зависимости от условий, которые, как ожидается, могут возникнуть в пункте захоронения в течение периода времени, рассматриваемого регулятором; нормативных требований к обеспечению удержания и ожидаемых эксплуатационных характеристик естественного геологического барьера.

Основная задача системы инженерных барьеров безопасности – предотвратить и/или отсрочить выброс радионуклидов из отходов и их поступление во вмещающую среду пункта захоронения, по крайней мере, в течение нескольких сотен лет с момента закрытия (то есть пока в отходах содержится большое количество продуктов деления и уровень тепловыделения значителен). Если говорить о роли контейнеров или упаковок с отходами, то их главная задача заключается в обеспечении полного удержания как раз в течение первых нескольких сотен лет после размещения отходов в пункте захоронения РАО. Использование контейнеров позволяет смягчить влияние неопределенностей, связанных с различными сложными по своей природе процессами (термическими, гидравлическими, механическими и химическими), которые могут быть инициированы в результате размещения тепловыделяющих отходов.

Тем не менее, для ПЗРО имеется полное соответствие принципам обеспечения безопасности реакторных установок в целом и принципу глубокоэшелонированной системы барьеров безопасности АЭС в частности.

1.3 Неопределенности и робастность, базовый и альтернативные сценарии

Несмотря на то, что и площадки захоронения, и конструкции инженерных барьеров выбираются по критериям долговременной стабильности и предсказуемости, они не являются статическими системами. Проходка горных выработок, размещение инженерных барьеров и самих отходов создают тепловые, гидрогеологические, механические, химические и биологические возмущения, и установление нового «квазиравновесия» в системе захоронения может занять до нескольких тысяч лет. Также система захоронения может подвергаться внешним изменениям в течение десятков тысяч лет и более, например, из-за климатических явлений и процессов. Геологические события и процессы могут тоже привести к изменениям в течение достаточно продолжительных периодов времени. Таким образом, эволюция пункта захоронения подвержена влиянию неопределенностей, которые увеличиваются с течением времени, и полностью не могут быть устранены.

Однако неопределенностей можно избежать или уменьшить их влияние за счет принятия соответствующих решений в процессе выбора площадки и проектирования, а также путем выполнения специальных исследований. Некоторые факторы могут стать менее неопределенными со временем. Например, процессы, связанные с градиентами температур внутри и вокруг пункта захоронения, могут быть подвержены значительной неопределенности в тот период, когда отходы генерируют значительное тепло, а в более долговременной перспективе (после того, как «термическая фаза» пройдет) градиенты температур уменьшатся, и эти процессы прекратятся. В еще более длительном периоде (за пределами «тепловой фазы»), возможно, потребуется рассмотреть возможность геотермальных и климатических явлений, что снова приведет к целому ряду неопределенностей, касающихся вероятности, времени, величины и потенциальных эффектов.

Понятно, что понимание медленных процессов и редких событий часто основано на более ограниченном объеме эмпирической информации, чем доступно для более быстрых процессов и частых событий. Кроме того, некоторые события и процессы могут быть настолько медленными или нечастыми, что они (и связанные с ними неопределенности) не имеют значения в течение периодов времени в тысячи лет, но должны учитываться в перспективе десятков и сотен тысяч лет.

На рисунке 4 показано, как ограничена предсказуемость изменений, которые действуют на различные компоненты системы [20, 23].

Элементы, обычно представляемые в модельной оценке безопасности, изменения, которые действуют на эти элементы и влияние на предсказуемость элементов со временем (NEA 1999)

Элементы, подлежащие представлению

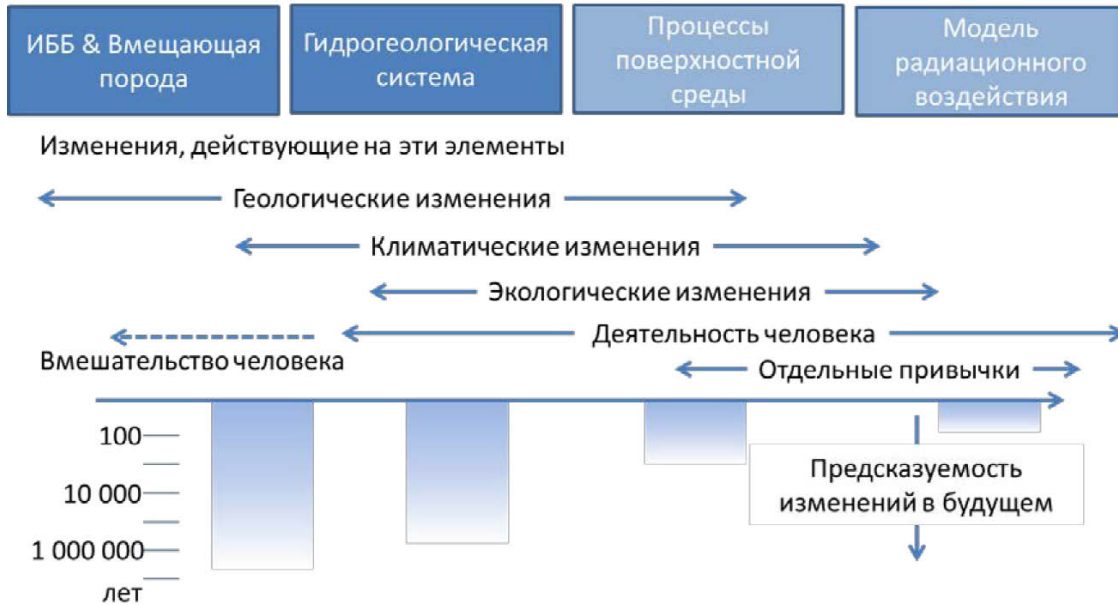


Рисунок 4 – Предсказуемость изменений, действующих на различные элементы системы захоронения [20, 23].

Обоснование безопасности как документ сфокусировано на том, чтобы продемонстрировать, что система захоронения будет функционировать ожидаемым образом в будущем. Это означает тщательно описанный ряд предположений [30], которые (очень упрощенно) состоят в том, что например, что климат будет изменяться определенным образом, что влечет за собой определенные изменения во вмещающей среде (например, в химическом составе подземных вод) и системе инженерных барьеров (например, изменения химического состава поровой воды бентонита). Эта ожидаемая линия эволюции конкретного пункта захоронения называется «базовым сценарием» и учитывается при выборе концепции системы захоронения (включая выбор вмещающей породы и состав инженерных барьеров).

Неопределенности, связанные с эволюцией площадки (и как следствие с выполнением пунктом захоронения своих функций), учитываются в оценках безопасности путем включения необходимого количества дополнительных вариантов развития и/или случаев вмешательства, так называемых «альтернативных сценариев». Для них, в отличие от базового сценария, для которого производятся расчеты доз, считают в основном уже только вероятности, исходя из того, что ущерб, вероятнее всего, будет постулированным.

Наиболее наглядно это может быть продемонстрировано на примере оценки фактора землетрясения. По современным представлениям, максимальная возможная магнитуда на площадке ПИЛ [16] в Нижнеканском массиве не препятствует потенциальному сооружению объекта, и именно она закладывается в соответствующие проектные решения – так формируется базовый сценарий. Одновременно считается, что на временах, соответствующих периоду потенциальной опасности объекта, не исключены (хотя и крайне маловероятны) события, когда будут возникать более сильные землетрясения. Для учета таких событий будет рассматриваться ряд альтернативных сценариев.

Так, например, в базовом сценарии шведского обоснования долговременной безопасности считается, что потенциальная площадка размещения пункта захоронения РАО находится в районе с низкой сейсмичностью, где магнитуда землетрясений редко превышает четыре балла. Тем не менее, т. к. нельзя исключать возможность того, что будущие ледниковые циклы будут влиять на сейсмичность региона, в специальном отчете оцениваются риски того, что сейсмические события могут нарушить целостность системы буфер-контейнер [17]

Обоснование долговременной безопасности формируется итерационно и детализируется по мере накопления результатов исследований с целью достижения робастности (то есть нечувствительности к

незначительным отклонениям от начальных предположений), и это зафиксировано в международных рекомендациях [18]. Робастность обоснования безопасности обеспечивается использованием множества цепочек доказательств, приводящих к дополнительным аргументам безопасности, которые могут компенсировать недостатки любого отдельного аргумента [13]. При этом требования регуляторов к захоронению РАО могут быть более строгими, чем для строительства АЭС, что связано именно с длительностью периода, в течение которого должна обеспечиваться безопасность пункта захоронения. Срок эксплуатации АЭС составляет несколько десятилетий, что даёт основания как проектировщикам, так и надзорным органам не рассматривать редко случающиеся потенциально опасные события. Так, как отмечается в [14] для АЭС Фукусима-1 оценка безопасности была заниженной, поскольку базировалась исключительно на сравнительно недавних исторических данных. Современные подходы к формированию досье обоснования долговременной безопасности (safety case) предполагают учёт всех доступных исторических данных, в том числе получаемых методами геохронологии, то есть с глубиной в прошлое на миллионы лет (см., например, [15]).

1.4 Природные аналоги

Одной из дополнительных линий аргументации безопасности (дополняющей лабораторные и натурные эксперименты, а также численное моделирование) могут быть результаты исследований объектов-аналогов. Природные и антропогенные аналоги являются качественным доказательством долговременной стабильности компонентов инженерных барьеров и предоставляют информацию временных и пространственных масштабов, недостижимых в специально поставленных экспериментах. Так, информация о долговременном поведении таких материалов, как уран, стекло, медь, железо, никель, хром, бентонит и цемент, а также для ряда горных пород может существенно дополнить данные, полученные в результате лабораторных исследований, изысканий на площадке и исследований в ПИЛ.

Значительное ограничение такой информации состоит в том, что она доступна только для одного «мгновенного снимка» во времени – в настоящий момент. Имеется международный консенсус: объекты-аналоги вносят значительный вклад в понимание медленных процессов, но количественная информация, которая может быть использована непосредственно при оценке безопасности, ограничена из-за неопределенности в их интерпретации – начальные условия и внешние процессы, которые повлияли на эволюцию объекта-аналога, часто неизвестны. Таким образом, их использование может ограничиваться очень важными, но только качественными наблюдениями о том, как, например, физические компоненты или процессы могут вести себя в сопоставимых естественных условиях [20].

Природными объектами-аналогами, которые представляют наибольший интерес, являются урановые рудные тела [24], природные системы с высоким рН [25] и встречающиеся в природе металлы, стекла и битум [27].

Урановые рудные тела

Основная информация, которая может быть получена при исследованиях урановых рудных тел и которая может быть релевантной для safety case [27, 26], это:

- состав, долговременная стабильность и коррозия и растворение уранинита (аналога ОЯТ);
- роль окислительно-восстановительных процессов в мобилизации и замедлении радионуклидов (аналог условий стального контейнера);
- состав и растворимость радионуклидов в подземных водах (аналог поведения радионуклидов в системе инженерных барьеров и вмещающей породе);
- характеристики процессов замедления радионуклидов, включая сорбционные процессы и матричную диффузию (аналог поведения радионуклидов во вмещающей породе);
- длительность процессов мобилизации и осаждения нестабильных изотопов (аналог процессов, ожидаемых в системе инженерных барьеров и вмещающей породе).

Природные ураниниты довольно широко распространены во многих типах горных пород и имеют возраст от сотен до тысяч миллионов лет, что является качественным свидетельством их долговечности и стабильности в геологических средах.

Одно из ограничений в рассмотрении уранинита как аналога ОЯТ связано с тем, что, несмотря на преобладание UO_2 в составе и сходную кристаллографическую структуру, существуют важные различия между уранинитом и ОЯТ, в том числе отсутствие в природных уранинитах высоких концентраций продуктов деления, актинидов и их дочерних продуктов, имеющих в ОЯТ.

Другим ограничением применения в обосновании безопасности результатов исследований урановых рудных тел является то, что многие из них находятся на сравнительно небольших глубинах, где доминирующим путем переноса радионуклидов будут мощные потоки грунтовых вод, особенно насыщенных кислородом. Обоснованная экстраполяция этих результатов на условия глубинного захоронения может быть затруднена, в частности, из-за невозможности восстановить начальные условия [1].

Стекла

Исследования природных аналогов показывают, что природные и боросиликатные стекла подвергаются коррозии с помощью аналогичных механизмов. Данные о существовании природных стекол возрастом до 40 млн лет позволяют предположить, что стекло является достаточно стабильной формой отходов. Натуральные вулканические стекла имеют концентрацию SiO_2 , аналогичную концентрации боросиликатного стекла в остеклованных ВАО, но в них не встречается высокое содержание бора или радионуклидов, поэтому результаты исследований таких аналогов не могут дать надежных количественных оценок скорости коррозии стекломатриц. Кроме того, вулканические стекла обычно извлекаются из приповерхностных или подводных сред, обладающих окисляющими свойствами, поэтому они могут рассматриваться только как приближенные аналоги к матрицам РАО на основе боросиликатных стекол [1].

Таким образом, очевидно, что наилучшим способом разрешения открытых вопросов о долговременной эволюции пунктов захоронения РАО является использование должным образом интегрального подхода к лабораторным экспериментам, исследованиям в подземных лабораториях, моделированию и природным аналогам. В целом, повторим, что хотя объекты-аналоги никогда не могут «доказать» безопасность захоронения самостоятельно, они могут внести ценные аргументы в анализ безопасности.

1.5 Обоснование долговременной безопасности и принятие решений

Вопросы захоронения РАО в геологических формациях в настоящее время изучаются во всем мире. С учетом конечной цели защиты людей и окружающей среды как сейчас, так и в будущем, пункт захоронения РАО считается безопасным, если он отвечает национальным стандартам безопасности, которые деталями могут отличаться в различных странах, но, тем не менее, ориентируются на международные стандарты безопасности.

Жизненный цикл пункта захоронения РАО включает ряд этапов, после каждого из которых принимается решение о переходе к следующему этапу. Для информированного принятия решений и доверия к Safety Case в целом необходимы:

- прозрачность, то есть предоставление заинтересованным сторонам для принятия решений четкой и понятной информации о безопасности системы;
- прослеживаемость, т. е. документирование всех ключевых допущений, особенно научно-технических данных и способов их получения для обеспечения возможности их повторения и, как следствие, доверия к разрабатываемой концепции безопасности;
- открытость, т. е. рассмотрение неопределенностей и незакрытых вопросов, которые могут повлиять на безопасность системы.

Обоснование долговременной безопасности (Safety Case) разрабатывается поэтапно по мере накопления информации, выполнения исследований, отработки технологий.

Концепция Safety Case разрабатывалась в течение нескольких десятилетий, и в настоящее время существует международный консенсус по его основным элементам.

В контексте принятия решений на каждом этапе реализации проекта Safety Case может служить платформой для диалога с заинтересованными сторонами, в том числе национальным оператором по обращению с РАО, регулирующими органами, исследовательскими организациями, международными экспертами, общественностью. По-видимому, этот подход вообще может считаться эталонным при принятии решений о размещении объектов использования атомной энергии.

В заключение раздела отметим принятые на международном уровне требования к ОДБ геологического захоронения:

- итеративность оценок безопасности площадки размещения объекта, вариантов конструкции, функций системы захоронения [12,18];
- обеспечение защиты людей и окружающей среды как в настоящее время, так и в будущем [28,18];
- полную привязку доказательной базы к характеристикам объекта и вмещающих горных пород [12,18];
- разработку базового и альтернативных сценариев эволюции объекта [11,18];
- обязательность рассмотрения полного набора особенностей, событий и процессов, которые потенциально могут оказать влияние на безопасность системы [12,18].

2 Особенности, события и процессы (ОСП – FEPs)

Для обеспечения уверенности в том, что в обосновании долговременной безопасности рассмотрены все значимые факторы, международными организациями (МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР) рекомендовано выполнение анализа специального перечня [13, 18, 29, 31, 32]. Этот список особенностей, событий и про-

цессов (ОСП) формировался в АЯЭ ОЭСР, начиная с 1993 года с учетом анализа обоснования проектов выполнявшихся в 6 странах (Швеции, США, Канаде, Швейцарии, Великобритании и Бельгии). Работа продолжается по настоящее время. Последняя редакция списка (версия 3.0) выпущена в 2019 году [12].

За время развития количество ОСП увеличилось в два раза, современный перечень ОСП построен в виде иерархических структур, где на верхнем уровне выделены 4 группы факторов системы захоронения – РАО и упаковка, система ИББ, геосфера и биосфера (рис. 5). В группе внешних факторов выделены подгруппы, относящиеся к воздействиям за счет исследовательских, строительных и эксплуатационных работ, геологических процессов, климатических процессов, человеческих действий в будущем и других (не попадающих в перечисленные категории). Факторы из групп, относящихся к элементам системы захоронения, делятся на подгруппы, выделяя характеристики элемента, эволюционные процессы в элементе и процессы миграции загрязнителя (радионуклидов) через элемент, которые далее ветвятся вплоть до 4 уровня (см. пример для группы «Геосфера» на рис. 6). Всего в списке 270 категорий, в которые могут быть объединены все факторы, относящиеся к системе захоронения и внешнему воздействию на нее.



Рисунок 5 – Схемы категоризации для ОСП

Примерно с 2000 года список ОСП, собранный АЯЭ ОЭСР, считается обоснованно полным, и по нему можно проводить проверку учета факторов при обосновании безопасности проектов ПЗРО. Он используется всеми странами, в том числе финскими [33] и шведскими [34] специалистами. В рамках анализа ОСП осуществляется отбор из списка важных для долговременного существования системы захоронения факторов.

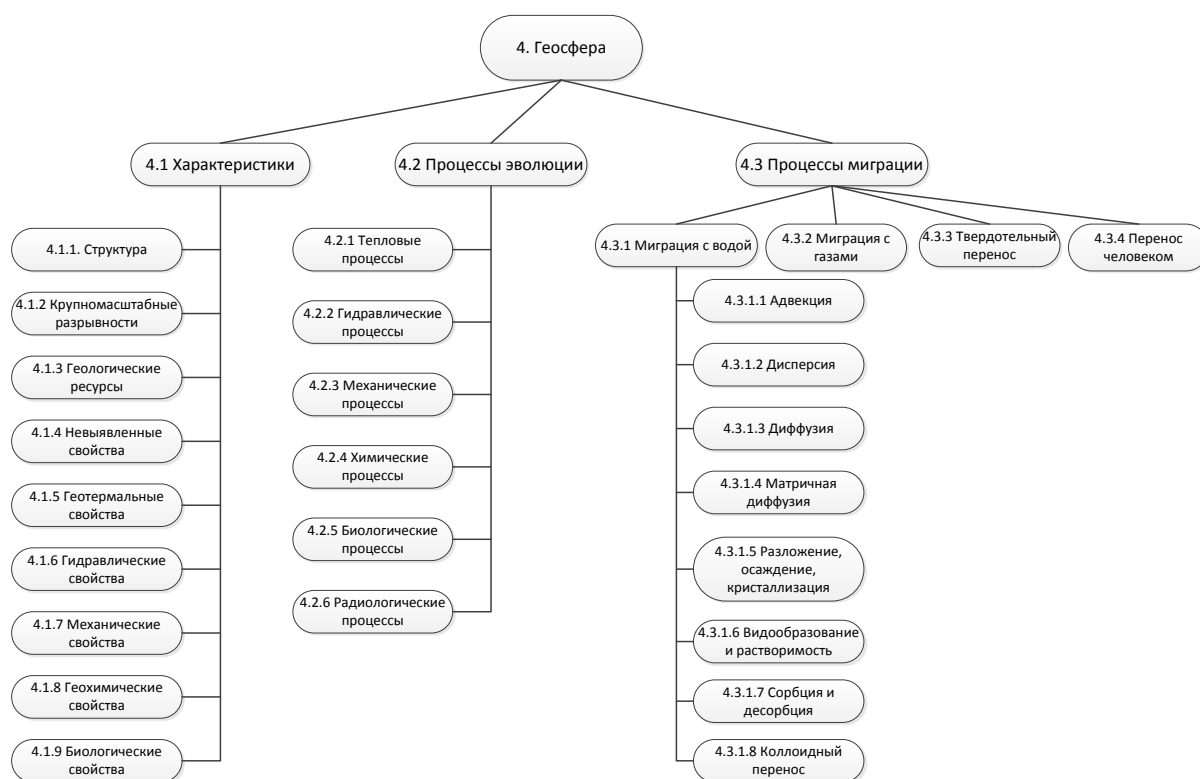


Рисунок 6 – Иерархическая структура для группы «геосфера»

При отборе факторов из списка ОСП очень важно выделить те, которые сами по себе или в комбинации с другими могут оказать значимое воздействие на долговременное поведение системы захоронения. На этапе отбора принимается решение о целесообразности учета конкретного фактора в модели поведения системы. При этом эффект его влияния оценивается качественно и количественно, опираясь на уровень сложности и структуру подсистем модели поведения системы. При оценке значимости эффекта следует учитывать следующие соображения:

- На упрощенном уровне модели поведения системы (мало информации, первые шаги итерации) могут быть учтены только самые существенные эффекты.
- На более детальном уровне моделирования поведения системы (последующие итерации) могут быть важными более тонкие эффекты.
- Некоторые факторы не оказывают видимого эффекта на систему в целом, но наблюдается их заметное воздействие на часть системы (подсистему). Их не следует сразу исключать из рассмотрения.

Основными причинами исключения факторов из рассмотрения являются:

- Отсутствия – не имеет отношения к системе захоронения.
- Низкой вероятности – вероятность проявления в течение периода времени, когда ОСП может оказаться существенным ниже установленного (регулируемого) уровня.
- Слабых последствий – эффект неизмерим, либо не наблюдаем, либо не существенен.
- Возможности регулирования – проявление может быть полностью устранено за счет выполнения набора регулирующих требований.
- Необоснованности – событие не может реализоваться для системы захоронения в ее данном воплощении.

Следующий этап анализа состоит в изучении всех выделенных факторов и формирование набора сценариев развития системы на их основе. В итоге отобранные важные факторы формируются в базу данных по ОСП конкретного проекта, где сведения по нему обновляются по мере накопления информации (проведения исследований, расчетов и т. п.).

Рассмотрим три различных примера рассуждений о факторах на этапе отбора в приложении к ПГЗРО в Нижнеканском массиве.

Первый пример – внешний фактор 1.2.5 магматическая и вулканическая активность. Глобально вулканическая деятельность способна воздействовать на площадку захоронения РАО посредством ряда неблагоприятных процессов. Однако опасность вулканизма для района размещения ПГЗРО в Красноярском крае не актуальна, так как ближайший действующий вулкан находится на Камчатке, а ближайшее вулка-

ническое поле Азас – в Западном Саяне на расстоянии более 700 км от участка Енисейский. Предположительно последнее извержение там было в голоцене [35]. Нижнеканский массив находится на границе Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы, сформировавшихся более 500 млн лет назад и относится к неактивным в вулканическом плане тектоническим районам платформенного типа. Т. е. Нижнеканский массив расположен вне зоны вулканической активности, поэтому применительно к нему данный процесс можно отнести к крайне маловероятным явлениям и исключить из детального рассмотрения.

Вторым примером рассмотрим фактор из класса геосфера 4.1.2 – крупномасштабные разрывности. К разрывным нарушениям такого типа можно отнести монолитные геологические блоки, разделенные разломами. Если ПГЗРО расположен внутри монолитного блока, напряжённо-деформированное состояние этого блока будет зависеть от положения разломов вокруг него и от характера взаимодействия с соседними блоками. В результате взаимодействия блоки смещаются друг относительно друга, при этом внутри блоков деформации сравнительно малы, разломы же в процессе заметно изменяются. Если же появится разлом, который будет непосредственно пересекать площадку ПГЗРО, и, более того, будет находиться в области, где захораниваются РАО, сдвиговые явления на границе блоков будут воздействовать непосредственно на контейнер с РАО и окружающие его ИББ. Наряду с механическим воздействием вследствие смещения блоков, разломы и трещины приводят к качественному изменению характера движения грунтовых вод, обеспечивая их поступление к окружающему контейнер с РАО бентониту. В результате его ускоренного насыщения водой, в нём возрастает давление, что приводит к изменению напряжённо-деформированного состояния контейнера. Эти явления требуется учитывать как при формировании расчётной сетки для моделирования тепловых и термомеханических процессов в ПГЗРО и окружающих горных породах, так и непосредственно при разработке физических и математических моделей объекта.

Соответственно, требуется надёжно обнаруживать места разломов, как на поверхности, так и в толще горных пород. Для этого применяется целый ряд методов, от визуального обнаружения до наблюдения геодинамики при помощи спутниковых систем геопозиционирования. В отношении этого фактора выбранная в России площадка требует существенно большего внимания, и соответствующие работы ведутся [75, 76, 77]. Исчерпывающий объём таких работ может быть выполнен только в рамках подземной исследовательской лаборатории.

В отношении перечня ОСП можно констатировать:

- Он чрезвычайно объёмен и за более чем 20-летнюю историю использования применительно к конкретным проектам превратился в международный эталон и инструмент формирования доверия на этапе концептуального описания задачи.
- Он включает, в том числе, чрезвычайно маловероятные события, некоторые из которых, на первый взгляд, не имеют отношения к проблеме ПГЗРО, но каждый из которых так или иначе обсуждался (как по инициативе оператора, так и регулятора) на разных этапах разных проектов за рубежом.
- На этапе отбора значимых для долговременной безопасности факторов примерно треть отсеивается.
- Несмотря на это, перечень открыт к расширению.

Эти обстоятельства являются гарантией полноты рассмотрения различных аспектов в процессе обоснования безопасности.

3 О расчетных моделях, используемых для оценки безопасности ПГЗРО

Для получения количественных оценок безопасности на основании разработанных базового и альтернативных сценариев формируется набор компьютерных моделей. Цель моделирования двоякая [13]:

- Модели помогают лучше понять отдельные процессы и их значимость для безопасности, а также взаимодействия между этими процессами в системе захоронения, влияние на эволюцию системы и показатели безопасности. Таким образом, процессы моделирования, проектирования, описания системы захоронения и разработки сценариев итеративно связаны друг с другом.
- Моделирование используется для демонстрации соответствия конкретных показателей нормативным или иным требованиям.

Моделирование обычно осуществляется на нескольких уровнях. Так, модели процессов разрабатываются для того, чтобы получить четкое представление об определенных аспектах системы захоронения, которые лягут в основу концептуальных моделей системы в целом, а также получить оценки параметров, которые будут использоваться в этих интегральных моделях.

Модели системы захоронения в целом необходимы для понимания взаимодействия компонентов системы и выполнения ими функций безопасности, а также используются для количественной оценки потенциального воздействия на человека и окружающую среду.

На данный момент одним из магистральных направлений математического моделирования и вычислительных технологий в целом является повышение предсказательной способности расчетных средств путем последовательного приближения к прецизионным постановкам задач, исходя из первых принципов.

Для реакторных задач первым этапом был переход от полностью консервативных оценок к кодам улучшенной оценки, который также сопровождался снятием консерватизма входных данных для численного моделирования и использованием анализа неопределённостей и использованием анализа неопределённостей. Сейчас основной упор идёт на применение подходов, дающих более точный и подробный результат, но требующих больших вычислительных мощностей – переход от точечных оценок и сетевых кодов к двух- и трёхмерному представлению.

Для задач захоронения — это одновременный учет всех релевантных для системы захоронения процессов (термо-, гидро-, механических, химических, биологических). То, что создание таких моделей на данный момент является вызовом, связано с такими факторами, как:

- многомасштабность элементов системы захоронения (от размеров порядка миллиметров – для контейнера, до километров – во вмещающей геологической среде);
- многообразии физических, химических и биологических процессов, влияющих на распространение радионуклидов;
- необходимость многовариантных расчетов при формировании различных сценариев долговременной эволюции захоронения;
- необходимость большого количества расчетов при различных наборах значений входных параметров для получения оценок неопределенности и чувствительности.

Тем не менее, особенно в свете появления все более и более высокопроизводительных компьютеров, это направление активно развивается [36]. Следует отметить, что ровно эти же факторы справедливы и для обоснования безопасности поведения, например, топливных сборок в различных режимах эксплуатации реакторных установок. В частности, характерные размеры моделируемых объектов различаются на несколько порядков – от долей миллиметра для размеров зёрен до нескольких метров для активной зоны в целом. Разнообразие взаимосвязанных процессов включает нейтронную кинетику, наработку и эволюцию продуктов деления, химические реакции, теплогидравлику и целый ряд других. Многообразие возможных вариантов развития событий требует выделения базовых сценариев; при моделировании же отдельных сценариев проведение многовариантных расчётов в настоящее время является общепринятой практикой.

Рассмотрение явлений, событий и процессов, влияющих на безопасность ПГЗРО, в случае их актуальности для конкретного объекта требует построения соответствующих математических и численных моделей. Эти модели позволяют провести расчеты на весь период потенциальной опасности объекта, либо до достижения максимально возможного радиоэкологического воздействия на население. Обычно для комплексной оценки безопасности используется целый комплекс моделей, описанию которого посвящен отдельный отчет (например, [37,38,39]). Это модели климатических, геодинамических, гидрологических процессов, модели изменения свойств инженерных барьеров безопасности (ИББ), модели миграции в ближней и дальней зонах, иногда также промежуточные модели «масштаба захоронения». Именно на последних реализуется рассмотрение наибольших временных диапазонов. Выполняется расчет миграции радионуклидов от ПГЗРО до зон потенциального водопользования и далее расчет дозовых нагрузок для базового сценария развития и альтернативных сценариев. В мировой практике на сегодняшний день характерным временем прогноза является 1 миллион лет. Наиболее успешными практиками обоснования безопасности ПГЗРО следует признать финскую, шведскую и французскую. На их примере, а также на российском опыте ОДБ далее проводится анализ используемых моделей.

После выделения из перечня ОСП тех факторов, которые требуют рассмотрения для данного ПГЗРО (скрининга), выделяются процессы, определяющие их протекание и последствия. Процессы обычно разделяются на 4 группы: тепловые, гидравлические, механические и химические. Для каждого из рассматриваемых процессов определяются характерные времена протекания (пример показан на рисунке 7).

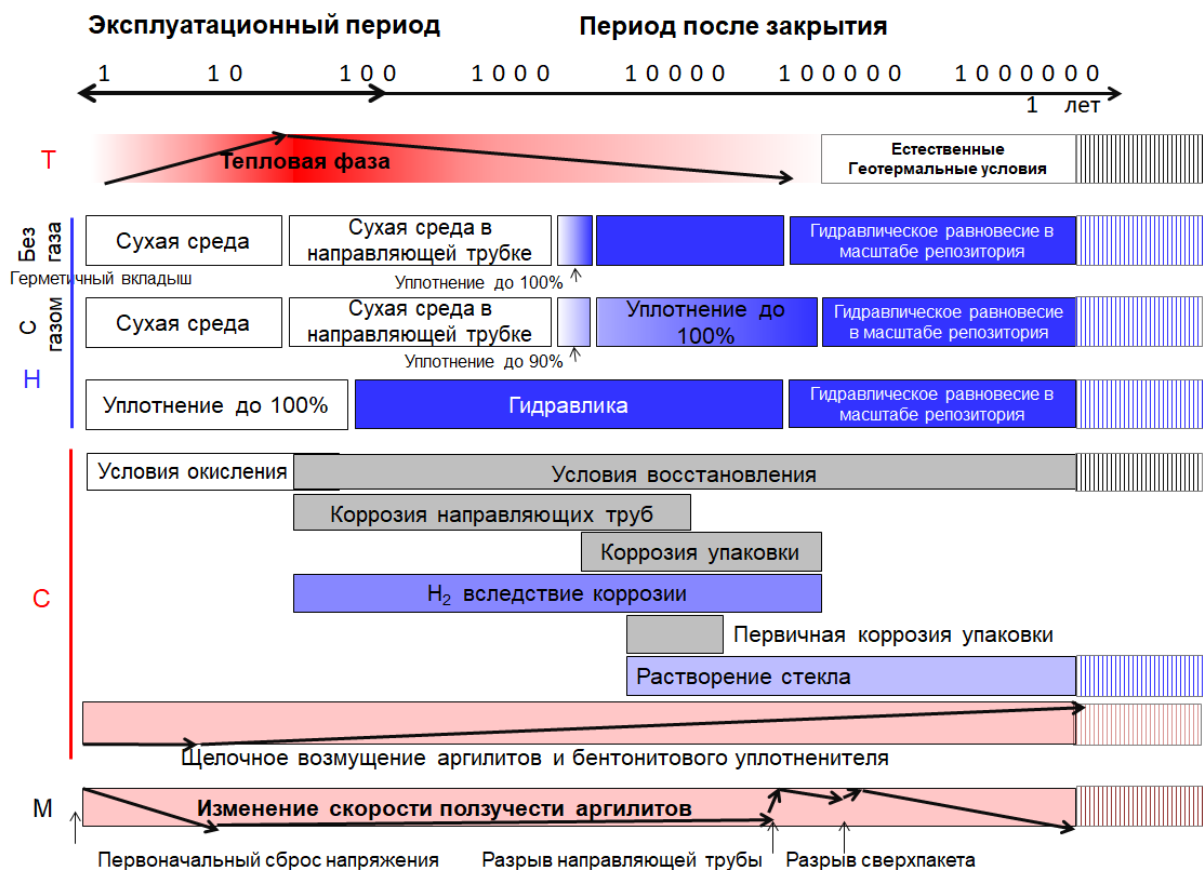


Рисунок 7 – Временные масштабы процессов, оцененные ANDRA

Далее строится иерархическая совокупность моделей: ближней зоны, которая имеет масштабы, соизмеримые с непосредственно пунктом захоронения (используется не всегда) и дальней зоны (см. рисунок 8). Влияние отдельных процессов может учитываться в этих моделях как путем прямого численного расчета параметров, так и путем использования зависимостей, определенных иными методами (аналитическими, эмпирическими, численными), в зависимости от степени взаимосвязи процессов, времени их протекания, изученности. На модели ближней зоны рассматривается выход радионуклидов за пределы ИББ с учетом их деградации в рамках одного элемента захоронения (одной ячейки для размещения РАО). Граничными условиями для этой модели служат рассчитанные гидрогеологические условия на модели масштаба захоронения (при ее наличии) либо на региональной модели (в противном случае). Рассчитанный в модели ближней зоны выход радионуклидов в геологическую среду служит источником для модели следующего уровня. В свою очередь, модель масштаба захоронения позволяет учесть пространственную конструкцию ПГЗРО, структуру потоков в нем, и задает источник для региональной модели, получая от нее в качестве граничных условий напоры и потоки подземных вод.

На основе анализа характерных времен сохранения изолирующих свойств барьеров и миграции в геологической среде производится выбор радионуклидов, требующих углубленного рассмотрения при обосновании безопасности. Это слабо сорбируемые или несорбируемые долгоживущие радионуклиды, к примеру, I-129, Se-79, Cs-135, Cl-36, Sn-126, Pd-107, Tc-99. Также при оценке безопасности обычно требуют учета трансурановые элементы, обладающие большим периодом полураспада. Однако они обычно сильнее задерживаются геологическими породами благодаря сорбции.

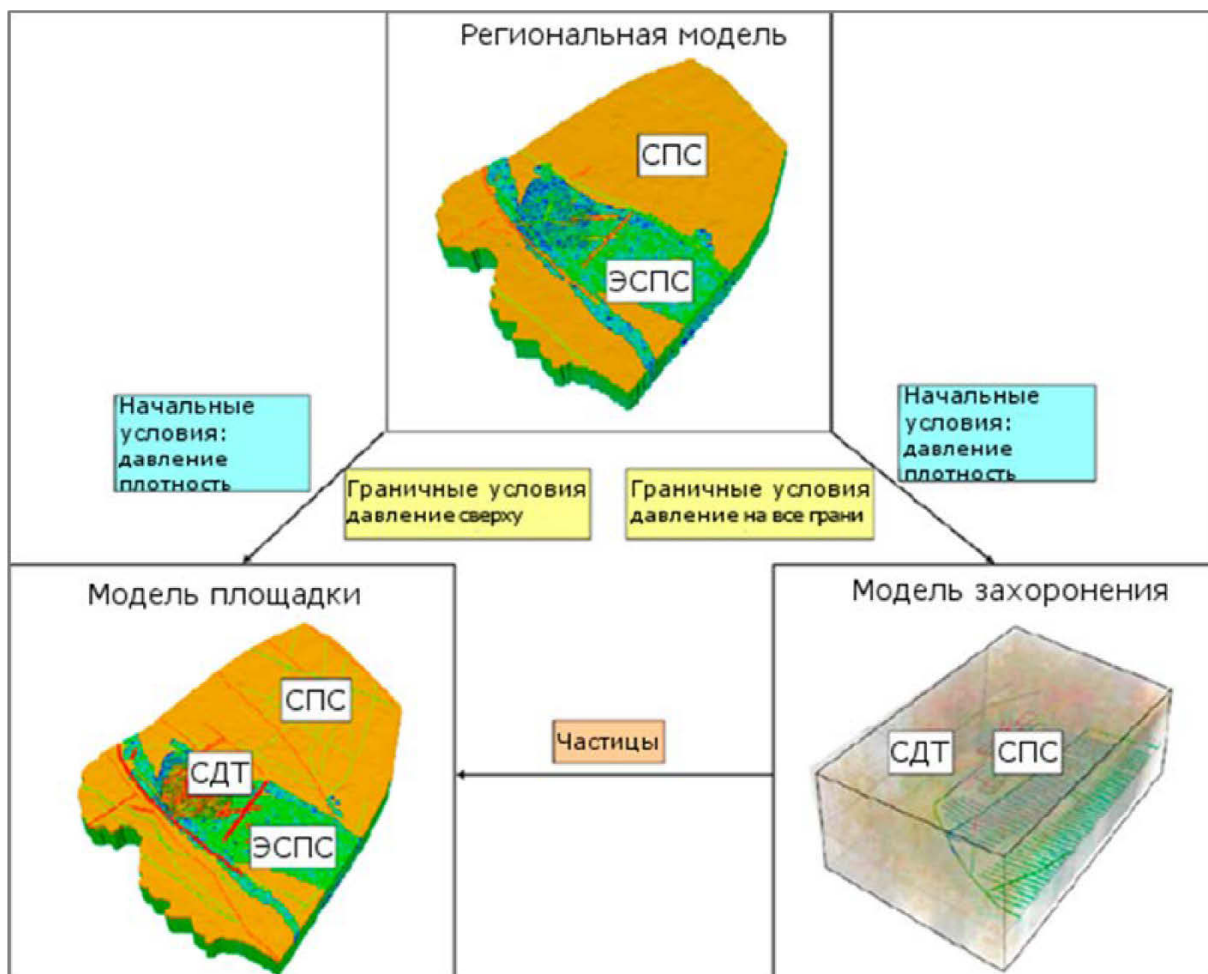


Рисунок 8 – Концепция моделей на различных масштабах: связи между моделями (Швеция).
 СПС – модель сплошной пористой среды; ЭСПС – модель эквивалентной сплошной пористой среды;
 СДТ – модель системы дискретных трещин

Для процессов в ближней зоне захоронения характерны масштабы 1000–10000 лет. Так, при оценке бельгийского проекта ПГЗРО процессы в ближней зоне рассматриваются на масштабах 10 000 лет (см. рисунок 9). В обосновании безопасности французского проекта ПГЗРО Cigeo [40] выход радионуклидов из ближней зоны для базового сценария эволюции происходит за времена порядка 10 000 лет. На этом временном масштабе характерны тепловые процессы (наиболее существенны в первую 1000 лет), насыщение пород и ИБВ водой, деградация ИБВ и химические процессы.

Временной масштаб 100 000 – 1 000 000 лет характерен для геодинамических и климатических процессов, а также процессов адвективно-диффузионного переноса радионуклидов в дальней зоне захоронения. На этом временном масштабе моделируются сценарии изменения климата и движения тектонических плит, оценивается их влияние на подземную гидродинамику – ключевой процесс, определяющий миграцию радионуклидов к земной поверхности. В Шведском проекте рассматривается прохождение ледников через площадку захоронения. ANDRA также исследует глубину, на которую может промерзнуть грунт в ледниковом цикле, а также последствия прохождения ледника для геологической структуры захоронения. На временном масштабе в 1 млн лет оценивается воздействие геодинамических процессов на поле фильтрационных потоков. На рисунке 10 показаны линии тока, рассчитанные для начального момента времени и через 400 000 лет после закрытия французского ПГЗРО. Показано, что для площадки объекта Cigeo геодинамические и геоморфологические изменения не влияют существенным образом ни на геологическую структуру (влияние ограничено эрозией 20–30 метров пород), ни на структуру потока.

$T_{+10,000}$ – начало разрушения упаковки



Рисунок 9 – Схематизация процессов, происходящих в ближней зоне захоронения в первые 10000 лет по версии ONDRAF/NIRAS (Бельгия)

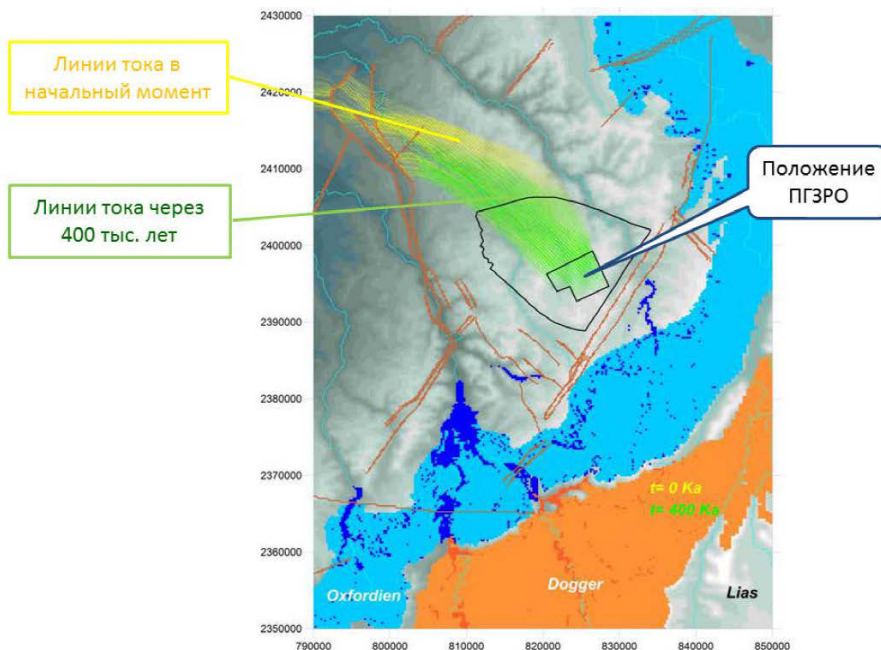


Рисунок 10 – Линии тока в Оксфордском известняке в начальный момент времени (желтые) и прогноз на 400 000 лет (зеленые) из [40]

Моделирование переноса радионуклидов в дальней зоне захоронения является ключевым необходимым элементом обоснования безопасности, поскольку геологической породе отводится основная роль в обеспечении долговременной безопасности ПГЗРО. Для этого используются расчетные коды, предназначенные для моделирования геофильтрационных и геомиграционных процессов: семейство MODFLOW (французский и российский проекты), TRACES (французский проект), CONNECTFLOW (финский, шведский проекты), FASTREAK (финский проект), GOLDSIM (США) и российский аттестованный код GeRa (российский проект). ANDRA посчитано, что пики выхода одного из ключевых радионуклидов, I-129, в вышележащий и нижележащий водоносные горизонты приходятся на 840 000 лет и 440 000 лет соответственно (см. рис. 11). Моделирование геомиграции радионуклидов, выполненное ANDRA в трехмерной постановке на период в 1 млн лет, показано на рис. 12.

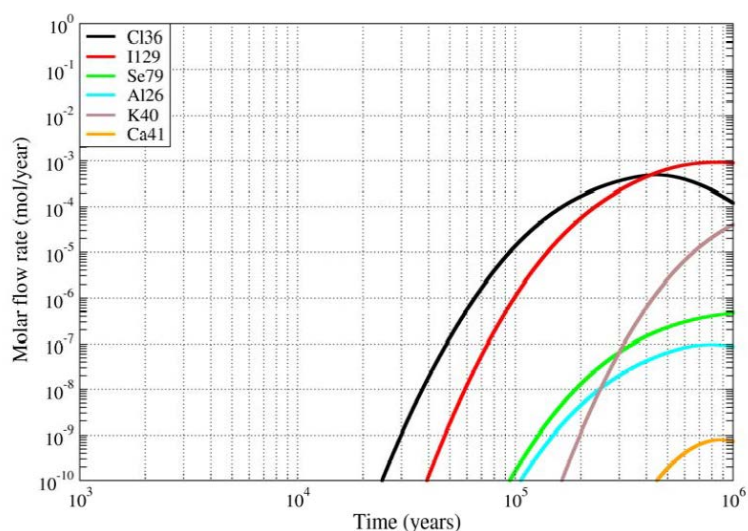


Рисунок 11 – Кривые выхода радионуклидов в верхний водоносный горизонт по результатам [40]

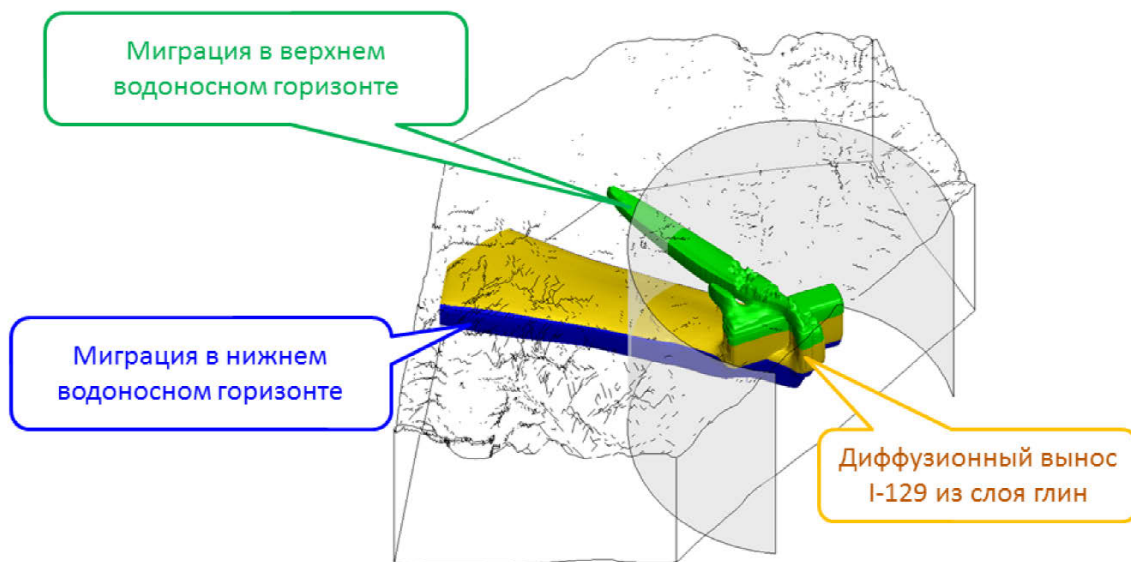


Рисунок 12 – Моделирование переноса I-129 на 1 миллион лет (изоповерхность концентрации 10–11 моль/л) [40]

Шведская компания SKB проводила расчет траекторий миграции радионуклидов с помощью программы ConnectFlow с использованием дискретной сети трещин (DFN). В региональной модели рассчитывается нестационарное течение подземных вод с учетом климатических изменений. В модели масштаба захоронения отслеживаются траектории частиц в районе тоннелей и скважин захоронения с детальным учетом трещин. В модели площадки эти траектории отслеживаются вплоть до выхода в биосферу. Полученные траектории затем использовались в кодах MARFA и FARF31 [41] для детального расчета

переноса с учетом сорбции, распада и матричной диффузии. По результатам расчетов для различных сценариев строились кривые выхода радионуклидов в биосферу (см. рисунок 13).

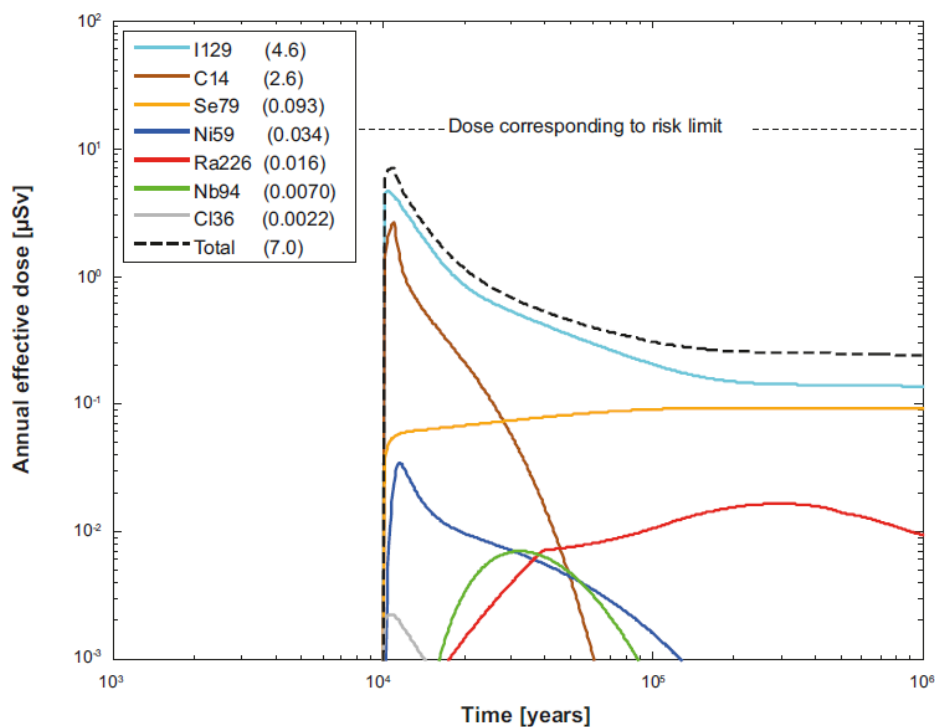


Рисунок 13 – Пример расчета выхода радионуклидов в одном из сценариев [41]

Специалисты компании Posiva проводили оценку долговременной безопасности, используя код ConnectFlow для моделирования гидрогеологических условий площадки. При этом рассматривались течения как в дискретной системе трещин (DFN), так и в эквивалентной пористой среде (ЕСРМ). Характерным временем оценок является 1 млн лет. Ниже приведены результаты моделирования на основе работ [46, 47] (см. рисунки 14–16). Отметим наличие скачков дозовых нагрузок (рис. 16), связанное с прогнозируемыми изменениями рельефа поверхности и поверхностной водной системы. К примеру, смена озера сельскохозяйственными угодьями приводит к значительному увеличению дозовых нагрузок.

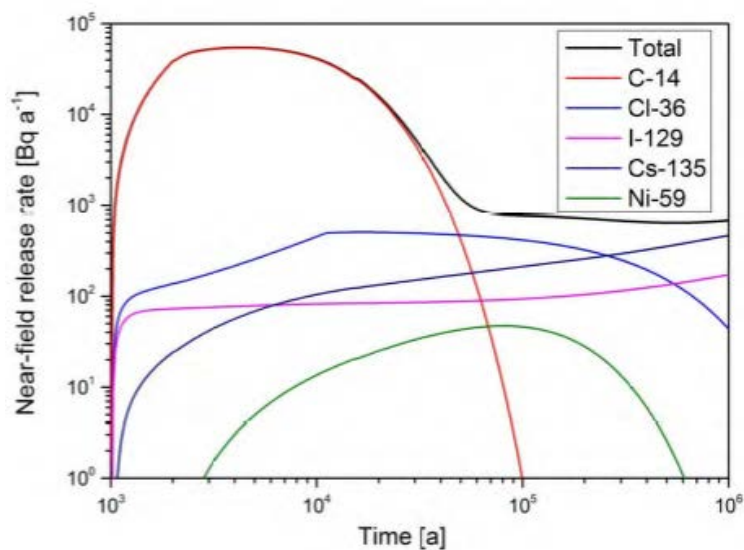


Рисунок 14 – Изменение скорости выхода радионуклидов из захоронения для базового сценария для C-14, Cl-36, Ni-59, I-129 и Cs-135, для радионуклидов, которые вносят наибольший вклад [46]

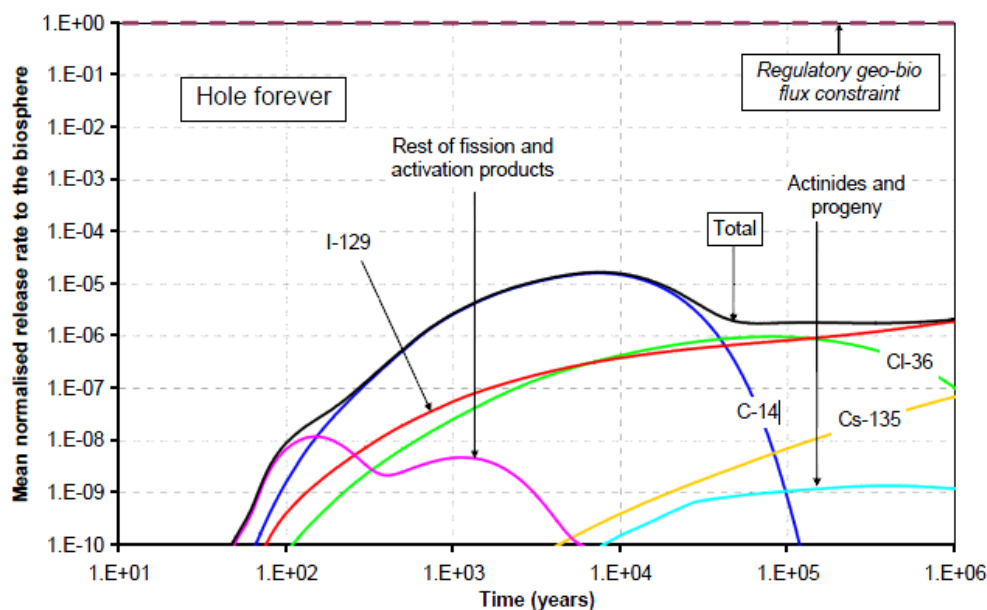


Рисунок 15 – Средние скорости выхода в биосферу. Результаты приведены средние для 10 000 реализаций, учтены наиболее важные радионуклиды [46]

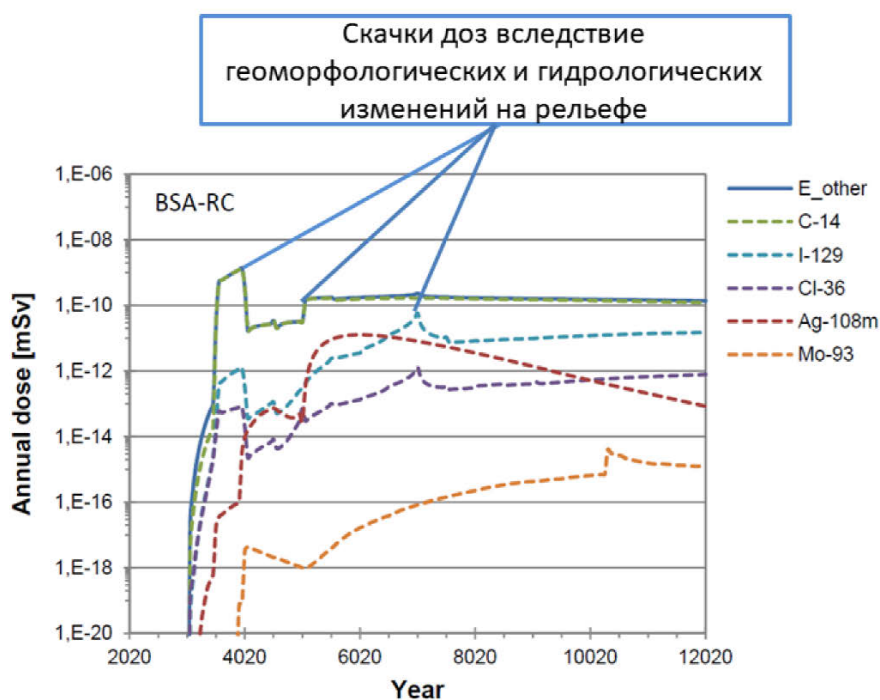
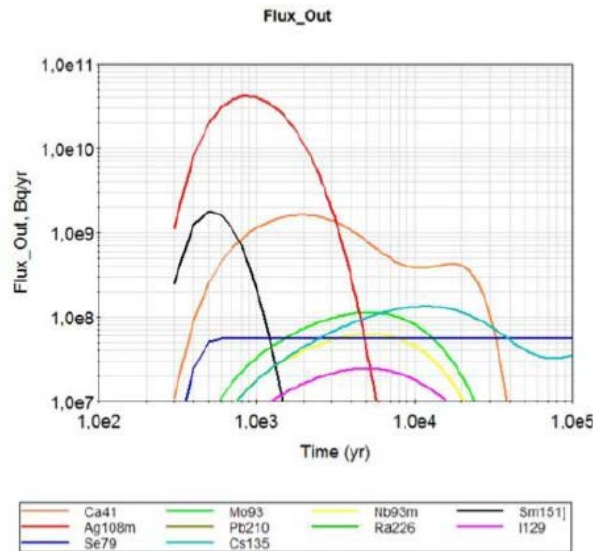


Рисунок 16 – Годовая доза для населения и вклад каждого радионуклида для базового сценария [47]

При подготовке проектной документации для российского ПГЗРО также была выполнена оценка долговременной безопасности, включая рассмотрение различных сценариев эволюции объекта. На рисунке 17 показаны результаты расчетов модели ближней зоны, моделирование было выполнено с помощью программного средства GoldSim. На основе численного моделирования была проведена оценка возможных путей миграции радионуклидов и показано, что потенциальной зоной разгрузки будет являться русло р. Енисей. В работе [48] приведены результаты расчета на момент времени 100 000 лет (см. рисунок 18). Рассчитанное на этой модели время дохождения нейтрального трассера от места ПГЗРО до р. Енисей составляет порядка 22 000 лет. Моделирование было выполнено с помощью Processing Modflow.



Поток радионуклидов
на выходе из инженерного барьера – «цемент»
(базовый сценарий)

Рисунок 17 – Изменение активности на выходе из инженерных барьеров для базового сценария

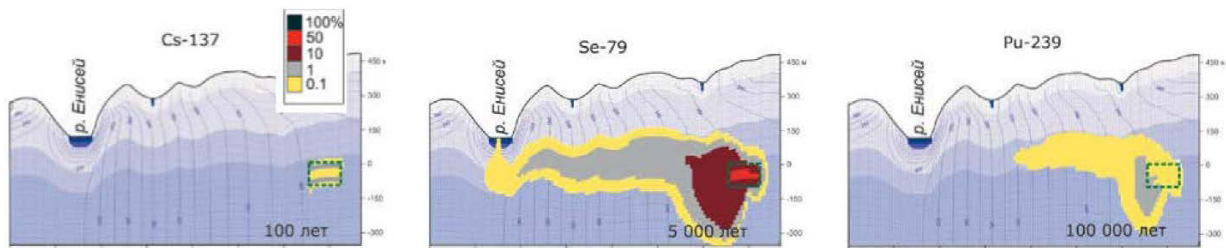


Рисунок 18 – Конфигурация ореолов загрязнения подземных вод радионуклидами в относительных концентрациях; время указано с момента выхода за пределы системы инженерных барьеров [48]

В работе [49] приведены результаты по созданию профильной модели геомиграции в Нижнеканском массиве с помощью аттестованного в Ростехнадзоре отечественного расчетного кода GeRa. На данной модели были продемонстрированы прогнозы миграции нейтрального трассера до потенциальной зоны разгрузки, в частности р. Шумиха. На рисунке 19 приведены результаты изменения нормированной активности нейтрального трассера в р. Шумиха. Стоит отметить, что время дохождения пика концентрации до зоны разгрузки составляет 22 500 лет, что согласуется с результатами работы [48].

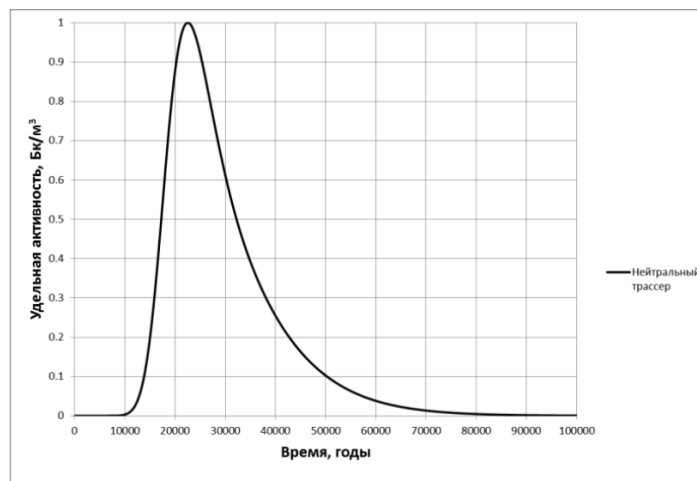


Рисунок 19 – Изменение активности нейтрального трассера в зоне разгрузки

В настоящий момент ИБРАЭ РАН в расчетном коде GeRa создана трехмерная модель фильтрации и геомиграции в дальней зоне ПГЗРО в Нижнеканском массиве с учетом конструктивных особенностей захоронения. В модель интегрирована конструкция захоронения в том виде, в котором она описана в работе [44]. Учитываются располагающиеся на двух горизонтах камеры захоронения, предназначенные для размещения РАО 2 класса (среднеактивные отходы с низким тепловыделением), и соединяющие их транспортные тоннели. Между выработками верхнего и нижнего горизонтов находятся вертикальные скважины для остеклованных ВАО 1 класса. В рамках данной модели проводился расчет геофильтрации и переноса консервативного (несорбируемого, нераспадающегося) трассера на период времени 10000 лет (см. рисунок 20).

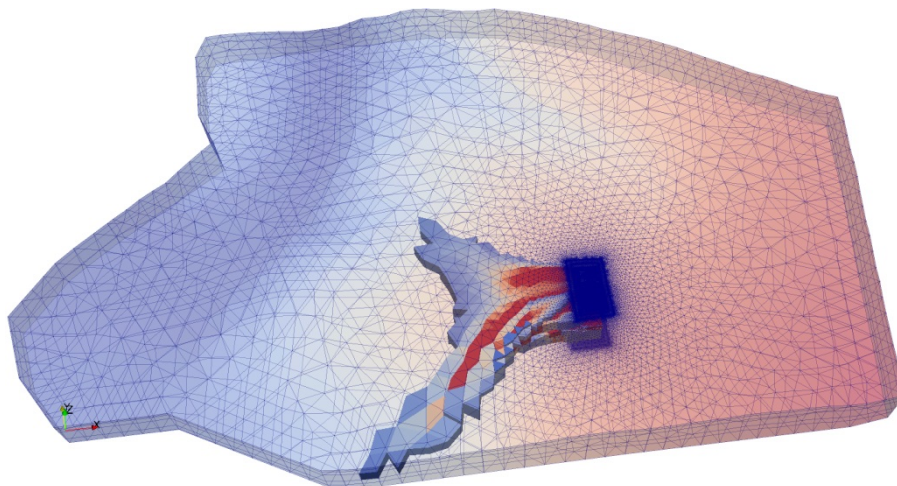


Рисунок 20 – Результат расчета переноса консервативного трассера на период времени 10000 лет

Подытоживая российский и международный опыт оценки долговременной безопасности ПГЗРО, следует констатировать, что обоснованно достигнутый период моделирования составляет от нескольких десятков тысяч лет до миллионов лет. При этом на геологическом масштабе даже он не является большой величиной. Для моделирования используется большое количество геофильтрационных и геомиграционных расчетных кодов, которые в соответствии со статьей 26 ФЗ-170 [45] НП-100-17 [8] успешно проходят аттестацию для использования при обосновании безопасности. Так, в настоящее время действующие аттестационные паспорта имеют отечественные коды GeRa, НИМФА, Geon-3D, ГЕОПОЛИС, HydroGeo. Отметим, что эти коды аттестованы без ограничений временного периода моделирования.

С учетом наличия процедуры аттестации [7] вопрос о доверии к результатам моделирования перестает трактоваться как доверие к длительным прогнозам, а превращается в вопрос технической корректности методологических подходов, связанных с предсказательной способностью вообще (собственно, в его демонстрации и есть суть данной работы).

Опасения относительно сроков в 10 000 лет, действительно, понятны. Однако, как уже отмечалось выше, при захоронении РАО мы имеем возможность детального обследования массива горных пород и самих РАО, тем самым предельно снижая неопределённость входных данных для моделирования. Более того, мы имеем широкие возможности для мониторинга состояния пункта захоронения в течение десятилетий, начиная с его сооружения и до окончательного закрытия. Этим возможностей мы лишены при моделировании, например, аварийных процессов на реакторных установках (РУ), неопределённость которых мы видим при проведении претестовых расчётов для тяжелоаварийных крупномасштабных экспериментов и бенчмарков.

Если представить, что степень неопределённости $U = f(u_0, \tau, T)$ моделируемой величины является функцией исходных неопределённостей u_0 , характерных времён моделируемых процессов τ и срока T , на который требуется моделирование, то эта функция является возрастающей по u_0 и T и убывающей по τ . Действительно, если ОСП изменяются слабо (влияние u_0), медленно (τ) и/или по известным законам, то достоверный расчет можно провести на практически бесконечный период времени T . Если эти законы неизвестны, то производится многовариантный расчет по большому количеству (иногда – и до миллиона) сценариев.

Надо отметить, что подобная ситуация наблюдается и при обосновании реакторных установок, когда несмотря на многообразие протекающих процессов достоверные прогнозы выполняются на годы (несколько кампаний, как минимум). Более того, эти данные, например, расчётное накопление радионуклидов, используются в качестве основы для моделирования ещё более сложных процессов, связанных с

нарушениями нормальной эксплуатации РУ. Вопрос о доверии к таким результатам под сомнение не ставится, более того, соответствующие коды аттестованы в Ростехнадзоре.

Соотношение неопределённости исходных данных u_0 и характерных времён, для которых требуется проводить моделирование, показано для различных аспектов безопасности на рисунке 21.

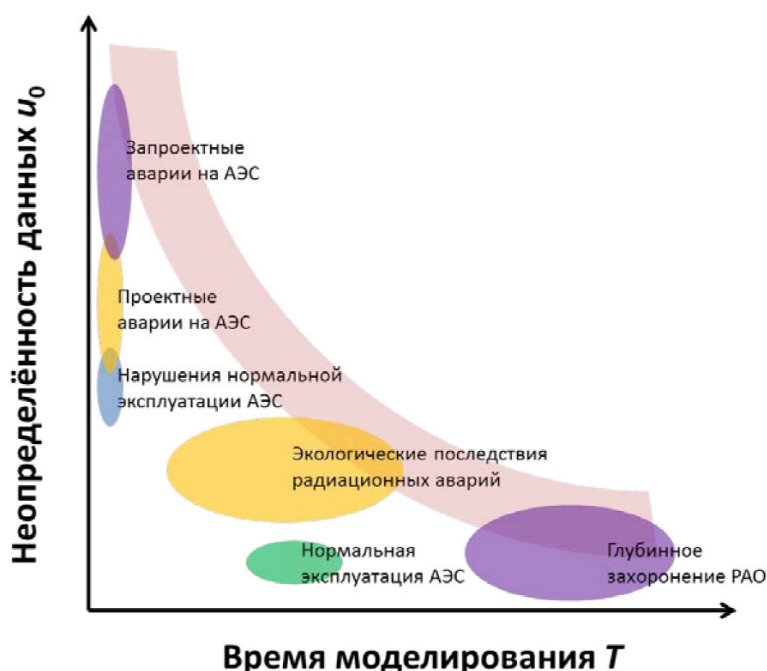


Рисунок 21 – Соотношение неопределённости исходных и характерных времён, для которых требуется проводить моделирование. Цветами (зеленый, синий, желтый, фиолетовый) показана трудоемкость моделирования и неопределенность результата

Кривая условно показывает аспекты с близкой сложностью моделирования (и, следовательно, достоверностью получаемых результатов). Так, для обоснования безопасности АЭС в условиях нормальной эксплуатации срок прогнозирования составляет несколько десятков лет. При этом накопленный опыт эксплуатации различных РУ позволяет говорить о низком уровне неопределённости даже при обосновании безопасности проектируемых установок. В результате получаемые в процессе расчётов результаты лежат в зоне высокой достоверности. При рассмотрении нарушений нормальной эксплуатации время, на которое происходит моделирование состояния РУ, уменьшается до часов и дней, но при этом резко растёт неопределённость исходных данных и уменьшается характерное время рассматриваемых процессов. Так, осушение активной зоны в некоторых постулируемых аварийных сценариях для ВВЭР происходит в течение нескольких десятков секунд (а для реактивных аварий и менее). Для процессов дефлаграции и детонации водорода характерные времена ещё меньше. В результате растёт сложность моделирования, и тем сильнее, чем более пессимистичный сценарий рассматривается (переход в аварийный режим, в том числе запроектный). В некоторых случаях рассматривается состояние АЭС после тяжёлой аварии на промежуток до года и более, например, состояние расплава в устройстве локализации, но процессы при этом предполагаются квазистационарными, что также подтверждает наш постулат.

Моделирование экологических последствий радиационных аварий делается на десятки и сотни лет. При этом увеличение сроков прогнозирования компенсируется снижением неопределённости путём постоянного изучения климатических, гидрологических и прочих условий в исследуемой местности. Увеличение сроков прогнозирования на тысячи и десятки тысяч лет, как в случае ПГЗРО, требует ещё большего снижения неопределённости, что и достигается созданием всеобъемлющей базы ОСП и детальными исследованиями массива пород, материалов ИББ, самих РАО, а также учётом глобальных внешних факторов, таких как магматическая активность, метеоритная опасность, изменения климата и т. д. Характерные времена существенных для безопасности ПГЗРО процессов при этом составляют десятки лет и более. Даже при наличии быстропротекающих процессов, таких как образование трещин в результате сейсмического воздействия, их эффект – например, изменение теплофизических, механических и фильтрационных свойств породы – будет проявляться опять-таки в течение десятилетий.

Характеризуя ситуацию с расчетным моделированием в целом констатируем:

1. Ситуация полностью аналогична ситуации с моделированием ядерных установок:

- Имеется система, в рамках которой ключевых расчетные элементы верифицируются, дублируются и непрерывно развиваются.
 - Детальность рассмотрения всех значимых аспектов чрезвычайно высока. Проблема неопределенностей, в том числе наличия диапазонов значений некоторых величин, не игнорируется, а снимается классическим образом – многовариантными расчетами.
2. Наибольшую значимость в обосновании долговременной безопасности представляют расчеты переноса слабосорбируемых радионуклидов C-14, I-129, Se-79, 99-Tc, Cs-135, Cl-36.

4 Зарубежный опыт



Рисунок 22 – Статус программ по созданию пунктов захоронения РАО в разных странах (по состоянию на апрель 2019 г.) [69]

4.1 Финляндия: началось сооружение

На сегодняшний день Финляндия является лидером среди всех стран мирового сообщества по срокам планируемого открытия пункта глубинного геологического захоронения (ПГЗ) ОЯТ в рамках проекта, запущенного еще в 1983 году. В 2001 году финский Парламент ратифицировал так называемое «принципиальное решение» о сооружении объекта на площадке Олкилуото в муниципалитете Эурайоки, который планируется построить в соответствии с разработанной в Швеции концепцией KBS-3. Следующим шагом стало начало сооружения в 2004 году объекта ONKALO для определения характеристик пород – подземной исследовательской лаборатории, которая в будущем станет частью самого пункта захоронения. В декабре 2012 года компания Posiva, ответственная за реализацию проекта глубинного геологического захоронения ОЯТ в Финляндии, подала заявку на получение лицензии на строительство ПГЗ ОЯТ, рассчитанного на прием 9 000 тонн ОЯТ, а также завода по инкапсуляции. В феврале 2015 года ядерный регулятор STUK постановил, что завод по инкапсуляции ОЯТ и сам пункт захоронения могут быть сооружены с учетом всех требований обеспечения безопасности. Это была первая в мире лицензия на сооружение пункта захоронения РАО. STUK также представил перечень замечаний, часть из которых должна быть устранена Posiva до начала работ по сооружению установок, а часть либо в ходе проведения строительных работ, либо до подачи заявки на получение лицензии на эксплуатацию объектов. В конце 2016 года регулятор окончательно подтвердил готовность Posiva к началу строительных работ на площадке [3].

Начиная с осени 2016 года Posiva подписала уже три контракта с YIT Construction Limited, являющейся крупнейшей строительной компанией в стране. Так, например, YIT уже завершены работы в рамках контракта, заключенного в ноябре 2016 года, стоимость которого составила около 20 млн евро. За 2,5 года YIT были проведены работы по проходке первых центральных тоннелей, а также вертикальных шахт, соединяющих их с поверхностью земли. Также в рамках данного контракта были выполнены работы по подготовке к бурению скважин, укреплению горных пород при подготовке к проходке восстающих

выработок для установки лифта, с помощью которого планируется доставлять контейнеры с ОЯТ на уровень захоронения. Помимо этого была осуществлена проходка горных пород для организации подземного узла приемки контейнеров с ОЯТ на глубине 430 м. Летом 2019 года Posiva заключила очередной контракт с фирмой YIT, согласно положениям которого компания займется проходкой выработок в рамках второго этапа по сооружению ПГЗ ОЯТ. Стоимость контракта, предусматривающего сооружение еще двух центральных тоннелей и пяти соединяющихся с ними тоннелей для захоронения ОЯТ, составила порядка 17 миллионов евро. Как ожидается, работы в рамках данного контракта начинаются в конце 2019 года и займут около 2,5 лет [65].

В конце сентября 2019 года строительная компания Skanska, заключившая контракт с Posiva, приступила к сооружению завода по инкапсуляции ОЯТ, заложив первый камень в его фундамент: согласно разработанному проекту, ОЯТ планируется упаковывать в контейнеры из меди и стали. Эти операции будут выполняться на заводе, расположенном на поверхности, откуда будет осуществляться их доставка в подземные тоннели ПГЗ ОЯТ, расположенного на глубине 400–450 м, а оттуда – в скважины захоронения. Согласно оценкам компании Posiva, суммарные затраты на этапе сооружения ПГЗ ОЯТ должны составить около 500 млн евро (или 570 млн долларов США). Согласно планам по состоянию на апрель 2019 г. в 2021/2022 году компания Posiva собирается подавать заявку на получение лицензии на эксплуатацию и в 2024 году приступить к работам по захоронению ОЯТ [68, 69].

4.2 Швеция: процедура получения лицензии на сооружение

Еще одним мировым лидером по темпам реализации проекта геологического захоронения ОЯТ является Швеция. Впервые исследования геологических формаций с целью поиска подходящей площадки для сооружения пункта захоронения были инициированы здесь еще в 1975 году и охватили 17 регионов, расположенных в разных частях страны. С 1995 года в ПИЛ Аспё на глубине 500 м проводились исследования геологических формаций, результаты которых подтвердили приемлемость геологических характеристик влажных гранитов для сооружения ПГЗ ОЯТ.

В 2009 году была определена площадка* для строительства ПГЗ ОЯТ в соответствии с разработанной SKB концепцией KBS-3. В марте 2011 года компания SKB подала заявку на строительство пункта захоронения в муниципалитете Эстаммар и завода по инкапсуляции ОЯТ. В Швеции имеется достаточно сложная система лицензирования ядерных установок. Она предполагает рассмотрение заявки как с позиций ядерной безопасности Управлением по ядерной безопасности (SSM), так и с позиций охраны окружающей среды. 23 января 2018 года шведский ядерный регулятор SSM направил правительству свое положительное заключение по заявке, подготовленной SKB в рамках процедуры получения лицензии на строительство ПГЗ ОЯТ и завода по инкапсуляции. Однако Суд по вопросам землепользования и защиты окружающей среды запросил дополнительную документацию по медным контейнерам, которые планируется использовать для захоронения ОЯТ [3]. В апреле 2019 года SKB направила на рассмотрение Суда дополнительные материалы по вопросу долговечности медных контейнеров, основанные на результатах целого ряда новых экспериментов, проведенного моделирования, а также анализа полученных ранее данных. Эти материалы включают около двадцати новых отчетов и научных публикаций. Основные выводы обобщены в техническом отчете, где кратко описаны главные трудности и проблемы, связанные с использованием медных контейнеров, а также их общая значимость с позиций обеспечения безопасности ПГЗ ОЯТ после его закрытия. В целом новые материалы лишь подтверждают предыдущие выводы экспертов о надежности контейнеров в условиях среды ПЗРО и демонстрируют возможность обеспечения долговременной безопасности захоронения ОЯТ в случае сооружения объекта в соответствии с разработанной SKB концепцией. В планах SKB приступить к строительству пункта захоронения незамедлительно после получения соответствующего разрешения правительства в начале 2020-х гг. (информация по состоянию на октябрь 2019 г.) [10].

4.3 Франция: подача документов для получения лицензии на сооружение планируется в 2020 г.

Во Франции в качестве наиболее предпочтительного варианта окончательной изоляции ВАО и долгоживущих САО была выбрана концепция их обратимого захоронения в глубинных геологических формациях, закрепленная на законодательном уровне (требование к обеспечению возможности для повторного извлечения уже захороненных отходов в течение по меньшей мере 100 лет, а также гибкости процесса принятия решений, что позволило бы будущим поколениям самостоятельно определить стратегию долговременного обращения с этими видами РАО). Итогом многолетних работ стала разработка проекта

* Площадка расположена в муниципалитете Эстаммар, приблизительно в 170 км от Стокгольма

пункта захоронения, который планируется построить в регионе Мёз-От-Марн. Объект получил название Cigéo. Площадка Cigéo будет включать комплекс наземных установок, предназначенных для приема упаковок с отходами, их инспектирования и подготовки к захоронению; подземных секций пункта захоронения, размещенных на глубине около 500 м, и инфраструктуру, соединяющую наземные и подземные установки. Как ожидается, срок эксплуатации объекта Cigéo составит более 100 лет, в течение всего этого периода зона захоронения будет постепенно расширяться и в итоге займет территорию общей площадью 15 км² [3].

В 2016 году были пересмотрены планы и график работ по захоронению: внедрен этап опытной эксплуатации пункта захоронения, предусматривающий захоронение первой партии отходов в 2030 году и переход к промышленной эксплуатации объекта в 2035 году. Также Andra (Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами) подготовило проект стратегического мастер-плана для этапа эксплуатации объекта Cigéo: он был передан на рассмотрение регулирующему органу ASN (Управлению ядерной безопасности) [3].

В январе 2018 года ASN выдало свои рекомендации относительно данных материалов: проект Cigéo в целом достиг приемлемого уровня технической проработанности. В то же время необходимы дополнительные исследования по обеспечению безопасности битуминизированных отходов, которые, согласно разработанному проекту, должны составить почти 18 % (40 000 упаковок) от суммарного количества РАО перед захоронением. Были рекомендованы два возможных подхода: предварительная переработка РАО с целью снижения их горючести и внесение изменений в сам проект захоронения. ASN рассматривает первый вариант как наиболее предпочтительный, а второй – как все же требующий изучения [65]. Экспертная оценка, проведенная командой независимых национальных и международных экспертов по данному вопросу по заказу уполномоченного министра в области энергетики, была представлена руководящим органам и затем ANDRA и IRSN летом 2019 года. На ее основе в Национальном плане по обращению с радиоактивными материалами и отходами будет уточнено, что ANDRA и производителям отходов предстоит сделать в этом направлении.

В настоящее время ОЯТ в соответствии с национальной стратегией не предназначено для прямого захоронения, за исключением нескольких видов экспериментального топлива. ОЯТ либо перерабатывается, либо хранится до начала эксплуатации IV поколения реакторов на быстрых нейтронах [66]. В то же время в Cigéo должен быть заложен принцип обратимости, который включает понятия адаптивности и извлекаемости. Требование адаптивности предполагает учет возможных изменений в энергетической политике или технологических предпочтениях, которые могут, например, привести к прямому захоронению ОЯТ. Если ОЯТ когда-либо в будущем будет переклассифицировано в РАО, оно должно будет приниматься в Cigéo. Данные требования были закреплены законом от 25.07.2016 г. Указанные изменения в законодательстве были далее имплементированы в Национальный план по обращению с радиоактивными материалами и отходами (такой план разрабатывается на каждые 3 года для оценки потребностей и постановки задач на будущее в национальном масштабе) [67]. План предусмотрел требование к национальному оператору ANDRA дать предложения по типам и количествам отходов для включения в резервный реестр РАО для Cigéo, а также представить уполномоченному министру в области энергетики оценку стоимости прямого захоронения ОЯТ. В 2016 г. стоимость обратимого геологического пункта захоронения оценивалась в 25 млрд евро за весь период строительства и эксплуатации (140 лет), стоимость подлежит регулярной переоценке, в т. ч. по мере достижения ключевых вех проекта.

В 2017 г. национальный оператор ANDRA объявил, что начало строительства Cigéo будет перенесено с 2020 на 2022 год. Заявку на разрешение на строительство первоначально планировалось подать в середине 2018 года, но затем это было перенесено в 2019 г. с соответствующим сдвигом старта строительства. По самым последним данным подача заявки планируется на 2020 год.

4.4 США: невыполненные обязательства государства

Закон о ядерных отходах 1982 г. предписывал Министерству энергетики провести обследование нескольких территорий для выбора площадок для двух пунктов захоронения – одного в восточной, а другого – в западной части страны. Окончательный выбор должен был сделать президент, начало работы пункта захоронения было намечено на 1998 год. Государство брало на себя обязательства по обеспечению заключительной стадии обращения с ОЯТ, а АЭС для финансирования затрат должны были платить сбор с вырабатываемой электроэнергии, который аккумулируется в Фонде ядерных отходов.

Законодательный акт о проведении работ по созданию пункта захоронения в Якка-Маунтин был одобрен Конгрессом США в 1987 году. В дальнейшем история этого объекта стала примером принятия политических решений относительно судьбы сооружения объектов окончательной изоляции (подробный обзор представлен в [78]). Против размещения объекта выступали власти штата Невада, которые использовали в своей борьбе юридические и политические аргументы. На общенациональном уровне республи-

канские администрации традиционно поддерживали проект, демократические же выступали с обратными решениями. Это противостояние продолжается до настоящего времени, несмотря на наличие законодательного мандата на создание пункта захоронения и консолидированного мнения экспертного сообщества о необходимости мощностей геологического захоронения.

С самого начала подавляющее большинство экспертов сходилось на том, что, если пункт захоронения в Якка-Маунтин будет построено правильно, ядерные отходы в нем будут представлять минимальный риск для населения. В 2008 г. Агентство по охране окружающей среды выпустило нормативный документ с критериями безопасности для пункта захоронения ВАО, в котором появилось требование о непревышении годовой дозы 0,15 мЗв в течение первых 10 тысяч лет и 1 мЗв в течение последующих 990 тысяч лет. В 2010 г. созданный по решению Республиканской партии комитет рассмотрел все имевшиеся документы по обоснованию безопасности пункта захоронения и пришел к выводу, что технические специалисты единодушны в том, что Якка-Маунтин является наиболее изученной площадкой на планете, и что ядерные отходы могут быть надежно изолированы здесь в течение десятков тысяч лет в соответствии с требованиями Комиссии по ядерному регулированию [78].

В 2011 году процесс лицензирования Якка-Маунтин был свернут по решению администрации президента Обамы. В том же году вышел в свет доклад Массачусетского технологического института (MIT) «Будущее ядерного топливного цикла» [79], в котором анализировались вопросы долговременного выбора типов топлива и реакторов, обращения с ОЯТ и захоронения РАО. Доклад содержал следующие основные выводы: *«На протяжении десятилетий при обсуждении перспектив развития ЯТЦ, главным образом доминировало мнение, что замкнутый топливный цикл, основанный на пуске реакторов на быстрых нейтронах, работающих на плутонии, в конечном итоге и станет основой для будущего ЯТЦ. Однако это мнение основано на устаревших представлениях о дефиците урана. Повторное исследование топливных циклов, проведенное в ходе данного исследования, показывает, что существует множество иных жизнеспособных вариантов осуществления ЯТЦ. А выбор оптимального варианта производится в условиях больших неопределенностей. ... Основная идея нашей работы – мы можем и должны продолжать ведение незамкнутого топливного цикла, внедрив системы хранения ОЯТ LWR, разрабатывая проекты геологического захоронения и проводя исследования альтернативных технологий, которые могут быть использованы в будущем».*

Практически сразу после исследования MIT появился доклад Независимой экспертной комиссии по ядерному будущему (Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future), назначенной президентом Обамой для рассмотрения вариантов обращения с ядерными отходами [80]. Одной из центральных рекомендаций стала необходимость принятия Соединенными Штатами *«комплексной программы обращения с ядерными отходами, которая приведет к своевременному созданию одного или нескольких геологических хранилищ для безопасного захоронения отработавшего ядерного топлива и высокоактивных отходов. Вывод о том, что захоронение необходимо и что глубинное геологическое захоронение является научным обоснованным подходом, был сделан каждой экспертной группой, рассматривавшей вопрос, и каждой страной, ведущей программу обращения с ядерными отходами».*

Администрация Обамы в течение второго срока нахождения в Белом доме не предприняла дальнейших действий для решения вопросов обращения с ядерными отходами. В 2013 г. Федеральный суд обязал Министерство энергетики прекратить взимать налог в Фонд ядерных отходов, который ранее собрался с производителей электроэнергии на АЭС. На конец 2017 финансового года в Фонде было 44,5 млрд долл. Для ядерного сектора отсутствие хранилища выразилось в росте затрат из-за невозможности полного освобождения площадок выводимых из эксплуатации АЭС (на них сохраняется ограниченный периметр с контейнеризованным ОЯТ), стоимость такого хранения на одной площадке оценивается в 8 млн долл. ежегодно. В такой ситуации находится, например, выведенная из эксплуатации АЭС Main Yankee. Ее оператору, вместе с двумя аналогичными объектами в других штатах, удалось отсудить у государства в совокупности 103 млн долл. компенсации затрат вынужденного хранения ОЯТ на площадке за период с 2013 до 2016 гг.

С другой стороны, большое развитие получил парк контейнеров для хранения и транспортировки ОЯТ, также есть планы создания консолидированных коммерческих хранилищ ОЯТ (получено 2 заявки – на площадке Andrews в штате Техас и площадке в городе Lea County в штате Нью-Мексико [81]). С точки зрения временного хранения ОЯТ можно отметить документ NUREG-2157 (2014) [82], который носит название «Общее Заявление о воздействии на окружающую среду для долговременного хранения ОЯТ» и адресован хранению ОЯТ в приреакторных хранилищах на площадке и хранилищах за пределами площадки. Документ анализирует экологическое воздействие такого хранения в трех временных диапазонах: краткосрочном, включающем 60 лет после окончания лицензии на эксплуатацию реактора, дополнительных 100 лет (т. е. временной диапазон 60+100), и неограниченного времени (на случай, если хранилище никогда не будет доступно для приема ОЯТ). Общие выводы состоят в том, что при всех рассмотренных

вариантах эффекты в большинстве случаев будут незначительными, при этом вариант продолжительного хранения на площадке менее затратен.

С приходом в Белый дом республиканской администрации были предприняты шаги для возвращения к вопросу о геологическом хранилище Якка-Маунтин. Кабинет Трампа ежегодно вносит на рассмотрение Конгресса вопрос о возобновлении лицензирования хранилища Якка-Маунтин, однако лобби, выступающему против таких планов, пока удается блокировать эти попытки. Таким образом, несмотря на законодательный мандат на сооружение пункта захоронения, наличие средств, научные доводы и запросы бизнеса, планам создания пункта захоронения воспрепятствовала политика.

4.5 Роль подземных исследовательских лабораторий

Отметим, что во всех трех странах, находящихся на продвинутых стадиях проекта создания пункта захоронения РАО, важной составляющей проектов по созданию ПГЗРО стали исследования, проводимые в ПИЛ. Так, во Франции ПИЛ Мёз-От-Марн была создана в 2000 году, в 2004 году ее выработки достигли горизонта глиняных формаций. С 2009 года по настоящее время в центре внимания было изучение методов проходки, укрепления и герметизации, в особенности в контексте оказываемого ими воздействия на окружающие породы. Были проведены испытания различного оборудования и технологий проходки. В ПИЛ проводятся многочисленные измерения при помощи более 20 000 установленных датчиков, данные с них продолжают поступать и после завершения работ [72].

В скором времени большая часть действующих в мире ПИЛ будет закрыта: так, например, к 2023 году будет закрыта шведская ПИЛ Аспё. Связано это, прежде всего, с завершением всех запланированных к проведению в этой ПИЛ НИОКР, а также сменой самого акцента при переходе к этапу сооружения и эксплуатации объектов захоронения в пилотном режиме. Причем, обязательность этапа пилотной или опытной эксплуатации предусмотрена в некоторых странах, к примеру, во Франции, требованиями законодательства. Так, если посмотреть, каким образом меняется роль ПИЛ на разных этапах реализации проектов геологического захоронения ОЯТ и РАО, то причины скорого закрытия ПИЛ становятся очевидными (рисунок 23) [73].

Что касается судьбы ПИЛ Аспё, то на данный момент рассматриваются два возможных варианта [74]:

- если до 2023 года специалисты смогут обосновать загрузку исследовательских мощностей ПИЛ (речь идет о научных организациях, университетах, организациях, ответственных за обращения с РАО или иных компаний, которые бы изъявили желание вкладывать средства в эксплуатацию объекта), то после 2023 года с SKB ответственность за эксплуатацию ПИЛ снята не будет;
- работы по закрытию ПИЛ Аспё будут проведены после 2023 года, если ни одна организация так и не изъявит желания или интереса в продолжении работ в ПИЛ.

В любом случае даже в случае закрытия подземной части установки SKB планирует адаптировать имеющиеся объекты наземной инфраструктуры (включая различные лаборатории, цеха, конференц-залы и т. п.) в соответствии с текущими потребностями самой компании [74].



Рисунок 23 – Роль ПИЛ на разных этапах реализации проектов по созданию ПГЗРО [73]

4.6 Выводы по зарубежному опыту

1. В настоящее время геологическое захоронение признано во всем мире в качестве наиболее безопасного и надёжного способа обращения с ВАО и долгоживущими САО.
2. В ядерных странах на государственном уровне ведется разработка и реализация программ и стратегий обращения с ОЯТ и РАО, горизонт планирования по отдельным объектам и программам – до 150 лет. Программы базируются на детальной проработке реестра РАО, необходимых объектов инфраструктуры, концептуальных решений по геологическому захоронению, последовательности действий по их сооружению и эксплуатации, включая графики захоронения, и пр. Повсеместно программы и стратегии характеризуются высоким уровнем открытости и публичной дискуссии.
3. В центре внимания регуляторов и общественности находятся различные аспекты безопасности. Это обеспечивает высокую степень технической проработанности проектов и достаточную уверенность в результатах обоснования их безопасности.
4. Задержки в реализации планов в странах-лидерах связаны, как правило, со сроками прохождения обязательных процедур и тщательностью проработки разносторонних аспектов, связанных с безопасностью и воздействием на окружающую среду. В США сооружение хранилища парализовано по политическим мотивам.

5 Управление знаниями

Ключевыми вехами реализации проекта сооружения ПГЗРО в последние годы явились:

- Разработка и утверждение 28.03.2018 г. генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачёвым «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов».
- Разработка и утверждение 09.01.2019 г. Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край)». Этот документ определяет основные направления всех видов исследований (мониторинг, натурные, лабораторные и численные исследования, отработка технологий) необходимых для получения необходимых аргументов для обоснования безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО. Разработан проект реализации ее первоочередных мероприятий.
- Разработка и утверждение 31.07.2019 г. Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» «Технических требований и плана-графика (2019–2021 гг. реализации первоочередных мероприятий «Комплексной программы...»), ставших основой для подготовки детальных технических заданий на соответствующие работы.
- Формирование облика основных экспериментов в ПИЛ. Документ включает описание требований к необходимым исследованиям, сопровождающим горнопроходческие работы, а также к выработкам, оборудованию, материалам и т. п. для выполнения комплексов термомеханических, геомеханических, гидрогеологических, микробиологических и геохимических экспериментов для оценки свойств материалов инженерных барьеров и вмещающей породы, а также их взаимодействий.

В итоге проект сооружения ПИЛ в настоящее время характеризуется необходимым динамизмом (рисунок 24) и развернутым научным сопровождением.



Рисунок 24 – Площадка строительства подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве

5.1 База знаний

В международной практике обоснования долговременной безопасности ПЗРО вопросы управления знаниями, включая сохранность и доступность информации, относятся к числу приоритетных направлений [50–53]. Соответствующие исследования [54] и мероприятия предусмотрены «Стратегией создания ПЗРО» [55] на всех фазах реализации проекта (направления «Система управления и кадры», «Исследования и разработки по обоснованию безопасности», «Взаимодействие с заинтересованными сторонами»). В документах МАГАТЭ ([18, 29]) неоднократно подчеркивается необходимость:

- доступности всей информации, отражающей этапы жизненного цикла ПЗРО, в том числе и для будущих поколений (см., например, п. 6.21 [29], п. 6.83 [11]);
- прослеживаемости, т. е. четкого и полного документирования цепочки принятых решений и допущений, нормативно-правовой базы, аргументов безопасности, расчетных моделей, параметров и данных, экспертных оценок и т. д. (см. пп. 4.98, 5.20, 7.16 [29]).

Для этих целей необходимо управление информацией в более широком смысле – как деятельность, посредством которой вся информация, относящаяся к проекту (или его регулированию), может обрабатываться организованным образом, что включает в себя планирование, тематический и качественный анализ, структурирование, архивирование, обновление и распространение среди всех заинтересованных сторон.

Программы по созданию пунктов захоронения РАО агрегируют большие объемы информации из различных областей деятельности, что связано с такими факторами, как:

- сложный и междисциплинарный характер проектов;
- временные масштабы этих проектов, на которых некоторые условия программы (например, нормативно-правовая база) могут измениться;
- итеративность обоснования долговременной безопасности, например, накопление данных и соответствующее углубление понимания характеристик площадки с течением времени;
- обширность релевантной информации, которая доступна из других областей деятельности, других национальных программ, в результате совместных исследований, осуществляемых международными организациями (АЯЭ ОЭСР, МАГАТЭ и др.);
- многообразии совокупности требований, выраженных различными заинтересованными сторонами по отношению к будущей системе захоронения.

Объемы охватываемой информации увеличиваются (как количество документов, так и разнообразие типов данных, глубина проработки отдельных аспектов и т. д.) по мере того, как программы проходят последовательные этапы разработки ПЗРО: выбор и характеристика площадки, сооружение, эксплуатация, закрытие. Каждый из этих этапов также связан с нормативным и общественным одобрением проекта. В некоторых программах создания ПЗРО также документируются аналогичные проекты, чтобы обеспечить в дальнейшем возможность принятия информированных решений. Почти всегда, в управлении всем этим объемом информации задействовано несколько информационных систем (отдельных баз данных, программных средств и т. д.), которые наиболее эффективны для удовлетворения потребности различных групп специалистов. Здесь стоит отметить, что это общая тенденция, затрагивающая не только проекты создания пунктов захоронения РАО – в качестве показательного, но далеко не единственного примера, можно привести публикации об управлении знаниями Европейской организации по ядерным исследованиям [56].

Объем и разнообразие данных, информации и знаний, вовлеченных в процесс обоснования безопасности таковы, что для их обработки зачастую не хватает какого-то одного программного средства [57]. Для удовлетворения всего спектра информационных потребностей привлекаются специфические базы данных, геоинформационные системы, системы управления требованиями, системы поддержки принятия решений и т. д.

В настоящее время разрабатывается информационно-технологическая платформа, которая будет обеспечивать всю необходимую информацию для сопровождения научной программы ПЗРО. Один из ее аспектов – управление требованиями. В информационной системе поддержки процесса обоснования долговременной безопасности российского ПЗРО PULSE (Project of Underground Laboratory Scientific Escort, Проект Научной поддержки ПИЛ) база знаний является ключевым и связующим элементом.

В свете требований к доступности информации, отражающей этапы жизненного цикла ПЗРО, основной базы знаний PULSE является архив (рисунок 25), содержащий все накопленные документы по предметной области, используемые в процессе обоснования безопасности:

- научно-технические отчеты и в целом документация по проекту, подготовленные за время его реализации (с середины 1980 гг.);
- вся релевантная ссылочная документация, объем которой на порядки превышает количество самих отчетов;

- отчеты по зарубежным проектам ПГЗРО;
- подборки новых научных публикаций по различным аспектам захоронения РАО.



Рисунок 25 – Типовая структура документации по проекту геологического захоронения РАО

Следует отметить, что в силу актуальности проблем сохранения знаний в крупномасштабных проектах [53], причем не только в проектах захоронения радиоактивных отходов, в настоящее время существуют международные общедоступные информационные системы, например, библиотека документов, охватывающих все области деятельности МАГАТЭ [58]. Перед разработчиками PULSE не стоит цели их дублирования. В файловый архив постепенно добавляются все документы, которые так или иначе используются в обосновании безопасности – в качестве аргументации, источника данных для каких-либо исследований или другой информации.

Следующий шаг – переход от структурированного хранилища информации к информационной системе, что предполагает реализацию инструментов для использования информации при принятии решений на разных этапах реализации «Стратегии создания ПГЗРО» (рисунок 26). Эти средства должны позволять обрабатывать накопленную информацию, а также поступающую в оперативном режиме при выполнении мероприятий, проведении исследований, кроме того должна быть реализована возможность учитывать и анализировать различные мнения экспертов.

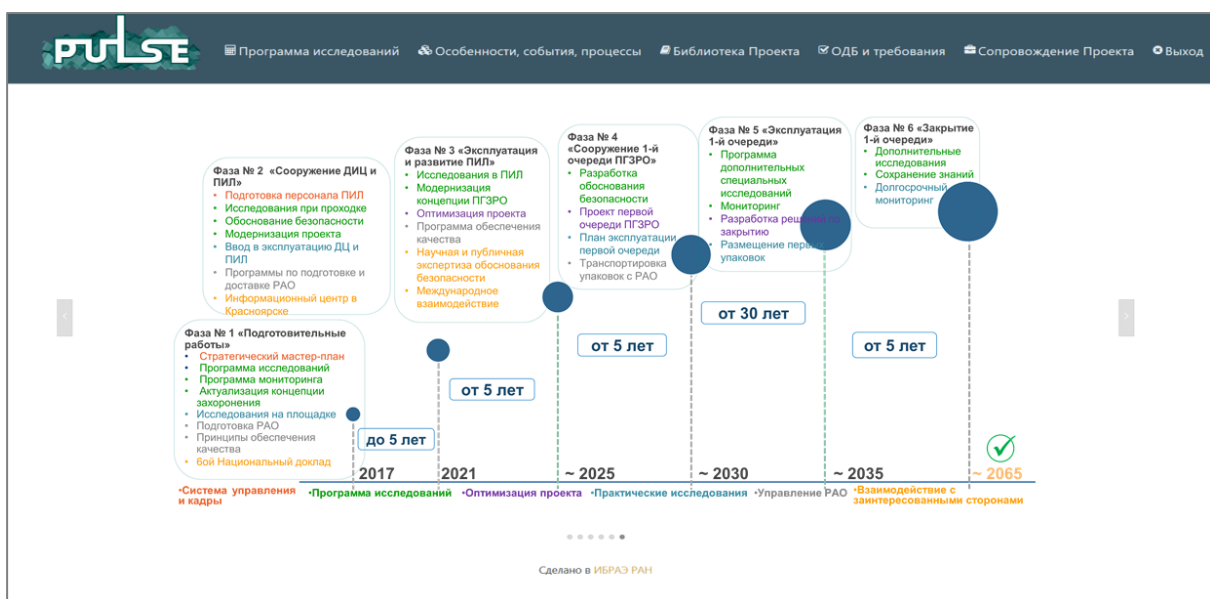


Рисунок 26 – Стратегия создания ПГЗРО в интерфейсе PULSE

На данном этапе развития в базе знаний PULSE отражены инструменты для следующих задач:

- систематизация и анализ степени реализации требований к ПГЗРО, исходящих из различных источников (этих требований более тысячи);
- обоснование наиболее вероятных и альтернативных сценариев эволюции системы захоронения, включая связи с необходимыми исследованиями;
- структурирование уже проведенных и планируемых в будущем исследований, включая связи между ними (рисунок 27) в соответствии с программой до 2030 г., утв. директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО О.В. Крюковым 9.01.2019;
- анализ изученности системы захоронения в терминах Особенности, Событий и Процессов [12];
- документирование работы экспертов в рамках аргументации безопасности и сопровождения Проекта.

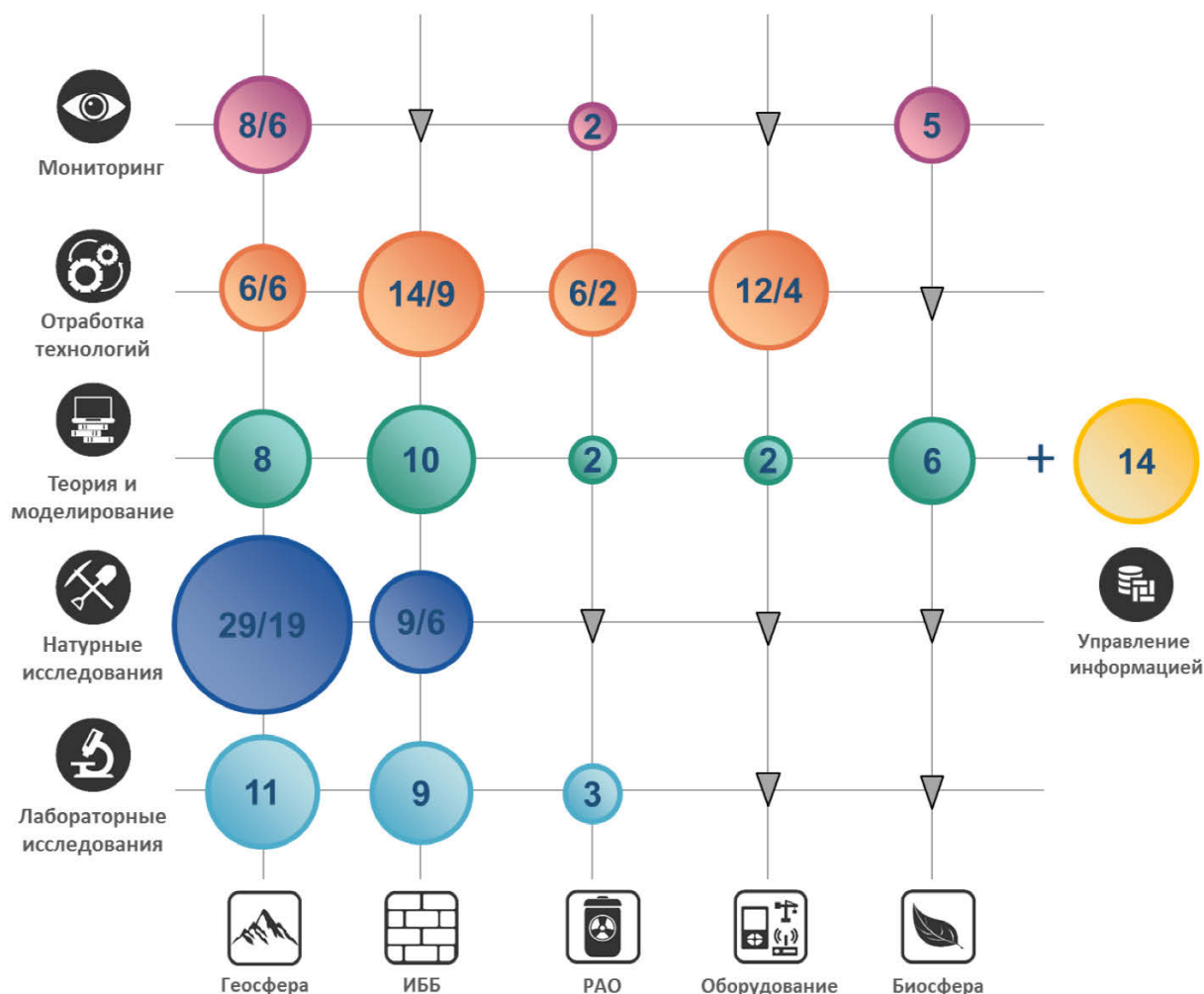


Рисунок 27 – Количество НИР и НИОКР в Программе исследований по соответствующим им элементам системы захоронения (горизонтальная ось) и направлениям деятельности (вертикальная ось)

По мере появления отчетов о проведении исследований они так же, как и результаты работы экспертов с требованиями и ОСП, систематизируются в специальном разделе базы знаний, задающем структуру обоснования долговременной безопасности, соответствующую рекомендациям МАГАТЭ [29] и лучшим зарубежным практикам [63, 64] (рисунок 28).

Структура ОДБ

- ▼ ОДБ
 - ▼ Итоговый отчет
 - Описание концепции безопасности
 - Определение функций безопасности, соответствующих показателей и критериев их оценки
 - Подтверждение выполнения функций безопасности по результатам исследований в ПИЛ
 - ▼ Набор основных документов
 - ▼ Серия отчетов, характеризующих начальное состояние (отчеты о входных данных)
 - Состояние площадки
 - Состояние системы ИББ
 - Состав и характеристики РАО
 - ▼ Серия отчетов о внутренних процессах
 - Отчет о процессах в РАО и матрице
 - Отчет о процессах в канистре
 - Отчет о процессах в буфере
 - Отчет о процессах в бетоне
 - Отчет о процессах во вмещающей горной породе (включая зону нарушений)
 - ▼ Серия отчетов о внешних процессах
 - Отчет о климате
 - Отчет о геосфере
 - Отчет по ОСП
 - Итоговый отчет о формировании сценариев
 - Отчет по используемым моделям
 - Отчет о переносе радионуклидов
 - Отчет о результатах моделирования долгосрочных сценариев
 - Отчет о последствиях эксплуатации
 - ▼ Дополнительная информация
 - Конструкторская документация
 - Описание площадки
 - Результаты НИОКР, в т.ч. более ранних исследований
 - Базы данных ОСП

Рисунок 28 – Предварительная структура обоснования долговременной безопасности

5.2 Публикации

Монографии

- Кочкин Б. Т. Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. – М.: Наука, 2005.
- Лаверов Н. П., Величкин В. И., Омеляненко Б. И. и др. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. М.: ИФЗ РАН. 2008. 280 с.
- Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Изд-во «Горная книга». 2011. 558 с.
- Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект) // М.: ИГЕМ РАН. – 2017.

Публикации в научной периодике

- Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО // Материалы КНТС. С-Пб.: Горно-химический комбинат, НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», 1999. 182 с.
- Андерсон Е. Б., Любцева Е. Ф., Оганезов А. В. и др. Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО // Разведка и охрана недр. 1999. № 9-10. С. 61-63.
- Гупало Т. А., Карпиков А. А., Родионова А. Е., Новиков Е. А. Комплекс исследований породного массива для определения безопасности захоронения ВАО в федеральном объекте геологической изоляции на всех стадиях его создания и эксплуатации // Материалы международной научно-практической конференции «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий». Сборник научных трудов. М.: ООО «Винпресс». 2016. С. 20-34.
- Кочкин Б. Т. Геологические неопределенности в оценке безопасности систем захоронения отходов // Геоэкология. 2004. № 2. С. 142-153.
- Кочкин Б. Т. Обоснование долгосрочной безопасности геологических хранилищ высокорadioактивных отходов // Геоэкология. 2013. № 4. С. 342-352.
- Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокорadioактивных отходов (участок Енисейский, Красноярский край) // Геоэкология. 2015. № 2. С. 52-65.
- Кочкин Б. Т., Петров В. А. Долгосрочный прогноз сейсмической опасности в связи с проблемой изоляции радиоактивных отходов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 7. С. 1369-1380.
- Кочкин Б. Т., Мальковский В. И. Количественная оценка долгосрочной эволюции условий миграции радионуклидов из могильника на участке Енисейский (Красноярский край) // Геоэкология. 2016. № 5. С. 401-411.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омеляненко Б.И. и др. Новые подходы к подземному захоронению высокоактивных отходов в России // Геоэкология. 2000. № 1. С. 3-12.
- Лаверов Н. П., Величкин В. И., Кочкин Б. Т. и др. Методологические основы исследований на завершающем этапе выбора площадок для размещения хранилищ отработавших ядерных материалов в кристаллических породах // Геоэкология. 2010. № 1. С. 3-12.
- Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Шрамко И. В. и др. Состояние работ и основные технические решения по созданию федерального объекта окончательной подземной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Матер. V Межд. ядерного форума.
- Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Белов С. В., Татаринов В. Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского гранитоидного массива района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. № 3. С. 232-243.
- Петров В. А., Полуэктов В. В., Хаммер Й. Р., Цулаф Г. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 67-74.
- Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Сеелев И. Н. Изучение современной геодинамики Нижне-Канского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 3. С. 157-160.
- Polyakov Yu. D., Porsov A. Yu., Beigul V. P., Palenov M. V. Setting up a safe deep repository for long-lived HLW and ILW in Russia: Current state of the works // The safety case for deep geological disposal of radioactive waste. Paris: NEA/RWM/R, 2013.
- Gupalo T. A. Safety assessments of ultimate isolation of radioactive waste in deep geological formation in Russia: objectives, problems, prospects // Proc. of Symp. Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?. Paris, France 23-25 January 2007. Paris: OECD/NEA, No. 6319. 2008. P. 393-401.

- Laverov N. P., Yudintsev S. V., Kochkin B. T., Malkovsky V. I. The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste // *Elements*. 2016. Vol. 12. № 4. P. 253-256.
- Polyakov Yu. D., Porsov A. Yu., Beigul V. P., Palenov M. V. Setting up a safe deep repository for long-lived HLW and ILW in Russia: Current state of the works // *The safety case for deep geological disposal of radioactive waste*. Paris: NEA/RWM/R, 2013.
- Laverov N. P., Yudintsev S. V., Kochkin B. T., Malkovsky V. I. The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste // *Elements*. 2016. Vol. 12. № 4. P. 253-256.

В том числе в журнале «Радиоактивные отходы»:

- Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // *Радиоактивные отходы*. — 2017. — № 1. — С. 32—41.
- Новые документы. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // *Радиоактивные отходы* – 2018. – № 2 (3) – С. 114-120.
- Кочкин Б. Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // *Радиоактивные отходы*. 2019. № 2 (7). С. 76—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91.
- Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В. Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // *Радиоактивные отходы* 2019 № 1 (6) С 90—99.
- Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // *Радиоактивные отходы*. — 2018. — № 3 (4). — С. 16—29.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // *Радиоактивные отходы* 2019 № 1 (6) С 77—89.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: к программе геомеханических исследований // *Радиоактивные отходы*. 2019. № 2 (7). С. 101—118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118.
- Сафонов А. В., Болдырев К. А. Исследование биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО в Нижнеканском массиве // *Радиоактивные отходы*. — 2019. — № 2 (7). — С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.

Заключение

Тезис о невозможности демонстрации долговременной безопасности ПГЗРО сильно преувеличен и в целом неверен. Сравнительно низкие темпы прогрессирования соответствующей науки связаны лишь с отсутствием ярко выраженной коммерческой составляющей или критически опасных стадий хранения РАО или ОЯТ. Возможность подготовки научно-обоснованного документа по геологическому захоронению РАО – факт, консенсусно принятый на международном уровне. Глубина его проработки должна быть достаточной, чтобы обеспечить полное доверие к проекту ПГЗРО. Этот путь – итерационный, обоснование долговременной безопасности разрабатывается поэтапно по мере накопления информации, выполнения исследований, отработки технологий. Принятые на международном уровне требования к ОДБ геологического захоронения:

- итеративность оценок безопасности площадки размещения объекта, вариантов конструкции, функций системы захоронения;
- обеспечение защиты людей и окружающей среды как в настоящее время, так и в будущем;
- полную привязку доказательной базы к характеристикам объекта и вмещающих горных пород;
- разработку базового и альтернативных сценариев эволюции объекта;
- обязательность рассмотрения полного набора особенностей, событий и процессов, которые потенциально могут оказать влияние на безопасность системы.

При отборе факторов из списка особенностей, событий и процессов очень важно выделить те, которые сами по себе или в комбинации с другими могут оказать значимое воздействие на долговременное поведение системы захоронения. При этом эффект влияния каждого из выделенных факторов оценивается качественно и количественно.

Рассмотрение явлений, событий и процессов, влияющих на безопасность ПГЗРО, в случае их актуальности для конкретного объекта требует построения соответствующих математических и численных моделей. Эти модели позволяют провести расчеты на весь период потенциальной опасности объекта, либо до достижения максимально возможного радиоэкологического воздействия на население. Обычно для комплексной оценки безопасности используется комплекс моделей, состоящий из моделей климатических, геодинамических, гидрологических процессов, моделей изменения свойств инженерных барьеров безопасности (ИББ) и моделей миграции в ближней и дальней зонах (возможно также использование промежуточной модели «масштаба захоронения»).

Из зарубежного опыта можно заключить следующее. В настоящее время геологическое захоронение признано во всем мире в качестве наиболее безопасного и надёжного способа обращения с высокоактивными отходами. В ядерных странах на государственном уровне ведется разработка и реализация программ и стратегий обращения с ОЯТ и РАО, горизонт планирования по отдельным объектам и программам – до 150 лет. Программы базируются на детальном анализе всех аспектов безопасности и концептуальных решений, а также характеризуются высоким уровнем открытости и публичной дискуссии. Это обеспечивает высокую степень технической проработанности проектов и достаточную уверенность в результатах обоснования их безопасности.

В контексте подробности проработки программ следует отметить аспект извлекаемости РАО, который включается в некоторые проекты, несмотря на то их целью однозначно является не хранение, а окончательная изоляция РАО. Извлекаемость РАО (retrivability) рассматривается прежде всего как один из вариантов обратимости принятых решений (reversibility) и обеспечения дополнительной гибкости, которая может позволить в будущем (причем, как правило – в относительно близком, до момента закрытия пункта захоронения) [83,84]:

- реагировать на новую техническую информацию или нормативные требования;
- осуществлять технический контроль в изменяющихся условиях;
- пересмотреть технические решения или исправить переставшую удовлетворяющую каким-либо (например, этическим) факторам ситуацию.



Рисунок 29 – Роль обратимости решений на различных этапах жизненного цикла [83]

То есть в национальных программах, которые включают извлекаемость в качестве заявленной функции в проект пункта окончательной изоляции РАО, не стоит цели сделать будущее извлечение легким или бесплатным, а рассматривается обеспечение такой возможности в принципе в рамках ответственного

отношения к будущим поколениям, обеспечения уверенности в проекте и информированного принятия решений [83,84].

Задержки в реализации планов в странах-лидерах связаны, как правило, со сроками прохождения обязательных процедур и тщательностью проработки разносторонних аспектов, связанных с безопасностью и воздействием на окружающую среду. В США сооружение хранилища парализовано по политическим мотивам.

Программы по созданию пунктов захоронения РАО агрегируют большие объемы информации из различных областей деятельности. Объемы охватываемой информации увеличиваются по мере того, как программы проходят последовательные этапы разработки ПГЗРО: выбор и характеристика площадки, сооружение, эксплуатация, закрытие, и международные требования подчеркивают доступность и прослеживаемость информации на всех этапах для обеспечения информированного принятия решений.

Список использованных источников

1. Alexander W. R., Reijonen H. M., McKinley I. G. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories //Swiss Journal of Geosciences. – 2015. – Vol. 108. – №. 1. – p. 75-100.
2. US National Research Council. The Disposal of Radioactive Waste on Land. : National Academies Press, 1957.
3. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Линге И.И., Пронь И.А. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного захоронения в Европейских странах. Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом.энергетики РАН, № IBRAE-2017-03 — М: ИБРАЭ РАН, 2017.
4. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Коновалов В. Ю. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ И РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона: Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-04. – Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. – 41 с.
5. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Правила процедуры и Финансовые правила – INFCIRC/602/Rev 5 –2014.
6. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI в. Основные положения. Минатом РФ. Москва 2000 г.(Одобрена Правительством Российской Федерации 25 мая 2000 г., протокол № 17). М.: Минатом России, 2000.
7. РД 03-34-2000 Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии.
8. Приказ Ростехнадзора от 23.06.2017 N 218 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (вместе с «НП-100-17. Федеральные нормы и правила.») (Зарегистрировано в Минюсте России 20.07.2017 N 47477).
9. Лопаткин А.В. Исходные требования к фракционированию изотопов для обеспечения р/э захоронения РАО. Техническая справка. 01.2019 НРРЭ. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Частное учреждение «Инновационно-технологический центр проекта «Прорыв» – 2017.
10. The Twenty-first Meeting of the Integration Group for the Safety Case (IGSC). 8-10 October 2019.
11. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14, IAEA Safety Standards, IAEA, Vienna, 2011.
12. NEA/RWM/R(2019)1. Radioactive Waste Management and Decommissioning. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3. – OECD, 2019.
13. NEA/RWM/R(2013)1. Radioactive Waste Management. The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories – OECD, 2013.
14. IAEA Report on Protection against Extreme Earthquakes and Tsunamis in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, International Experts Meeting, Vienna, 4–7 September 2012.
15. Söderlund P. et al. Biotite and muscovite 40 Ar–39 Ar geochronological constraints on the post-Svecofennian tectonothermal evolution, Forsmark site, central Sweden //International Journal of Earth Sciences. – 2009. – Vol. 98. – №. 8. – p. 1835.
16. Караулов В.А., Заблоцкий К.А. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов

- до глубин 450-525 метров (+5 – –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2015.
17. Fälth B., Hökmark H., Munier R. Effects of Large Earthquakes on a KBS-3 Repository: Evaluation of Modelling Results and Their Implications for Layout and Design. – Svensk kärnbränslehantering (SKB), 2010.
 18. Захоронение радиоактивных отходов, Конкретные требования безопасности № SSR-5, Нормы МАГАТЭ по безопасности, МАГАТЭ, – Вена, 2011 г.
 19. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Cooperation and Development, 2012.
 20. Radioactive Waste Management. Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste. – OECD, 2009.
 21. NEA, 2009. International Experience in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC): Outcome of the INTESC Project. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, Publication 6251.
 22. Chapman N., Hooper A. The disposal of radioactive wastes underground //Proceedings of the Geologists' Association. – 2012. – Vol. 123. – №. 1. – p. 46-63.
 23. The Role of the Analysis of the Biosphere and Human Behaviour in Integrated Performance Assessments, OECD PAAG document NEA/RWM/PAAG(99)5.
 24. Smellie J. A. T., Karlsson F. The Cigar Lake analogue project: a reappraisal of some key issues and their relevance to repository performance assessment. – SKB Technical Report TR-96-08, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden, 1996.
 25. Smellie J. A. T. A natural analogue study of cement-buffered, hyperalkaline groundwaters and their interaction with a repository host rock. Phase III. – SKB Technical Report TR 98-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Stockholm, Sweden, 1998.
 26. N. Fujii et al. Long-term stability of bentonite under hyperalkaline condition shown by natural analogue in the Philippines. 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 24 – 27 September 2017, Davos, Switzerland.
 27. Miller W. et al. (ed.). Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Waste Management Series – Vol. 2. – 316 p. – Amsterdam: Pergamon, 2000.
 28. Safety Fundamentals No SF-1 //Vienna: International Atomic Energy Agency. – 2006.
 29. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-23. Vienna, 2012.
 30. Safety analysis for SFR Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. Updated 2017-04. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2017. – SKB TR-14-01.
 31. NEA. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, 2000.
 32. NEA International FEP Database : Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency, 2014
 33. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. FEP screening and processing. – Posiva Oy, 2014. – №. POSIVA–14-3.
 34. FEP report for the safety assessment SR-PSU. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2014. – SKB TR-14-07.
 35. Аржанников С. Г. и др. К вопросу о позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна и выделении конечных морен MIS 2 на основе бериллиевого датирования (10 Be) ледниковых комплексов // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – №. 11. – С. 1917-1933.
 36. Birkholzer J. T. et al. 25 years of DECOVALEX-Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 122. – p. 103995.
 37. Posiva O. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Models and data for the repository system 2012. Parts 1 and 2. – Posiva Oy, 2013. – №. POSIVA--13-1.
 38. Vahlund F. et al. Model summary report for the safety assessment SR-Site. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2014. – №. SKB-TR--14-11.
 39. Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2. Models, Codes and General Modelling Approach National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 2014. – Nagra Technical Report 14-09.
 40. Safety Options Report – Post-Closure Part. ANDRA: CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000- r 5-0062. 466 p.
 41. SKB R-12-04, Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
 42. SKB TR-10-50, Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

43. Объемное гидрогеологическое моделирование. Проектная документация по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Том 12.2.9. Объемное гидрогеологическое моделирование. СПбО ИГЭ РАН. СПб. 2014.
44. Григорьев Ф. В., Пленкин А. В., Капырин И. В. О необходимости учета конструкции пункта глубинного захоронения РАО при моделировании поступления радионуклидов в дальнюю зону // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3(4). — С. 95—101.
45. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» с изменениями и дополнениями от 26 июля 2019 г.
46. Posiva. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto—Formulation of Radionuclide Release Scenarios 2012.
47. Posiva. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto—FEP Screening and Processing. Eurajoki, Finland: Posiva Oy, 2014.
48. В. Г. Румынин. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1 (1). — С. 42—53.
49. G. Neuvazhaev, A. Rastorguev. Substantiation of the rock massif permeability based on packer tests. E3S Web Conf., 98 (2019) 10004 .
50. International Mechanisms to Support Records, Knowledge and Memory Preservation Over the Short and Medium Term, NEA/RWM/R(2015)2 – 2015 – [Electronic resources] – Access mode: <http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2015/rwm-r2015-2.pdf> – Free. – Paris, France: OECD.
51. Vision Document for the Radioactive Waste Repository Metadata Management (RepMet) Project, NEA/RWM(2014)2 – 2014 – [Electronic resources] – Access mode: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/032/47032433.pdf – Free. – Paris, France: OECD.
52. NEA Report No. 7341, Sourcebook of International Activities Related to the Development of Safety Cases for Deep Geological Repositories, NEA/RWM/R(2013) – 2017. – [Electronic resources] – Access mode: <https://www.oecd-nea.org/rwm/pubs/2017/7341-sourcebook-safety-cases.pdf> – Free. – Paris, France: OECD.
53. Comparative analysis of methods and tools for nuclear knowledge preservation, Technical report No. NG-T-6.7, IAEA Nuclear Energy Series. – International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2011.
54. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С.С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1. – С. 32–41.
55. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов [Текст] / Госкорпорация «Росатом» – Москва, 2018.
56. Shiers J. et al. CERN services for long term data preservation. – 2016. – №. CERN-IT-Note-2016-004.
57. NEA/RWM/R(2018)2. Managing Information and Requirements in Geological Disposal Programmes.
58. International Nuclear Information System. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iaea.org/INIS/> – свободный.
59. A New Approach for Feature, Event, and Process (FEP) Analysis of UNF/HLW Disposal, Freeze, G., S. D. Sevougian, C. Leigh, M. Gross, J. Wolf, J. Mönig, and D. Buhmann, Proceedings of the WM2014 Conference, March 2 – 6, 2014, Phoenix, Arizona USA.
60. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0. NEA/RWM/R(2019)1 – 2019 – [Electronic resources] – Access mode: <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2019/rwm-r2019-1.pdf> – Free. – Paris, France: OECD.
61. Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. – Posiva Oy & Svensk Kärnbränslehantering, 2017. – Posiva SKB Report 01.
62. Miller B., Marcos N. Process report—FEPs and scenarios for a spent fuel repository at Olkiluoto // Posiva report No. 2007-12. – 282 p.
63. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. SKB report TR-11-01. – Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011.
64. TURVA-2012 Synthesis Report. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. – Posiva Oy, 2012. – Posiva 2012-12.
65. Further contract for Finnish repository construction. World Nuclear News, August 2019, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Further-contract-for-Finnish-repository-constructi?feed=feed>
66. France. Sixth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations. – October 2017. – 244 p.

67. French National Plan for the Management of Radioactive Materials and Waste for 2016-2018. – 269 p. <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications/Others-ASN-reports/French-National-Plan-for-the-Management-of-Radioactive-Materials-and-Waste-for-2016-2018>.
68. Foundation stone laid for Finnish encapsulation plant. World Nuclear News, September 2019, URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Foundation-stone-laid-for-Finnish-encapsulation-pl?feed=feed>
69. Strategic Briefing on the Progress on High-level Waste Disposal in NEA Member Countries, 18 April 2019.
70. SKB supplements the application for a final repository, SKB, April 2019, URL: <https://www.skb.com/news/skb-supplements-the-application-for-a-final-repository/>
71. France's Cigeo repository needs work, Nuclear Engineering International, February 2018, URL: <https://www.neimagazine.com/news/newsfrances-cigeo-repository-needs-work-6029843>.
72. Andra Underground Research Laboratory: looking back on 9 years of experiments, ANDRA, URL: <https://international.andra.fr/andra-underground-research-laboratory-looking-back-9-years-experiments>
73. Underground Research Laboratories: Purposes, Evolution of Objectives, and Brief History, Mick Apted and Neil Chapman, US Nuclear Waste Technical Review Board April 24, <https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/meetings/2019/april/aped.pdf?sfvrsn=6>
74. Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2017, Technical Report TR-18-10 February 2019.
75. Морозов В. Н., Татаринцов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3 (4). — С. 16—29.
76. Татаринцов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Татаринцова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы 2019 № 1 (6) С 77—89
77. Татаринцов В. Н., Морозов В. Н., Маневич А. И., Татаринцова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: к программе геомеханических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 101— 118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118.
78. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. – Под общей редакцией И.И.Линге и И.И.Крышева. – М.: «САМ полиграфист», 2015. – 296 с.
79. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. An Interdisciplinary MIT Study. - Massachusetts Institute of Technology, 2011. – 237 p.
80. Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future. Report to the Secretary of Energy. January 2012. – 158 p.
81. United States of America. Six National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and on the Safety of Radioactive Waste Management. October 2017. – 215 p.
82. NUREG–2157. Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel. Final Report, Volumes 1 and 2. – NRC, September 2014. – 687 p.
83. Ruiz-Lopez C., Pescatore C. Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste: An Overview of Regulatory Positions and Issues. – Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2015. – №. NEA/RWM/R(2015)1.
84. Radioactive Waste Management. Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste Considerations for National Geological Disposal Programmes. NEA No. 7085. – Organisation for Economic Co-Operation and Development. –2012. – ISBN 978-92-64-99169-9.