



Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-12

Preprint IBRAE-2017-12

Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. А. Пронь, В. Ю. Коновалов
ЗАРУБЕЖНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ
ОЯТ И РАО.

Часть III. Зарубежный опыт создания и
эксплуатации подземных исследовательских
лабораторий

Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Пронь И. А., Коновалов В. Ю. ЗАРУБЕЖНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ И РАО. ЧАСТЬ III. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2017-12. Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. — 34 с. — Библиогр.: 20 назв. — 72 экз.

Аннотация

Данная работа продолжает серию публикаций, призванных обобщить накопленный за рубежом опыт в сфере создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий и пунктов глубинного геологического захоронения ОЯТ и долгоживущих РАО.

В настоящей работе представлен обзор зарубежного опыта создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ). В первой части описана международная классификация ПИЛ, ключевые задачи исследований в ПИЛ, а также роль, которую выполняют такие исследования на каждом этапе реализации проектов по созданию пунктов глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО. В качестве примера стратегического планирования НИОКР приведена матрица проекта создания глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО, разработанная в США и описывающая ключевые этапы и направления работ на всем протяжении реализации проекта, начиная с предварительных исследований и кончая строительством, эксплуатацией и закрытием ПЗРО. Во второй части работы описана деятельность в четырех зарубежных ПИЛ, сооруженных в гранитных вмещающих формациях (Швейцария, Швеция, Канада, Финляндия).

©ИБРАЭ РАН, 2017

Cebakovskaya N. S., Utkin S. S., Pron I. A., Konovalov V. Yu. INTERNATIONAL EXPERIENCE IN DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF SNF AND RW. PART 3. INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT AND OPERATION OF UNDERGROUND RESEARCH LABORATORIES. Preprint IBRAE-2017-12 — Moscow: Nuclear Safety Institute, 2017 — 34 p. — Bibliogr: 20 items.

Abstract

This paper continues a series of publications summarizing current international experience in the establishment and operation of underground research laboratories and deep geological repositories for spent nuclear fuel and long-lived radioactive waste.

This paper overviews current international experience in the establishment and operation of underground research laboratories (URL). The first part introduces international classification of URL types, the key R&D tasks, as well as the changing role of URLs at different stages during the stepwise repository development. The paper provides an example of R&D strategic planning approach developed in the U.S. — repository development matrix comprising rows and columns, where the rows are key activities and the columns are the phases in the repository development timeline from an early research and development phase to later phases such as construction, operations, and closure. The second part provides a general description of R&D performed in four underground research laboratories in granite formations (Switzerland, Sweden, Canada, Finland).

©Nuclear Safety Institute, 2017

**Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО.
Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных
исследовательских лабораторий**

Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: (495) 955-23-06, эл. почта:ceb@ibrae.ac.ru

И. А. Пронь, В. Ю. Коновалов

ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»
119017, Москва, ул. Пятницкая, д.49А, стр. 2
тел.: (495) 967-94-46, эл. почта:info@noraо.ru

Содержание

Принятые сокращения	4
Введение	4
1 Опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий.....	6
1.1 Международная классификация ПИЛ	7
1.2 Ключевые задачи исследований в ПИЛ.....	8
1.3 Роль исследований, проводимых в ПИЛ, на разных этапах реализации программ по захоронению РАО	8
1.3.1 Роль ПИЛ на этапе анализа концепции захоронения	8
1.3.2 Роль ПИЛ на этапе выбора площадки.....	10
1.3.3 Роль ПИЛ на стадии разработки обоснования безопасности и подготовки заявки на получение лицензии	11
1.3.4 Роль ПИЛ на стадии сооружения пункта захоронения и проведения мониторинга	14
1.3.5 Роль ПИЛ на стадии эксплуатации пункта захоронения и ведения мониторинга.....	14
1.3.6 Роль ПИЛ на стадии закрытия пункта захоронения.....	15
1.3.7 Роль ПИЛ в разработке новых технологий в области захоронения РАО	15
1.4 Матрица проекта разработки пункта захоронения ОЯТ и ВАО (США).....	16
2 Примеры зарубежных ПИЛ и НИОКР в гранитных формациях.....	23
2.1 Швейцария — ПИЛ Гримзель	23
2.2 Швеция — ПИЛ Аспё.....	25
2.3 Канада — ПИЛ АЕСL	27
2.4 Финляндия — ПИЛ ONKALO.....	29
Заключение	31
Литература.....	34

Принятые сокращения

- KBS-3 — Концепция глубинного геологического захоронения ОЯТ, разработанная в Швеции
Nagra — Национальное кооперативное общество по захоронению РАО (Швейцария)
ONKALO — Объект для характеристики пород в Финляндии (подземная исследовательская лаборатория конкретного назначения)
Posiva Oy — Компания, ответственная за реализацию проекта глубинного геологического захоронения ОЯТ в Финляндии
SFOE — Федеральное энергетическое управление Швейцарии
SKB — Шведская компания по обращению с ОЯТ и РАО
SSM — Управление по ядерной безопасности (Швеция)
STUK — Управление по радиационной и ядерной безопасности (Швеция)
АЭС — Атомная электростанция
ВАО — Высокоактивные отходы
ДЖ НСАО — Долгоживущие низко- и среднеактивные отходы
ЗСО — Зона структурного ослабления (возникает вследствие проведения горнопроходческих работ)
МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии
НАО — Низкоактивные отходы
НИОКР — Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ОВОС — Оценка воздействия на окружающую среду
ОСП — Особенности, события, процессы (англ. Features, events and processes, FEPs)
ОЯТ — Отработавшее ядерное топливо
ПЗРО — Пункт захоронения радиоактивных отходов
ПИЛ — Подземная исследовательская лаборатория
ПИЛ ОН — Подземная исследовательская лаборатория общего назначения
ПИЛ КН — Подземная исследовательская лаборатория конкретного назначения
РАО — Радиоактивные отходы
САО — Среднеактивные отходы

Введение

Зарубежный опыт показывает, что исследования в ПИЛ проводятся во всех странах, запустивших собственные программы по созданию пунктов геологического захоронения. Некоторые страны располагают сразу несколькими подземными лабораториями, размещенными в разных типах геологических формаций. Например, во Франции и в Японии в разные периоды времени функционировало по четыре ПИЛ (французские ПИЛ: Vure — с 2004 года, глины; Tournemire — с 1990 года, глины; Amelie — с 1986 по 1992 год, соль; Fanaу-Augeres — с 1980 по 1990 год, гранит; японские ПИЛ: Мицунами — с 2004 года, гранит; Хоронобе — с 2005 года, осадочные породы; Тоно — с 1986 по 2004 год, Камаиши — с 1988 по 1998 год, осадочные породы (табл. 1)).

Всего несколько стран до сих пор не обладают собственными ПИЛ: Великобритания, Нидерланды, Испания. Связано это в первую очередь с тем, что ввод в эксплуатацию пунктов геологического захоронения здесь должен состояться лишь через несколько десятков лет: в Великобритании пункт захоронения ВАО/ОЯТ планируется ввести в эксплуатацию не раньше 2075 года; в Испании запуск программы по поиску площадки для строительства пункта захоронения намечен на 2085 год; в Нидерландах пункт захоронения НАО, САО, ВАО будет создан не раньше 2130 года. Тем не менее представители испанского национального агентства по обращению с РАО ENRESA принимают активное участие в исследованиях, проводимых в швейцарской международной лаборатории HADES, наравне с исследователями из Франции, Германии, Чехии, Японии, США и Швеции.

Среди всех стран, реализующих программы по созданию пунктов геологического захоронения ВАО и ОЯТ, наибольшего прогресса достигла Финляндия. В ноябре 2015 года финский регулятор STUK выдал оператору площадки компании Posiva Oy лицензию на сооружение пункта захоронения. При этом уже имеющаяся ПИЛ ONKALO станет частью самого пункта захоронения. 25 ноября 2016 года STUK подтвердил готовность Posiva Oy к началу строительных работ на площадке, а в декабре 2016 года на площадке стартовали работы по проходке нескольких главных тоннелей будущего пункта захоронения, а также отходящих от них камер, предназначенных для вертикального захоронения канистр с ОЯТ.

Таблица 1. Сводная информация о зарубежных подземных исследовательских лабораториях

Страна	ПИЛ	Вид*	Глубина	Характер НИОКР**	← 1960 гг.	← 1970 гг.	← 1980 гг.	← 1990 гг.	← 2000 гг.	← 2010 гг.
Бельгия	HADES	ОН/СС	230 м	ТХГМР + Д						
Венгрия	Pécs	КН/СВ	1000 м	ХА						
Германия	Asse	ОН/СВ	490-950 м	ТХГМР + Д						
	Gorleben	КН/СС	840 м	ХА						
	Konrad	КН/СВ	800-1300 м	ХГМ						
	Morsleben (ERAM)	КН/СВ	500 м	Д						
Индия	Kolar Gold Fields	ОН/СВ	1 000 м	ТМ+Д						
Канада	AECL	ОН/СС	240-420 м	ТХГМ						
США	Climax	ОН/СВ	300 м	Д						
	G-Tunnel	ОН/СВ	420 м	ТХМ						
	Busted Butte	ОН/СС	420 м	ХГМ						
	WIPP	КН/СС	655 м	ТХГМР + Д						
	ESF	КН/СС	300 м	ТХГМ + Д						
Финляндия	ONKALO	КН/СС	500 м	ТХГМР + Д						
Франция	Fanay-Augeres	ОН/СВ	-	ТХГМ						
	Amelie	ОН/СВ	-	ТМ + Д						
	Tournemire RT	ОН/СВ	250 м	ХГМ						
	Bure	КН/СС	500 м	ТХГМР + Д						
Швейцария	Grimsel TS	ОН/СВ	450 м	ТХГМ						
	Mont Terri URL	ОН/СВ	230 м	ТХГМ						
Швеция	Aspo HRL	ОН/СС	450 м	ТХГМ + Д						
	Stripa	ОН/СВ	410 м	ТХГМ						
Япония	Tono	ОН/СВ	130 м	ХГМ						
	Kamaishi	ОН/СВ	700 м	ХА						
	MIU	ОН/СВ	300 м	сооружается						
	Honorobe	ОН/СС	250 м	ТХГМР						
Республика Корея	KURT	ОН/СС	90 м	ТХГМ + Д						

Легенда

- — соли
- — граниты
- — туф
- ▨ — пластичные глины
- ▨ — аргиллиты
- ▨ — другие осадочные породы

* ОН — ПИЛ общего назначения, КН — ПИЛ конкретного назначения, СС — специально сооруженная ПИЛ, СВ — ПИЛ в существующей выработке;

** Т — тепловые, Х — химические, Г — гидрогеологические, М — механические, Р — радиационные, Д — демонстрационные, ХА — характеристика

В России, как и в Финляндии, планируется создание ПИЛ, которая впоследствии будет являться частью самого пункта захоронения (согласно международной классификации данная ПИЛ относится к категории ПИЛ конкретного назначения).

Руководство по безопасности МАГАТЭ SSG-14 «Геологические пункты захоронения радиоактивных отходов» содержит следующее требование к проектированию и сооружению ПИЛ, создаваемых для проведения исследований на конкретной площадке, где в будущем может быть построен пункт геологического захоронения:

6.42. «...Если по плану подземная лаборатория или экспериментальная установка должна стать частью самого пункта захоронения, то следует предоставить всю необходимую документацию, демонстрирующую тот факт, что сооружение и эксплуатация установки по характеристикам будут удовлетворять нормативным требованиям, действующим в отношении самого пункта захоронения».

Таким образом, в Финляндии ПИЛ является частью будущего пункта захоронения. В этой связи сооружение объекта ONKALO фактически означало начало работ по сооружению самого пункта захоронения, так как тоннели доступа, шахты и подземные сооружения ПИЛ в дальнейшем будут использоваться непосредственно для выполнения операций по захоронению отходов. Тем не менее для сооружения этой части могильника получения строительной лицензии не требовалось. Вместо этого Правительство ратифицировало Принципиальное решение, санкционирующее дальнейшую реализацию программы по разработке пункта захоронения ОЯТ в Олкилуото, предполагающую в качестве следующего этапа создание на выбранной площадке объекта для характеристики пород.

Финский регулятор заранее определил перечень необходимых для подачи документов, которые оператор должен был направить STUK для рассмотрения и утверждения, в том числе: предварительный отчет по обоснованию безопасности, отчет по классификации безопасности систем и элементов установки, а также данные о строительном подрядчике, в том числе информацию о квалификации персонала, перечень нормативов, требований и стандартов, которыми собирается руководствоваться подрядчик при проведении работ, описание системы управления безопасностью и качеством, проектные данные, чертежи, конструкторскую документацию, график проведения плановых проверок и т.п. Кроме того, регулятор обязал оператора предоставить информацию о том, каким образом компания планирует осуществлять информационный обмен со STUK в процессе строительства ПИЛ. На основании этого документа регулятор мог спланировать и организовать проведение надзорных мероприятий, которые были бы надлежащим образом синхронизованы с графиком проведения строительных работ на площадке, обеспечив тем самым своевременный обмен информацией, например, в случае возникновения непредвиденного развития событий при проведении работ под землей. В этот документ вошла следующая информация: график проведения строительных работ, промежуточные отчеты о ходе работ, результаты проведенных исследований, а также сведения о запланированных во время выполнения строительных работ исследованиях. Все эти данные STUK оценивал с привлечением сторонних экспертов, а результаты таких экспертиз, а также принятые на их основе решения, включая обоснования, документировались и публиковались в открытом доступе.

Таким образом, на момент окончания разработки проекта ПИЛ имелись следующие материалы:

- принципиальное решение, ратифицированное Правительством, санкционирующее реализацию программы по разработке пункта захоронения ОЯТ в Олкилуото;
- утвержденная концепция захоронения KBS^{**} (не была окончательно утверждена лишь схема размещения упаковок — горизонтальное или вертикальное захоронение);
- предварительный проект пункта захоронения, основывающийся на концепции KBS;
- предварительный отчет по обоснованию безопасности;
- основные чертежи ПИЛ ONKALO, уровень детализации которых достаточен для получения разрешения на проведение строительных работ (т.е. описание места размещения установки, а также итогового состояния систем и сооружений);
- подробное описание программы НИОКР, запланированных в ПИЛ ONKALO;
- описание полного перечня исходных условий на площадке (климат, биосфера, топография, геология коренных пород, геомеханика, гидрогеология, гидрогеохимия);
- программа мониторинга потенциальных воздействий, оказываемых установкой в ходе сооружения и эксплуатации объекта ONKALO;
- перечень и описание основных нарушений, которые могут потенциально возникнуть в ходе сооружения установки (особое внимание уделяется тем, что могут повлиять на обеспечение безопасности в долгосрочной перспективе).

Обобщение опыта, накопленного Финляндией, как и опыта множества других стран, представленных в данной публикации, является важной составляющей работы специалистов, исследующих различные аспекты вопроса глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО во всем мире, а изучение опыта — неотъемлемое условие достижения хороших результатов в любом деле.

1 Опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий

За последние 40 лет в мире было создано множество подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ), предназначенных для проведения работ по характеристике, испытаниям и демонстрации практической осуществимости различных концепций глубинного геологического захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива [1]. Эти объекты сыграли ключевую роль в разработке технологий, методик и технических основ, требующихся для обеспечения безопасной изоляции РАО в глубинных геологических формациях в течение очень продолжительных периодов времени. Массив знаний, формируемый в ходе такой исследовательской деятельности, облегчает и содействует разработке всех основных элементов программ по созданию пунктов захоронения и соответствующих обоснований безопасности, включая этапы выбора и характеристики площадки, проектирования, оценки безопасности,

* Все элементы и системы установки классифицируются с точки зрения их значимости для обеспечения безопасности

** Стратегия обращения с ОЯТ, разработанная в Швеции: захоронение ОЯТ в кристаллических породах на глубине с использованием буфера из бентонитовой глины

лицензирования, сооружения, эксплуатации и закрытия пункта захоронения (рис. 1). Помимо этого, деятельность в ПИЛ играет ключевую роль и в не столь технических, но не менее важных элементах обоснования безопасности как взаимодействие с общественностью, укрепление общественного доверия, международное сотрудничество и обучение персонала.

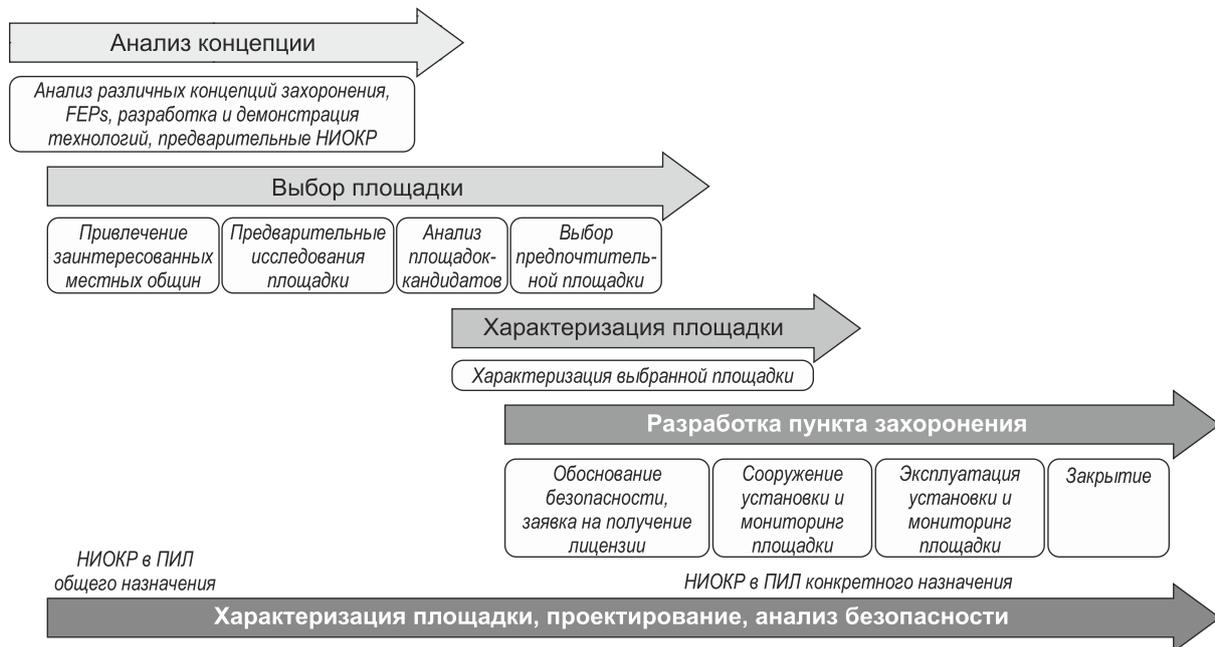


Рисунок 1 — Хронология реализации программы по созданию пункта геологического захоронения РАО и связанных с ней НИОКР

1.1 Международная классификация ПИЛ

Согласно международной классификации, различают два вида ПИЛ: ПИЛ общего назначения (англ. generic URL) и ПИЛ конкретного назначения (англ. site-specific URL) (рис. 2, табл. 2) [2].



Рисунок 2 — Основные виды ПИЛ

ПИЛ общего назначения — это установки, расположенные на площадках, где никогда не будут захораниваться радиоактивные отходы, используемые для проведения НИОКР общей направленности. На основании результатов таких НИОКР может быть принято решение о сооружении пункта захоронения в сходных геологических условиях. Такие лаборатории используют для исследования процессов и разработки, испытания и демонстрации технологий, методов и технических приемов, необходимых при выборе площадки для строительства пункта захоронения, его сооружении, эксплуатации и закрытии. Кроме того, ПИЛ могут использоваться для обучения технического персонала, а результаты проведенных здесь исследований способствуют улучшению общего понимания проекта и повышению уверенности в возможности обеспечения безопасности захоронения РАО в рамках процесса взаимодействия с заинтересованными сторонами.

ПИЛ конкретного назначения используют для схожих целей, но в отличие от ПИЛ общего назначения их сооружают на площадках, потенциально пригодных для строительства пунктов захоронения. Таким

образом, в рамках таких НИОКР могут быть получены данные, которые в будущем могут использоваться для подтверждения пригодности конкретной площадки для строительства пункта захоронения, а также необходимые при его проектировании, строительстве и оценке безопасности.

1.2 Ключевые задачи исследований в ПИЛ

В целом международное сообщество выделяет следующие группы ключевых задач, которые позволяют проводить исследования в ПИЛ [1]:

- Исследования в ПИЛ позволяют испытывать и совершенствовать оборудование и методику характеристики различных видов горных пород. Опыт эксплуатации многочисленных ПИЛ общего назначения показал, насколько полезно проведение такой работы. Так, например, специалистам научных организаций и ведомств, ответственных за реализацию проекта захоронения, результаты исследований в ПИЛ общего назначения помогают в разработке, совершенствовании, оптимизации и испытании необходимых технологий и технических приемов до начала работ на площадке реального пункта захоронения, а для экспертов регулирующих органов — ПИЛ служит плацдармом для наработки собственных компетенций в данной области.
- ПИЛ позволяет провести целый ряд работ по характеристике вмещающих пород, выполняющих функции геологического барьера, а также оценить нарушения, провоцируемые проведением проходческих работ, тепловой нагрузкой, процессами газовыделения и химическими реакциями.
- В ПИЛ может быть испытана система инженерных барьеров безопасности, а также оценены показатели функционирования различных элементов системы захоронения.
- Исследования в ПИЛ призваны решить множество разноплановых задач, что позволяет целому ряду ответственных организаций и заинтересованных сторон достигнуть поставленных целей в рамках реализации национальной программы по захоронению РАО.
- Сооружение ПИЛ открывает возможности для испытания и оптимизации различных методов проведения горнопроходческих работ, укрепления и герметизации подземных выработок, является важнейшим шагом на пути планирования, проектирования и разработки пункта захоронения, оценки безопасности и работоспособности системы захоронения.

Еще одним немаловажным преимуществом проведения исследований в ПИЛ, которое следует выделить отдельно, является то, что такая деятельность позволяет укрепить доверие заинтересованных сторон, в том числе широкой общественности, к разработчикам проекта и повысить уверенность в безопасности предлагаемой концепции захоронения РАО в глубинных геологических формациях.

1.3 Роль исследований, проводимых в ПИЛ, на разных этапах реализации программ по захоронению РАО

Значительные сроки реализации программ по геологическому захоронению РАО (многие десятилетия) обуславливают необходимость применения гибкого и адаптивного подхода, что продиктовано не только появлением все более совершенных технологий, но и высокой динамичностью социальных и политических процессов. В общем, в хронологии любого проекта по созданию подобных установок можно выделить четыре основных этапа (см. рис. 1): анализ концепции, выбор площадки, характеристика площадки и разработка пункта захоронения. Как видно из рисунка, в рамках каждого этапа можно выделить отдельные стадии, причем зачастую отдельные этапы и стадии могут частично совмещаться по времени реализации. Следует отметить, что хронология, представленная на рис. 1, может корректироваться в зависимости от контекста национальной политики обращения с РАО и ОЯТ в конкретной стране и конкретных задач, ставящихся на национальном уровне. В целом опыт большинства стран показывает, что продолжительность этапов, предшествующих непосредственному началу работ по сооружению пункта захоронения, может составлять десятки лет, сроки строительных работ, как правило, не превышают десяти лет, а продолжительность периода эксплуатации в значительной степени определяется объемом захораниваемых отходов и может длиться не один десяток лет. На каждом этапе программы роль исследований, проводимых в ПИЛ, будет различаться, а приоритизация НИОКР в рамках процесса стратегического планирования всего комплекса работ по созданию ПЗРО осуществляется в контексте трех основных процессов: характеристика площадки, проектирование установки и анализ безопасности. Эти процессы формируют итеративную основу, задающую направления исследовательской деятельности на различных этапах реализации программы захоронения.

1.3.1 Роль ПИЛ на этапе анализа концепции захоронения

Большая часть работ, проводимых на этапе анализа концепции, носит достаточно общий характер и в основном призвана улучшить общее представление о предлагаемых концепциях захоронения и связан-

ных с ними FEPs (англ. features, events and processes (особенности, события, процессы)), а также содействовать разработке, анализу и демонстрации практической осуществимости и безопасности соответствующих технологий и методов. Кроме того, результаты НИОКР на этом этапе служат основой для принятия взвешенных решений и формирования обоснованных суждений об альтернативных концепциях и технологиях, внедрение которых может потребоваться по мере продвижения к следующим этапам реализации программы захоронения. Полученные на этом этапе НИОКР данные также используют в процессе коммуникации с заинтересованными сторонами на этапе выбора площадки, что способствует повышению уверенности заинтересованных сторон в возможности обеспечения безопасности захоронения РАО за счет применения предлагаемой концепции захоронения и связанных с ней технологий.

На этом этапе исследования могут проводиться сразу на нескольких площадках, сложенных разными типами вмещающих пород. Так, например, в рамках швейцарской программы по захоронению РАО действуют две ПИЛ: одна в гранитных формациях (Гримзель), другая — в глиняных (Монт-Терри). Такая же ситуация сложилась и в Японии, где на сегодняшний день действует одна лаборатория по изучению кристаллических пород (Мицунами) и еще одна ПИЛ была построена в осадочных породах (Хоронобе) [3]. Эти две ПИЛ позволяют решить целый ряд задач, в том числе:

- подтвердить целесообразность применения определенных технологий захоронения, методов исследования площадки, методов проведения оценки безопасности;
- получить более детальное представление о каждом типе вмещающих пород;
- обеспечить возможность для обучения технического персонала;
- содействовать развитию правильного представления общественности о безопасности реализуемых концепций геологического захоронения РАО.

Этот этап НИОКР также предусматривает проведение работ по анализу и оценке различных концепций захоронения. Например, в настоящее время в рамках американской программы захоронения ВАО и ОЯТ оценивается целесообразность их скважинного захоронения в кристаллических породах. В данном случае сооружение опытной скважины в целях демонстрации технической осуществимости и безопасности было признано более рациональным шагом, чем сооружение полноценной ПИЛ. Вообще технология скважинного захоронения ВАО изучается американскими специалистами еще с 1957 года. Следует отметить, что возможности для повторного извлечения уже захороненных отходов данная технология не предусматривает. Между тем на проект по исследованию возможности скважинного захоронения РАО, рассчитанный на пять лет, Министерство энергетики США собирается потратить около 35 млн долларов [4].

С другой стороны, для многих стран создание собственной ПИЛ на этом этапе реализации программ по глубинному захоронению РАО может оказаться чрезвычайно затратным мероприятием. Вместо этого такие страны могут использовать уже имеющиеся знания, накопленные в ходе многочисленных НИОКР, проводимых в подземных лабораториях по всему миру. Таким образом, с точки зрения любой страны, не обладающей собственной ПИЛ, любая зарубежная ПИЛ: будь то ПИЛ ОН или ПИЛ КН, будет являться ПИЛ общего назначения, а для определения потребности в сооружении собственной ПИЛ общего назначения прежде всего потребуются тщательным образом изучить и оценить уже имеющийся опыт.

Для некоторых стран даже в случае обнаружения какой-либо важной недостающей информации на данном этапе проведение совместных исследований может оказаться более экономически целесообразным шагом по сравнению с сооружением собственной ПИЛ. Однако следует помнить о том, что проведение исследований в собственной ПИЛ общего назначения обладает целым рядом несомненных преимуществ. Во-первых, такая деятельность позволяет наработать собственный опыт и развить технические компетенции, которые потребуются при создании пункта геологического захоронения, во-вторых, облегчает коммуникацию с заинтересованными сторонами и, наконец, служит отправной точкой в деле привлечения широкой общественности к процессу разработки установки [5].

Исследования, проведенные в ПИЛ общего назначения, сыграли важную роль в анализе и демонстрации безопасности и технической осуществимости различных концепций захоронения и проектных решений, исследовании особенностей, событий и процессов (FEPs), а также количественной оценке масштабных взаимосвязанных процессов, результаты которой были положены в основу работ по созданию и валидации моделей. Примером реализации перечисленных функций является проект «Полномасштабные исследования поведения инженерных барьеров», реализованный в швейцарской ПИЛ Монт-Терри, по изучению поведения буфера из бентонита и вмещающей среды из глины на этапе интенсивного тепловыделения, наблюдаемого сразу после размещения отходов в пункте захоронения. Этот проект позволил проанализировать масштабные процессы массо- и теплопереноса, оценить тепловую деформацию и высыхание буфера и вмещающих пород, изменения давления поровой воды в ближней зоне и процессы донасыщения в буфере и ближней зоне вмещающих пород. Другой пример — исследования в швейцарской лаборатории Гримзель, расположенной в слаботрециноватых гранитных формациях, где изучается долгосрочная эволюция диффузионных процессов (LTD Experiment).

Хотя некоторые аспекты этих и других исследований могут определяться особенностями конкретной площадки, в большинстве своем преобладающие процессы для глиняных и гранитных формаций будут носить общий характер для каждого типа вмещающей среды. Результаты таких НИОКР могут использоваться для количественной оценки FERs, анализа различных концепций и проектных решений, разработки, испытаний и валидации моделей. Полученные знания находят применение в процессе принятия решений по проведению НИОКР в других сходных вмещающих средах, а также могут служить хорошей отправной точкой для принятия взвешенных решений на этапе выбора площадки и в рамках проведения НИОКР на конкретных площадках, что позволит уделить больше внимания характеристике выбранной площадки и оценке ее пригодности для сооружения пункта захоронения.

Еще одним направлением работ, для которого важны результаты исследований в ПИЛ общего назначения, может стать совершенствование конструкции вспомогательных систем и улучшения качества технологий и методов проведения работ по мониторингу и характеристике, например, за счет сравнения результатов замеров, проведенных с помощью обычных исследований на поверхности, с данными, собранными в ходе исследований под землей.

1.3.2 Роль ПИЛ на этапе выбора площадки

Согласно принятой международной практике этап выбора площадки начинается с разработки основополагающих критериев отбора площадок, потенциально пригодных для сооружения безопасного пункта захоронения, а также первичного выявления и оценки вмещающих пород, способных удовлетворить большинству выдвинутых критериев. Затем выделяют те регионы страны, местные жители которых проявляют интерес к размещению пункта захоронения. После предварительного скрининга предложенных площадок отсеивают очевидно непригодные для сооружения пункта захоронения (такой подход применяется в большинстве стран, реализующих программы по захоронению РАО, в том числе в Швейцарии, Канаде, Швеции, Финляндии и Японии). Если местное население отобранных на этом этапе площадок дает свое согласие на дальнейшее сотрудничество, на этих площадках проводят предварительные более детальные исследования с использованием доступных геологических сведений и данных по характеристике. Этот процесс носит итерационный характер, что предполагает постепенное повышение уровня детализации информации и постоянный обмен информацией с различными заинтересованными сторонами (лицами, ответственными за принятие решений на местном уровне; широкой общественностью, государственными учреждениями и ведомствами и т.п.). Задача этого этапа — оценка пригодности площадки для строительства установки, способной обеспечить долгосрочную безопасность глубинного геологического захоронения РАО, а также доведение собранной информации до сведения заинтересованных сторон с решением всех вопросов, вызывающих их беспокойство.

Итерационный процесс оценки продолжается до тех пор, пока не будет выбрана одна или несколько наиболее предпочтительных площадок для строительства пункта захоронения. Конечная стадия до момента утверждения таких площадок, как правило, предполагает проведение исследований не только на поверхности, но и под землей, разработку концептуального проекта установки, а также проведение предварительной оценки безопасности. В свою очередь, данный этап ознаменовывает переход от исследований в ПИЛ общего назначения к исследовательской работе в ПИЛ конкретного назначения, позволяющей получить количественную оценку характеристик каждой отдельной площадки, результаты которой используют для сравнения площадок по перечню основополагающих критериев. Несмотря на это, в ПИЛ общего назначения все еще может продолжаться проведение крупномасштабных экспериментов и испытаний, направленных на проработку отдельных аспектов обоснования безопасности, включая демонстрацию технической осуществимости и безопасности технологий размещения отходов, сооружения и эксплуатации установки, углубление понимания FERs, испытания и валидацию моделей, разработку и оценку целесообразности и качества методик проведения полевых исследований.

Следует отметить, что законодательство некоторых стран предусматривает возможность для того, чтобы в дальнейшем после принятия окончательного решения о месте размещения пункта захоронения, ПИЛ конкретного назначения стала непосредственно частью самой установки для захоронения (Финляндия, Швейцария).

На этапе выбора площадки ключевыми направлениями деятельности в ПИЛ является:

- детальная характеристика площадок-кандидатов и окружающей среды, включая количественную оценку неопределенностей, связанных с данными, моделями и сценариями, по окончании каждой стадии или этапа;
- совершенствование и оптимизация методик проведения испытаний, осуществления горнопроходческих работ и эксплуатации пункта захоронения применительно к конкретной вмещающей среде;
- анализ проектных решений системы инженерных барьеров безопасности с точки зрения их пригодности для практического внедрения на площадках-кандидатах;
- разработка и детализация оценки безопасности и моделей процессов для каждой площадки-кандидата;

- поддержание надлежащего уровня знаний в области геологического захоронения РАО и уровня компетенции персонала;
- повышение уверенности заинтересованных сторон в безопасности концепции геологического захоронения в целом и возможности обеспечения безопасности при реализации проекта на конкретной площадке в частности, а также доверия к оператору и разработчику проекта.

1.3.3 Роль ПИЛ на стадии разработки обоснования безопасности и подготовки заявки на получение лицензии

Этап разработки ПЗРО состоит из четырех основных стадий:

- подготовка и передача на рассмотрение обоснования безопасности и заявки на получение лицензии на сооружение пункта захоронения;
- сооружение пункта захоронения и мониторинг площадки;
- эксплуатация пункта захоронения (включая подачу заявки на получение эксплуатационной лицензии) и мониторинг площадки;
- закрытие пункта захоронения.

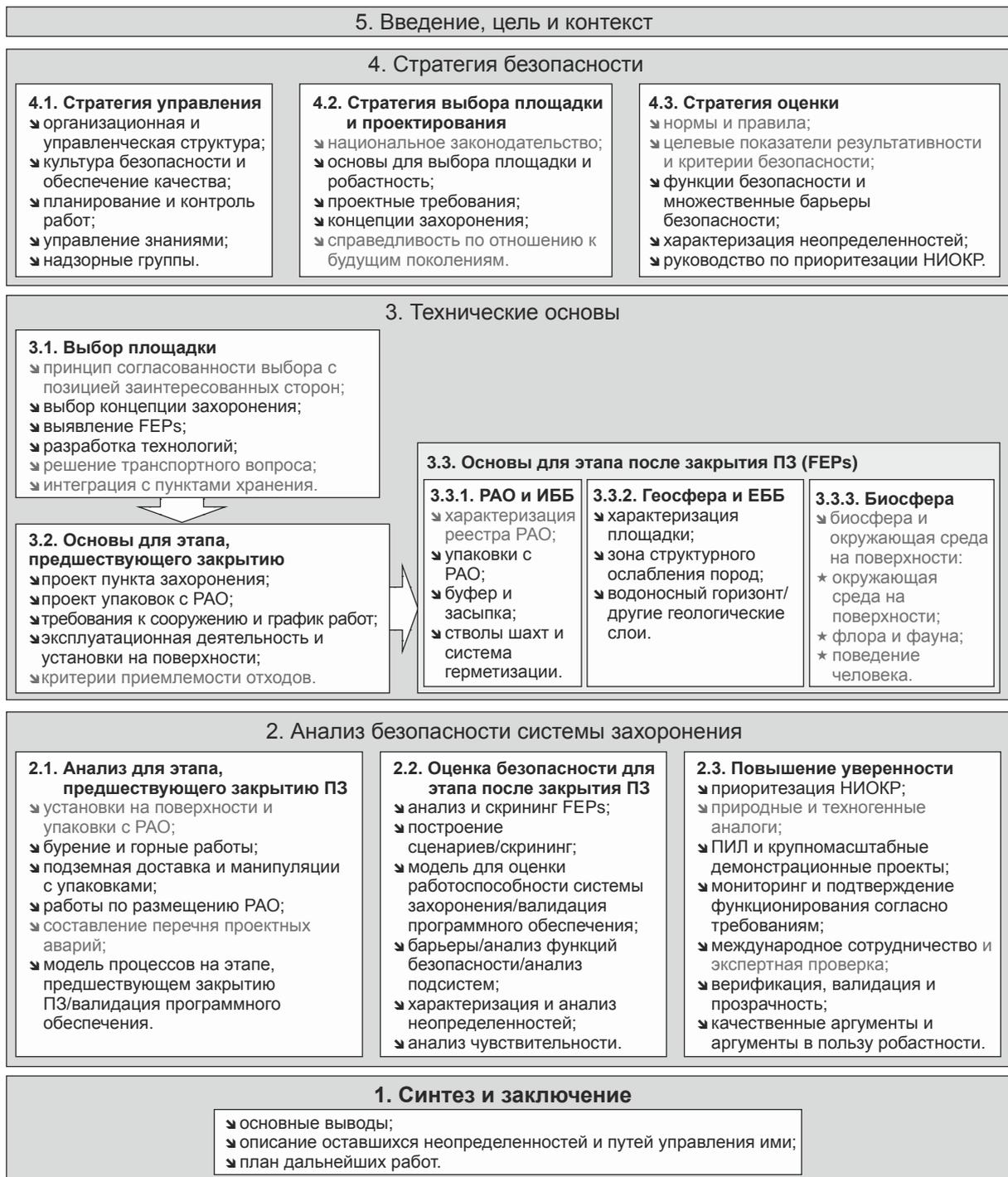
На первой стадии, когда уровень обеспечения безопасности геологического захоронения РАО, продемонстрированный в обосновании безопасности, соответствует уровню ожиданий заинтересованных сторон, разработчик пункта захоронения передает заявку на получение лицензии на сооружение ПЗРО на рассмотрение регулирующему органу. Обоснование безопасности на этом этапе включает громадный массив документов и материалов, содержащих всеобъемлющий объем свидетельств, результатов анализа, а также качественных и количественных аргументов, собранных с момента начала поиска площадки для строительства пункта захоронения [6]. Заявка на получение лицензии включает в себя описание аргументов из обоснования безопасности, свидетельствующих о том, что пункт захоронения удовлетворяет всем требованиям, нормам и критериям.

Некоторые из наиболее важных элементов обоснования безопасности, подлежащие документальному оформлению, показаны на рис. 3. Следует отметить, что полевые исследования в ПИЛ играют ключевую роль практически для всех элементов обоснования безопасности. Некоторые элементы, для которых исследования в ПИЛ играют не столь значимую роль, выделены на рисунке серым цветом. Несмотря на это, даже для этих элементов исследования в ПИЛ могут стать источником получения ценных сведений. Большая часть технических аспектов, связанных с исследовательской деятельностью в ПИЛ (например, сбор данных и анализ процессов), имеет отношение к эволюции FEPs на этапе после закрытия пункта захоронения. Как видно из рис. 3, выделяют три категории таких FEPs: FEPs, связанные с отходами и инженерными барьерами; FEPs, имеющие отношение к системе естественных барьеров безопасности; FEPs, связанные с биосферными процессами [7].

Этап получения лицензии предполагает существенную итерацию и отстройку обратной связи между работами по характеристике площадки, проектированию пункта захоронения и анализу безопасности до тех пор, пока разработчик проекта и заинтересованные стороны не будут в достаточной степени уверены в возможности обеспечения безопасности захоронения РАО.

Три главных процесса (см. рис. 1), составляющих основу приоритизации НИОКР, проводимых как на поверхности, так и под землей, охватывают и разъясняют большую часть элементов обоснования безопасности, показанных на рис. 3. Основная задача работ по характеристике сводится к сбору достаточного объема данных по рассматриваемой площадке для: (1) формирования всеобъемлющего и достоверного описания геологических, гидрогеологических, геохимических и геомеханических условий площадки; (2) проектирования пункта захоронения; (3) моделирования и анализа FEPs; (4) характеристики и уменьшения неопределенностей, имеющих отношение к важным сведениям и FEPs; (5) оценки безопасности.

При проектировании пункта захоронения основная цель работ заключается в создании такой системы захоронения, которая в сочетании с геологической системой была бы способна удовлетворить всем требованиям безопасности, в том числе таким основополагающим, как обеспечение удержания и изоляции РАО. Ключевой задачей работ по анализу безопасности, включающему как оценку безопасности для этапа, предшествующего закрытию установки, так и оценку безопасности для этапа после закрытия пункта захоронения, является формирование количественных оценок потенциального радиологического воздействия, а также оценка робастности системы и ее способности удовлетворять требованиям безопасности. Помимо этого, анализ безопасности позволяет снабжать программу по характеристике площадки данными, необходимыми в целях минимизации неопределенностей, связанных с оценками показателей функционирования системы захоронения, а также сведениями, необходимыми для внесения изменений в программу проектирования, способными минимизировать риски как в период до закрытия, так и после закрытия установки для захоронения.



2.1. Анализ для этапа, предшествующего закрытию ПЗ

- установки на поверхности и упаковки с РАО;
- бурение и горные работы;
- подземная доставка и манипуляции с упаковками;
- работы по размещению РАО;
- составление перечня проектных аварий;
- модель процессов на этапе, предшествующем закрытию ПЗ/валидация программного обеспечения.

2.2. Оценка безопасности для этапа после закрытия ПЗ

- анализ и скрининг FEPs;
- построение сценариев/скрининг;
- модель для оценки работоспособности системы захоронения/валидация программного обеспечения;
- барьеры/анализ функций безопасности/анализ подсистем;
- характеристика и анализ неопределенностей;
- анализ чувствительности.

2.3. Повышение уверенности

- приоритизация НИОКР;
- природные и техногенные аналоги;
- ПИЛ и крупномасштабные демонстрационные проекты;
- мониторинг и подтверждение функционирования согласно требованиям;
- международное сотрудничество и экспертная проверка;
- верификация, валидация и прозрачность;
- качественные аргументы и аргументы в пользу робастности.

- основные выводы;
- описание оставшихся неопределенностей и путей управления ими;
- план дальнейших работ.

Рисунок 3 — Ключевые элементы обоснования безопасности для пункта глубинного геологического захоронения РАО

Итерационный характер процедуры рассмотрения заявки на получение лицензии обусловлен требованием, предъявляемым к системе инженерных и естественных барьеров безопасности, которые совместно должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к производительности системы захоронения в целом. Количественная оценка взаимного влияния системы инженерных и естественных барьеров безопасности и их совместного поведения должна содержаться в оценке безопасности и связанном с ней анализе чувствительности, в которых описывают ключевые параметры, процессы и характеристики (и связанные с ними неопределенности), в наибольшей степени определяющие комплексное поведение этих систем. Результаты количественной оценки чувствительности служат отправной точкой для следующего

этапа НИОКР, направленного на снижение наиболее значимых неопределенностей, связанных с поведением спроектированного пункта захоронения и с процессами природного происхождения.

С точки зрения мировой практики данный подход к разработке обоснования безопасности был полностью перенят шведской компанией SKB. В этой стране его разработка велась в соответствии с последовательным многоступенчатым процессом, который может быть условно разделен на 11 основных этапов (рис. 4).

Конструкторская документация	Описание площадки	Результаты НИОКР	Результаты более ранних исследований	Базы данных FEPs
1. Анализ FEPs (характеристик, событий, процессов): <ul style="list-style-type: none"> ➤ исходное состояние; ➤ внутренние процессы; ➤ внешние факторы. 				
2а. Описание исходного состояния площадки	2б. Описание исходного состояния системы инженерных барьеров безопасности	2с. Описание схемы размещения элементов системы захоронения (с учетом адаптации к особенностям площадки)		
3. Описание внешних условий <ul style="list-style-type: none"> ➤ климат и вопросы, связанные с климатом; ➤ будущая деятельность человека. 		4. Систематизация материалов из отчетов по процессам с предписаниями относительно учета различных процессов, в том числе применительно к моделированию		
5. Определение функций безопасностей и соответствующих показателей: <ul style="list-style-type: none"> ➤ функции безопасности системы; ➤ поддающиеся измерению/расчету показатели функций безопасности; ➤ критерии для показателей функций безопасности. 			6. Систематизация входных данных	
7. Определение референтного сценария эволюции и его анализ: Исследование эволюции пункта захоронения для: <ul style="list-style-type: none"> ➤ ситуации повторения последнего ледникового цикла продолжительностью 120 000 лет; ➤ ситуации глобального потепления, вызванного повышением концентраций парниковых газов в атмосфере. 				
8. Выбор сценариев на основании: <ul style="list-style-type: none"> ➤ результатов анализа референтного сценария; ➤ результатов анализа FEPs; ➤ функций безопасности. 			9. Анализ отобранных сценариев на предмет сохранения функций: <ul style="list-style-type: none"> ➤ удержания радионуклидов; ➤ задержки радионуклидов. 	
10. Дополнительный анализ: <ul style="list-style-type: none"> ➤ сценариев, связанных с будущей деятельностью человека; ➤ технологической оптимизации и применения наиболее передовых технологий; ➤ значимости исключенных из рассмотрения FEPs; ➤ для сроков, превышающих 1 миллион лет; ➤ природных аналогов. 			11. Выводы: <ul style="list-style-type: none"> ➤ соблюдение нормативных требований; ➤ применение результатов оценки в рамках оптимизации проекта пункта захоронения, программы НИОКР и исследований площадки. 	

Рисунок 4 — Этапы процедуры обоснования безопасности (Швеция, [8])

Роль ПИЛ на данном этапе программы по разработке пункта захоронения определяется спецификой присущей ему деятельности. Так, после принятия решения о выборе площадки и начала работ по подготовке пакета документов, необходимого для подачи заявки для получения лицензии на строительство пункта захоронения, следует определиться с тем, будет ли ПИЛ КН расположена в непосредственной близости от площадки пункта захоронения или же станет частью самой установки. Если ПИЛ КН еще не была сооружена на выбранной для строительства пункта захоронения площадке (как по финансовым соображениям, так и из-за наличия достаточного объема данных для принятия решения о выборе площадки), то потребуются оценить целесообразность ее создания в контексте обоснования безопасности по конкретной площадке. В ряде стран обязательность создания такой лаборатории прописана на уровне национального законодательства или продиктована требованиями заинтересованных сторон. Все же за основу при принятии такого решения обычно принимают набор технических критериев, выработанных благодаря появившемуся в ходе уже проделанной работы более точному представлению о ключевых элементах обоснования безопасности (рис. 3), и такие немаловажные аспекты как, например, суммарные затраты на разработку и эксплуатацию ПИЛ и необходимый уровень технического развития для внедрения различных технологий захоронения. Кроме того, на этом этапе при обсуждении вопроса о создании ПИЛ конкретного назначения следует определить возможности для использования в обосновании безопасности сведений, данных, знаний и методик, наработанных в других ПИЛ.

Несмотря на сказанное выше, статистика показывает, что большинство стран все-таки намерено обзавестись собственными ПИЛ конкретного назначения. К числу преимуществ, которые дает наличие ПИЛ КН на этапе подачи заявки на получение лицензии на сооружение пункта захоронения, относятся: (1) возможности для разработки и совершенствования технологий и приемов ведения горнопроходческих, строительных работ, работ по размещению РАО и элементов системы инженерных барьеров без-

опасности в условиях конкретной площадки или вмещающей среды; (2) разработка программы обеспечения качества, которую можно было бы использовать и в ходе сооружения самого пункта захоронения; (3) тестирование и валидация моделей FEPs и моделей функционирования системы захоронения; (4) укрепление доверия заинтересованных сторон; (5) обучение и повышение квалификации технического персонала. Еще одним преимуществом создания ПИЛ КН, представляющей собой либо часть будущего пункта захоронения, либо сооружаемой на прилегающих к выбранной площадке территориях, является возможность подтверждения и детализации данных параметризации, полученных в ходе лабораторных исследований и/или отбора проб и замеров на поверхности земли, а также уменьшение неопределенностей, связанных с такими данными. Еще одно достоинство проведения НИОКР в ПИЛ КН состоит в том, что они в отличие от лабораторных исследований позволяют получить подробную информацию о зоне структурного ослабления (ЗСО), возникающей как следствие ведения горнопроходческих работ. К такой информации следует относить сведения о возмущающем воздействии, связанном как непосредственно с самим проведением горнопроходческих работ, так и о тепловых эффектах, которые могли бы быть изучены в ходе экспериментов с использованием нагревательных элементов. Эта функция ПИЛ КН играет важную роль в свете того, что ЗСО может повлиять на реализацию некоторых функций безопасности, присущих системе естественных барьеров безопасности, таких как «удержание» и «ограничение или отсрочка выброса радионуклидов».

1.3.4 Роль ПИЛ на стадии сооружения пункта захоронения и проведения мониторинга

После получения разрешения на проведение строительных работ переходят к сооружению наземных и подземных установок будущего пункта захоронения. Эта работа может вестись поэтапно или же весь объем строительных работ может быть завершен до начала приема и размещения отходов. Работы по сооружению подземной части пункта захоронения включают проходку тоннелей и шахт доступа, вентиляционных шахт; проходку выработок во вмещающих породах для размещения зон обращения с РАО, зоны доставки и захоронения РАО; установку систем обеспечения безопасности, энергоснабжения и вентилирования. До начала всех этих работ на этапе лицензирования должны быть установлены исходные условия вмещающей среды и геосферы (гидрогеологические, геохимические, тепловые, механические и биологические характеристики). Принципиальное отличие работ по сооружению обычных подземных сооружений для извлечения подземных ископаемых от деятельности по возведению пункта геологического захоронения РАО состоит в том, что при их проведении должны быть минимизированы воздействия, способные негативно сказаться на исходных условиях площадки и состоянии геологических барьеров.

На этапе сооружения пункта захоронения основная роль НИОКР в ПИЛ КН состоит уже не столько в осуществлении исследовательской деятельности, сколько в подтверждении полученных ранее данных, выдвинутых суждений и т.п. Другими словами, к этому моменту регулирующий орган и заинтересованные стороны уже убеждены в том, что оператором был собран достаточный объем знаний, гарантирующий определенную степень уверенности в том, что выбранная площадка позволит обеспечить безопасность захоронения РАО. Однако для подтверждения этого вывода требуется проведение дополнительных мониторинговых исследований. Кроме того, ПИЛ может стать экспериментальным объектом, где будут испытываться и оптимизироваться методы и технологическая оснастка для проведения горнопроходческих работ, работ по сооружению, эксплуатации пункта захоронения, обращению с РАО перед началом их промышленного внедрения в условиях реального пункта захоронения. Так, например, в Финляндии испытание технологии ведения горнопроходческих работ является неотъемлемой частью НИОКР, проводимых в ПИЛ ONKALO [9]. Также НИОКР, проводимые в ПИЛ КН на этом этапе, по-прежнему будут способствовать повышению уровня общественного доверия к проекту в течение длительного периода размещения отходов в пункте захоронения. Еще один важный аспект, который прописан на уровне национального законодательства в некоторых странах (например, во Франции), — разработка и тестирование методик, технологий и оборудования, предназначенных для повторного извлечения отходов, если в законодательстве страны прописано требование к повторному извлечению уже захороненных отходов.

1.3.5 Роль ПИЛ на стадии эксплуатации пункта захоронения и ведения мониторинга

До начала эксплуатации пункта захоронения его оператор должен получить лицензию на прием и размещение отходов в установке. Работы по размещению отходов и установке элементов системы инженерных барьеров безопасности осуществляются в соответствии с разработанным планом. От момента начала размещения отходов и до захоронения последней партии РАО и закрытия пункта захоронения может пройти не одно десятилетие. Этот срок определяется целым рядом аспектов таких, как объем отходов, подлежащих захоронению, темпы работ по приему отходов, размещению РАО в пункте захоронения и установке элементов системы инженерных барьеров безопасности, проведению строительных работ. На этапе эксплуатации может продолжаться осуществление работ по сооружению отдельных секций пункта захоронения, а также по засыпке и герметизации уже заполненных отходами камер.

Роль ПИЛ КН на этапе эксплуатации (т.е. до момента полного окончания работ по размещению отходов и установке элементов системы инженерных барьеров безопасности) также преимущественно сводится к подтверждению достоверности уже имеющихся знаний. НИОКР этого этапа могут включать проведение долгосрочных экспериментов продолжительностью в несколько десятков лет, направленных на изучение влияния сформировавшихся условий на площадке и тепловыделения от отходов на состояние элементов системы инженерных барьеров безопасности. Потенциально в случае получения отрицательных результатов может потребоваться извлечь уже захороненные отходы. Кроме того, на этом этапе может продолжаться деятельность по совершенствованию и оптимизации существующих технологий размещения отходов в том случае, если в ходе проходки выработок для создания камер захоронения будут выявлены какие-либо условия, явления и процессы, важные с точки зрения обеспечения безопасности, наличие которых не удалось предвидеть заранее.

1.3.6 Роль ПИЛ на стадии закрытия пункта захоронения

До начала работ по закрытию пункта захоронения его оператор должен получить лицензию на проведение работ по закрытию и выводу из эксплуатации объекта. Для получения такой лицензии потребуются актуализация материалов обоснования безопасности и разработка плана закрытия установки. Обновленная версия обоснования безопасности должна отражать новое усовершенствованное представление о пункте захоронения и геологической системе, сформированное в ходе проведения строительных работ и эксплуатации объекта.

НИОКР, проведенные в ПИЛ КН, играют важную роль на этапе закрытия, так как они позволяют установить, какие именно технологии герметизации пункта захоронения окажутся наиболее эффективными. Подобные исследования следует инициировать еще на стадии сооружения и эксплуатации пункта захоронения, что позволит реализовать их на этапе закрытия установки.

Закрытие установки не всегда является окончательным шагом в деятельности по захоронению отходов. В ряде стран предусмотрен период, в течение которого отходы могут быть повторно извлечены из установки, например, во Франции этот период составляет 100 лет: в течение столь длительного срока ПИЛ КН может быть использована для проведения НИОКР, направленных на совершенствование существующих методов мониторинга.

1.3.7 Роль ПИЛ в разработке новых технологий в области захоронения РАО

Совершенствование существующих и разработка новых технологий в области захоронения РАО является неотъемлемой частью процесса проведения исследований в ПИЛ. Помимо создания оборудования и выработки решений, необходимых для реализации программ по захоронению РАО, некоторые из разрабатываемых технологий могут найти и другое коммерческое применение.

К числу наиболее важных технологий, разработанных в ходе проведения НИОКР в зарубежных ПИЛ, следует отнести (рис. 5):

- Специальное оборудование, разработанное для целей проходки тоннелей захоронения и камер для вертикального размещения упаковок с отходами в ПИЛ ONKALO (Финляндия).
- Оборудование для горизонтального размещения упаковок с отходами, разработанное и испытанное в ПИЛ Aspö (Швеция) и Mont Terri (Швейцария), и для вертикального размещения отходов, разработанное и испытанное в ПИЛ ONKALO.
- Оборудование для изготовления и установки материала буфера, разработанное в ПИЛ Aspö и ONKALO.
- Заглушка из торкретбетона, обладающая низким pH (<11) (разработка швейцарской лаборатории Grimsel).
- Разработка мелкодисперсной цементной смеси и технологий ее заливки в ПИЛ AECL (Канада) для тампонирования слаботрешиноватых гранитов. Эти разработки были впоследствии применены при реализации целого ряда геотехнических проектов и проектов по добыче полезных ископаемых.
- Разработка швейцарской лаборатории Grimsel, создавшей газонепроницаемую систему засыпки и герметизации, обеспечивающую лучшие условия для переноса газа в засыпанных подземных сооружениях без ущерба для функций удержания радиоактивных веществ.
- Целый ряд различных технологий мониторинга, разработанных в рамках европейского проекта MoDeRn для пластичных глиняных формаций в ПИЛ HADES (Бельгия), твердой глины в ПИЛ Bure (Франция) и гранита в ПИЛ Grimsel Test Site (Швейцария), включая:
 - ◆ сеть высокочастотных беспроводных сенсоров, заключенных внутри системы барьеров безопасности, которая обеспечивает беспроводную передачу сигналов средствам обработки данных. Эта разработка позволяет отказаться от использования батарейного питания и повысить срок эффективного функционирования сенсоров в 5-10 раз;
 - ◆ систему беспроводной сквозьземной передачи ограниченного объема данных из пункта захоронения на поверхность земли в течение нескольких десятилетий;
 - ◆ множество сенсорных и мониторинговых технологий (сейсмические, оптоволоконные, лазерные и др.).



Рисунок 5 — Оборудование, разработанное в финской ПИЛ Onkalo

1.4 Матрица проекта разработки пункта захоронения ОЯТ и ВАО (США)

Из всего вышесказанного следует, что исследовательская деятельность в ПИЛ является неотъемлемой частью любой программы по созданию пункта геологического захоронения. Направленность и объем исследований, проводимых на каждом этапе реализации программы, каждая страна определяет, исходя из собственных интересов и потребностей. В свою очередь, потребность в проведении тех или иных НИОКР можно определить путем систематизации представления о содержании каждого этапа и отдельных стадий проекта, т.е. стратегического планирования деятельности в этой области. Так, в США в рамках такого стратегического планирования работ для более наглядного отображения содержания каждого этапа реализации программы была разработана так называемая матрица проекта создания глубинного геологического захоронения ОЯТ и ВАО, описывающая ключевые этапы и направления работ на всем протяжении реализации проекта, начиная с предварительных исследований и кончая строительством, эксплуатацией и закрытием установки (табл. 2) [10]. Матрица состоит из столбцов и строк, где в строках описываются ключевые направления деятельности, а в столбцах — основные этапы разработки проекта по созданию пункта захоронения. Такая структура позволяет выявить те мероприятия, выполнение которых необходимо для успешной реализации программы, а также выделить те, что представляют особый интерес с точки зрения участвующих в программе организаций.

Основные этапы работы	Выбор площадки					Разработка пункта захоронения			
	Выявление заинтересованных в реализации проекта регионов	Предварительная оценка площадки	Сравнение площадок-кандидатов	Выбор предпочтительных площадок	Характеризация выделенных площадок	Заявка на получение лицензии	Сооружение и мониторинг	Эксплуатация и мониторинг	Закрытие
<p>Планирование, НИОКР, оценка концепции</p> <p>Оценка концепций захоронения и анализ ГЕР, разработка и испытание технологий, предварительные НИОКР</p>	<p>Выявление заинтересованных в реализации проекта регионов</p> <p>Разработка плана по характеристикам площадки отхода.</p> <p>Характеризация реестра и формы отходов для разработки проекта упаковки и размещения самого ПЗРО.</p> <p>Разработка начального проекта концепции захоронения, включающего обобщенный концептуальный проект основных сооружений и систем ПЗРО, в т.ч. упаковки с РАО, установки на поверхности, объекты инфраструктуры.</p>	<p>Продолжение работ по характеристикам площадки и получение наиболее важных данных, необходимых для проектирования упаковки для захоронения РАО и ПЗРО, определения требуемой вместимости ПЗРО, схемы размещения элементов системы захоронения и выбора концепции захоронения. Эти аспекты, в свою очередь, влияют на выбор определенной площадки и первоначальных требований к ее выбору (например, объем вмещающих пород для захоронения заданного объема отходов).</p> <p>Разработка более детализированной концепции захоронения под конкретные площадки.</p> <p>Определение возможностей для выполнения строительных работ на потенциальных площадках.</p>	<p>Актуализация данных по характеристикам отхода.</p> <p>Выявление предпочтительных мест для размещения площадок и адаптация концепций захоронения под конкретные типы ПЗРО, среды и геосферы в целях проведения предварительного анализа.</p> <p>Предварительный проект основных подземных конструкций, сооружений и ИББ, упаковка с отходами, организация доступа к подземным секциям ПЗРО и системы герметизации для оценки технической осуществимости проекта и безопасности на этапе после его закрытия.</p> <p>Предварительные соображения относительно размещения поверхностных сооружений в контексте оценки площадки и технической осуществимости строительных работ.</p>	<p>Актуализация данных по характеристикам отхода.</p> <p>Утверждение предварительных требований к упаковке РАО и проекту ПЗРО в рамках процесса выбора площадки.</p> <p>Завершение разработки концептуальной модели проекта ПЗРО, его оценка и ин-формирование заинтересованных сторон.</p> <p>Концептуальный проект ПЗРО должен включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> схему размещения основных подземных сооружений и элементов системы ИББ, упаковка с отходами, систем организации доступа к подземным секциям ПЗРО, его герметизации; названных установок, систем и компонентов инфраструктуры. 	<p>Завершение разработки плана по характеристикам площадки.</p> <p>Утверждение предварительных функциональных требований к упаковке и проекту ПЗРО.</p> <p>Окончание итеративной разработки проекта системы ИББ, прошедшей параллельно с оценкой показателей системы захоронения и работами по характеристикам площадки. Проект ИББ должен включать концептуальный проект системы ИББ, системы вентилирования, упаковки с отходами, засыпки.</p> <p>Завершение разработки концептуального проекта пункта захоронения и начало более детальной проработки, уровень детализации которой будет определяться требованиями к заявке на получение лицензии.</p>	<p>Подтверждение соответствия характеристик отхода и имеющихся на момент захоронения РАО неопределенностей критериям приемлемости отходов.</p> <p>Подтверждение данных о породах и вмещающие гидрогеологическую обстановку.</p> <p>Обеспечение соблюдения функциональных требований и требований проектирования.</p> <p>Демонстрация надлежащего уровня технологической готовности для реализации необходимых технологий захоронения.</p> <p>Демонстрация того факта, что в сооруженном ПЗРО все установки и системы будут удовлетворять требованиям эксплуатационной безопасности.</p> <p>Оценка потенциального воздействия строительных работ на функции, выполняемые системой захоронения.</p>	<p>Промышленная эксплуатация установки.</p> <p>Реестр отходов (полученных и захороненных).</p> <p>Характеризация и документирование данных о характеристиках отхода и соблюдении критериев приемлемости.</p>	Засыпка и термитизация ПЗРО	
<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>	<p>Проектирование, в том числе упаковка с отходами, и характеристика РАО</p>

Основные работы	Выбор площадок						Разработка пункта захоронения			
	Планирование, НИОКР, оценка концепции	Выявление заинтересованных в реализации проекта регионов	Предварительная оценка площадки	Сравнение площадок-кандидатов	Выбор предпочтительных площадок	Характеризация выбранных площадок	Заявка на получение лицензии	Сооружение и мониторинг	Эксплуатация и мониторинг	Закрытие
Оценка концепций захоронения и анализ FERs, разработана и испытана технология, предварительные НИОКР	Разработка всеобъемлющей системы оценки показателей функционирования системы захоронения (ВСОП) и гео-сферных концептуальных моделей для типовых референтных случаев. Проведение анализа FERs для типовых референтных случаев и выявление сценариев и FERs, исключенных из дальнейшего рассмотрения. Разработка базы данных и входных параметров для типовых референтных случаев и ВСОП. Разработка ВСОП математических и расчетных методологий для вероятностного ВСОП моделирования, количественной оценки неопределенностей и анализа чувствительности. Разработка типовых расчетных моделей для оценки безопасности ПЗРО на этапе после закрытия ПЗРО в рамках реализации ВСОП. Проведения скрининговой оценки радионуклидов из реестра радионуклидов для выявления РН, вносящих наибольший вклад в дозовую нагрузку, и разработка референтного реестра РН, который мог бы использоваться в дальнейшем при оценке площадок. Разработка методик обработки результатов моделирования и их представления заинтересованным сторонам.	При необходимости использование данных, собранных в ходе работ по характеристике площадки и анализа FERs, типовых референтных случаев, скрининга радионуклидов и упрощенных методов оценки безопасности площадок и составления перечня площадок-кандидатов. Продолжение разработки средств оценки безопасности работ, начатой на предыдущих этапах, необходимой в рамках процесса выбора площадки, характеристика площадок, оценки безопасности и подготовки заявки на получение лицензии. Доработка методик, предназначенных для обработки результатов моделирования и их представления заинтересованным сторонам.	Использование данных по конкретным площадкам для разработки входных параметров для проведения упрощенных оценок безопасности и анализа FERs в контексте условий выбранной площадки. Разработка подробных чертежей концептуального проекта ПЗРО. Актуализация результатов скринингового анализа реестра радионуклидов. Разработка упрощенных чертежей проекта ПЗРО. Анализ площадки в рамках программы по выбору предпочтительных площадок. Продолжение разработки средств оценки безопасности работ, начатой на предыдущих этапах, необходимой в рамках процесса выбора площадки, характеристика площадок, оценки безопасности и подготовки заявки на получение лицензии. Представление результатов анализа площадок заинтересованным сторонам.	Использование данных по конкретным площадкам для разработки входных параметров для проведения упрощенных оценок безопасности и анализа FERs в контексте условий выбранной площадки. Разработка подробных чертежей концептуального проекта ПЗРО. Актуализация результатов скринингового анализа реестра радионуклидов. Доработка концептуальных и расчетных ВСОП моделей в контексте условий, присутствующих в выбранной площадке. Проведение анализа по выбору предпочтительной площадки, включение в проект ПЗРО для конкретной площадки и FERs. Первичная количественная оценка неопределенностей и анализ чувствительности работ по характеристике площадки. Продолжение разработки средств оценки безопасности и аналитической работы, начатой на предыдущих этапах, необходимой в рамках процесса выбора площадки, характеристика площадок, оценки безопасности и подготовки заявки на получение лицензии. Представление результатов анализа площадок заинтересованным сторонам.	Продолжение разработки средств оценки безопасности и аналитической работы, начатой на предыдущих этапах, необходимой в рамках процесса выбора площадки, характеристика площадок, оценки безопасности и подготовки заявки на получение лицензии. Разработка наглядного представления результатов работ по подготовке заявки для получения лицензии, ответственных за принятие решений, и заинтересованных сторон в рамках реализации программы по характеристике площадки.	Характеризация выбранных площадок	Завершение работ по разработке ВСОП. Завершение анализа FERs, определение эволюции системы FERs, исключенных из дальнейшего рассмотрения. Завершение работы по созданию базы данных и базы входных параметров моделирования. Завершение разработки математической и расчетной методологии для вероятностного ВСОП моделирования, количественной оценки неопределенностей и оценки чувствительности. Анализ в рамках методологии для вероятностного ВСОП моделирования, количественной оценки неопределенностей и оценки чувствительности. Анализ в рамках методологии для вероятностного ВСОП моделирования, количественной оценки неопределенностей и оценки чувствительности. Проведение работ по скрининговой оценке радионуклидов для выявления РН, вносящих наибольший вклад в дозовую нагрузку, и разработке референтного реестра РН. Завершение работы над окончательной редакцией оценки безопасности для этапа после закрытия ПЗРО. Разработка наглядного представления результатов работ по подготовке заявки для получения лицензии, ответственных за принятие решений, и заинтересованных сторон.	Выполнение завершающей оценки показателей функциональности системы захоронения перед началом работ по размещению отходов, включающей анализ данных, собранных в ходе проведения работ на территории строительства ПЗРО, актуализация знаний, собранных в ходе проведения работ на территории строительства (включая любые изменения, внесенные в проект и ПЗРО) и проведения работ в строительно-монтажных работах и НИОКР в ПИЛ. Использование результатов оценки показателей функциональности ПЗРО, анализа чувствительности и неопределенности для завершения работ над составлением программы мониторинга на этапе эксплуатации ПЗРО.	Эксплуатация и мониторинг	Закрытие

Оценка безопасности на этапе после закрытия пункта захоронения

Основные работы	Выбор площадки				Характеризация площадки	Разработка пункта захоронения				
	Выявление заинтересованных в реализации проекта регионов	Предварительная оценка площадки	Сравнение площадок-кандидатов	Выбор предпочтительных площадок		Заявка на получение лицензии	Сооружение и мониторинг	Эксплуатация и мониторинг	Закрытие	
<p>Планирование, НИОКР, оценка концепции</p> <p>Оценка концепций захоронения и анализ FERs, разработка и испытание технологий, предварительные НИОКР</p>					<p>Характеризация выбранных площадок</p>	<p>Оценка и оптимизация концепции захоронения, завершение разработки концепции.</p> <p>Проведение исследований, направленных на снижение неопределенностей и уровня консерватизма, присущего вопросам, важным с точки зрения оценки безопасности.</p> <p>Завершение испытаний и разработки технологий и методов проведения строительных работ, установки элементов системы ИББ и размещения отходов, безопасной эксплуатации ПЗРО.</p> <p>Демонстрация технической осуществимости технологий и методов ведения строительных работ, установки элементов ИББ и размещения РАО, безопасной эксплуатации ПЗРО.</p> <p>Подтверждение данных, полученных для конкретной площадки, и имеющегося представления о взаимосвязанных процессах, валидация моделей.</p> <p>Продолжающаяся работа по привлечению заинтересованных сторон и укреплению общественного доверия.</p>	<p>Заявка на получение лицензии</p>	<p>Сооружение и мониторинг</p>	<p>Эксплуатация и мониторинг</p>	<p>Закрытие</p>
<p>Исследования в ПИЛ конкретного назначения</p>					<p>Разработка проекта, получение разрешения и сооружение ПИЛ.</p> <p>Сбор данных по конкретной площадке, включая подробные данные о характеристиках вмещающих пород.</p> <p>Разработка и/или совершенствование технологий и методологий проведения исследований на конкретных площадках.</p> <p>Анализ FERs, присущих конкретной площадке, и сбор данных по конкретной площадке, важных с точки зрения процессов, протекающих в системе ИББ и ближайшей зоне вмещающей среды.</p> <p>Количественная оценка связанных процессов, необходимая для валидации моделей для заявки на получение лицензии.</p> <p>Проверка возможностей и точности методов и технологий подземной и наземной характеризации и ведения мониторинга.</p> <p>Оценка и демонстрация осуществимости и безопасности концепций захоронения в рамках подготовки заявки на получение лицензии.</p> <p>Продолжающаяся работа по привлечению заинтересованных сторон и укреплению общественного доверия.</p> <p>Оценка и демонстрация применимости технологий и методов реализации строительных работ и работ по размещению РАО.</p>	<p>Заявка на получение лицензии</p>	<p>Сооружение и мониторинг</p>	<p>Эксплуатация и мониторинг</p>	<p>Закрытие</p>	

2 Примеры зарубежных ПИЛ и НИОКР в гранитных формациях

2.1 Швейцария — ПИЛ Гримзель

Таблица 3. Общие сведения о ПИЛ

Тип ПИЛ	Общего назначения
Исследуемая формация	Центральный массив Аар (граниты)
Место нахождения	Бернские Альпы, кантон Берн, 1 750 м выше уровня моря, мощность перекрывающих пород — 450 м.
Характеристики	Годы сооружения основного тоннеля: 1983-1984 гг. (была использована специальная буровая машина диаметром сечения проходки — 3,5 м); Проходка дополнительных выработок — 1995, 1999 гг. (горнопроходческие работы осуществлены буровзрывным способом, диаметр — 2,3 м); общая протяженность тоннелей — около 1 км.

Общие сведения о национальной политике Швейцарии в области захоронения ОЯТ и РАО [11]:

- С июля 2006 года в Швейцарии действует мораторий на экспорт ОЯТ в целях его переработки. До этого операторы могли самостоятельно выбирать между переработкой и захоронением ОЯТ, однако теперь все ОЯТ рассматривается в качестве РАО и подлежит окончательной изоляции в пункте геологического захоронения. На национальном уровне политика обращения с ОЯТ до сих пор не определена.
- Национальное кооперативное общество по захоронению РАО (Nagra), учрежденное операторами швейцарских АЭС и Федеральным правительством страны в 1972 году, несет ответственность за разработку концепции захоронения всех категорий РАО и реализацию соответствующих проектов.
- Швейцарская концепция захоронения радиоактивных отходов предусматривает создание двух пунктов захоронения: одного — для НАО и САО, другого — для ОЯТ и ВАО. Сейчас рассматривается возможность сооружения обеих установок на одной площадке.
- В Швейцарии действуют две подземные лаборатории. У Nagra есть собственная лаборатория — испытательная площадка Гримзель в кантоне Берн, сооруженная во вмещающих породах из гранита, вторая лаборатория — Монт-Терри в кантоне Юра — государственная лаборатория, находящаяся в ведении Федерального управления топографии (глины).

Основные вехи осуществления исследовательской программы в ПИЛ Гримзель (табл. 3):

- 1983–1986 гг. — исследования площадки;
- 1984–1986 гг. — геофизические исследования (этап 1);
- 1994–1996 гг. — геофизические исследования (этап 2);
- 1986–2004 гг. — исследование процессов удержания радионуклидов;
- 1990–1993 гг. — исследования дальней зоны;
- 1994–1996 гг. — исследования ближней зоны;
- 1995–2004 гг. — масштабные демонстрационные эксперименты;
- 1997–2004 гг. — тестирование и верификация моделей;
- 1997–2003 гг. — совершенствование методов характеризации площадки;
- 2003–2013 гг. — исследования в рамках проекта «Фаза б», направленные на анализ предлагаемых концепций и технологий захоронения РАО в условиях, максимально приближенных к реальным (например, CFM (образование коллоидов и их перенос), FEBEXe (полномасштабное испытание инженерных барьеров безопасности), FEBES-DP (проект по демонтажу элементов системы инженерных барьеров безопасности), LCS (долгосрочные испытания цемента) и т.п.).

На данный момент в ПИЛ Гримзель проводятся сложные эксперименты, рассчитанные на длительный период и нацеленные на демонстрацию показателей работоспособности системы глубинного геологического захоронения РАО. Всего можно выделить три основных направления НИОКР:

- 1 Проекты по определению функциональной значимости геологических барьеров, включающие исследования основных процессов, протекающих в геосфере. Примерами таких проектов являются (рис. 6):
 - a) проект GAM (Gas Migration in Shear Zones) по изучению процессов газовой миграции в тектонических дизъюнктивных зонах;
 - b) HPF (Hyperalkaline Plume in Fractured Rock, 1997–2003 гг.) и CRR (Colloid and Radionuclide Retardation, 1997–2002 гг.) — изучение свойств вмещающих пород, отвечающих за задержание радионуклидов (с учетом наличия высокощелочных цементных растворов, формирования коллоидов в переходной зоне между инженерными и естественными барьерами безопасности), с использованием радионуклидных маркеров.

- 2 Проекты, демонстрирующие концепции захоронения в реалистичных условиях, например, крупномасштабные проекты FEBEX — «Полномасштабное тестирование инженерных барьеров» (Full-scale Engineered Barrier Experiment, 2005–2016 гг.) и GMT — «Эксперимент по моделированию миграции газа в системе инженерных барьеров безопасности и геосфере» (Gas Migration Test in the EBS and Geosphere, 1997–2004 гг.) — позволяют проанализировать характер взаимодействия между радиоактивными отходами, вмещающими породами и инженерными барьерами безопасности, а также оптимизировать сами концепции захоронения (например, методы доставки и размещения отходов). Неотъемлемой частью таких проектов также является тестирование и дальнейшее совершенствование средств измерения. Например, в рамках проекта GMT в реальных условиях были изучены возможности оптоволоконных сенсоров.
- 3 Проекты по характеристике площадки. Например, в рамках проекта EFP (Effective Parameters, 1998–2002 гг.) проводилась разработка и совершенствование технологий характеристики зон трещиноватых пород репрезентативного объема.

Испытательная площадка Гримзель (GTS)

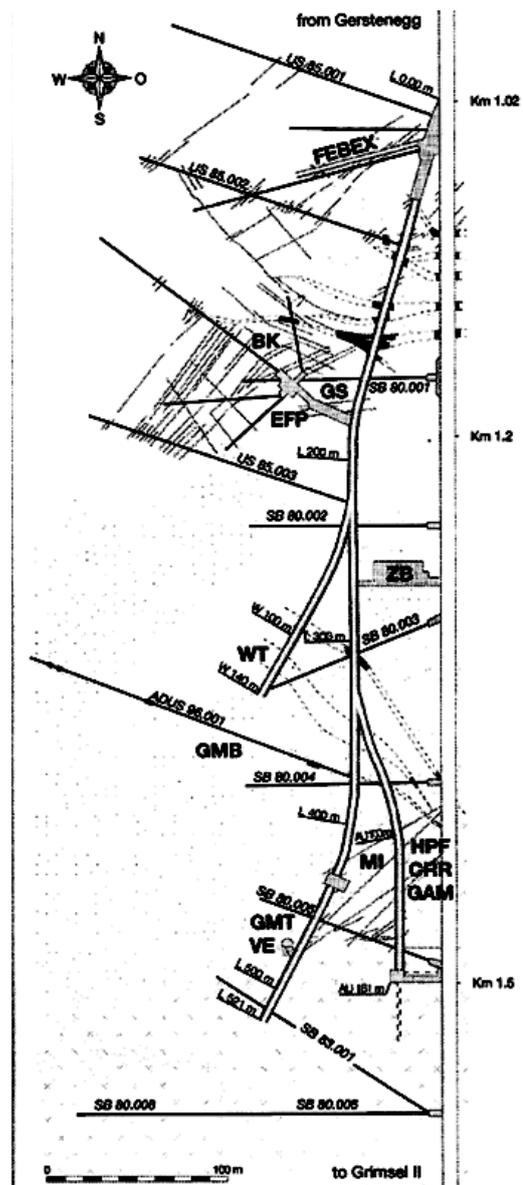
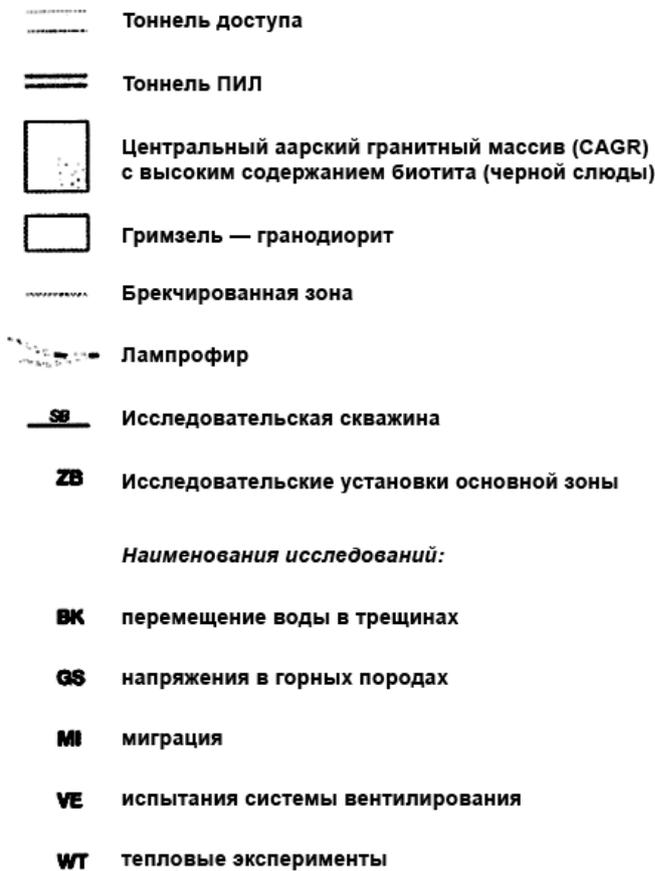


Рисунок 6 — Расположение основных зон проведения экспериментов в ПИЛ Гримзель

2.2 Швеция — ПИЛ Аспё

Таблица 4. Общие сведения о ПИЛ

Тип ПИЛ	Общего назначения
Исследуемая формация	Смоландские граниты (докембрийская эпоха)
Место нахождения	Южная Швеция, неподалеку от АЭС Оскарсхамн, побережье Балтийского моря

Тоннель в форме двойного витка спирали диаметром 5 м спускается на глубину 450 м ниже уровня моря. Общая протяженность тоннеля составляет около 3 600 м. Горнопроходческие работы в верхней части тоннеля до уровня 340 м были произведены с использованием традиционных буровзрывных технологий, проходка нижнего уровня велась с применением специально сконструированной буровой машины диаметром сечения проходки 5 м. Также имеется одна шахта для доставки персонала диаметром 3,8 м и две небольшие вентиляционные шахты диаметром 1,5 м (рис. 7).

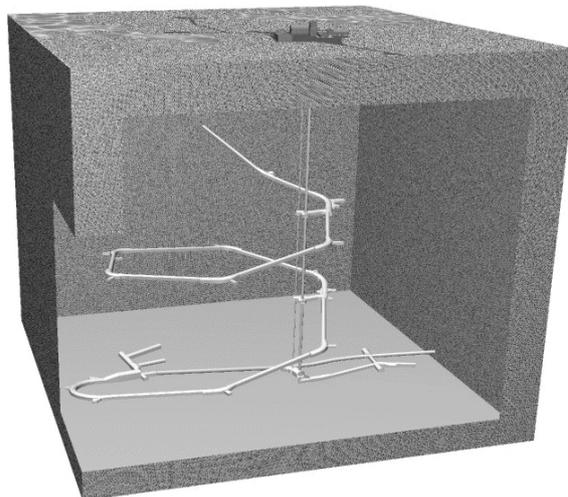


Рисунок 7 — Общий вид ПИЛ Аспё

Общие сведения о национальной политике Швеции в области захоронения ОЯТ и РАО [11]:

- Государственная политика Швеции предусматривает окончательную изоляцию ОЯТ в кристаллических породах. После выгрузки из реакторов ОЯТ около 1 года хранят на приреакторных площадках, а затем направляют на установку централизованного хранения СЛАВ. По прошествии пятидесяти лет ОЯТ планируется поместить в медные канистры и направить в пункт глубинного геологического захоронения, площадка для сооружения которого уже определена. В 2011 году компания SKB подала заявку на получение лицензии на строительство пункта захоронения в Эстхаммаре. Компания SKB планирует приступить к сооружению пункта захоронения в 2020 году.
- Компания SKB была учреждена операторами шведских АЭС в 1970 году в целях оказания им содействия в транспортировке РАО, обращении с ОЯТ и РАО и их хранении за пределами реакторных площадок. Кроме того, SKB несет ответственность за разработку проектов и строительство установок для обращения с ОЯТ и РАО, а также за реализацию сопутствующих программ НИОКР.
- ПИЛ Аспё (полное название *Äspö Hard Rock Laboratory*) была построена в 1990-е гг. Основной целью создания лаборатории стало изучение способности барьеров пункта захоронения (медные канистры, буфер из бентонита и вмещающие породы) предотвращать выход радиоактивных веществ на поверхность. В рамках НИОКР в Аспё осуществляется опытное захоронение канистр, засыпка и герметизация тоннелей, а также извлечение уже захороненных канистр. Кроме того, здесь тестируют различные устройства и механизмы, которые планируется использовать при захоронении ОЯТ.
- Шведская концепция захоронения KBS-3V основывается на инкапсуляции ОЯТ в медные канистры со вставками из нержавеющей стали. Канистры по одной будут размещены в индивидуальных вертикальных скважинах на глубине около 500 м в окружении бентонитовых глин, выполняющих роль буфера, защищающего канистру от подвижек горных пород и ограничивающего приток грунтовых вод. В случае разгерметизации канистры буфер выполнит функции диффузионного барьера, ограничивающего перемещение радионуклидов. Скважины захоронения пробурят в полу тоннелей захоронения. После окончания работ по захоронению тоннели будут заложены бентонитовой глиной, обладающей низкой гидравлической проницаемостью, а давление набухания и плотность этого материала обеспечат удержание буфера на месте, ограничивая его расширение в вертикальном направлении.

Основные вехи осуществления исследовательской программы в ПИЛ Аспё:

- 1986 г. — изучение коренных пород в Аспё и на расположенных поблизости островах;
- 1988 г. — площадка Аспё утверждена для строительства подземной лаборатории;
- 1989 г. — начало работ по прокладке тоннеля;
- 1995 г. — этап строительных работ завершен;
- 1995-2005 гг. — выполнение основной части научно-исследовательской работы (изучение процессов перемещения грунтовых вод и их состава);

- 1999-2005 гг. — проведение основной части демонстрационных тестов и испытаний (испытания технологий захоронения, извлечения захороненных канистр, эксперименты на прототипе установки для захоронения).

Площадки для проведения испытаний в ПИЛ Аспё [12, 13]

- Испытание технологий повторного извлечения канистр. Шведская концепция окончательной изоляции ОЯТ предполагает поэтапную реализацию проекта захоронения. Так, сначала в пункте захоронения будут размещены лишь небольшие объемы ОЯТ. Результаты проведенных работ по опытному захоронению будут проанализированы, и в случае, если они окажутся отрицательными, захороненное топливо потребуется извлечь. В отсеке лаборатории Canister Retrieval Test проводятся исследования возможности повторного извлечения захороненного ОЯТ (рис. 8).

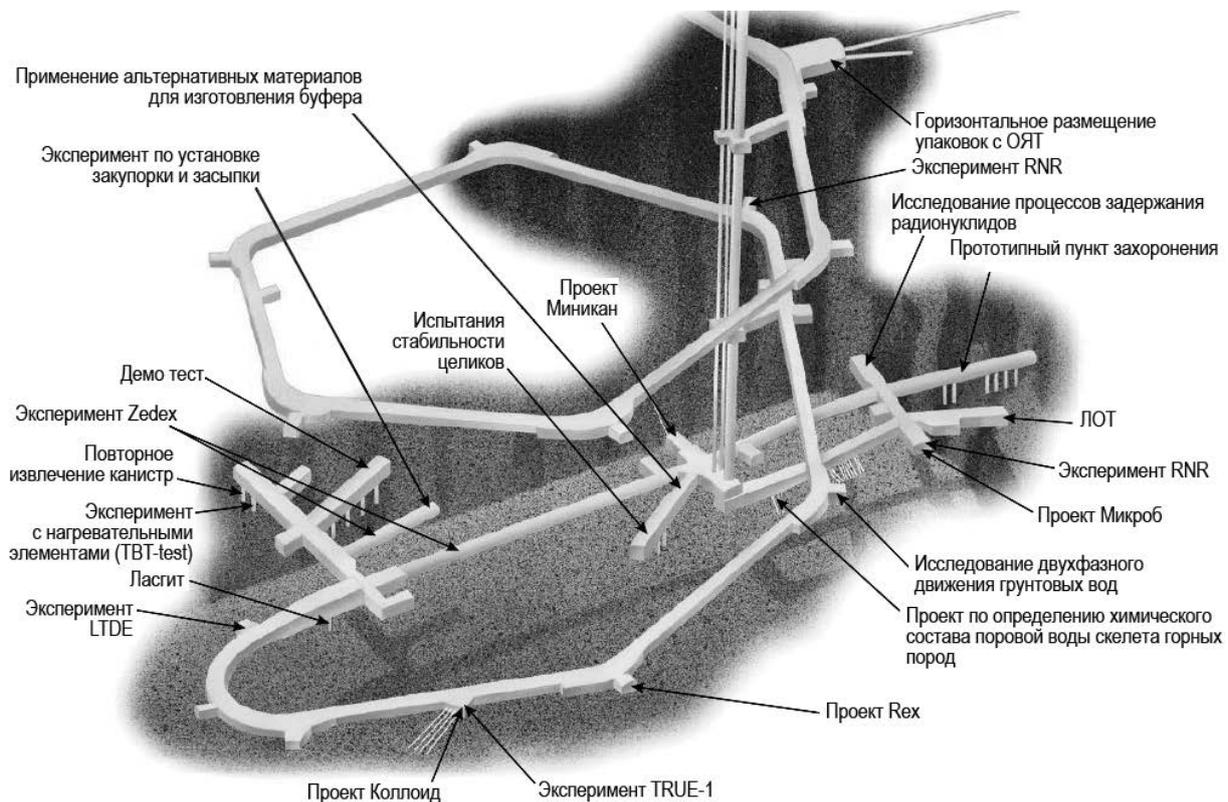


Рисунок 8 — Расположение зон проведения испытаний в ПИЛ Аспё

- Демо-тест. Испытания проводят с целью определения наилучшего способа ориентации 25-тонных медных канистр с ОЯТ в отсеках для захоронения, окруженных буфером из бентонитовых глин. Также на этом участке осуществляются испытания технологии закладки и герметизации тоннелей захоронения. Данные работы уже выполнены на участке протяженностью 30 м, проходка которого осуществлялась буровзрывным способом. На данный момент осуществляется мониторинг герметичности закладки и закупорки с применением около 200 различных измерительных приспособлений.
- Тестирование различных видов бентонитовых глин — тоннель Аспе используется для наблюдения за распределением полей напряжения в горных породах и буфере из различных видов бентонитовых глин, доставленных на площадку из Северной Америки, Индии и Греции.
- Прототип пункта захоронения был построен в целях демонстрации показателей функционирования будущего пункта захоронения и представляет собой тоннель, в котором размещены шесть полноразмерных канистр, не заполненных ОЯТ (для измерения уровня тепловыделения от ОЯТ тепло производится электрическими нагревателями). Измерительные приборы помещены в скважины, глину, канистры, бентонит, закладку и окружающие канистры, вмещающие породы.
- Тоннель Аспё. Канистры могут быть ориентированы в ячейках захоронения как горизонтально, так и вертикально. Для горизонтального размещения требуется специальное оборудование для бурения отсеков захоронения и установки в них канистр. Это оборудование тестируется в тоннеле Аспё на глубине 220 м.

Исследования вопросов обеспечения долгосрочной безопасности. Цель данных проектов — изучить эволюцию пункта захоронения и понять, каким образом происходящие в пункте захоронения изменения могут повлиять на способность его барьеров изолировать ОЯТ.

- Проект Миникан. Рассматривается следующий случай: целостность канистры нарушается, внутрь начинает поступать вода, развиваются процессы коррозии чугунных вставок канистры. В рамках данного проекта проводят исследования коррозионных процессов, протекающих в зазоре между чугунной вставкой и медной облицовкой, с использованием пяти миниатюрных канистр, размещенных в скважинах (на медную облицовку всех канистр нанесена перфорация в виде небольших отверстий, имитирующих повреждение канистры).
- Ласгит (крупномасштабный тест по закачке газа). Изучение процессов, происходящих в случае повреждения канистры — коррозия чугуна приводит к выделению газообразного водорода, вследствие чего давление внутри канистры поднимается и газ через окружающий канистру бентонит просачивается наружу. Теоретически такие процессы могут привести к образованию каналов в глине.
- Проект Микроб. Одна из задач проводимых исследований — определить действительно ли подземные бактерии, выделяющие в процессе жизнедеятельности сульфатные ионы, способны выжить в слое окружающих канистру бентонитовых глин. Сульфатные ионы представляют опасность, так как могут спровоцировать развитие коррозионных процессов. С другой стороны, сами микробы могут противостоять процессам коррозии за счет поглощения кислорода. В рамках проекта Микроб изучается эффективность поглощения кислорода бактериями.
- ЛОТ (тестирование поведения материала буфера в долгосрочной перспективе). Цель исследования — изучение эволюции бентонитовых глин как в условиях, сходных с условиями глубинного захоронения, так и в более агрессивной среде. Внутри скважин, пробуренных в полу тоннеля, были размещены блоки, состоящие из медных трубок и бентонита. В течение нескольких лет эти трубки будут нагревать, а затем извлекут и проанализируют изменение их характеристик, а также характер движения радиоактивных индикаторов в глине.
- Эксперимент LTDE (диффузия в долгосрочной перспективе). Цель — определить, насколько глубоко радиоактивные вещества способны проникать в трещины и поры пород (т.е. изучить потенциал горных пород к удержанию радионуклидов). Кроме того, полученные в ходе эксперимента данные используют для изучения процессов сорбции различных радионуклидов.
- Проект Коллоид. Изучение способности коллоидов переносить радионуклиды.
- Эксперимент RNR (англ. Radionuclide Retention Project). Основная задача исследований, реализуемых в этой зоне ПИЛ, состоит в валидации данных о задержании радионуклидов, полученных в лаборатории, путем их сравнения с результатами проводимых экспериментов.

2.3 Канада — ПИЛ АЕСЛ

Таблица 5. Общие сведения о ПИЛ

Тип ПИЛ	Общего назначения.
Исследуемая формация	Интрузивный гранитный массив.
Место нахождения	Западная оконечность Канадского щита на юго-востоке провинции Манитоба.
Характеристики	ПИЛ состоит из тоннелей и экспериментальных камер общей протяженностью в несколько сотен метров, расположенных на одном из двух уровней установки — 240 и 420 м. Все помещения располагаются вокруг вертикальной шахты доступа, доходящей до уровня 443 м.

Общие сведения о национальной политике Канады в области захоронения ОЯТ и РАО [11]:

- Согласно национальной политике Канады в области обращения с РАО, ОЯТ подлежит окончательной изоляции в пункте глубинного геологического захоронения без предварительной переработки.
- NWMO — организация по обращению с РАО — несет ответственность за проведение исследований и изучение вопросов хранения и захоронения РАО. К настоящему времени NWMO завершила поиск коммун-добровольцев для строительства пункта глубинного захоронения в четырех провинциях: Онтарио, Квебек, Нью-Брансуик и Саскачеван. Ожидается, что к 2023 году будет выбрана одна площадка для проведения более детальных исследований, а к эксплуатации пункта захоронения планируется приступить не раньше 2040-2045 гг.

Исследования в ПИЛ АЕСЛ (рис. 9) позволили получить наиболее точную и правдоподобную картину потенциального воздействия горнопроходческих и строительных работ, операций по размещению упаковок, имитирующих реальные контейнеры с отходами, и закрытию подземных выработок на состоя-

ние системы захоронения. Еще до начала горнопроходческих работ здесь было проведено множество исследований по характеристике площадки, включавших бурение разведочных и контрольных скважин, а также целый ряд геофизических исследований, позволивших определить исходные условия среды. В течение всего периода эксплуатации реализовывалась программа мониторинга, позволившая оценить изменения региональных гидрогеологических условий, вызванных проведением различных экспериментов в ПИЛ и проходкой новых подземных выработок. Методика выполнения работ по герметизации скважины при закрытии ПИЛ была, насколько это возможно, приближена к той, что планируется использовать при закрытии реального пункта геологического захоронения. Сейчас на территории закрытой ПИЛ реализуется программа непрерывных наблюдений, в том числе включающая мониторинг процессов восстановления гидрогеологических условий на площадке. Таким образом, к настоящему времени получено достаточно полное описание эволюции условий на площадке, начиная с момента ввода объекта в эксплуатацию и кончая его закрытием.

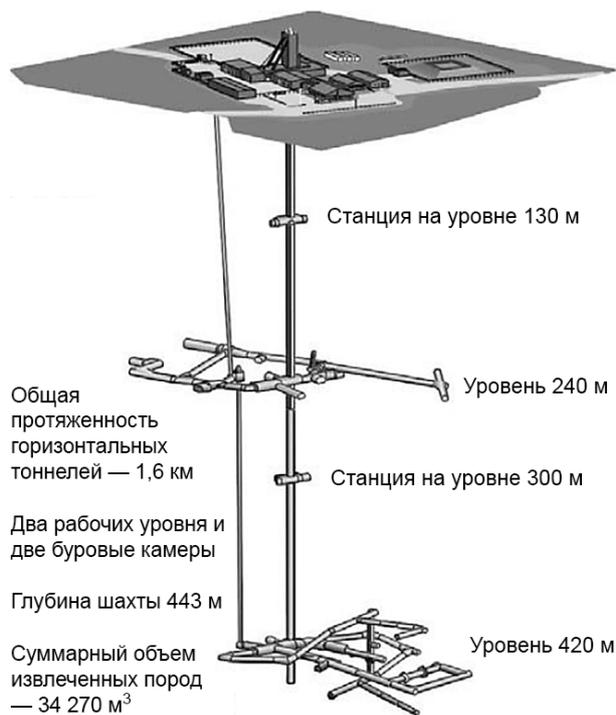


Рисунок 9 — ПИЛ AECL

Основные вехи осуществления исследовательской программы в ПИЛ AECL:

- 1980 г. — подписание договора с властями провинции Манитоба об аренде земли под сооружение установки;
- 1983 г. — завершение этапа предварительных исследований площадки и начало сооружения шахты ПИЛ;
- 1990 г. — завершена проходка тоннеля доступа на уровнях 240 и 420 м;
- 1990 г. — начало активной фазы исследований в ПИЛ;
- 1993 г. — продление договора аренды земли до 2011 года;
- 1998 г. — принятие решения о закрытии ПИЛ;
- 2003 г. — начало работ по выводу из эксплуатации: ликвидация и снос установок на поверхности и очистка загрязненных территорий; герметизация, закупорка и затопление шахт и вентиляционной выработки. Затопление подземных выработок стало последним экспериментом, реализованным в данной ПИЛ. Его цель — изучить процессы деградации системы герметизации в условиях затопления водой;
- 2010 г. — закрытие лаборатории.

Основные направления исследований

В рамках программы исследований, реализованных в ПИЛ AECL, можно выделить три основных направления [14]:

- исследования методологий характеристики площадки или долгосрочного мониторинга геологической среды;
- исследования передвижения растворенных веществ через трещиноватые и не нарушенные трещинами кристаллические породы;
- исследования, обосновывающие технологии герметизации системы захоронения.

Среди множества НИОКР следует выделить несколько ключевых:

- программа по совершенствованию методик измерения напряжений в горных породах и их понимания (In Situ Stress Programme);
- программа работ по характеристике, в ходе реализации которой была разработана комплексная методология характеристики площадок (URL Characterization Programme);
- изучение особенностей придвижения растворенных веществ в сильно трещиноватых и средне трещиноватых породах (Solute Transport in Highly Fractured Rock (HFR) & Solute Transport in Moderately Fractured Rock (MFR));
- программа по изучению влияния жизнедеятельности микроорганизмов на все аспекты реализации концепции захоронения;

- исследование явления диффузии в условиях слаботрешиноватых пород с целью формирования базы данных по эффективным коэффициентам диффузии (In Situ Diffusion Experiment);
- эксперимент по герметизации тоннеля, в ходе которого испытывались технологии герметизации материалами на основе бетона и глины в целях выявления и фиксации данных о параметрах, способных повлиять на их работоспособность (Tunnel Sealing Experiment, TSX);
- эксперимент по заливке цементного раствора, направленный на демонстрацию возможности долгосрочной изоляции высокопроницаемых водоносных зон при их пересечении тоннелями или шахтами с использованием бетонной смеси с суперпластифицирующими добавками, способными проникнуть в мельчайшие трещины и расщелины (Grouting Experiment).
- эксперимент, направленный на изучение показателей функционирования материалов буфера в геологической среде с влажностными условиями как в отсутствии повышенных температур, так и при нагреве (Buffer/Container Experiment);
- эксперимент, направленный на совершенствование базового представления о поведении массива горных пород и механизмов нарушения их сплошности (Mine-by Experiment).

2.4 Финляндия — ПИЛ ONKALO

Таблица 6. Общие сведения о ПИЛ [9]

Тип ПИЛ	Конкретного назначения
Исследуемая формация	Граниты
Место нахождения	Площадка Олкилуото вблизи г. Эурайоки
Характеристики	<p>Проходка подземных выработок осуществлялась с применением буровзрывных технологий; Глубина — 455 м;</p> <p>Один тоннель доступа с уклоном 1:10, шириной 5,5 м, высотой 6,3 м (рис. 10);</p> <p>Три шахты: одна для доставки персонала диаметром 4,5 м и две вентиляционные шахты диаметром 3,5 м;</p> <p>Основная задача исследований — демонстрация практической осуществимости создания пункта геологического захоронения ОЯТ в данной конкретной формации, выявление внутри вмещающих пород участков, наиболее пригодных для прокладки тоннелей захоронения, испытание технологий проведения горнопроходческих работ и окончательной изоляции ОЯТ в реалистичных условиях.</p>

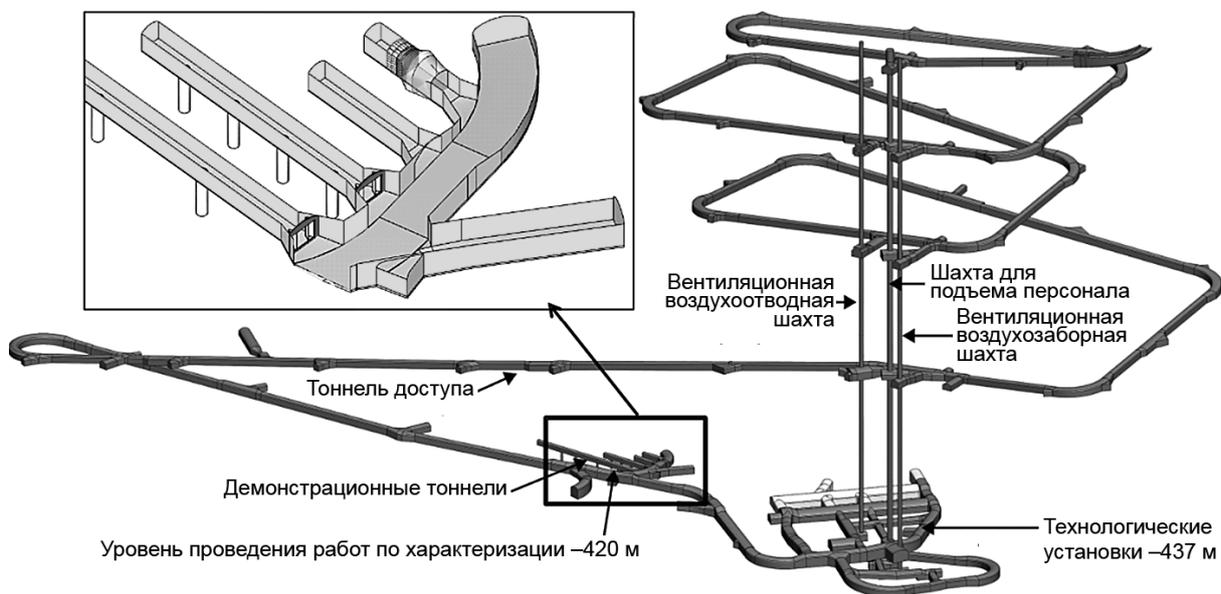


Рисунок 10 — ПИЛ ONKALO

Общие сведения о национальной политике Финляндии в области захоронения ОЯТ [11]:

- В Финляндии утверждена стратегия прямого захоронения ОЯТ. В декабре 2000 года Правительство приняло решение о строительстве пункта геологического захоронения на площадке Олкилуото рядом с городом Эурайоки. В 2004 году началось сооружение подземного объекта ONKALO для определения

характеристик вмещающих пород. В феврале 2016 года POSIVA Oy заключила контракт с компанией YIT Rakennus Oy на сооружение тоннеля доступа к подземным секциям объекта ONKALO. С марта 2016 года YIT Rakennus Oy выполняет работы по сооружению тоннеля доступа, который соединит поверхностные установки с зоной под землей, где собственно и будут захораниваться отходы. Также в рамках проекта на глубине 430-440 м будет выполнена проходка камер для размещения цеха технического обслуживания и паркинга. Работы по размещению ОЯТ в пункте захоронения планируется начать в 2023 году.

- Posiva Oy несет ответственность за обращение с ОЯТ АЭС, операторами которых являются компании TVO и Fortum. Таким образом, Posiva Oy также отвечает и за захоронение ОЯТ, включая деятельность по выбору площадки и лицензированию установки. После того как АЭС будут выведены из эксплуатации, а ОЯТ — надлежащим образом окончательно изолировано в пункте геологического захоронения, государство станет полноправным собственником захороненного ОЯТ и будет нести ответственность за дальнейшее обращение с ним.

Основные вехи осуществления исследовательской программы в ONKALO:

- 2003 г. — начало подготовительных работ на площадке;
- 2004 г. — начало работ по проходке подземных выработок с применением буровзрывных технологий проходки;
- конец 2012 г. — завершение работ по проходке подземных выработок;
- 2014 г. — начало полномасштабных испытаний с целью оценки функциональных возможностей оборудования и технологий, которые планируется использовать в реальном пункте захоронения;
- 2014 г. — завершение проходки всех вертикальных шахтных стволов (шахта для доступа персонала, а также шахты для воздухозабора и воздухоотвода).

Основные направления исследований в ПИЛ ONKALO

На разных уровнях объекта ONKALO расположено несколько зон проведения исследований (рис. 11):

- Ниша 1 — испытание поведения буфера из бентонита (изостатически спрессованный бентонит марки MX-80) в условиях повышенного тепловыделения;
- Ниша 3 (POSE/EDZ) — испытания по определению величины сопротивления растрескивания пород в условиях, характерных для реального пункта захоронения, с бурением двух вертикальных скважин в полу ниши диаметром 1,5 м и глубиной 6 м [15];
- Ниша 4 (HYDCO) — гидрогеологические исследования, направленные на изучение взаимного влияния процессов, протекающих в двух исследовательских скважинах, расхода воды и связей между проводящими воду трещинами в породах;
- Ниша 5 (REPRO) — изучение удерживающей способности и свойств матрицы пород с использованием трассеров (H-3, Cl-36, Na-22, Sr-85 и Ba-133);
- Демонстрационные тоннели предназначены для испытаний в подтверждение технической осуществимости и безопасности отдельных элементов концепции захоронения KBS-3V, а также пригодности пород для осуществления всех запланированных работ;
- POPLU — программа исследований, осуществляемая в рамках европейского проекта DOPAS, направленная на испытание конструкции заглушек POPLU, которыми планируется герметизировать тоннели захоронения, в условиях, приближенных к реальным условиям пункта захоронения, что позволит определить возможность обеспечения всех требований безопасности при реализации данной технологии;
- POST — проект по изучению и выявлению свойств трещин в горных породах, способных повлиять на стабильность скважин захоронения ОЯТ. Задача проекта состоит в разработке стратегии и методических рекомендаций по выявлению параметров, важных с точки зрения оценки стабильности трещин в масштабах пункта захоронения при проектировании объекта и при оценке безопасности на этапе после его закрытия.

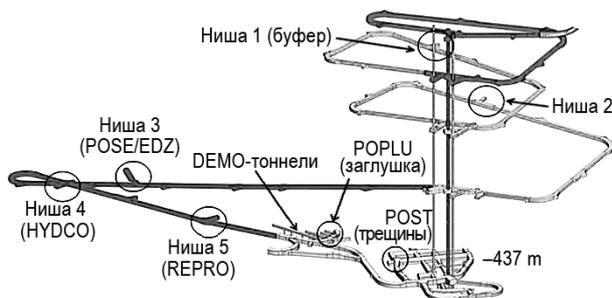


Рисунок 11 — Основные зоны проведения исследований и испытаний в ONKALO

Заключение

Как видно из обзора зарубежного опыта, исследования, проводимые в ПИЛ, играют важнейшую роль в разработке систем глубинного геологического захоронения РАО и соответствующих обоснований безопасности. Некоторые страны проводят такие исследования уже на протяжении более трех десятков лет. За эти десятилетия был накоплен ценный опыт и знания, имеющие отношение как к общей проблематике захоронения РАО (например, полезные при разработке и оценке различных концепций захоронения и с точки зрения повышения уверенности в возможности обеспечения долгосрочной безопасности посредством окончательной изоляции РАО в глубинных геологических формациях), так и более конкретной направленности, например, в области характеристики, проектирования и оценки показателей функционирования разрабатываемых систем захоронения.

Примеры большинства стран (США, Швеция, Финляндия) показывают насколько важную роль в процессе разработки как самой установки, так и материалов обоснования безопасности и вспомогательных оценок безопасности играет стратегическое планирование работ, связанных с созданием ПЗРО. При этом концепция стратегического планирования, являющаяся неотъемлемой частью реализации программ захоронения в этих странах, отражает четыре основных подхода, рекомендованных МАГАТЭ в контексте разработки ПЗРО [16-18]:

- поэтапный подход к разработке «касается этапов разработки ПЗРО, реализация которых во многом зависит от процессов принятия регулирующих и политических решений, и обеспечивает: упорядоченное накопление и оценку необходимых научно-технических данных; оценку потенциальных площадок; разработку концепций захоронения; проведение итеративных исследований по проектированию конструкции и оценке безопасности с использованием постоянно уточняемых данных; рассмотрение органами технического и регулирующего надзора; организацию общественных консультаций; и принятие политических решений... Указанный поэтапный подход, наряду с изучением возможных вариантов выбора конструкции и эксплуатационного управления установкой для захоронения, призван обеспечивать гибкость в реагировании на новую техническую информацию, прогресс в технологиях обращения с отходами и материалами. Он также позволяет учесть социальные, экономические и политические аспекты, связанные с установкой для захоронения, с целью обеспечения принятия всех необходимых мер для дальнейшего предотвращения, недопущения или задержки выбросов в окружающую среду. Этот подход может включать варианты возвращения к предыдущему этапу или даже, для большинства типов установок, извлечения отходов после их размещения, если это будет сочтено целесообразным» [16];
- итеративный подход означает, что разработка ПЗРО должна вестись поэтапно, а некоторые работы в рамках этой деятельности должны повторяться «множественно, что способствует постепенному повышению ценности информации по мере продвижения от одного этапа разработки установки к следующим» [17];
- дифференцированный подход к разработке ПЗРО предполагает, что «уровень детализации информации, представляемой в рамках обоснования и оценки безопасности, должен быть соизмерим с масштабами радиационных рисков, а также сопоставим с конкретным этапом разработки установки для захоронения» [18];
- использование системы многоуровневой аргументации позволяет «повысить доверие заинтересованных сторон и общественности и ценность информации, представленной в рамках обоснования безопасности, за счет использования набора аргументов, которые в совокупности способствовали бы повышению уверенности в отдельных сведениях, выдвигаемых допущениях или результатах» [18].

Отметим три важных для настоящего исследования вывода, сделанных по результатам рассмотрения зарубежного опыта.

- Создание и функционирование ПИЛ является практически обязательным элементом работ по пунктам захоронения геологического типа. Исследования в ПИЛ проводятся во всех странах, запустивших собственные программы по созданию ПЗРО.
- Стратегическое планирование и проектное управление являются обязательными и неотъемлемыми компонентами реализации национальных проектов создания ПЗРО. Разработка стратегического плана (программы) предваряет начало практических работ и постоянно сопровождает их. Применение методов стратегического планирования и проектного управления при реализации подобных проектов не гарантирует успешного достижения цели, но является обязательным условием ее достижения. В отношении этих методов планирования и управления можно отметить, что в современном мире без их применения не зафиксировано случаев успешного достижения сложных и долгосрочных целей при наличии сколь либо значимых ограничений по финансовым ресурсам.

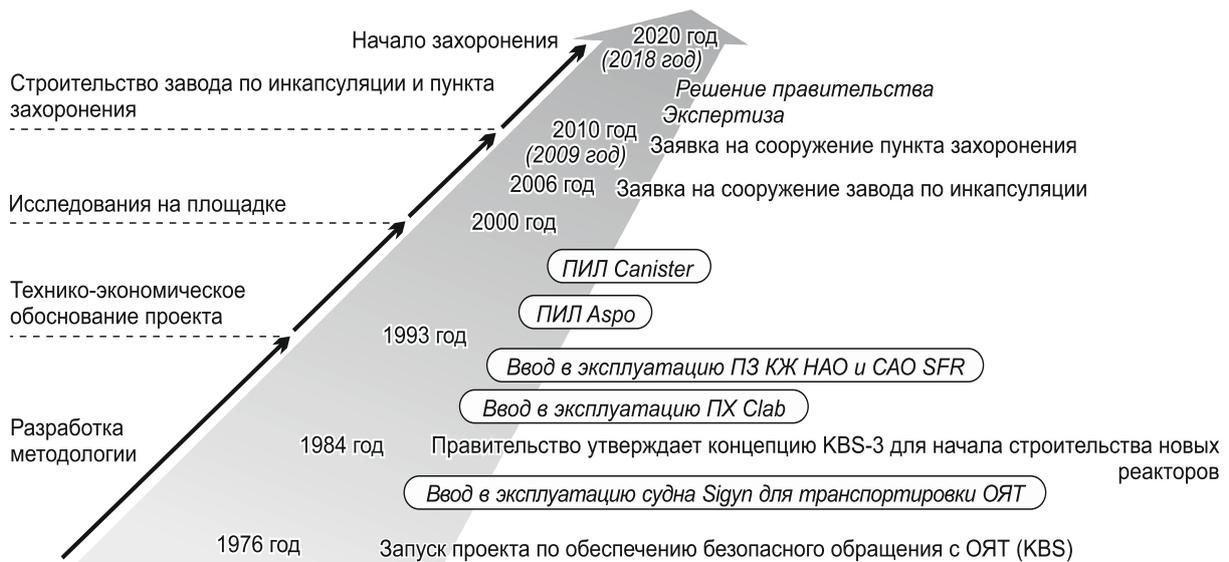


Рисунок 12 — Долгосрочная программа по геологическому захоронению ОЯТ в Швеции

Наиболее простыми и наглядными примерами, иллюстрирующими наличие долгосрочной программы, являются примеры Швеции (рис. 12) и Швейцарии (рис. 13). Основные этапы реализации шведской программы по захоронению ОЯТ (в скобках указаны сроки, намеченные в начале планирования работ по реализации проекта KBS-3, действительные на 2007 год, в 2009 году они были скорректированы с учетом реальных темпов реализации проекта). Другим примером подобного рода является проработанность процедуры оценки безопасности (рис. 14). На рисунке приведена схема части процедуры обоснования безопасности на период после закрытия, разработанная шведской компанией SKB.

Для всех рассмотренных ситуаций мирового опыта характерны единые методологические подходы и источники требований к разработке концепции безопасности. Обращение к этим подходам, изложенным в трех основных документах [16-18], основывается на формулировках «Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами» [19], в связи с чем следование этим подходам и источникам становится практически неизбежным.

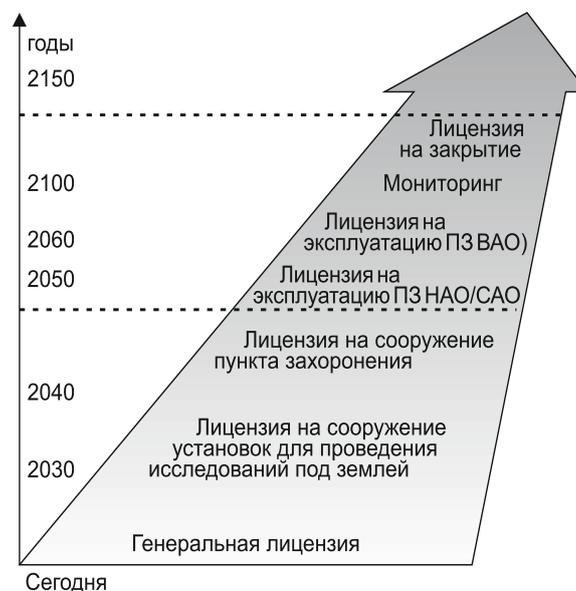


Рисунок 13 — Долгосрочная программа по геологическому захоронению РАО в Швейцарии

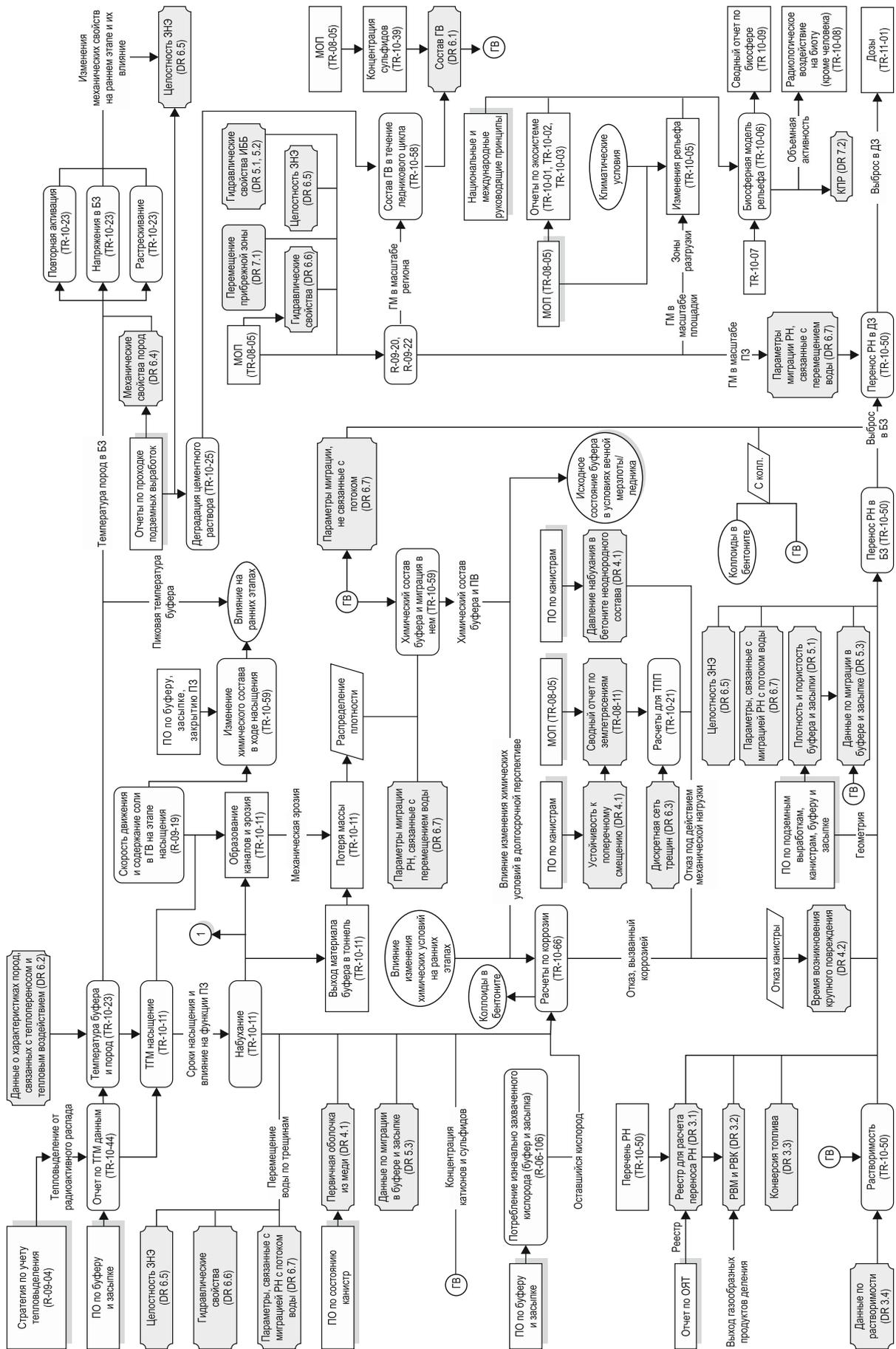


Рисунок 14 — Примерный вид процедуры оценки безопасности (СКВ, Швеция) [20]

Литература

1. IAEA (International Atomic Energy Agency) 2001. The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1243, International Atomic Energy Agency, Vienna, September 2001.
2. NEA (Nuclear Energy Agency) 2013. Underground Research Laboratories (URLs), NEA Report No. 78122, Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2013) 2, February 2013, www.oecdnea.org, Paris, France: OECD 2013.
3. Siting of Radioactive Waste Management Facilities in Japan and Switzerland, Fuchs Sarah, the University of Tokyo, International Program, 2014.
4. Team selected for US deep borehole field test, World Nuclear New, January 2016.
5. The Use of Underground Research Laboratories to Support Repository Development Programs: A Roadmap for the Underground Research Facilities Network by The Underground Research Facilities Network, Robert J. MacKinnon, Sandia National Laboratories, SAND2015-9427, October 2015.
6. The Role of URLs in Support of the Safety Case, Sevougian, S. D. Sandia National Laboratories, SAND2014-18391PE, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2014.
7. 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.
8. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, TR-11-01, Volume I, SKB, March 2011.
9. Case Study: ONKALO Underground Rock Characterization Facility, Kemppainen K., Proceedings of the IAEA Workshop on Need for and Use of Generic and Site-Specific Underground Research Laboratories to Support Siting, Design and Safety Assessment Developments, Oct. 7-9, 2014, Albuquerque, NM.
10. The Use of Underground Research Laboratories to Support Repository Development Programs: A Roadmap for the Underground Research Facilities Network by The Underground Research Facilities Network, Robert J. MacKinnon, Sandia National Laboratories, SAND2015-9427, October 2015.
11. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО, Н.С. Цебаковская, С.С. Уткин, И.В. Капырин и др. — М.: Изд-во «Комтехпринт», 2015, 208 с.
12. ASPO Hard Rock Laboratory, C. Svemar, S. Pettersson, T. Hedman, WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ.
13. The Aspo Hard Rock Laboratory, SKB Publication, SKB.
14. Twenty Plus Years of Underground Research at Canada's URL, Baumgartner, P., P. M. Thompson, International Symposium on Nuclear Energy (SIEN'07), Nuclear Power — A New Challenge, Bucharest, Romania, 15-19 October 2007.
15. ONKALO POSE Experiment — Phase 1&2: 3D Thermo-Mechanics Prediction, Working Report 2012-68, Matti Hakala, Jouni Valli, Posiva, December 2014.
16. Захоронение радиоактивных отходов, Конкретные требования безопасности № SSR-5, Нормы МАГАТЭ по безопасности, МАГАТЭ, Вена, 2011 год.
17. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14, IAEA Safety Standards, IAEA, Vienna, 2011.
18. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-23, IAEA Safety Standards, IAEA, Vienna, 2012.
19. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами, МАГАТЭ, Вена, 5 сентября 1997 года. Конвенция вступила в силу для России 19.04.2006.
20. Model summary report for the safety assessment SR-Site, TR-10-51, Technical Report, SKB, December 2010.