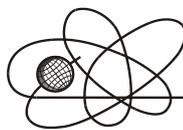




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2017-04

Preprint IBRAE-2017-04

Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, В. Ю. Коновалов

ЗАРУБЕЖНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ И РАО.

**Часть II. Актуальное состояние проектов
создания пунктов глубинного геологического
захоронения в США, Канаде и странах
Азиатского региона**

Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Коновалов В. Ю. ЗАРУБЕЖНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОЯТ И РАО. ЧАСТЬ II. АКТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТОВ СОЗДАНИЯ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАХОРОНЕНИЯ В США, КАНАДЕ И СТРАНАХ АЗИАТСКОГО РЕГИОНА. Препринт ИБРАЭ № ИВРАЕ-2017-04 — Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. — 41 с. — Библиогр.: 42 назв. — 60 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 описаны последние события, произошедшие с конца 2014 года по начало 2017 года в области глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО в Канаде, США и Японии. Представлена актуальная информация по планируемым срокам реализации проектов, их стоимости и ключевым аспектам организации работ.

Кроме того, ввиду малой осведомленности отечественных специалистов в вопросах обращения с ОЯТ и РАО в Китае, Республике Корея и Индии, по этим странам Азиатского региона представлена более подробная информация, включая краткие сведения о ведомствах, ответственных за реализацию проектов захоронения в стране; классификации РАО, реестре РАО (прогнозные и фактические данные), имеющихся в стране установках по обращению с РАО, проектах по созданию пунктов геологического захоронения РАО, подземных исследовательских лабораториях.

©ИБРАЭ РАН, 2017

Cebakovskaya N.S., Utkin S.S., Konovalov V.Yu. INTERNATIONAL EXPERIENCE IN DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF SNF AND RW. PART2. CURRENT PROGRESS IN DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE AND SPENT FUEL IN THE U.S., CANADA AND ASIAN COUNTRIES. Preprint IBRAE-2017-04 — Moscow: Nuclear Safety Institute, 2017 — 41 p. — Bibliogr: 42 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 examines recent developments in the field of RW and SNF deep geological disposal (2014 – 2017) in Canada, the U.S. and Japan. It provides up-to-date information on the planned schedule of disposal operations, relevant costs and management aspects.

Owing to the fact that very few publications are available in Russian literature discussing RW and SNF management issues in China, the Republic of Korea and India, the paper provides a more extensive study on relevant topics for these countries, including data on institutions and organizations responsible for waste disposal; RW classification and inventory (forecasted and currently accumulated), operated waste management facilities, geological disposal projects and underground research laboratories.

©Nuclear Safety Institute, 2017

Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона

Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ «ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: (495) 955-23-06, эл. почта: ceb@ibrae.ac.ru

В. Ю. Коновалов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОПЕРАТОР ПО ОБРАЩЕНИЮ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ»
тел.: (495) 967-94-46, эл. почта: info@noraо.ru

Содержание

Принятые сокращения	4
Введение	4
Общий прогресс в реализации проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения за рубежом: Канада, США, Япония	4
Канада	4
Проект глубинного геологического захоронения НАО и САО	5
Проект глубинного геологического захоронения ОЯТ	6
США	9
Проект глубинного скважинного захоронения РАО	10
Пункт захоронения для высокоактивных отходов ядерно-оружейного комплекса США	12
Япония	13
Программы по глубинному геологическому захоронению ОЯТ и РАО в странах Азиатского региона: Индия, Китай, Республика Корея	17
Индия	17
КНР	21
Республика Корея	26
Классификация и реестр РАО	28
Пункт окончательной изоляции НАО и САО на площадке АЭС Вольсон	29
Научные исследования и разработки в области захоронения ОЯТ	32
Референтная концепция корейской системы захоронения ОЯТ и ВАО	32
Концепция геологического захоронения ОЯТ CANDU и ВАО от пирохимической переработки ОЯТ PWR	35
Литература	38
Приложение 1. Сводная информация по проектам глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО, реализуемым в странах Азии, США и Канаде	40

Принятые сокращения

- APM — Adaptive Phased Management, концепция адаптивного обращения с РАО (Канада)
СЕАА — Канадское агентство по экологическим экспертизам
DOE — Министерство энергетики США
FEPs — Особенности, события и процессы
NRC — Комиссия по ядерному регулированию США
NWMO — Организации по обращению с ядерными отходами (Канада)
NUMO — Организация по обращению с РАО (Япония)
OPG — Компания Онтарио Пауэр Дженерейшн (Канада)
WIPP — Опытная установка по изоляции трансурановых радиоактивных отходов (Нью-Мексико, США)
АБ — Траншеи с облицовкой из армированного бетона (Индия)
АЭС — Атомная электростанция
ВАО — Высокоактивные отходы
ДЖ НСАО — Долгоживущие низко- и среднеактивные отходы
ЗТ — Земляные траншеи с облицовкой из каменной кладки (Индия)
ЗСО — Зона структурного ослабления (возникает вследствие проведения горнопроходческих работ)
КП — Скважины, обсаженные керамическими плитами (Индия)
НАО — Низкоактивные отходы
НИОКР — Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НСАО — Низко- и среднеактивные отходы
ОВОС — Оценка воздействия на окружающую среду
ОТВС — Отработавшие тепловыделяющие сборки
ОЯТ — Отработавшее ядерное топливо
ПЗ — Пункт захоронения
ПИЛ — Подземная исследовательская лаборатория
РАО — Радиоактивные отходы
САО — Среднеактивные отходы

Введение

Данная работа продолжает серию публикаций ИБРАЭ РАН, призванных обобщить накопленный за рубежом опыт в сфере создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий и пунктов глубинного геологического захоронения ОЯТ и долгоживущих РАО. В предыдущей части была представлена актуальная информация по восьми европейским странам, позволяющая оценить общий прогресс, достигнутый за последние три года, в области глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО в странах, занимающих лидирующие позиции в этой сфере: Бельгии, Великобритании, Венгрии, Германии, Финляндии, Франции, Швеции, Швейцарии.

В настоящей работе актуализирована информация по США и Канаде, а также по четырем странам Азиатского региона: Японии, Республике Корея, Индии и Китаю (приложение 1). Напомним, что более подробно ознакомиться с историей реализации проектов глубинного геологического захоронения за рубежом можно, обратившись к «Обзору зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО» [1], опубликованному в 2015 году. Ввиду того, что последние три страны (Республика Корея, Индия и Китай) не были представлены в данном обзоре, а также из-за малой осведомленности отечественных специалистов в вопросах обращения с ОЯТ и РАО в странах Азиатского региона, по этим странам в рамках настоящей публикации представлена более подробная информация, включая сведения о: ведомствах и организациях, ответственных за реализацию проектов захоронения; классификации РАО, реестре РАО (прогнозные и фактические данные), имеющихся в стране установках по обращению с РАО, проектах по созданию пунктов геологического захоронения РАО, подземных исследовательских лабораториях.

Общий прогресс в реализации проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения за рубежом: Канада, США, Япония

Канада

В Канаде реализуется сразу два проекта глубинного геологического захоронения РАО:

- проект по созданию объекта окончательной изоляции ОЯТ в соответствии с так называемой концепцией адаптивного обращения с РАО (англ. Adaptive Phased Management, APM),

- проект по захоронению порядка 200 000 м³ НАО и САО в известняковых породах на глубине 680 м.

Работы по захоронению НАО и САО планируется начать в 2026 году, хотя реализация проекта пока идет с отставанием от установленного графика, в соответствии с которым компания-оператор (Ontario Power Generation, далее OPG) должна была получить лицензию на строительство установки еще в 2015 году. Однако в начале 2016 года Министерство окружающей среды и проблем изменения климата (регулятор) запросило у OPG проведение дополнительных исследований по изучению возможности сооружения объекта на двух альтернативных площадках. В декабре 2016 года итоговый отчет по данному исследованию был направлен на рассмотрение регулятору. Окончательное решение о месте сооружения пункта захоронения НАО и САО ожидается в течение 2017 года.

К середине 2016 года круг площадок, рассматриваемых в качестве потенциальных кандидатов для сооружения пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ, был сужен до девяти (все в провинции Онтарио). Ожидается, что в 2023 году будет выбрана одна площадка для проведения более детальных исследований, и NWMO надеется приступить к захоронению ОЯТ в 2040-2045 гг.

В августе 2016 года NWMO подготовила очередной публичный отчет – стратегический мастер-план, в котором были обозначены ключевые направления работы организации на следующие пять лет. Среди всего прочего в этом матер-плане был представлен обновленный проект концепции захоронения ОТВС, а согласно приведенным NWMO оценкам, захоронение 5,2 млн канадских ОТВС обойдется в сумму порядка 22,8 млрд канадских долларов.

Проект глубинного геологического захоронения НАО и САО

Канадская стратегия обращения с НАО и САО предусматривает окончательную изоляцию этих видов РАО в геологических формациях, гарантирующую обеспечение безопасности человека и окружающей среды в долгосрочной перспективе (рис. 1). В 2001 году, заручившись уверенной поддержкой местного совета, компания OPG приступила к проведению предварительных исследований на площадке, расположенной в муниципалитете Кинкардин. Исследования были организованы в форме независимой оценки (Independent Assessment Study), включавшей оценку целесообразности концепции захоронения НАО и САО с геотехнической точки зрения, исследование общественного мнения путем интервьюирования местных жителей и предпринимателей, а также проведение ОВОС. Еще одним неотъемлемым элементом независимой экспертизы стало проведение консультаций с жителями как самого муниципалитета Кинкардин, так и расположенных по соседству населенных пунктов. Согласно заключению экспертизы, по геологическим характеристикам данная площадка идеально подходит для размещения пункта геологического захоронения, а местные жители в целом поддерживают идею строительства установки [1].

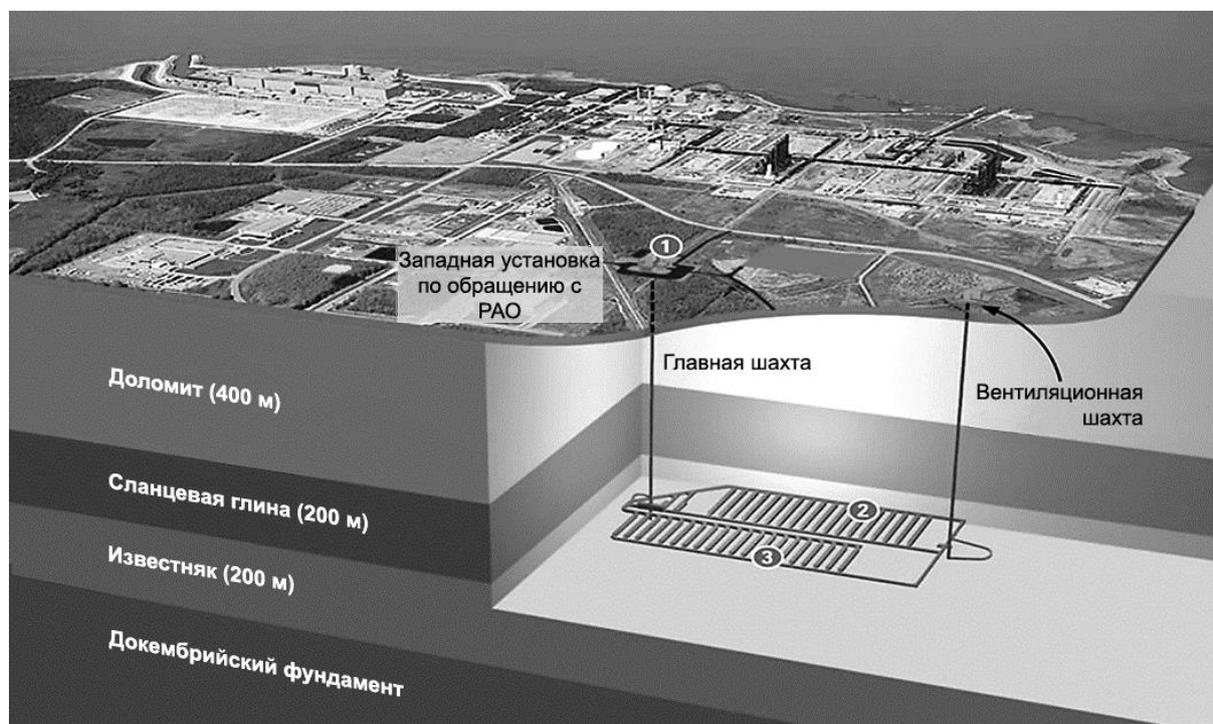


Рисунок 1 — Проект канадского пункта глубинного геологического захоронения НАО и САО

В апреле 2004 года муниципальный совет Кинкардин принял резолюцию о признании концепции глубинного захоронения НАО и САО наиболее предпочтительной стратегией по обращению с этим видом РАО, гарантирующей обеспечение безопасности в долгосрочной перспективе, а 13 октября 2004 года предоставил компании ORG официальное разрешение на строительство установки в этой местности. В подписанном соглашении были также оговорены сроки и условия реализации проекта. В ноябре 2005 года был инициирован процесс экологической экспертизы проекта, включающий проведение детальных геологических изысканий, разработку предварительного проекта установки, подготовку оценки безопасности и оценки воздействия на окружающую среду.

С 2007 по 2010 год на площадке было пробурено шесть скважин до глубины заложения будущего объекта, а в 2012 году были сооружены еще две дополнительные скважины, что позволило провести ряд исследований, результаты которых свидетельствуют о наличии благоприятных условий для сооружения установки. К 2015 году планировалось получить лицензию на сооружение установки и приступить к строительным работам на площадке.

В мае 2015 года было получено положительное заключение по оценке воздействия проектируемого объекта на окружающую среду. Однако федеральное правительство решило отложить принятие окончательного решения по проекту, а в феврале 2016 года Министерство окружающей среды и проблем изменения климата заявило о необходимости проведения дополнительных исследований. Так, окончательное решение по проекту было принято на основании результатов исследований по трем ключевым направлениям [2]:

- оценка экологических последствий сооружения объекта в двух возможных районах провинции Онтарио, выбранных из соображений технической осуществимости проекта и его экономической целесообразности. Одна из предлагаемых площадок расположена на юге провинции (осадочные породы), другая – на севере (граниты). При этом в ходе данного исследования точное место строительства объекта определить не требовалось;
- оценка совокупного воздействия объекта на окружающую среду для варианта размещения пункта захоронения ОЯТ в границах исследуемой площадки проектируемого пункта захоронения НАО и САО;
- разработка плана мероприятий по смягчению последствий, связанных с созданием объекта.

28 декабря 2016 года компания ORG направила на рассмотрение Канадскому агентству по экологическим экспертизам (СЕАА) итоговый отчет по проекту дополнительных исследований последствий строительства пункта захоронения на двух альтернативных площадках в осадочных и гранитных породах в трех томах [3-5]. В целом, исходя из результатов проведенного исследования, выбор другой площадки для размещения установки связан с целым рядом негативных последствий социально-экономического характера. Ниже приведены пять наиболее значимых [6]:

- на текущем этапе реализации проекта принятие решения о строительстве объекта на другой площадке приведет к повышению суммарных затрат на 3,5 млрд долларов при том, что затраты на реализацию проекта на рассматриваемой ранее площадке оцениваются всего в 2,4 млрд долларов;
- график реализации проекта изменится: в соответствии с текущими планами первая партия отходов должна быть захоронена в 2026 году, а в случае сооружения установки на другой площадке к работам по захоронению РАО приступят не раньше 2055 года;
- наиболее серьезные риски в случае строительства объекта на другой площадке связаны с необходимостью транспортировки отходов на расстояние до 2 000 км, для чего может потребоваться совершить от 22 000 до 24 000 рейсов по автомобильным дорогам общего пользования, преодолев в общей сложности более миллиона километров. С точки зрения затрат на транспортировку и упаковку отходов, размещение пункта захоронения на альтернативной площадке приведет к удорожанию проекта до 1,4 млрд долларов;
- подготовка площадки общей площадью 900 га, включая работы по очистке территории, созданию транспортной и иной инфраструктуры, окажет негативное воздействие на среду обитания диких животных и растений и нанесет вред окружающей среде;
- в случае размещения установки на альтернативной площадке могут возникнуть значительные трудности с поиском муниципалитета, жители которого поддержали бы идею сооружения пункта захоронения.

Учитывая результаты данного исследования, компания ORG надеется, что уже в течение 2017 года правительство Канады утвердит площадку в муниципалитете Кинкардин для строительства пункта окончательной изоляции НАО и САО.

Проект глубинного геологического захоронения ОЯТ

Впервые стратегия захоронения ОЯТ как основа национальной политики долгосрочного обращения с радиоактивными отходами в Канаде была предложена компанией Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL) еще в 1972 году. К концу 1980-х гг. канадскими специалистами было проведено множество исследований по установлению целесообразности практической реализации концепции геологического захоронения ОЯТ в глубинных массивах магматических пород Канадского щита.

В 2002 году канадский Парламент принял постановление о создании Организации по обращению с ядерными отходами (NWMO), которой было поручено разработать и реализовать стратегию окончательной изоляции отработавшего топлива. Сравнив между собой различные концепции, в 2005 году NWMO рекомендовало Министерству природных ресурсов Канады утвердить концепцию адаптивного поэтапного обращения с РАО (АРМ): «адаптивный» означает возможность адаптации плана работ на каждом этапе реализации проекта в свете новых знаний или обстоятельств, а «поэтапный» – что разработка установки будет осуществляться в несколько этапов на протяжении около 160 лет вплоть до момента ее окончательного закрытия. Концепция предполагает создание централизованного пункта глубинного геологического захоронения на глубине 500–1000 м в магматических породах, осуществление непрерывного мониторинга установки, а также обеспечение возможности повторного извлечения отходов в течение длительного периода времени.

Проект, реализуемый в рамках концепции АПО, состоит из девяти последовательных этапов (табл. 1). Проведение работ, относящихся к первому этапу, началось в мае 2010 года. С 2011 по 2013 гг. были реализованы работы второго этапа – первичный скрининг, в котором приняли участие 22 коммуны, проявившие интерес к проекту. К концу 2015 года была завершена первая из двух стадий третьего этапа предварительной оценки потенциальных площадок во всех заинтересованных коммунах. В ходе этих работ была проведена первичная оценка потенциальной пригодности местных вмещающих пород с точки зрения их способности к обеспечению удержания и изоляции отработавшего топлива. По большей части данные работы включали теоретические исследования, которые позволили ответить на следующие вопросы [7]:

- позволяют ли характеристики вмещающих пород на площадке обеспечить долгосрочное удержание и изолировать отработавшее топливо от людей, окружающей среды и уберечь от воздействий, провоцируемых антропогенной деятельностью на поверхности или природными явлениями;
- является ли вмещающая формация стабильной и будет ли она оставаться таковой в течение очень продолжительного периода времени с учетом возможных воздействий, связанных с геологическими и климатическими процессами, например, землетрясениями и ледниковыми циклами;
- позволяют ли условия на площадке обеспечить безопасность при сооружении, эксплуатации и закрытии пункта захоронения;
- насколько велика вероятность несанкционированного проникновения человека в пункт захоронения;
- имеются ли реальные возможности для изучения и описания геологических условий на уровне, необходимом для демонстрации обеспечения безопасности захоронения в долгосрочной перспективе;
- могут ли быть разработаны безопасные маршруты транспортировки ОЯТ из мест его текущего хранения.

Таблица 1. Основные этапы реализации концепции АРМ

Подготовка	Публикация окончательной редакции руководства по поиску площадки для сооружения пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ
Этап 1	Запуск процесса поиска площадки с предоставлением, насколько это возможно, полной и всеобъемлющей информации населению страны
Этап 2	Проведение первичного скрининга и обсуждений в коммунах, проявивших интерес к участию в проекте
Этап 3	В коммунах, успешно прошедших этап первичного геологического скрининга, в два этапа проводится предварительная оценка потенциальной пригодности территорий для сооружения пункта захоронения
Этап 4	Детальные исследования площадки, выбранной в ходе исследований предыдущего этапа в качестве наиболее приоритетной для размещения объекта
Этап 5	Согласие коммуны на реализацию проекта в конкретной местности
Этап 6	Ратификация соглашения между коммуной и NWMO после проверки на соответствие требованиям и выдачи положительного заключения регулирующим органом
Этап 7	Формальная публичная независимая экспертиза соблюдения всех требований, норм и правил
Этап 8	Сооружение и эксплуатация объекта для характеристики пород (специально сооруженной ПИЛ конкретного назначения)
Этап 9	Сооружение и эксплуатация пункта захоронения

На данный момент усилия NWMO сосредоточены на реализации работ, предусмотренных в рамках второй стадии третьего этапа, в ходе которой к середине 2016 года круг рассматриваемых площадок был сужен до девяти (рис. 2). Проводимые исследования позволят более детально оценить как возможность технической реализации и обеспечения безопасности при осуществлении проекта в конкретных регионах (приемлемость с точки зрения геологии, инженерных возможностей для реализации, удобства с точки зрения транспортировки ОЯТ, обеспечения защиты окружающей среды и т.п.), так и социально-экономические условия для повышения благосостояния отдельных коммун в ходе создания пункта захоронения. Кроме того, данная стадия проекта предполагает установление более тесных контактов NWMO с

местным населением и в первую очередь с представителями коренных народов. Ведь для NWMO и правительства Канады их поддержка и партнерство с ними являются неотъемлемым условием успешной и своевременной реализации данного проекта. Также в ходе текущей стадии работ будут проведены предварительные полевые исследования, включающие:

- детальные геофизические обследования;
- первичное, а затем более детальное геологическое картирование;
- сейсмическую разведку методом отражённых волн;
- бурение глубоких скважин.

Ожидается, что реализация работ, предусмотренных в рамках второй стадии третьего этапа, завершится к концу 2022 года, а в 2023 году будет выбрана одна площадка для проведения более детальных исследований, запланированных в рамках четвертого этапа. Учитывая текущие темпы реализации проекта, NWMO надеется приступить к захоронению ОЯТ в 2040-2045 гг.

В августе 2016 года NWMO подготовила очередной публичный отчет – стратегический мастер-план, в котором были обозначены ключевые направления работы организации на следующие пять лет – с начала 2017 по конец 2021 года. Так, например, в отчете были представлены результаты последней оценки суммарных затрат на реализацию проекта. Так, захоронение 5,2 млн канадских ОТВС обойдется в сумму порядка 22,8 млрд долларов.

Кроме того, в данном документе была представлена обновленная версия концепции захоронения канадских ОТВС. Согласно новому проекту, на заводе по упаковке ОЯТ контейнеры с ОТВС будут заключены в блоки из бентонита. Затем, при размещении в пункте захоронения, такие блоки будут штабелироваться в два уровня при горизонтальной ориентации самой ОТВС (рис. 3). Все оставшиеся зазоры планируются засыпать гранулами из бентонита.



Рисунок 2 — Коммуны Канады, принявшие участие в реализации проекта АПО

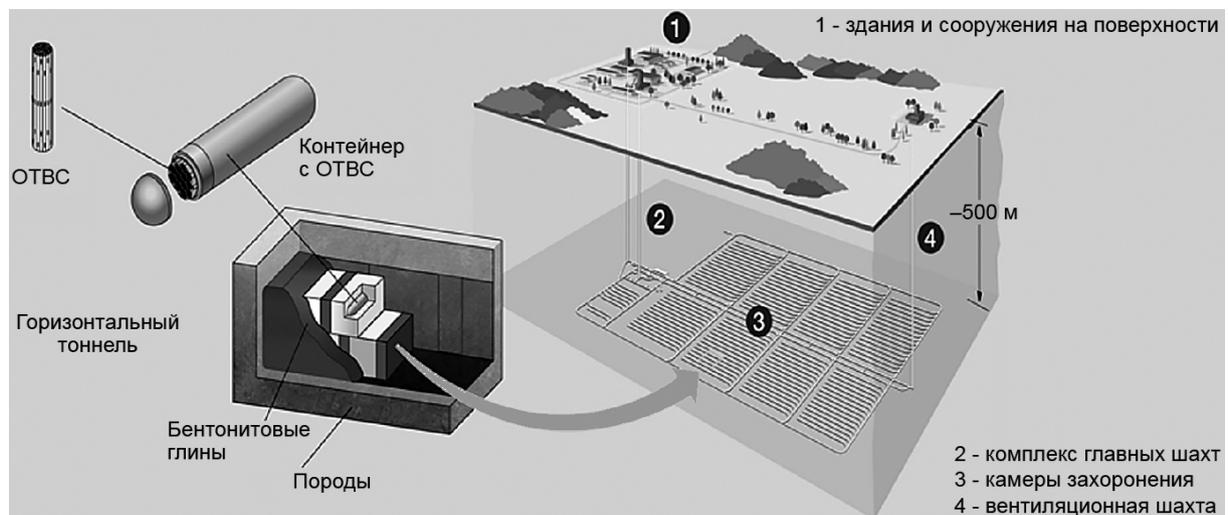


Рисунок 3 — Обновленная концепция захоронения канадского ОЯТ

Сам пункт захоронения, состоящий из целой системы камер для окончательной изоляции таких блоков с ОТВС, планируется построить на глубине около 500 м, в зависимости от геологических особенностей конкретной площадки. Для размещения необходимой инфраструктуры на поверхности потребуется участок размером 650 на 550 м, на котором будут построены все основные здания, а также еще один размером 170 на 100 м для размещения установок вентиляционной системы. При этом NWMO ожидает, что территории над самой установкой для захоронения можно будет использовать в иных целях. Поэтому в ближайшее время оператору предстоит продемонстрировать возможность соблюдения всех требований безопасности на данных территориях, что позволило бы санкционировать дальнейшее использование земель, прилегающих к площадке, по любому целевому назначению. Между тем для размещения подземных секций пункта захоронения, учитывая имеющиеся прогнозы по реестру РАО и особенности местной геологии, понадобится участок размером 2 на 3 км (т.е. площадью порядка 600 га).

США

По состоянию на начало 2017 года проект Якка-Маунтин, обошедшийся в сумму в 9 млрд долларов, все еще находится на стадии заморозки. Тем не менее, за последние два года регулятор (NRC) завершил публикацию всех томов отчета по обоснованию безопасности данного проекта. В результате NRC так и не выдало разрешения на эксплуатацию объекта в виду того, что, несмотря на соблюдение требований безопасности, у DOE отсутствуют права на пользование земельным участком, отведенным под площадку пункта захоронения, и водными ресурсами. Смена высшего руководства страны тем не менее может означать, что проект Якка-Маунтин будет возобновлен, и первым шагом на этом пути станет создание нового независимого органа – Управления по обращению с РАО, на который в том числе и будет возложена ответственность за реализацию данного проекта.

Все же в течение последних двух лет основное внимание в области захоронения РАО было сосредоточено на следующих проектах:

- разработка новой процедуры поиска площадки для сооружения пунктов централизованного хранения и захоронения ОЯТ и ВАО, основывающейся на принципе добровольного участия и согласия местных жителей,
- программа создания отдельного пункта захоронения для высокоактивных отходов, образовавшихся на установках ядерно-оружейного комплекса США, которые изначально планировалось захоронить вместе с коммерческим ОЯТ в Якка-Маунтин;
- проект глубинного скважинного захоронения РАО.

В 1978 году DOE инициировало программу исследований с целью поиска потенциальных площадок для сооружения первого в США пункта геологического захоронения ОЯТ. К 1983 году по результатам исследований было определено 9 площадок, отобранных для проведения детальных геологических изысканий. Через два года круг поиска сузился до трех площадок: Хэнфорд (штат Вашингтон, базальт), Деф Смит (штат Техас, соли) и Якка-Маунтин (штат Невада, туф). В 1987 году, основываясь на полученных данных о высокой стабильности вмещающих пород из туфа и малой интенсивности движения грунтовых вод, Конгресс принял решение о том, что в дальнейших исследованиях по характеристике будет участвовать только Якка-Маунтин. В 1997 году в Якка-Маунтин завершились работы по сооружению подземной исследовательской установки протяженностью галерей около 8 км. В том же году DOE инициировало программу по оценке технической осуществимости проекта, призванную обобщить результаты уже проведенных работ по характеристике площадки [1].

В 1998 году был опубликован итоговый отчет, содержащий рекомендации по поводу проведения дальнейших работ по характеристике. В результате в 2002 году площадка была утверждена для строительства пункта захоронения (рис. 4), а в 2006 году были определены сроки его ввода в эксплуатацию – март 2017 года.

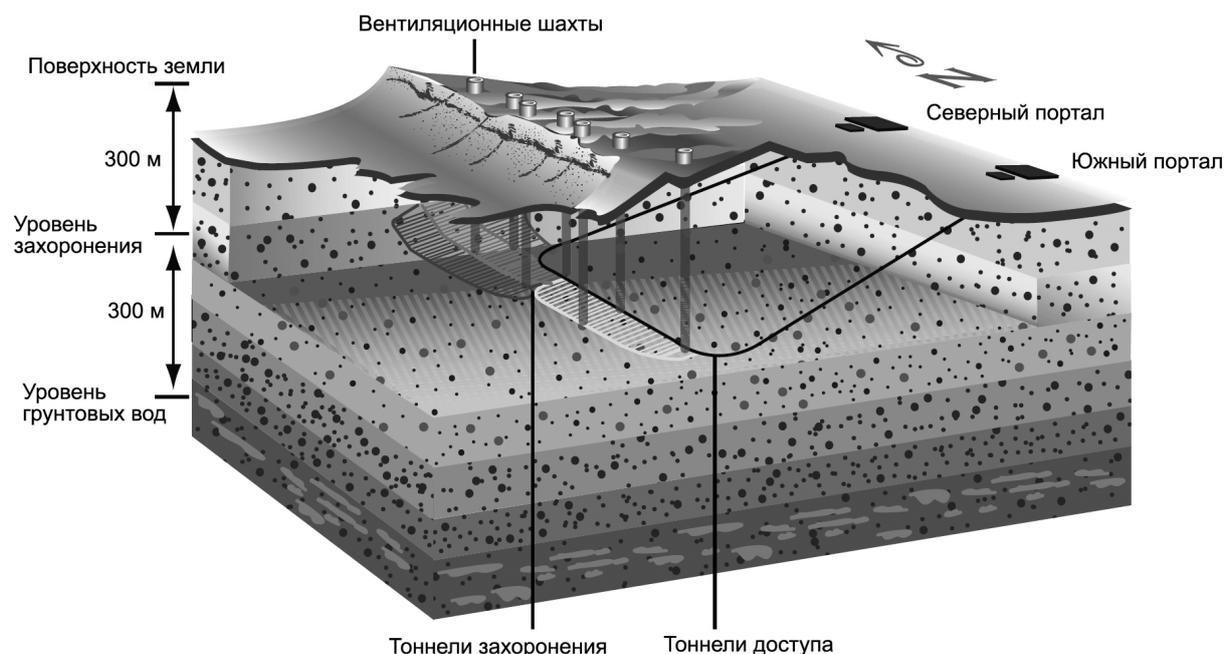


Рисунок 4 — Проект пункта геологического захоронения ОЯТ Якка-Маунтин [1]

Однако политические процессы смены власти в США, в результате которых президентом страны стал Барак Обама, помешали осуществлению этих планов. Еще во время своей предвыборной кампании Б. Обама пообещал закрыть проект, что и было сделано уже в 2009 году, всего спустя год после того как NRC (Комиссия по ядерному регулированию США) приступила к рассмотрению заявки на получение лицензии. В 2009 году Сенат США принял постановление о снятии Якка-Маунтин с дальнейшего рассмотрения в качестве площадки для строительства объекта окончательной изоляции ОЯТ. Несмотря на решение Сената, в соответствии с решением Апелляционного суда США, в 2013 году NRC продолжила рассмотрение заявки. В 2014–2015 гг. Комиссия опубликовала пять томов отчета по обоснованию безопасности. В целом Комиссия признала, что большая часть требований была соблюдена. Исключения составляют лишь требования в отношении прав собственности на земле- и водопользование. До настоящего момента участок земли, отведенный под строительство пункта захоронения, так и не был приобретен DOE в собственность, а этот процесс может надолго затянуться и стать серьезной помехой на пути своевременной реализации проекта. Таким образом, из-за отсутствия у DOE прав на пользование земельным участком и водными ресурсами на площадке Якка-Маунтин эксперты NRC не смогли выдать разрешение на строительство установки, которая уже обошлась в сумму порядка 9 млрд долларов США.

Еще одним открытым вопросом оставалось воздействие установки на грунтовые воды, а также последствия выхода грунтовых вод на поверхность. В 2013 году DOE приступило к подготовке дополнительных материалов, содержащих описание потенциального радиологического и нерадиологического воздействия возможных выбросов радиоактивных веществ из формы отходов на водоносные горизонты, почву, окружающую среду и здоровье человека. В августе 2015 года эти материалы были представлены на суд общественности. Публичные слушания по этому вопросу завершились в ноябре 2015 года, после чего сотрудники NRC приступили к экспертизе материалов. Согласно выводам отчета, любые непосредственные, опосредованные и суммарные риски для рассмотренных в данных материалах объектов воздействия можно считать незначительными.

В целом для продолжения реализации проекта захоронения в Якка-Маунтин необходимо завершить процедуру экспертизы проекта, экспертам NRC – подготовить заключение по дополнительным материалам, включенным в итоговую оценку воздействия на окружающую среду, а сотрудникам DOE – организовать и провести общественные слушания. С учетом меняющегося в США политического климата и приходом в 2017 году к власти Дональда Трампа ожидается, что эти процессы могут быть запущены уже в ближайшее время. Самым важным первым шагом на этом пути может стать создание нового независимого органа – Управления по обращению с РАО, на который в том числе и будет возложена ответственность за реализацию данного проекта.

В течение последних двух лет (2015–2016 гг.) основные дискуссии разворачивались по трем основным направлениям работ:

- разработка новой процедуры поиска площадки для сооружения пунктов централизованного хранения и захоронения ОЯТ и ВАО, основывающейся на принципе добровольного участия и согласия местных жителей [8],
- программа создания отдельного пункта захоронения для высокоактивных отходов, образовавшихся на установках ядерно-оружейного комплекса США, которые изначально планировалось захоронить вместе с коммерческим ОЯТ в Якка-Маунтин [9];
- проект глубинного скважинного захоронения РАО [10–12].

Проект глубинного скважинного захоронения РАО

Концепция глубинного скважинного захоронения высокоактивных отходов изучается уже на протяжении нескольких десятилетий во многих странах, а в США впервые была предложена в качестве возможного варианта окончательной изоляции этой категории отходов еще в 1957 году, когда американская академия наук разработала руководящие принципы долгосрочной изоляции РАО.

Современная концепция скважинного захоронения предусматривает бурение скважины или куста скважин в кристаллических породах до глубины 5 000 м. В нижнюю часть скважины (2 000 м) помещают канистры с ОЯТ или остеклованными ВАО, а верхнюю часть (3 000 м) заполняют инертными материалами (спрессованным бентонитом, бетоном, асфальтом) (рис. 5). Таким образом, данная концепция предполагает захоронение РАО на глубинах, в несколько раз превышающих таковые в случае обычного проекта глубинного геологического захоронения, а значит, обеспечивает и более надежную изоляцию от окружающей среды. Зона захоронения в одной такой скважине может вместить до 400 канистр с отходами высотой около 5 м [13].

* англ. Consent-Based Siting

** ОЯТ из реакторов PWR из расчета, что в одну скважину может быть загружено 235 т ОЯТ [12]

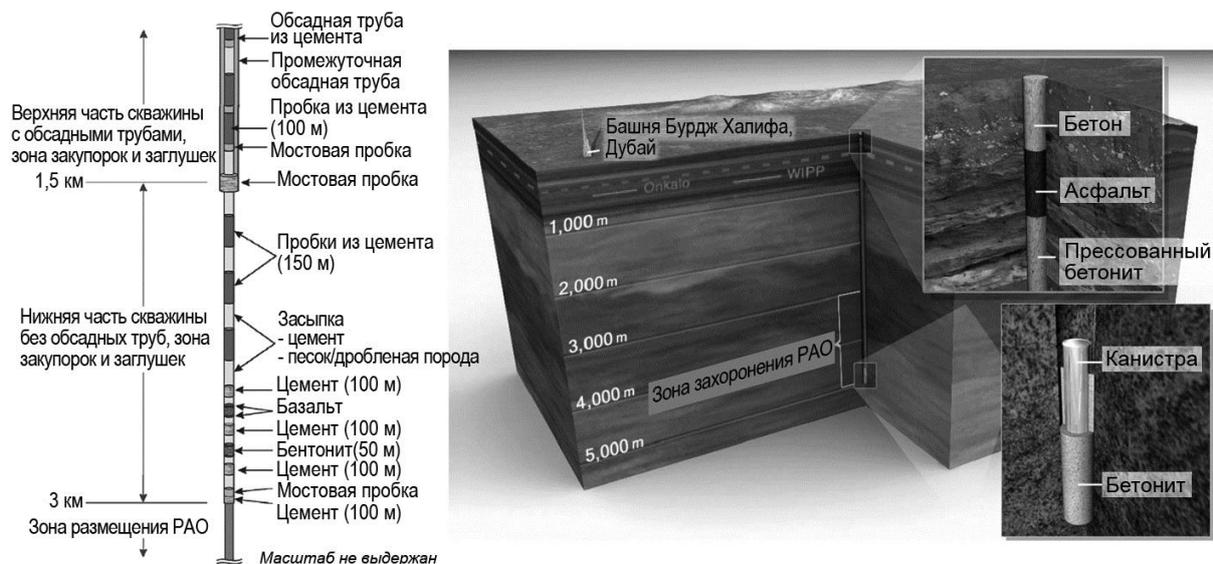


Рисунок 5 — Концепция глубинного скважинного захоронения ОЯТ и ВАО [12]

Упаковка для захоронения отходов в таких скважинах будет состоять из оболочки, выполненной из легированной стали, приварных заглушек, обеспечивающих герметизацию отходов внутри канистры, и разъемов с резьбовым сочленением для загрузки целой цепочки канистр с отходами в скважину. Такая достаточно простая структура позволит противостоять воздействию механических напряжений при осуществлении манипуляций с упаковками, их размещении внутри скважины, а также воздействию гидростатического давления и высоких температур, которые будут наблюдаться как в процессе захоронения, так и после размещения отходов в установке.

В табл. 2 представлены результаты оценки стоимости реализации захоронения в одной скважине. Ожидается, что наибольшие затраты будут связаны с проведением работ по бурению и укреплению скважины. Вторая по величине статья расходов – изготовление канистр и их загрузка ОЯТ. При этом затраты на размещение канистр и закупорку и герметизацию скважин приблизительно одинаковы. Оценка проводилась для проекта захоронения ОТВС, выгруженных из реактора типа PWR, с учетом загрузки в одну скважину 400 канистр с ОТВС общим весом 253 тонны. Таким образом, расчетная стоимость захоронения составит около 158 долларов США на килограмм. Для сравнения в существовавший до середины 2014 года Фонд ядерных отходов, средства из которого должны пойти на реализацию проекта глубинного геологического захоронения, операторы АЭС были обязаны перечислять по 0,01 доллара США за каждый произведенный киловатт электроэнергии, а это значит, что удельная стоимость захоронения могла составить 400 долл./кг [14]. Поэтому, даже несмотря на то, что представленная в табл. 2 итоговая стоимость захоронения не включает в себя затраты на транспортировку и промежуточное хранение ОЯТ, ожидается, что накопленных средств Фонда хватит на реализацию данного проекта.

Таблица 2. Оценка стоимости глубинного скважинного захоронения ВАО/ОЯТ

	Затраты в расчете на одну скважину, в \$ по курсу 2011 года
Бурение, укрепление и оборудование скважины	27 296 587
Упаковка и загрузка канистр	7 629 600
Размещение канистр	2 775 000
Закупорка и герметизация	2 450 146
ВСЕГО	40 151 333

Что касается времени осуществления работ, то по результатам проведенной оценки общая продолжительность бурения одной скважины, ее укрепления и оборудования, загрузки отходов с последующей герметизацией скважины составит около 186 дней. Причем эти расчеты были подготовлены, основываясь на предположении о том, что все работы будут проводиться непрерывно. Таким образом, в случае одновременного проведения работ в четырех скважинах скорость захоронения ОЯТ может составить порядка 2000 тонн в год [12].

Однако, несмотря на множество теоретических свидетельств технической и экономической целесообразности реализации данной концепции захоронения, полученных американскими специалистами за годы исследований (табл. 3), следующим важным шагом должно стать проведение полевых испытаний данной технологии. В конце декабря 2016 года Министерство энергетики США определило четыре компании, которые займутся изучением возможности проведения таких работ на четырех площадках: АЕСОМ (площадка в штате Техас), ENERCON и TerranearРМС (две площадки в штате Нью-Мексико), РЕ/СПЕС (площадка в штате Южная Дакота) [15]. До этого в январе 2016 года Министерство энергетики США утвердило команду специалистов из Института Баттелла*, Центра энергетических и экологических исследований при университете Дакоты, Технологического центра Шлюмберже в Техасе и швейцарской компании Solexperts для проведения опытного бурения 480-метровой скважины в кристаллических породах на территории штата Северная Дакота в целях технико-экономического обоснования технологии скважинного захоронения РАО. На проект по исследованию возможности скважинного захоронения РАО, рассчитанный на пять лет, DOE собиралось потратить около 35 млн долларов [16]. Однако DOE пришлось столкнуться с сильной оппозицией местных жителей, активно выступающих против проведения каких бы то ни было НИОКР в данной местности, а утвержденная DOE команда специалистов так и не смогла убедить местных жителей в безопасности запланированных работ.

При этом геологически стабильные породы, сходные по своим характеристикам с изучаемыми в Северной Дакоте, были выявлены во многих регионах США. Поэтому решение о проведении предварительных исследований сразу на четырех потенциальных площадках позволит реализовать данный проект с учетом принципа добровольного согласия и участия местных жителей. Выбранные DOE компании будут работать с местным населением, информируя его о предстоящих работах.

Таблица 3. Основные вехи в реализации проекта исследований концепции глубинного скважинного захоронения ОЯТ/ВАО в США

Год	Ключевые события
2009	Завершена работа над предварительной оценкой эффективности и технико-экономических показателей концепции глубинного скважинного захоронения ВАО
2011	Завершена разработка подробного проекта типовой установки для глубинного скважинного захоронения и соответствующего плана работ по захоронению
2012	Разработана дорожная карта НИОКР для концепции глубинного скважинного захоронения, включая планы проведения НИОКР в реальных условиях, оценки стоимости и график выполнения работ
2013	Завершена разработка технических и материально-технических регламентов для проведения работ по выбору площадки для сооружения опытной скважины (без захоронения РАО) и тестирования методов ее герметизации
2014	Завершена разработка плана НИОКР для проекта полевых исследований, завершена работа над оценкой геологических данных, альтернативных форм отходов и проектов герметизации скважин
2015	Завершена разработка концептуального решения по созданию скважины для характеристики, объявлен конкурс на проведение работ по бурению исследовательской скважины и проведению испытаний
2016	DOE утверждает четыре компании, которые займутся исследованием возможности сооружения исследовательской скважины на четырех площадках

Пункт захоронения для высокоактивных отходов ядерно-оружейного комплекса США

Впервые официально о необходимости сооружения отдельного пункта геологического захоронения ВАО, произведенных установками ядерно-оружейного комплекса США, было заявлено в Президентском меморандуме, вышедшем в марте 2015 года одновременно с отчетом Министерства энергетики США, в котором также признавалась техническая и экономическая целесообразность реализации этой стратегии. В декабре 2016 года DOE опубликовало проект документа, содержащего перечень работ по созданию такого пункта захоронения, в том числе по поиску площадки для его размещения и организации транспортировки отходов на площадку захоронения, а также оценке стоимости, реестра захораниваемых РАО, сроков выполнения работ на каждом этапе и рисков им сопутствующих [9].

Согласно планам DOE, в установке планируется окончательно изолировать исключительно ВАО и ОЯТ, источником образования которых являются установки ядерно-оружейного комплекса США, а также, возможно, и некоторые объемы РАО, образовавшиеся в результате осуществления Министерством различных программ НИОКР. В табл. 4 представлены оценки объема различных видов отходов, которые планируется захоронить в такой установке (с учетом прогнозов по объемам образования отходов к 2048 году).

* англ. Battelle Memorial Institute (институт, занимающийся вопросами дефектоскопии)

Таблица 4. Реестр ВАО и ОЯТ ядерно-оружейного комплекса США к 2048 году

Площадка	Вид РАО	Объем, м ³
Саванна Ривер	Остеклованные ВАО	6 957
Хэнфорд	Остеклованные ВАО	14 089
	Объем цезия и стронция из капсул после остекловывания	453
	Остеклованные ВАО из ФРГ	3
Национальная лаборатория в шт. Айдахо	Кальцинированные ВАО	3 661
	Натрий содержащие отходы после обработки методом парового реформинга в системе с псевдоожиженным слоем	721
	ВАО, обработанные электрометаллургическим способом	132
	ОЯТ реакторных судовых установок	4 600
Объемы ОЯТ в ведении DOE	ОЯТ	1 800

В целом по прогнозам DOE с момента запуска процесса поиска площадки и до захоронения первой партии отходов в объекте может пройти порядка 30 лет (рис. 6). Оценка затрат на реализацию каждого этапа проекта захоронения военных ВАО и ОЯТ представлена в табл. 5.

Таблица 5. Результаты предварительной оценки стоимости реализации программы захоронения военных ВАО и ОЯТ (две площадки участвуют на этапе предварительного скрининга, одна из которых выбирается для проведения детальных исследований), млн долларов США

Продолжительность	3 года			
	3 года	3 года	5 лет	11 лет
Этап программы	Выявление площадки	Скрининг площадки	Характеризация площадки	Всего
Процесс выбора площадки	45	45	300	390
Скрининг и выбор площадки	45	400	10	455
Характеризация площадки	0	50	600	650
Характеризация отходов	6	10	35	51
Разработка проекта пункта захоронения	4	30	275	309
Мероприятия во исполнение закона о национальной политике в области защиты окружающей среды	10	15	100	125
Лицензирование	5	15	100	120
Сооружение пункта захоронения	0	0	730	730
Организация работ	15	70	150	235
Всего	130	635	2 300	3065

Япония

После аварии на АЭС Фукусима, произошедшей в марте 2011 года, доверие населения страны как к операторам АЭС, так и к регулирующему органу было подорвано. За последние годы национальный оператор по обращению с РАО в Японии (NUMO) предпринял несколько шагов, призванных восстановить утраченное доверие и в скором времени запустить новую кампанию по поиску площадки для строительства пункта окончательной изоляции ВАО:

- В мае 2015 года на основании результатов проведенных до этого исследований по оценке технической осуществимости и безопасности реализации концепции геологического захоронения ВАО в Японии была принята «Основополагающая политика в области захоронения». Положения этого документа официально утвердили концепцию геологического захоронения в качестве наиболее приемлемого метода окончательной изоляции ВАО.
- Положения «Основополагающей политики...» закрепили принципы обеспечения возможности повторного извлечения захороненных отходов и обратимости решений, принимаемых по проекту захоронения.
- В процедуру поиска площадки для строительства пункта захоронения был включен дополнительный этап предварительного геологического скрининга, который позволит разделить всю территорию страны на три группы регионов в соответствии с уровнем приемлемости условий для сооружения объекта окончательной изоляции ВАО.
- NUMO была пересмотрена стратегия работы с населением, что позволило повысить общий уровень осведомленности граждан страны по проектам геологического захоронения РАО и ОЯТ, реализуемым в Японии и за рубежом.

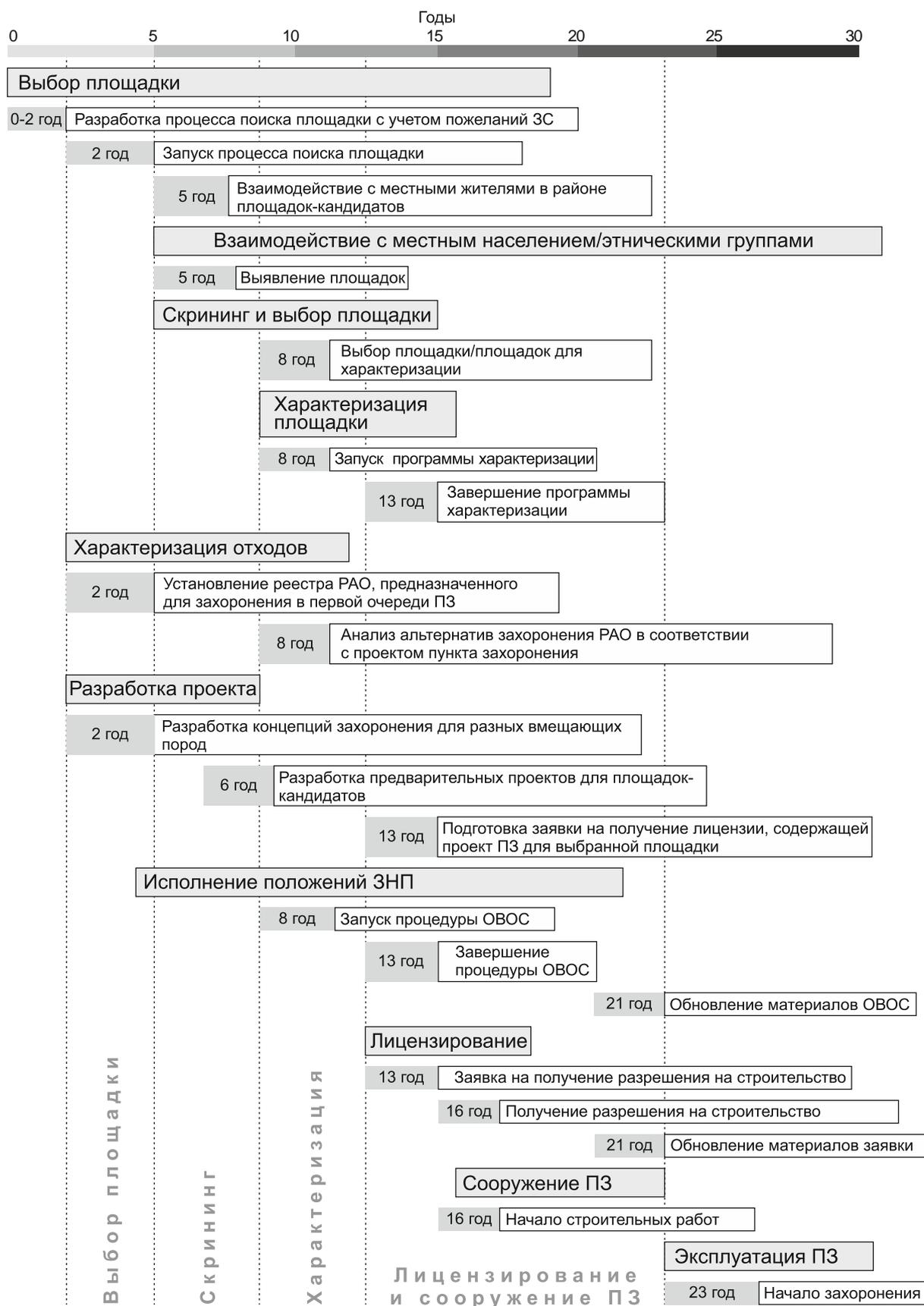


Рисунок 6 — Предварительный график реализации проекта захоронения военных ВАО и ОЯТ (ЗС – заинтересованные стороны; ЗНП – закон о национальной политике в области защиты окружающей среды [12])

В Японии официально утверждена политика переработки ОЯТ, а образующиеся в результате ВАО планируются окончательно изолировать в пункте глубинного геологического захоронения. Впервые вопрос о захоронении РАО в Японии был поднят в 1970-е гг. В течение следующего десятилетия был проведен ряд исследований целесообразности реализации данной концепции. В конце 1990-х с целью проведения всестороннего обсуждения проблем окончательной изоляции РАО была создана рабочая группа, в состав которой вошли инженеры, ученые, экономисты, политологи и представители антиядерных движений [1].

В 1990-е гг. был проведен анализ технической осуществимости проекта глубинного захоронения РАО в Японии, а в 1992 году опубликован отчет по предварительным результатам проведенного анализа. Второй отчет по технико-экономическому обоснованию проекта захоронения ВАО, вышедший в 1999 году, предлагал поэтапный процесс принятия решения в рамках программы захоронения ВАО с обязательным привлечением общественности к участию в программе захоронения. В июне 2000 года Парламент Японии принял закон «Об окончательном захоронении РАО», предписывающий произвести глубинное геологическое захоронение ВАО (при этом под ВАО подразумевались исключительно остеклованные РАО, образовавшиеся в результате переработки ОЯТ). Для исполнения положений данного закона в 2002 году операторы ядерных установок учредили Организацию по обращению с РАО (NUMO) [1].

В том же году NUMO инициировало кампанию по поиску площадки для строительства пункта захоронения ВАО, основывавшуюся на принципе добровольного выдвижения муниципалитетов для участия в первом этапе процесса – теоретических исследованиях, задача которых состояла в выявлении перечня площадок-кандидатов для проведения предварительных исследований (более подробно эта процедура описана в [1]). В период с 2007 по 2011 гг. заявки на добровольное участие в процессе выбора площадки были поданы несколькими муниципалитетами, однако произошедшее в марте 2011 года землетрясение и авария на АЭС Фукусима Даичи лишь способствовали росту антиядерных настроений в стране и ни один муниципалитет не продолжил участие в программе.

В целом после аварии 2011 года население Японии стало куда пристальней следить за развитием событий в области атомной энергетики: японцы более критично относятся к заявлениям правительства и в значительной степени утратили доверие как к операторам АЭС, так и к регулятору. Согласно результатам многочисленных опросов, большая часть населения страны до конца не верит в то, что муниципалитет сможет на любом этапе проведения исследований снять свою кандидатуру с дальнейшего рассмотрения. Кроме того, остро встал еще один вопрос: можно ли вообще, с учетом высокого уровня сейсмической активности, найти достаточно стабильные формации для строительства подобного объекта в Японии?

Для разрешения сложившейся ситуации в 2013 году правительством Японии были учреждены многопрофильные рабочие группы, которым предстояло провести повторную оценку технической осуществимости концепции геологического захоронения. В результате эксперты пришли к следующим двум ключевым выводам [17]:

- с учетом последних геонаучных данных на территории страны имеются геологические формации, потенциально пригодные для строительства пункта захоронения;
- в рамках реализации программы по геологическому захоронению ВАО необходимо периодически проводить оценку безопасности, основываясь на наиболее актуальных научных данных, и обязательно информировать об этом широкую общественность.

В мае 2015 года выводы экспертов рабочих групп стали базой для «Основополагающей политики в области окончательного захоронения», согласно положениям которой [17]:

- концепция геологического захоронения была утверждена в качестве наиболее приемлемого метода окончательной изоляции ВАО. При этом положения обновленной политики предусматривают разработку проекта будущего пункта захоронения с учетом возможности как для повторного извлечения уже захороненных отходов, так и пересмотра решений, принятых на более ранних стадиях (аналогично политике «обратимости захоронения», утвержденной во Франции). Такой подход позволит будущим поколениям самостоятельно выбирать между различными альтернативами обеспечения долгосрочной безопасности обращения с ВАО. Кроме того, уровень технической осуществимости и безопасности концепции геологического захоронения будет итеративно оцениваться на всем протяжении реализации программы по мере накопления знаний и совершенствования технологий;
- программа поиска площадки для строительства пункта захоронения была дополнена этапом предварительного скрининга. Процедура предварительного скрининга позволит разделить всю территорию страны на три группы регионов: потенциально наиболее пригодные, потенциально пригодные и потенциально непригодные для строительства пункта захоронения. Разработка соответствующих геологических критериев (в соответствии с перечнем FEPs), необходимых для проведения оценки, была завершена в 2016 году, а результаты скрининга планируется опубликовать в формате отчета к концу 2017 года;
- необходимо разработать новую схему взаимодействия с жителями муниципалитетов, которая бы позволила добиться достижения взаимного согласия по спорным вопросам с использованием подходов, применяемых на региональном и местном уровнях в странах, добившихся значительного успеха в диалоге с населением при осуществлении проектов по геологическому захоронению.

В 2016 году МЕТИ (Министерство экономики, торговли и промышленности), выполняющее функции государственного управления в области использования атомной энергии, направило запрос на проведение независимой технической экспертизы проекта обновленной программы поиска площадки для строительства пункта захоронения специалистами NEA OECD. В конце мая 2016 года эксперты огласили свои выводы и замечания по результатам рассмотрения предоставленных МЕТИ материалов: в целом новый процесс выбора площадки соответствует общемировой практике, а прописанный в положениях «Основополагающей политики...» подход к информированию и взаимодействию с местным населением на каждом этапе процедуры поиска площадки соответствует общепризнанным основам стратегии геологического захоронения РАО [18].

Что касается взаимодействия с населением, то в 2013 году МЕТИ поручило NUMO полностью пересмотреть стратегию ее работы с населением. Для этого была создана еще одна рабочая группа, состоявшая из сторонних экспертов, выводы которых легли в основу нового рабочего плана NUMO по информированию общественности:

- необходимо поддерживать открытый диалог между представителями NUMO и широкой общественностью путем проведения открытых семинаров и конференций в крупнейших городах страны, а также посещения специалистами NUMO остальных населенных пунктов на специально разработанных трейлерах «Geo Mirai» (рис. 7), внутри которых размещены интерактивные выставки с экспонатами, благодаря которым обычные люди могли бы легко понять концепцию геологического захоронения и принципы обеспечения долгосрочной безопасности;
- необходимо продолжать разработку образовательных программ и материалов по проекту геологического захоронения, предназначенных для распространения среди учителей общеобразовательных школ;
- привлекать сотрудников NUMO к организации дебатов по вопросу геологического захоронения ВАО между учениками колледжей.



Рисунок 7 — Мобильная интерактивная выставка Geo Mirai

Начиная с 2013 года, конференции, предусмотренные в соответствии с положениями нового рабочего плана NUMO по информированию общественности, были проведены NUMO во всех крупнейших городах страны. Так, в 2014 году конференции состоялись в 29 городах. Каждая такая конференция включала три обязательных этапа:

- презентация проекта сотрудниками NUMO;
- обсуждение представленных материалов группой лиц, состоящей из координатора, журналистов, представителей местных жителей и учеников местных колледжей, а также представителей NUMO;
- вопросы от аудитории сотрудникам NUMO.

Рис. 8 наглядно отражает результаты применения нового подхода к информированию общественности: к 2014 году уровень общей осведомленности по вопросу геологического захоронения среди населения страны вырос почти в два раза по сравнению с показателями 2003 года [17].

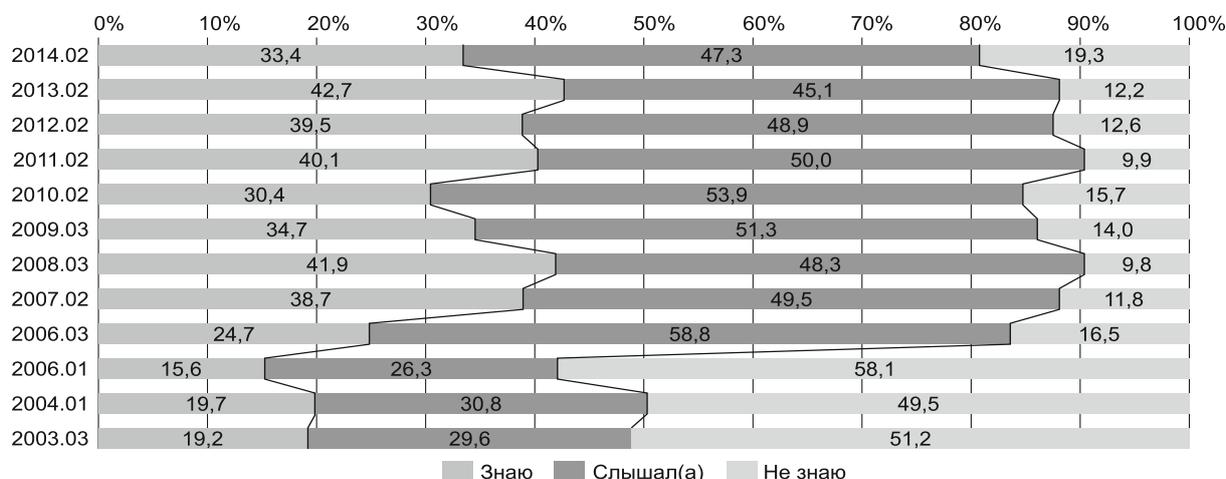


Рисунок 8 — Результаты социологического опроса по выявлению уровня осведомленности среди населения Японии о программе геологического захоронения ВАО [17]

Программы по глубинному геологическому захоронению ОЯТ и РАО в странах Азиатского региона: Индия, Китай, Республика Корея

Индия

В соответствии с темпами развития атомноэнергетической отрасли и объемами образования ОЯТ в Индии, потребность в запуске объекта для окончательной изоляции ВАО может возникнуть не раньше 2060 года. При этом исследования в ПИЛ общего назначения проводились на протяжении 10 лет с начала 1980-х гг.

Основываясь на результатах проведенных НИОКР, индийские специалисты разработали концептуальный проект будущего пункта захоронения площадью 4 км², способного вместить порядка 10 000 контейнеров с ВАО. Захоранивать остеклованные ВАО планируется в гранитных, гнейсовых или базальтовых геологических формациях, расположенных на глубине от 500 до 600 м.

На данный момент основные усилия сосредоточены на поиске площадки для сооружения новой ПИЛ, которая в будущем могла бы стать частью самого пункта захоронения.

Работа АЭС обеспечивает 3,5 % электроэнергии, производимой в Индии. По состоянию на начало 2017 года в стране действовало 22 атомных энергетических реактора суммарной мощностью 6,2 ГВт, а на этапе строительства находилось еще 5 реакторных установок общей мощностью около 3,2 ГВт (рис. 9).

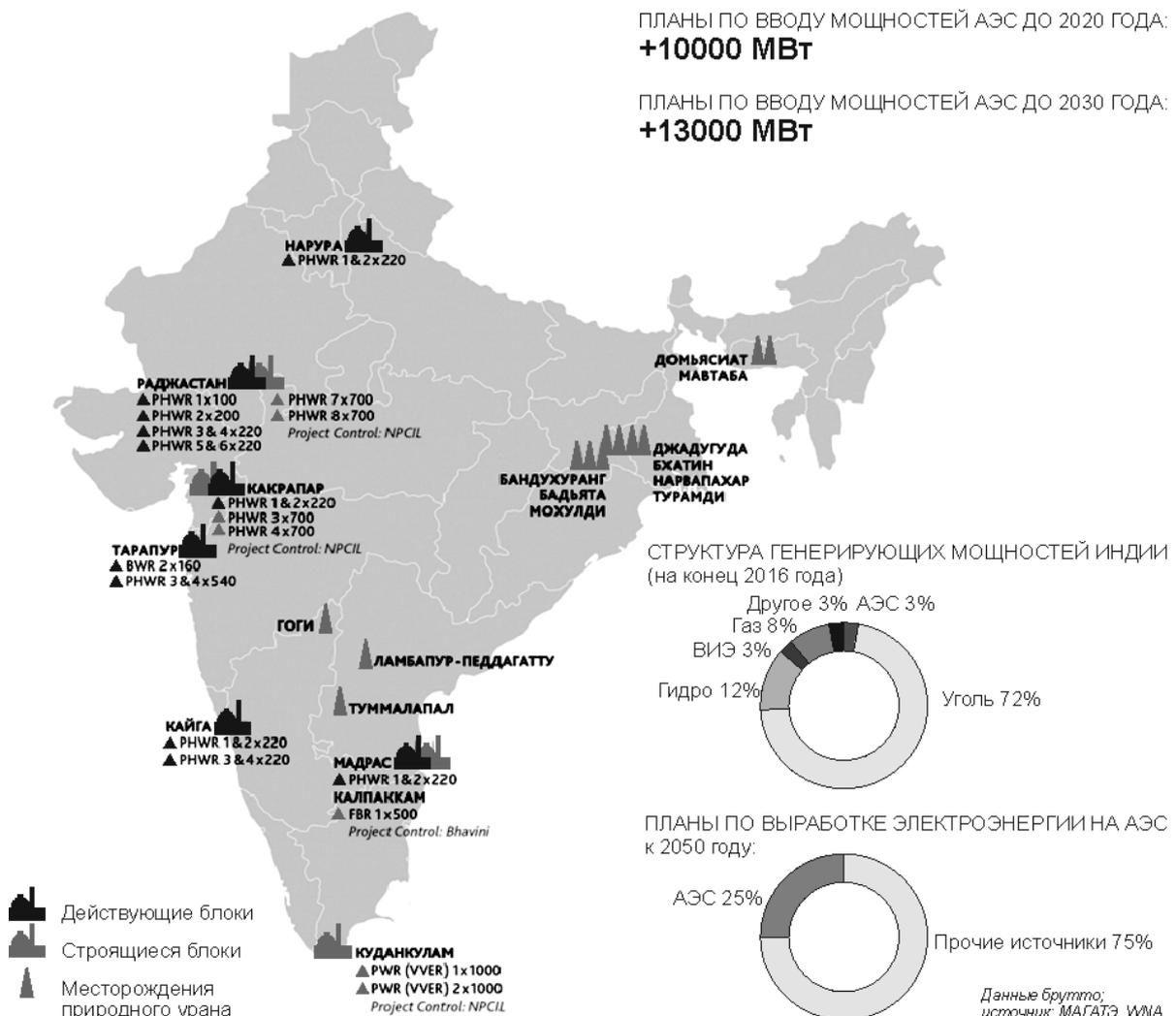


Рисунок 9 — Выработка атомной энергии на АЭС в Индии

Развитие атомной энергетики в Индии прошло несколько этапов. Её зарождение относится к началу 1950-х годов, когда известный индийский физик Х. Бхабха разработал стратегическую программу развития индийской атомной энергетики, в основе которой лежал тот факт, что Индия практически лишена запасов природного урана (обладая, по разным оценкам, от 1 до 2% мировых запасов этого природного ядерного топлива), но, с другой стороны, обладает более чем 25% от мировых промышленных запасов тория. Программа «трёхступенчатого похода к ториевой энергетике» актуальна и сейчас: на сегодняшний день в стране разведано 900 000 тонн промышленных запасов тория и лишь около 150 000 тонн урана. Кроме того, на фоне взрывного роста населения и масштабного развития экономики и промышленности в деле обеспечения страны энергией невозможно опираться лишь на минеральное топливо. Такое положение дел обуславливает громадные инвестиции правительства Индии в атомную энергетику: цель программы – генерация 25% всей электроэнергии на АЭС к 2050 году.

Несмотря на достаточно серьёзные амбиции в атомно-энергетической сфере и масштабную программу по строительству гражданских ядерных реакторов, из-за своих скудных запасов природного урана эта страна вынужденно идёт по совершенно уникальному пути развития атомной энергетики: Индия в качестве собственных ресурсов, в отличие от многих других стран, пытающихся скорее избавиться от отработанного ядерного топлива, рассматривает и промышленно получаемые делящиеся изотопы. В первую очередь – это получаемый из природного урана плутоний (изотоп ^{239}Pu) и производимый при бомбардировке в реакторе уран (изотоп ^{233}U), получаемый из природного изотопа тория.

На сегодняшний день в Индии работают три завода по переработке ОЯТ. Первая такая установка была открыта в Тромбее еще в 1964 году и обеспечивала ежегодную переработку ОЯТ в объеме 60 тонн. В 1998 году был открыт еще один завод в Калпаккаме, а спустя еще 13 лет – в Тарапуре, производительностью 100 тонн в год каждый (PUREX процесс). ВАО от переработки ОЯТ остекловывают, помещая в матрицу из борсиликатного стекла, а затем направляют на промежуточное хранение [19]. Согласно положениям национального законодательства, минимальный срок обязательной выдержки топлива в таких хранилищах составляет 30 лет.

В результате переработки 2 500 тонн ОЯТ до 2000 года было получено порядка 5 000 кубических метров ВАО. При этом суммарные объемы образования САО и НАО оценивались в 35 000 и 210 000 м³ соответственно [20].

На сегодняшний день в пунктах промежуточного хранения на площадках перерабатывающих заводов в Тарапуре и Калпаккаме размещено 10 000 м³ ВАО. Установка в Тарапуре способна принять около 1 700 упаковок с ВАО суммарной активностью порядка 80 000 000 ТБк. При выходе страны на планируемые объемы генерации атомной энергии в 40 000 МВт (эл.)/год индийские АЭС будут ежегодно производить по 1 500 тонн ОЯТ, переработка которых приведет к образованию еще 3 000 м³ ВАО в год [21].

Согласно положениям национальной политики Индии в области обращения с РАО, высокоактивные отходы, образующиеся в результате переработки ОЯТ, подлежат окончательной изоляции в пункте глубинного геологического захоронения. По некоторым оценкам, учитывая прогнозируемые темпы образования ОЯТ и его переработки, к 2030 году для захоронения всего объема накопленных ВАО Индии потребуется соорудить пункт геологического захоронения РАО общей площадью в 15 км².

Что касается НАО и САО*, то они подлежат окончательной изоляции в пунктах приповерхностного захоронения различной конфигурации в зависимости от активности захораниваемых РАО (табл. 6) [22]:

Таблица 6. Варианты приповерхностного захоронения твердых НАО и САО

Категория НСАО	Поверхностная доза/удельная активность	Тип установки (см. далее)	Характер отходов
I	< 2 мГр/ч	ЗТ	Загрязненная бумага, бетон, хлопковая ткань, резина и т.п.
II	2–20 мГр/ч	АБ	Загрязненное оборудование, конструкции и фильтры
III	20–500 мГр/ч	АБ	Кондиционированные/переработанные концентраты, шлам, отработавшая смола
	> 500 мГр/ч	КП	Загрязненные конструкционные элементы реакторов, сильно загрязненное оборудование, кондиционированные отработавшие смолы
IV	Отходы, содержащие альфа-излучатели < 4 000 Бк/г > 4 000 Бк/г	АБ и КП	Отверженные отходы с альфа-излучателями, содержащие бета и гамма активность
		КП	

* индийская система классификации РАО практически идентична классификации МАГАТЭ

- земляные траншеи с облицовкой из каменной кладки (ЗТ) используются для захоронения отходов категории I. Глубина таких траншей может варьироваться от 1 до 4 м, а каменная кладка обеспечивает целостность и стабильность всей конструкции. После заполнения отходами траншею засыпают слоем из смеси почвы, вермикулита и бентонита толщиной около одного метра;
- траншеи с облицовкой из армированного бетона (АБ) используются для захоронения НСАО, относящихся к категориям II и III, и располагаются по модульному принципу. Стандартные размеры траншеи – 2,5 на 15 м при глубине 4,8 м (рис. 10). Толщина облицовки стен таких траншей изменяется от 350 мм в верхней части до 750 мм в нижней части. Каждая зона участка захоронения оборудована мостовым краном. Для защиты от атмосферных осадков во время проведения работ по захоронению используются мобильные крыши. После заполнения траншеи сверху устанавливается бетонная плита, обеспечивающая необходимую экранировку от радиоактивного излучения;
- скважины, обсаженные керамическими плитами (КП) используются для захоронения отходов, относящихся к категориям III и IV. Данная концепция предусматривает захоронение отходов в упаковках объемом 200 л, которые помещают в цилиндрические камеры на уровне 4 м ниже уровня земли. Диаметр камер составляет 710 мм (рис. 10).

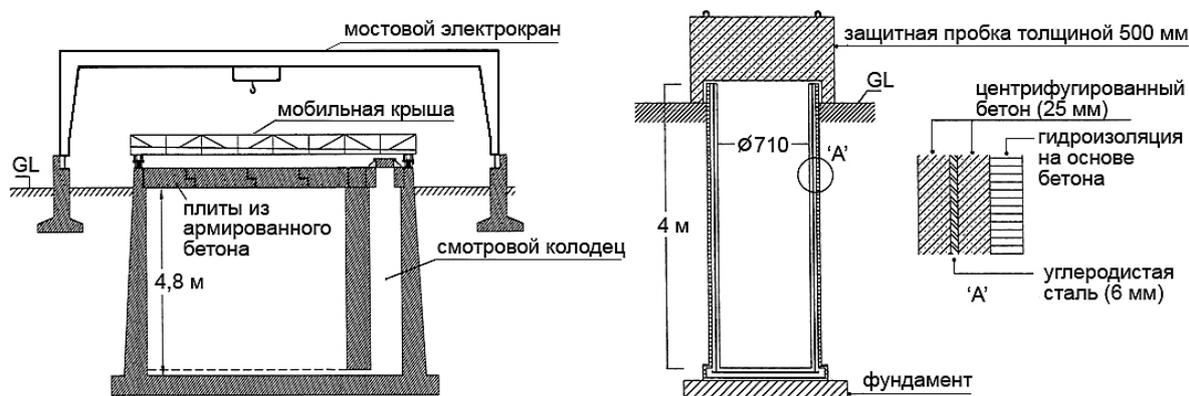


Рисунок 10 — Конструкция траншеи с облицовкой из армированного бетона (слева) и скважины, облицованные керамическими плитами (справа)

Что касается пункта глубинного геологического захоронения ВАО, то согласно прогнозам, потребность в такой установке появится в Индии только к 2060 году [23]. Тем не менее, в этой стране программа исследований возможности создания подобного объекта была запущена еще в начале 1980-х гг. В те годы на глубине 1 000 м в закрытой части рудника Kolar Gold Fields, расположенного на юге штата Карнатаке, известного крупнейшими в стране месторождениями золота, была проведена серия подземных экспериментов. В течение 10 лет в этой ПИЛ был реализован целый комплекс НИОКР, основная задача которых состояла в разработке методологий оценки термомеханического поведения вмещающих пород (амфиболиты) в реальных условиях захоронения, а также формирования основ для дальнейшей разработки и валидации математических моделей. Кроме того, была осуществлена разработка инструментов для проведения измерений и ведения мониторинга.

Самым масштабным стал эксперимент по изучению теплового воздействия захороненных отходов на вмещающую среду системы захоронения (рис. 11). Основной источник тепла состоял из шести тепловыделяющих элементов мощностью 1,5 кВт каждый. Элементы были помещены в оболочку из углеродистой стали (длина трубы – 2 м, диаметр – 35,5 см). Вокруг основного тепловыделяющего элемента был размещено еще восемь мощностью 2,0 кВт (длина труб – 3 м, диаметр – 101,6 мм). Основной тепловыделяющий элемент был помещен в шахту диаметром 368 мм глубиной 4,5 м, а дополнительные – в скважины диаметром 140 мм и глубиной 5 м.



Рисунок 11 — Зона проведения эксперимента по изучению влияния тепловыделения на вмещающие породы в ПИЛ Карнатаке

Эти скважины располагались радиально на расстоянии 1 м от основного нагревающего элемента (рис. 12). Пять экстензометров были установлены в скважинах диаметром 38 мм и глубиной 6 м, а еще четыре тензометра – в скважинах диаметром 76 мм. Еще 40 таких скважин было пробурено для размещения термодпар. После включения тепловыделяющих элементов данные приборов фиксировались каждый час, а позднее – раз в сутки. Общая продолжительность эксперимента составила 1 280 дней. Также были разработаны специальные коды, которые позволили смоделировать эволюцию теплового поля по методу конечных элементов. После чего данные измерений были сопоставлены с результатами моделирования: для ряда скважин были получены достаточно близкие значения, а для некоторых значения отличались, что в основном было обусловлено ошибками в работе измерительного оборудования, а также неоднородностью характеристик массива горных пород. В целом в ходе эксперимента существенного развития процессов деградации вмещающих пород выявлено не было.

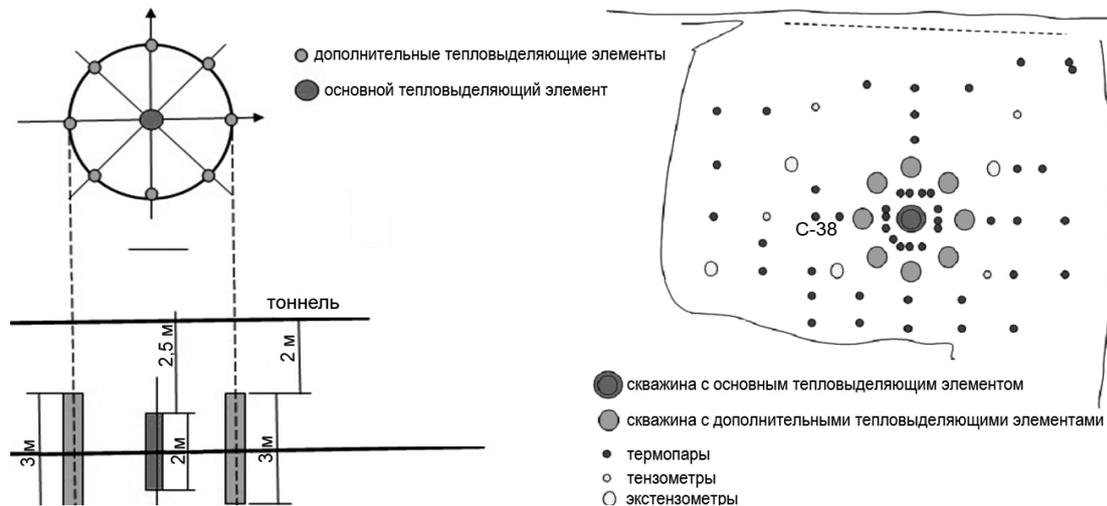


Рисунок 12 — Схема расположения тепловыделяющих элементов в эксперименте, проведенном в ПИЛ Карнатаке

Основываясь на результатах проведенных НИОКР, индийские специалисты разработали концептуальный проект будущего пункта захоронения площадью 4 км². Захоранивать остеклованные ВАО планируется в гранитных, гнейсовых или базальтовых геологических формациях, расположенных на глубине от 500 до 600 м. Подземные части объекта будут соединены с поверхностью посредством двух шахт: шахты доступа диаметром 6 м и вентиляционной шахты диаметром 4 м. Система захоронения будет состоять из двух транспортных тоннелей прямоугольной формы, каждый протяженностью 800 м. От этих тоннелей будет отходить в общей сложности 63 тоннеля захоронения, каждый протяженностью 110 м способный вместить около 40 упаковок с ВАО (рис. 13). Каждая ячейка захоронения глубиной 5 м и диаметром 85 см сможет вместить по одному контейнеру с РАО, ориентированному вертикально (высота контейнера – 2 м). Между контейнером и вмещающими породами планируется установить буфер, выполненный из блоков спрессованной смектитовой глины (максимальная толщина буфера – 50 см).

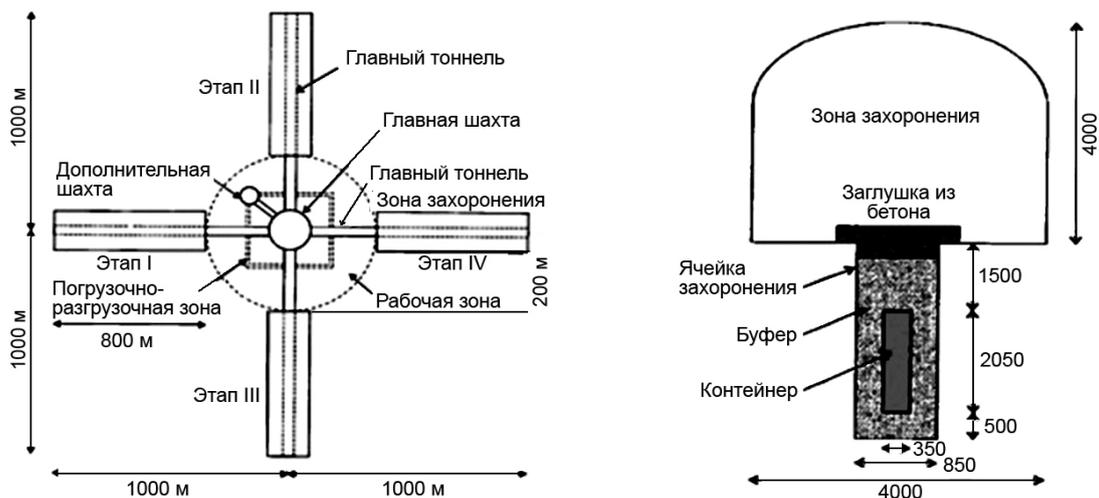


Рисунок 13 — Индийская концепция глубинного геологического захоронения ВАО в гранитных формациях

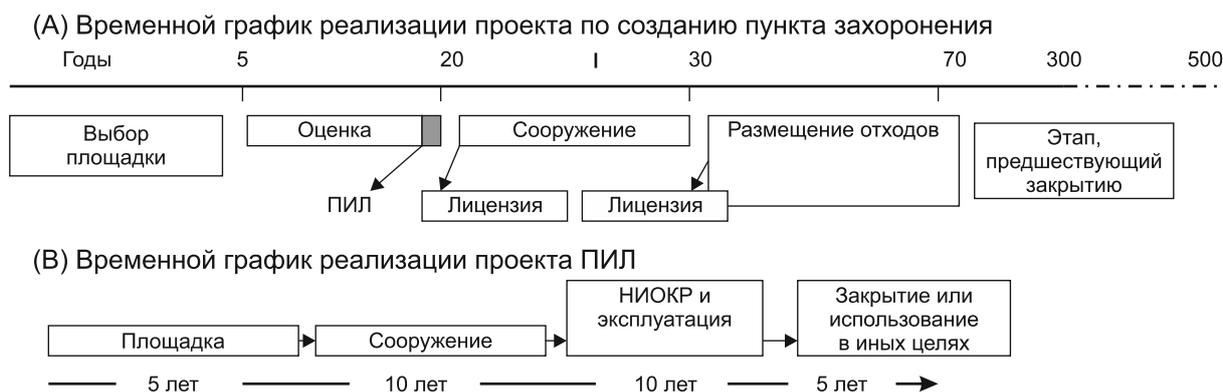


Рисунок 14 — График реализации программы захоронения в Индии

Результаты компьютерного моделирования процессов теплопереноса вокруг излучающего 500 Вт/м^2 тепла контейнера, находящегося в ячейке захоронения с засыпкой из бентонитовой глины, а также тепловой эволюции всей системы захоронения, содержащей десятки тысяч таких контейнеров, свидетельствуют о том, что гранитные формации и применение бентонитового буфера будут способствовать плавному рассеянию тепла, и ни в одной части пункта захоронения значения температуры не превысят 100°C , что является одним из основных требований к разрабатываемому проекту захоронения. Согласно прогнозам, в течение 1000 лет эволюции системы захоронения в различных точках теплового поля, расположенных на различном удалении от тоннелей захоронения, температура будет оставаться значительно ниже указанного значения. Это означает, что условия для перехода грунтовых вод в паровую фазу, а следовательно, и интенсификации переноса радионуклидов отсутствуют. Результаты исследований также показали, что структура системы захоронения, содержащей 10 000 контейнеров, останется достаточно стабильной даже по истечении 500 лет. При этом наибольший уровень нестабильности прогнозируется на период спустя 50 лет после размещения отходов в установке.

На данный момент ключевым направлением работ в рамках программы захоронения ВАО, реализуемой в Индии, является подготовка к созданию ПИЛ конкретного назначения, которая в будущем могла бы стать частью самого пункта захоронения (рис. 14). В начале 1990-х гг. правительством была запущена масштабная программа геологического скрининга нескольких крупных регионов страны со вмещающими породами из гранита. Общая площадь территорий, исследованных в рамках этой программы составила порядка $0,6 \text{ млн км}^2$. В результате была сформирована всеобъемлющая база данных, содержащая информацию по характеристикам горных пород, на основании которых была оценена пригодность разных регионов для размещения пункта захоронения.

Впервые о месте предполагаемого размещения будущей ПИЛ было официально объявлено в октябре 2009 года – данные территории расположены вблизи деревни Годжи в штате Карнатака на юге страны. Спустя всего месяц появилась информация о том, что на данном участке, также включенном в программу по разведке урановых запасов, реализуемую с 1995 года, было найдено месторождение урановой руды площадью около одного квадратного километра. Запасы урана на этом участке оценивались в 4 264 тонны U_3O_8 со средней степенью обогащения 0,17%. В 2012 году правительство санкционировало работы по разведке данного месторождения, а проект по созданию ПИЛ был заморожен на неопределенный срок.

На данный момент еще 4–5 площадок, выявленных в ходе программы геологического скрининга, рассматриваются в качестве потенциальных кандидатов для строительства ПИЛ конкретного назначения.

КНР

В Китае ОЯТ из реакторов PWR подлежит переработке, а образующиеся в результате ВАО – окончательной изоляции в пункте глубинного геологического захоронения на глубине 500 м в гранитных вмещающих формациях. Программа по поиску площадки, пригодной для сооружения такого объекта, была запущена в 1985 году. На данный момент гранитные формации нагорья Бэйшань рассматриваются в качестве наиболее приоритетного района для заложения ПИЛ конкретного назначения* и впоследствии сооружения самого пункта захоронения.

* ПИЛ конкретного назначения – это подземная исследовательская лаборатория, сооружаемая на площадке, потенциально пригодной для строительства пункта захоронения, в которой НИОКР проводят в целях получения данных по конкретной площадке и наработке уникального опыта на этой площадке. Такая ПИЛ может быть построена как в пределах самой промышленной площадки будущего ПЗРО, так и на прилегающих к этой площадке территориях. Шахты и тоннели доступа ПИЛ КН впоследствии могут быть трансформированы в тоннели доступа, ведущие непосредственно к самому ПЗРО

В 2006 году был опубликован стратегический мастер-план по созданию пункта геологического захоронения в Китае. Согласно его положениям, площадка для сооружения ПИЛ конкретного назначения должна быть утверждена к 2020 году. Конечной целью программы является создание пункта захоронения ВАО к 2050 году.

На сегодняшний день Китай имеет целый комплекс проблем в сфере энергетики: в первую очередь они связаны с сильной зависимостью китайской энергетики от угольных электростанций. В этих условиях развитие атомной энергетики рассматривается КНР как одно из наиболее перспективных направлений в обеспечении энергобезопасности страны.

Несмотря на то, что запуск первого энергоблока в Китае был осуществлен только в 1991 году, сегодня КНР реализует крупнейшую в мире программу развития атомной энергетики, к участию в которой привлечены ведущие европейские, американские и российские производители оборудования для АЭС. По состоянию на начало 2017 года в Китае действовало 35 ядерных реакторов, еще 22 находились на стадии строительства и почти 40 реакторов – на этапе заложения.

Тем не менее, несмотря на определенные достижения, ядерная энергетика КНР все еще занимает одно из последних мест в общем энергобалансе страны. По последним данным около 73 % энергии в Китае вырабатывают тепловые электростанции, работающие на угле и углеводородном топливе, около 17 % – гидроэлектростанции и только 2,3% – АЭС (32,4 ГВт). Таким образом, Китай, на сегодняшний день не входит в список даже 10 стран по числу установленных мощностей АЭС [24]. Согласно положениям отраслевого плана развития атомно-энергетической отрасли в Китае, к 2020 году доля электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, должна вырасти до 4%.

Согласно официальной политике КНР, все отработавшее топливо, выгружаемое из реакторов типа PWR, подлежит переработке с целью извлечения урана и плутония с последующим остекловыванием образующихся ВАО. Согласно последним оценкам, проведенным в 2015 году, к 2030 году в КНР будет накоплено свыше 23 500 тонн ОЯТ, 15 000 тонн которого будет размещено в пунктах сухого хранения.

В 2011 году Китайская национальная ядерная корпорация (China National Nuclear Corporation, CNNC) учредила закрытую акционерную компанию Ruineng Technology, на которую была возложена обязанность по развертыванию мощностей, необходимых для организации промышленной переработки ОЯТ и производства МОКС топлива. Кроме того, данной организации было поручено заниматься вопросами обращения с ОЯТ и его хранения. С учетом планов правительства при достижении показателей по выработке электроэнергии на АЭС на уровне 80 ГВт, ежегодные объемы образования ОЯТ составят порядка 2 000 тонн, а это означает, что к 2050 году в стране будет накоплено свыше 83 000 тонн ОЯТ.

Строительство первого опытного завода по переработке ОЯТ в Китае началось в 2006 году, а в 2010 году состоялся его пуск в эксплуатацию. За два года с 2013 по 2015 год данная установка позволила переработать около 50 тонн ОЯТ. С марта 2015 года в провинции Ганьсу началось возведение опытно-демонстрационного завода по переработке ОЯТ мощностью 200 тонн/год.

В ноябре 2007 года CNNC подписало первый контракт с компанией AREVA по оценке технической осуществимости проекта создания завода по переработке ОЯТ и производству МОКС-топлива в Китае общей стоимостью порядка 15 млрд долларов США. В 2010 году CNNC и AREVA заключили отраслевое соглашение, направленное на реализацию данного проекта, с 2013 по 2015 гг. были подписаны контракты, ознаменовавшие первые реальные шаги по созданию завода по переработке ОЯТ производительностью 800 тонн в год. В сентябре 2015 года CNNC заявило о запуске кампании по поиску площадки для строительства объекта. Непосредственно к самым строительным работам планируется приступить в 2020 году, а ввод установки в эксплуатацию запланирован на 2030 год. Помимо мощностей по переработке ОЯТ на площадке завода площадью около 3 км² планируется разместить пункт хранения ОЯТ вместимостью от 3 000 до 6 000 тонн, а также пункт хранения остеклованных ВАО. Тем не менее, учитывая прогнозируемые темпы образования и накопления ОЯТ, каждые десять лет КНР потребуются вводить в эксплуатацию еще по одному заводу по переработке ОЯТ производительностью не менее 800 тонн ОЯТ в год [25].

В настоящее время в Китае имеется один пункт централизованного хранения ОЯТ, расположенный в 25 км от города Ланьчжоу в провинции Ганьсу. Изначально установка могла принять на хранение около 550 тонн ОЯТ, однако в дальнейшем ее вместимость планируется увеличить. Тем не менее, на сегодняшний день большая часть ОЯТ хранится в мокрых хранилищах, действующих на территории реакторных площадок. Единственное сухое приреакторное хранилище ОЯТ имеется на АЭС Киншан.

Согласно официальным данным, к 2014 году в Китае было накоплено 4 367,7 тонн ОЯТ, выгруженно-го из энергетических реакторов. Из этого объема 3 196,9 тонн было размещено в бассейнах выдержки приреакторных площадок, а еще 776,6 тонн – в пункте сухого хранения.

Также в Китае имеется два действующих пункта захоронения НАО и САО (система классификации РАО в Китае представлена в табл. 7). В табл. 8 приведены последние официальные данные по реестру РАО, захороненных в этих установках, по состоянию на середину 2014 года [26]. Также на юге Китая

проводятся работы по сооружению еще одного пункта захоронения НАО и САО. Всего в ближайшее время планируется построить два пункта захоронения НАО и САО.

Таблица 7. Китайская система классификации РАО [26]

Физическое состояние	Класс РАО	Характеристики РАО
ГРО	Низкоактивные (НАО)	Концентрация не превышает $4 \cdot 10^7$ Бк/м ³
	Среднеактивные (САО)	Концентрация превышает $4 \cdot 10^7$ Бк/м ³
ЖРО	Низкоактивные (НАО)	Концентрация $< 4 \cdot 10^6$ Бк/л
	Среднеактивные (САО)	Концентрация $4 \cdot 10^6$ Бк/л – $4 \cdot 10^{10}$ Бк/л
	Высокоактивные (ВАО)	Концентрация $> 4 \cdot 10^{10}$ Бк/л
ТРО	Низкоактивные (НАО)	Удельная активность $< 4 \cdot 10^6$ Бк/кг
	Среднеактивные (САО)	(1) Период полураспада 60 дней $< T_{1/2} \leq 5$ лет, удельная активность $> 4 \cdot 10^6$ Бк/кг; (2) Период полураспада 5 лет $< T_{1/2} \leq 30$ лет, удельная активность $4 \cdot 10^6$ Бк/кг $< C \leq 4 \cdot 10^{11}$ Бк/кг; (3) Период полураспада > 30 лет, удельная активность $> 4 \cdot 10^6$ Бк/кг, тепловыделение < 2 кВт/м ³
	Высокоактивные (ВАО)	(1) Период полураспада 5 лет $< T_{1/2} \leq 30$ лет, тепловыделение > 2 кВт/м ³ или удельная активность $> 4 \cdot 10^{11}$ Бк/кг; (1) Период полураспада > 30 лет, удельная активность $> 4 \cdot 10^{10}$ Бк/кг или тепловыделение > 2 кВт/м ³
	Альфа- активные РАО	Альфа- излучатели с периодом полураспада > 30 лет, удельная активность в одном контейнере $> 4 \cdot 10^6$ Бк/кг.

Таблица 8. Последние данные по реестру НАО и САО в пунктах захоронения

	Пункт захоронения	Объем РАО, м ³	Суммарная активность, Бк
1.	Северо-западный пункт захоронения НСАО	9 454,72	$8,16 \cdot 10^{13}$
2.	Пункт захоронения Гуандун Байлонг	1 493,16	$3,87 \cdot 10^{13}$
	Всего	10 947,88	$1,20 \cdot 10^{14}$

Что касается ВАО, то строительство завода по остекловыванию ВАО началось в середине 2014 года. Сегодня на площадке будущего завода хранится порядка 800 м³ жидких ВАО. Предполагается, что на данном объекте, сооружаемом по немецким технологиям, будет производиться отверждение только отходов, образовавшихся в результате ведения военных программ. После тестирования данной технологии подобная установка будет сооружена и для отверждения ВАО, образовавшихся в результате переработки ОЯТ энергетических реакторов.

В будущем остеклованные ВАО планируется захоронить на глубине 500 м в насыщенных гранитных вмещающих формациях (рис. 15). Система инженерных барьеров безопасности включает остеклованную форму отходов, канистры с ВАО, буферные материалы, закладку и систему герметизации. В качестве материала закладки и буфера планируется использовать бентонит.

Впервые программа НИОКР по созданию пункта глубинного геологического захоронения ВАО была предложена еще в 1985 году. Тогда же была запущена кампания по поиску площадки для сооружения такого объекта. Программа состояла из четырех основных этапов: этап технической подготовки; этап геологических исследований, этап полевых исследований и этап сооружения пункта захоронения. Задача програм-

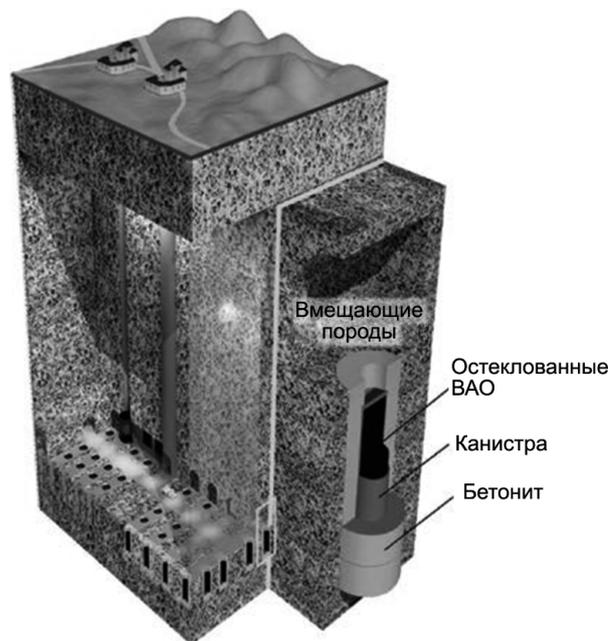


Рисунок 15 — Китайская концепция захоронения остеклованных ВАО

мы состояла в том, чтобы к 2040 году в Китае был сооружен пункт захоронения для остеклованных ВАО, ВАО, образующихся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации и трансураниевых РАО. Тем не менее, первый правительственный документ, посвященный вопросу захоронения ВАО был опубликован лишь в 2006 году: «Руководство по проведению НИОКР в области геологического захоронения высокоактивных отходов». Новая программа включала три основных этапа (табл. 9). Конечной целью программы является открытие пункта захоронения ВАО к 2050 году.

Таблица 9. Долгосрочный план по созданию пункта глубинного геологического захоронения ВАО в Китае

Этап	Сроки	Основные вехи
Этап 1: Лабораторные исследования и выбор площадки для пункта захоронения	2006–2020 гг.	Предварительное утверждение площадки для сооружения пункта захоронения. Предварительная характеристика площадки. Утверждение площадки для строительства подземной исследовательской лаборатории. Сооружение ПИЛ.
Этап 2: Подземные полевые исследования	2021–2040 гг.	Завершение работ по характеристике площадки. Утверждение площадки для строительства пункта захоронения. Завершение большей части экспериментов в ПИЛ. Подтверждение наличия технических возможностей для строительства пункта захоронения. Создание детализированного проекта пункта захоронения.
Этап 3: Сооружение пункта захоронения	2041–2050-е гг.	Завершение работ по сооружению пункта захоронения к 2050 году. Начало захоронения отходов.

Что касается организаций и ведомств, ответственных за реализацию данного проекта, то зоны ответственности распределены следующим образом [27]:

- вопросами регулирования и лицензирования ядерной деятельности, в том числе и в области обращения с РАО и их захоронения, занимаются два ведомства: Министерство охраны окружающей среды (Ministry of Environmental Protection, MEP) и Национальное управление по ядерной безопасности (National Nuclear Safety Administration, NNSA);
- Агентство по атомной энергии Китая (China Atomic Energy Agency, CAEA) осуществляет надзор за деятельностью, реализуемой в рамках проекта, в том числе и в части распределения финансирования. Одной из ключевых задач CAEA является планирование работ в области захоронения РАО;
- CNNC (Китайская национальная ядерная корпорация) ответственна за реализацию проекта глубинного геологического захоронения ВАО. Четыре ее дочерних компании ответственны за реализацию основных работ в рамках данного проекта: Пекинский исследовательский институт геологии урана (Beijing Research Institute of Uranium Geology, BRIUG) занимается исследованиями и оценкой площадок, изучением поведения системы инженерных барьеров безопасности и анализом показателей функционирования системы захоронения; Китайский институт атомной энергии (China Institute of Atomic Energy, CIAE) проводит исследования миграции радионуклидов; Китайский институт радиационной защиты (China Institute for Radiation Protection) отвечает за проведение оценок безопасности; Инженерная атомно-энергетическая компания Китая (China Nuclear Power Engineering Company, CNPE) осуществляет проектно-конструкторские работы.

Процедура поиска площадки разбита на четыре этапа:

- скрининговые исследования, охватившие всю территорию страны (1985–1986 гг.). После завершения этапа скрининга для проведения дальнейших исследований были выбраны шесть потенциальных регионов;
- региональный скрининг (1986–1989 гг.) шести регионов позволил выявить 21 район, потенциально пригодный для размещения пункта захоронения;
- районный скрининг (с 1990 года по настоящее время) в районах, выбранных на предыдущем этапе. К настоящему времени гранитные формации нагорья Бэйшань рассматриваются в качестве наиболее приоритетного района для заложения ПИЛ конкретного назначения и впоследствии сооружения самого пункта захоронения (рис. 16). С 1999 по 2015 гг. программа по характеристике гранитных пород Бэйшаня охватывала пять основных участков, где были проведены наземные геологические, гидрогеологические и геофизические исследования. В общей сложности было пробурено 23 скважины (из них 15 скважин глубокого заложения), позволивших провести испытания по опытной откачке и закачке, исследование скважин акустическим телевизором и методом радиолокационной съемки, были взяты образцы керн, проведены замеры полей напряжения. С 2011 года в целях сопоставления площадок бурильные работы также проводились в других потенциально пригодных районах провинций Синьцзянь и Внутренней Монголии, а с 2014 года была запущена программа по исследованию глиняных вмещающих формаций;

- утверждение площадки (2020 год).

Окончательное решения об утверждении той или иной площадки планируется принять только после взаимного сопоставления площадок по целому комплексу критериев, в том числе на основе социально-экономических факторов, факторов природного происхождения, включая геологические условия, прогнозируемые изменения природных условий, гидрогеологические и геохимические условия, прогнозы будущей деятельности человека в рассматриваемой местности, имеющиеся условия для сооружения установки, условия транспортировки отходов на выбранную площадку, возможности для обеспечения защиты окружающей среды, будущее землепользование, социальные последствия от реализации и общественное одобрение проекта.

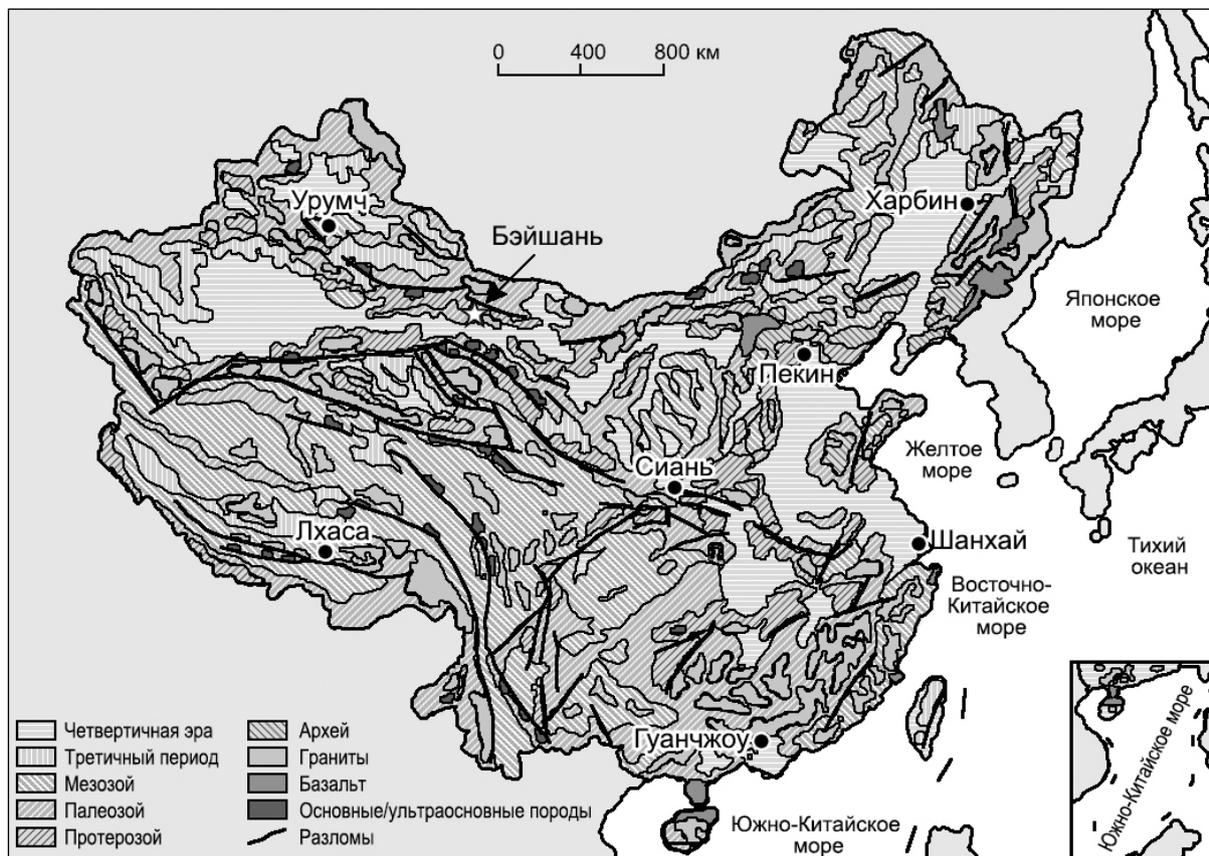


Рисунок 16 — Потенциальные регионы для сооружения ПИЛ и пункта захоронения в гранитных формациях на территории Китая

Планирование работ по созданию ПИЛ конкретного назначения ведется еще с 2006 года. Речь идет о создании объекта по характеристике пород, который впоследствии мог бы стать частью самого пункта захоронения. В 2014 году CNNC представил стратегический план по созданию такой ПИЛ, согласно которому:

- ПИЛ конкретного назначения будет построена в репрезентативных горных формациях на участке, утвержденном в качестве потенциально наиболее пригодного для строительства пункта захоронения;
- ПИЛ будет полномасштабной и позволит реализовать все поставленные задачи в области характеристики и проведения запланированных экспериментов и испытаний;
- глубина заложения ПИЛ составит 500 м;
- должны иметься возможности для расширения площади ПИЛ;
- работы, проводимые в ПИЛ, должны помочь оператору в разработке необходимых технологий, демонстрации возможности обеспечения безопасности, характеристики площадки и повышении уровня общественного одобрения концепции глубинного геологического захоронения ВАО;
- должны иметься возможности для международного сотрудничества, а также сотрудничества со всеми заинтересованными в проекте китайскими ведомствами, организациями и компаниями;
- в первую очередь следует построить ПИЛ в гранитных вмещающих формациях, а затем заняться строительством подобного объекта в глиняных породах.

Республика Корея

На официальном уровне политика обращения с ОЯТ в Корее не утверждена. Ожидается, что правительство примет соответствующее решение позднее, основываясь на темпах развития технологий в атомно-энергетической отрасли как в стране, так и за рубежом при условии достижения общественного консенсуса по этому вопросу. Сейчас хранение ОЯТ осуществляется на приреакторных площадках в «мокрых» и «сухих» хранилищах.

Программа научных исследований, направленных на разработку технологии захоронения высокоактивных отходов и ОЯТ, была запущена в 1997 году, а к 2007 году корейскими экспертами был подготовлена концепция референтной системы захоронения – KRS, предусматривающей два сценария захоронения: прямое захоронение ОЯТ без предварительной переработки; прямое захоронение ОЯТ, произведенного реакторами CANDU, и пирохимическая переработка ОЯТ с реакторов PWR, с последующим захоронением образовавшихся в результате переработки ВАО. Сам пункт захоронения планируется построить на побережье Корейского полуострова на глубине около 500 м.

Утвердить площадку для строительства объекта должны к 2028 году, а завершение строительных работ намечено на 2052 год. При этом общая стоимость проекта была оценена в 55,4 млрд долларов США.

Для подтверждения безопасности концепции KRS в 2003 году был запущен проект по созданию подземной исследовательской лаборатории общего назначения в кристаллических породах (гранит) – Корейский подземный исследовательский тоннель (Korea Underground Research Tunnel, KURT).

Промышленное производство электроэнергии на АЭС в Республике Корея было запущено в 1978 году. По состоянию на начало 2017 года в эксплуатации находится 25 блоков АЭС: 21 реактор PWR и четыре блока тяжеловодных ядерных реакторов с водой под давлением (PHWR) типа CANDU (АЭС Вольсон) [28]. Еще три реакторных блока типа PWR строятся на площадках АЭС Шин-Ханул (2 блока) и Шин-Кори (1 блок). Согласно утвержденным планам, реакторы на АЭС Шин-Ханул планируется ввести в эксплуатацию в апреле 2018 года и в феврале 2019 года соответственно (рис. 17).

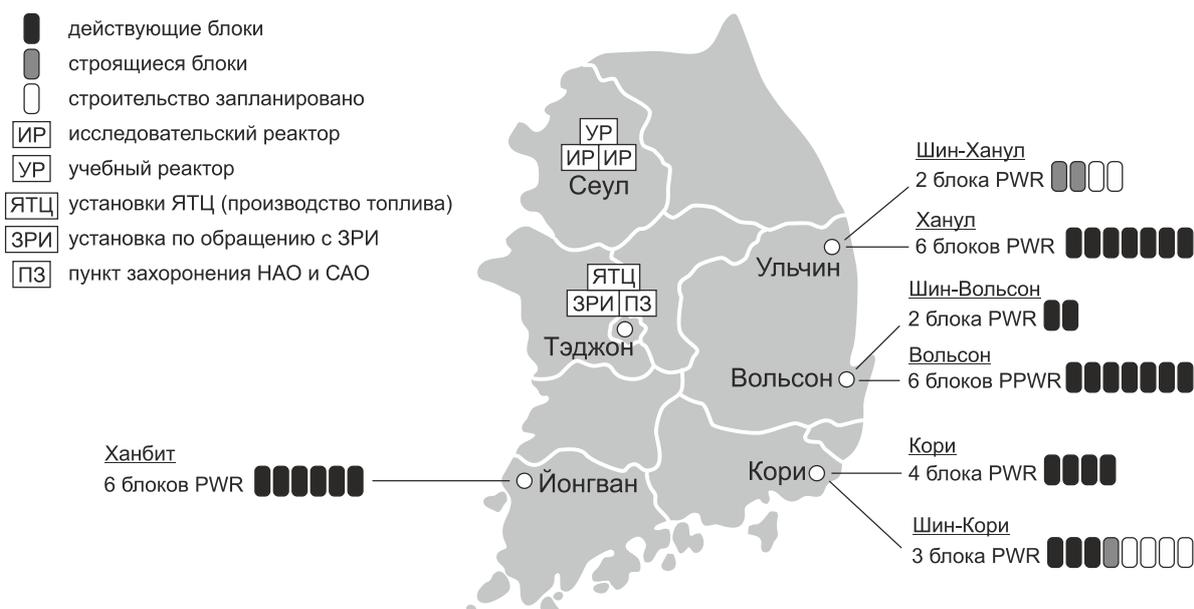


Рисунок 17 — Основные ядерные установки Республики Корея

В 2015 году корейские АЭС суммарной электрической мощностью 23,1 ГВт произвели 31,7% всей электроэнергии в стране. В ближайшем будущем планируется начать строительство еще 6 реакторных блоков, а согласно положениям «Общенационального плана по производству и потреблению электроэнергии», к 2024 году в строй будут введены 11 блоков PWR, которые должны обеспечить дополнительные 31,9 % установленной мощности, при этом доля производства электроэнергии на атомных электростанциях увеличится до 48,5 %.

За разработку основ национальной политики в области обращения с радиоактивными отходами ответственность несет Комиссия по атомной энергии (АЕС). На 249-ом заседании Комиссии, состоявшемся в сентябре 1998 года, был принят официальный документ, утвердивший ее основные положения. В них оговаривались сроки ввода в эксплуатацию пунктов окончательной изоляции РАО: пункт захоронения НАО и САО планировалось построить к 2008 году, а пункт централизованного хранения ОЯТ – к

2016 году. Все же позднее из-за возникших проблем с поиском площадок для строительства объектов эти сроки пришлось пересмотреть. Возведение первой очереди комплекса приповерхностного захоронения НАО и САО вблизи АЭС Вольсон было завершено летом 2014 года, а спустя год на площадку была доставлена первая партия отходов для окончательной изоляции.

Что касается политики обращения с отработавшим топливом, то ее принципы до сих пор полностью не определены: Комиссия примет соответствующее решение позднее, основываясь на темпах развития технологий в атомно-энергетической отрасли как в стране, так и за рубежом, при условии достижения общественного консенсуса по этому вопросу. Сейчас хранение ОЯТ осуществляется на приреакторных площадках в «мокрых» и «сухих» хранилищах [29].

В соответствии с законом «О национальной энергетике», за планирование основной деятельности, формирование национальной политики и долгосрочной стратегии государства в энергетической отрасли отвечает Национальный комитет по энергетике (NEC). При этом функции планирования и реализации деятельности в области использования атомной энергии распределены между четырьмя ведомствами: Комиссией по атомной энергии (АЕС), Комиссией по ядерной безопасности (NSC), Министерством науки, информационно-коммуникационных технологий и планирования (MSIP) и Министерством торговли, промышленности и энергетики (MOTIE) (рис. 18) [30, 31].

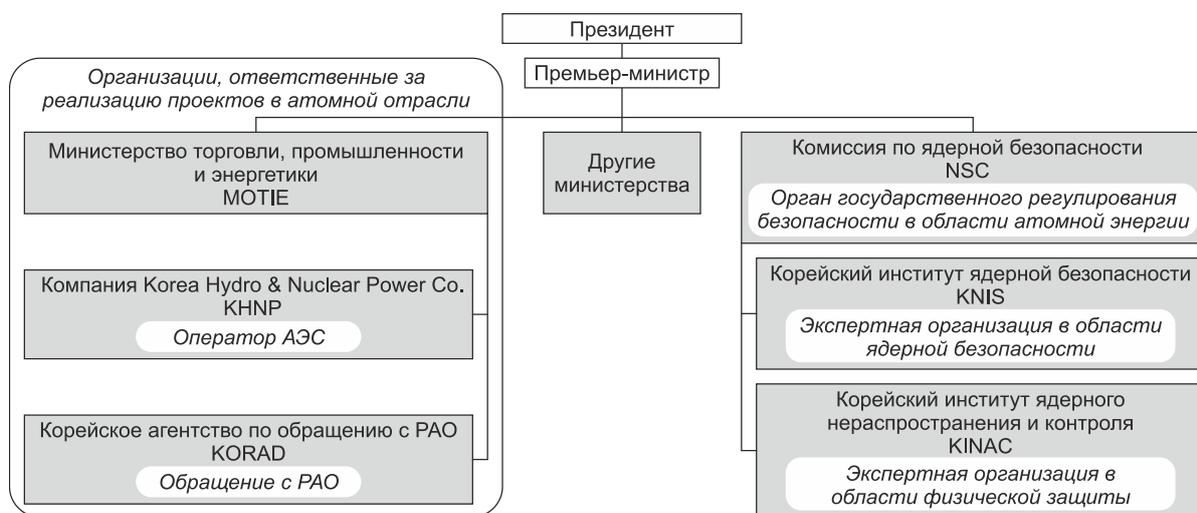


Рисунок 18 — Основные ведомства, участвующие в проектах по созданию пунктов захоронения в Корее [29]

В соответствии с Законом об атомной энергии, АЕС является верховным руководящим органом, принимающим решения по национальной политике Республики Корея в области использования атомной энергии. АЕС во главе с премьер-министром страны состоит из 9–11 членов, представляющих интересы правительства, научных кругов и атомно-энергетической отрасли.

Министерство науки, информационно-коммуникационных технологий и планирования MSIP отвечает за проведение НИОКР, регулируемую деятельность и лицензирование. Для выполнения возложенной на MSIP миссии в декабре 1996 года в структуре Министерства была учреждена Комиссия по ядерной безопасности (NSC), возглавляемая Министром науки, информационно-коммуникационных технологий и планирования. Техническую поддержку регулирующему органу оказывают две научно-исследовательские организации: Корейский институт ядерной безопасности (KINS), являющийся экспертным органом в области ядерной безопасности, и Корейский институт ядерного нераспространения и контроля (KINAC), оказывающий экспертную поддержку в области обеспечения физической защиты ядерных установок, в том числе ядерных материалов и контроля над их экспортом и импортом.

Основная ответственность за строительство и эксплуатацию АЭС, поставки ядерного топлива и обращение с РАО лежит на Министерстве торговли, промышленности и энергетики (MOTIE). При этом за строительство и эксплуатацию АЭС, а также обращение с РАО, образовавшимися на этих АЭС, отвечает компания Korea Hydro & Nuclear Power Co (KHNP), входящая в состав Корпорации Korea Electric Power Corporation (KEPCO). Другое подразделение Корпорации – KEPCO Engineering & Construction Company (KEPCO E&C) занимается вопросами проектирования, технического обслуживания и эксплуатации АЭС, а KEPCO Nuclear Fuel (KEPCO NF) – производством ядерного топлива для корейских АЭС.

В 2009 году было учреждено Корейское агентство по обращению с радиоактивными отходами (KORAD), миссия которого заключается в обеспечении долгосрочной безопасности обращения с РАО в

Республике Корея, в том числе KORAD отвечает за сооружение пунктов окончательной изоляции НАО и САО, промежуточное хранение и окончательное захоронение ОЯТ. Кроме того, отдельное подразделение Агентства несет ответственность за управление Фондом РАО. В соответствии с положениями Закона об обращении с радиоактивными отходами, производители отходов обязаны возместить KORAD будущие затраты на обращение с РАО, перечислив соответствующие суммы в Фонд РАО. Размер отчислений в Фонд пересматривается правительством раз в два года.

В 2009 году Агентство инициировало собственное исследование по вопросу долгосрочного обращения с ОЯТ, завершённое в 2011 году. Затем в течение 10 месяцев созданный правительством «Форум по выработке политики обращения с ОЯТ», состоявший из экспертов различного толка, а также представителей общественных организаций и местного населения, проживающего вблизи АЭС, проанализировал выводы KORAD по проведённому исследованию. Результаты сравнения различных вариантов политики обращения с ОЯТ и результаты опроса общественного мнения были обобщены в итоговом отчете, переданном на рассмотрение Правительству в сентябре 2012 года. В отчете содержалось 14 рекомендаций: в одной из них указывалось на «необходимость завершения работ по сооружению пункта промежуточного хранения ОЯТ к 2024 году».

В ноябре 2012 года было решено перейти к следующему этапу по выработке стратегии обращения с РАО – общественным консультациям, организацией которых занялся специальный комитет PECOS. Основная задача консультаций – разработать национальный план по обращению с ОЯТ, который бы получил одобрение широкой общественности. Для этих целей Комитету потребовалось собрать и проанализировать мнения всех заинтересованных сторон, включая представителей общественных организаций и местного населения, проживающего вблизи АЭС. Итоговый отчет по результатам работы Комитета был опубликован в 2015 году, а содержащиеся в нем рекомендации должны послужить основой для определения национальной политики обращения с ОЯТ в Республике Корея [29].

Классификация и реестр РАО

В соответствии с положениями закона «О ядерной безопасности», выделяли две категории радиоактивных отходов: высокоактивные отходы, образующиеся в результате эксплуатации АЭС, и низко- и среднеактивные отходы, образующиеся как в ходе производства атомной энергии, так и использования радиоизотопов в медицине, промышленности и науке.

В декабре 2013 года NSC одобрил поправки к действующей системе классификации РАО, согласно которым были определены следующие категории РАО: очень низкоактивные отходы (ОНАО), низкоактивные отходы (НАО), среднеактивные отходы (САО) и высокоактивные отходы (ВАО). Согласно действующей на сегодняшний день системе классификации РАО, к категории ВАО следует относить радиоактивные отходы с удельной активностью свыше 4 000 Бк/г для альфа-излучающих радионуклидов с периодом полураспада более 20 лет и тепловыделением более 2 кВт/м³. В Республике Корея весь объем ВАО приходится на отработавшее топливо [29].

К началу 2016 года было накоплено в общей сложности 425 086 ОТВС, из которых 408 796 ОТВС было выгружено из реакторов типа CANDU. Согласно прогнозам, к 2020 году объемы ОЯТ превысят 20 000 тонн. На данный момент все ОЯТ размещено в приреакторных «мокрых» и «сухих» хранилищах.

НАО и САО, образующиеся в ходе эксплуатации АЭС, представляют собой сухие активированные отходы, отвержденные жидкие отходы и отработавшие ионно-обменные смолы и фильтры. К началу 2016 года на площадках АЭС хранилось 98 887 двухсотлитровых бочек с НАО и САО [29]. 6 163 бочки было вывезено с территории приреакторных хранилищ и размещено в пункте захоронения НСАО Вольсон, оставшаяся часть НСАО по-прежнему хранится на территории четырех приреакторных площадок. Данные по объемам ОЯТ и НСАО и вместимости приреакторных хранилищ представлены в табл. 10. В пункт захоронения Вольсон также осуществляются поставки закрытых радиационных источников. С момента его открытия в июле 2015 года и по начало 2016 года на данную площадку было доставлено 3 225 бочек с ЗРИ.

Таблица 10. Реестр НСАО и ОЯТ, образовавшихся в результате эксплуатации АЭС [29]

АЭС		Реестр ВАО (ОЯТ)			Реестр НСАО		
Площадка	Число блоков	Вместимость (ОТВС)	Накоплено (ОТВС)	Заполненность хранилищ, %	Вместимость (бочек по 200 л)	Накоплено (бочек по 200 л)	Заполненность хранилищ, %
Кори	6 PWR	6 494	5 613	86,4 %	61 592	43 702	71 %
Ханбит	6 PWR	9 017	5 693	63,1 %	26 412	23 166	87,7 %
Ханул	6 PWR	7 066	4 855	68,7 %	24 091	18 812	78 %
Вольсон	4 PHWR 2 PWR	499 632 1 046	408 796 129	81,8 % 12,3 %	23 603	13 207	56 %
ВСЕГО	24	523 255	425 086	81,2 %	135 698	98 887	72,9 %

Пункт окончательной изоляции НАО и САО на площадке АЭС Вольсон

Изначально пункт захоронения НАО и САО планировалось построить на одной площадке с пунктом централизованного хранения ОЯТ. С 1986 по 2003 год было предпринято восемь попыток найти подходящую площадку для сооружения объектов, однако все они оказались безуспешными по целому ряду причин [32]:

- в некоторых случаях у экспертов присутствовали опасения по поводу возможности обеспечения безопасности;
- впоследствии эксперты признали, что процесс принятия решений в ходе поиска площадки был недостаточно прозрачным и справедливым;
- заинтересованные стороны не могли достигнуть согласия по ключевым вопросам;
- успешной реализации мешала решительная оппозиция со стороны местных жителей.

В декабре 2004 года Комиссия по атомной энергии заявила, что пункт захоронения НАО и САО и пункт централизованного хранения ОЯТ будут построены на разных площадках, что, наконец, позволило сдвинуть процесс с мертвой точки. В первую очередь было решено заняться проектом по созданию пункта захоронения НАО и САО.

В марте 2005 года был принят «Особый закон о поддержке регионов размещения пункта окончательной изоляции низко- и среднеактивных отходов», согласно которому при строительстве пункта захоронения НАО и САО полностью исключалась возможность строительства пункта централизованного хранения ОЯТ в той же местности. Кроме того, правительство устанавливало требование к обязательному проведению местных референдумов по вопросу строительства установки, а пакет льгот, предоставляемых местным жителям, был расширен. Что касается открытости и прозрачности процесса, то закон гарантировал следующее [32]:

- окончательное решение о строительстве установки в конкретном регионе могло быть принято только при условии получения большинства голосов местных жителей на региональном референдуме;
- обязательное предоставление всей необходимой информации местным жителям о разработке плана по поиску площадки, результатах проведенных исследований и т.п. (обеспечение прозрачности и открытости процесса принятия решений);
- проведение открытых обсуждений с участием местных жителей.

В законе также оговаривался размер выплат местному населению. Так, был учрежден специальный фонд «Поддержки регионов» размером 272 млн долларов США, деньги из которого могли расходоваться на развитие местной инфраструктуры. Кроме того, за каждую двухсотлитровую бочку, захороненную в пункте окончательной изоляции НАО и САО, в фонд дополнительно поступает по 580 долларов США [33].

Принятие этого закона изменило ситуацию коренным образом – спустя пару месяцев местные жители десяти регионов на добровольной основе изъявили желание участвовать в процессе выбора площадки для строительства пункта захоронения. В марте 2005 года Министерство инновационной экономики (МКЕ) учредило Комитет по поиску площадки (SSC) в составе 20 экспертов, возложив на него ответственность за обеспечение прозрачности и справедливости процесса принятия решений.

В июне 2005 года МКЕ утвердило обновленную процедуру выбора площадки, состоящую из пяти основных этапов (рис. 19). На первом этапе всенародно объявляется о старте кампании по поиску площадки для строительства пункта захоронения НАО и САО. Затем с одобрения местных жителей муниципальные власти подают заявку на участие в процессе выбора площадки, после чего по результатам проведенной оценки пригодности выдвинутых в кандидаты площадок МКЕ запрашивает у местных властей разрешение на проведение референдума. По результатам референдума площадка в регионе, набравшем наибольший процент голосов местных жителей в поддержку проекта, утверждается для строительства установки [32].

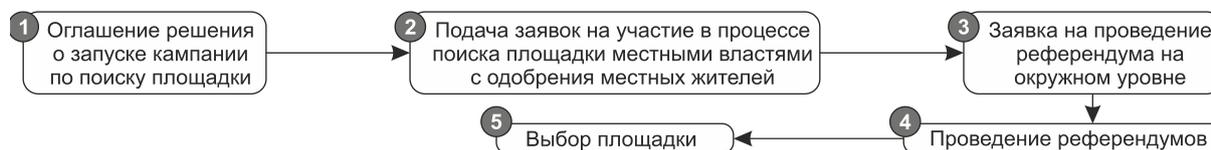


Рисунок 19 — Основные этапы процедуры поиска площадки для строительства пункта захоронения НАО и САО в Республике Корея

К 31 августа 2005 года заявки на участие в процессе поиска площадки были поданы местными властями четырех округов: Кунсан (Gunsan), Кёнджу (Gyeongju), Пхохан (Pohang) и Йондок (Yeongdeok). По результатам оценки все четыре оказались потенциально пригодными для сооружения установки. По итогам проведенных референдумов был выбран округ Кёнджу, расположенный в 370 км к юго-востоку от Сеула вблизи АЭС Вольсон (табл. 11) [32].

Таблица 11. Результаты референдумов в четырех округах

Округ	Кёнджу	Кунсан	Пхохан	Йондок
Имели право голоса	208 607	196 980	37 536	374 697
Проголосовало (не участвовало в референдуме)	147 636 (70 521)	138 192 (65 336)	30 107 (9 523)	178 586 (63 851)
Явка	70,8%	70,2%	80,2%	47,7%
Голоса «за»	89,5%	84,4%	79,3%	67,5%

Ответственность за строительство и эксплуатацию пункта окончательной изоляции НАО и САО Вольсон, рассчитанного на прием порядка 800 000 бочек отходов и по площади занимающего более 2 100 000 м², была возложена на KORAD. Основные этапы проекта приведены в табл. 12.

Таблица 12. Основные этапы проекта по созданию центра захоронения НАО и САО Вольсон [33]

январь 2006 года	Утверждение площадки для строительства центра по захоронению НАО и САО вблизи АЭС Вольсон
февраль 2006 года	Детальное исследование площадки и разработка проекта
июль 2006 года	Определен способ захоронения НАО и САО для первой очереди установок (подземное захоронение в шахтах)
январь 2007 года	Подача заявки на получение лицензии на строительство и эксплуатацию установок первой очереди центра захоронения
июль 2008 года	Получение лицензии на строительство и эксплуатацию установок первой очереди
декабрь 2010 года	Ввод в эксплуатацию первой очереди установок по приему и хранению отходов
июнь 2014 года	Завершение строительных работ
июнь 2015 года	Захоронение первой партии отходов
декабрь 2014 года	Подача заявки на строительство и эксплуатацию установок второй очереди центра
начало 2017 года	Ввод в эксплуатацию установок второй очереди

13 июля 2015 года в установке была захоронена первая партия отходов, состоявшая из 16 бочек с РАО, упакованных в бетонный контейнер. С этого дня осуществляется регулярная транспортировка РАО из наземного пункта промежуточного хранения, где уже накоплено 5 032 бочек с НАО и САО, 2 536 из которых поступили с АЭС Вольсон, 1 000 – с АЭС Ханул. В ближайшее время в пункт хранения поступит еще 4 233 бочки с РАО, источником образования которых являются корейские АЭС, промышленные предприятия и медицинские учреждения.

Как видно из табл. 12, проект разделен на два этапа. Первый этап завершился в июне 2014 года запуском первой очереди установок для окончательной изоляции НАО и САО в шести подземных шахтах общей вместимостью 100 000 бочек с отходами (рис. 20). Строительные работы на площадке начались в ноябре 2007 года и должны были закончиться в 2010 году. Однако ввиду необходимости проведения дополнительных работ по укреплению сводов подземной части объекта, а также возникших проблем с притоком грунтовых вод, дату ввода в эксплуатацию пришлось сдвигать дважды – сначала в 2009 году на 30 месяцев, а позднее в 2012 году еще на 18 месяцев. Кроме того, на первом этапе был сооружен целый ряд наземных установок, в том числе здания для инспектирования упаковок с отходами и для временного хранения РАО, установка для обработки отходов, главный центр управления работами по захоронению РАО и ремонтный цех [34]. Затраты на проведение работ, включенных в первый этап, составили 1,5 млрд долларов США.

Шесть шахт первой очереди пункта захоронения диаметром 25 м и высотой около 50 м расположены на глубине 80–130 м ниже уровня моря. Подземная часть пункта захоронения также включает тоннель для проведения строительных работ протяженностью около 1 950 м, эксплуатационный тоннель (1 415 м) и шахту доступа (207 м). Работы по проходке шахт пункта захоронения были начаты в феврале 2011 года и завершены в ноябре 2013 года. После чего была выполнена установка шахтных кранов для размещения бочек с отходами внутри шахт, системы противопожарной безопасности, а также систем радиационного мониторинга и вентиляции.

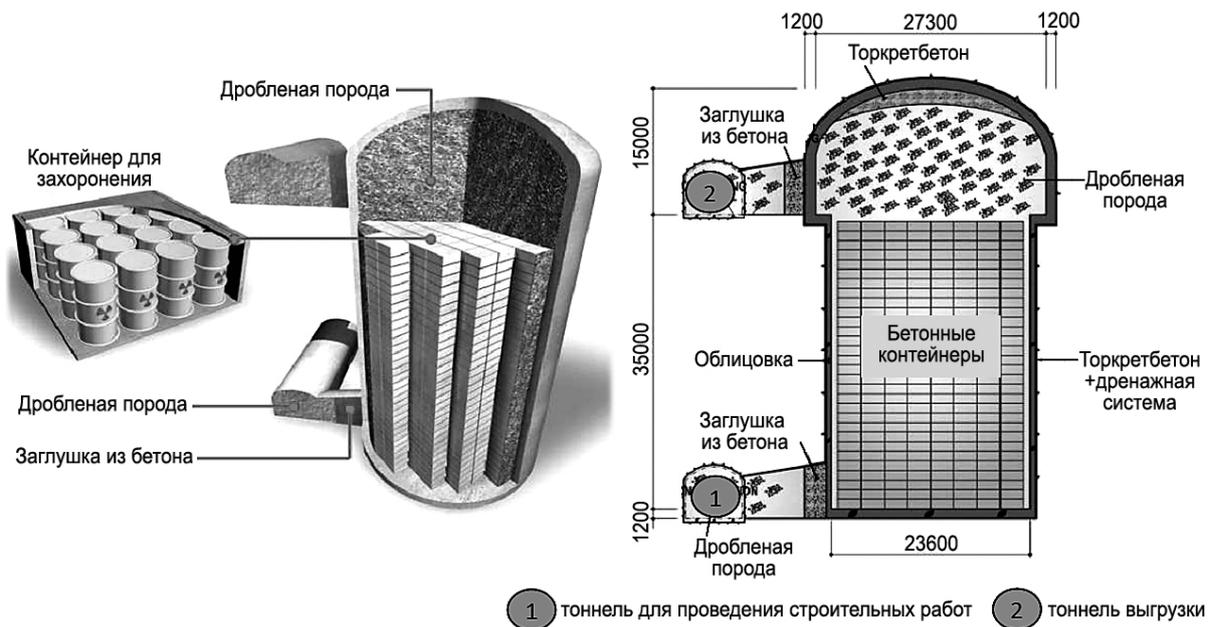
Концепция захоронения отходов в шахтах показана на рис. 21–22. Более 100 000 бочек, размещенных в шести шахтах (по 16 700 бочек в каждой шахте), способны вместить 35 200 м³ РАО. Для повышения производительности работ по захоронению отходов двухсотлитровые бочки группируют по 16 штук в специальных контейнерах (4×4), установка которых внутри шахт выполняется дистанционно с помощью крана.



Рисунок 20 — Основные установки центра захоронения НАО и САО Вольсон [34]



Рисунок 21 — Схема установок центра захоронения Вольсон первой очереди [35]



1 тоннель для проведения строительных работ 2 тоннель выгрузки

Рисунок 22 — Схема захоронения отходов в шахтах [36]

Установки второй очереди должны разместиться на площади 71 014 м². Согласно проекту, разработка которого началась в 2011 году, приповерхностный пункт захоронения сможет вместить 125 000 бочек с РАО. Установки для захоронения представляют собой модули 20×20 м высотой 10,5 м из армированного бетона толщиной стен 0,6 м. Бочки внутри модулей планируется размещать в девять ярусов, таким образом, общая вместимость каждого модуля составит 6 800 бочек. Все манипуляции с бочками будут осуществляться с помощью специальных кранов под мобильными крышами, обеспечивающими защиту от атмосферных осадков. После заполнения модуля все пустоты планируется заполнить гравием и залить цементным раствором.

Летом 2016 года МОТПЕ официально одобрило проект сооружения второй очереди пункта захоронения стоимостью 88 000 долларов США. Завершение работ по сооружению комплекса установок второй очереди общей площадью 120 000 м², способного вместить 125 000 бочек с РАО, намечено на 2019 год [37].

Таким образом, центр захоронения Вольсон станет первой в мире площадкой, на которой будут одновременно сосуществовать два типа установок для окончательной изоляции РАО – приповерхностный пункт захоронения и подземный. Кроме того, здесь же планируется разместить установку для захоронения ОНАО траншейного типа, предназначенную для приема отходов, которые образуются в результате вывода из эксплуатации АЭС. Таким образом, центр Вольсон после его постепенного расширения сможет принять на захоронение в общей сложности порядка 800 000 бочек с РАО. На сегодняшний день задача KORAD к 2020 году увеличить вместимость установок Центра до 350 000 бочек.

Научные исследования и разработки в области захоронения ОЯТ

В Республике Корея программа научных исследований, направленных на разработку технологии захоронения высокоактивных отходов (ОЯТ), была запущена в 1997 году, а к 2007 году корейскими экспертами был подготовлен проект так называемой референтной системы захоронения ОЯТ – KRS (Korea Reference System). К тому времени была проведена предварительная оценка безопасности проекта, реализована программа по изучению геологических условий на территории страны, разработана система инженерных барьеров безопасности, а также модели миграции радионуклидов в системе захоронения [38].

Для подтверждения безопасности концепции KRS в 2003 году был запущен проект по созданию подземной исследовательской лаборатории общего назначения в кристаллических породах (гранит) – Корейский подземный исследовательский тоннель (Korea Underground Research Tunnel, KURT). Сооружение тоннеля началось в мае 2005 года после проведения необходимых работ по характеристике площадки, разработки проекта ПИЛ и получения лицензии на проведение строительных работ. Проходка тоннеля KURT, формой поперечного сечения, напоминающего подкову (6×6 м), протяженностью 250 м осуществлялась с применением технологий направленного бурения и взрывных работ (рис. 23). Проходка была завершена в ноябре 2006 года. Стоимость работ составила 3,6 млн долларов США.

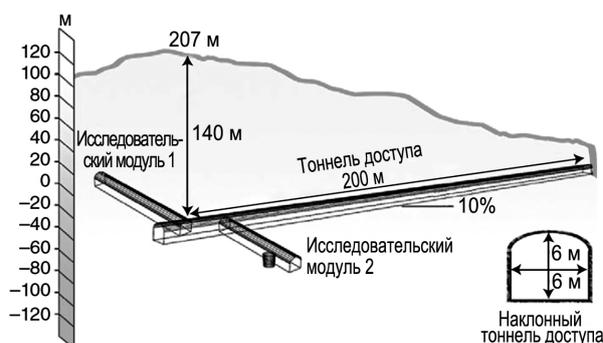


Рисунок 23 — Схема подземного исследовательского тоннеля KURT [39]

ПИЛ состоит из тоннеля доступа протяженностью 180 м и двух исследовательских модулей общей протяженностью 75 м. Глубина заложения составила 90 м. Основными направлениями исследований, проводимых в KURT, являются:

- эксперименты с использованием нагревающих элементов;
- исследование термо-гидро-механического поведения системы инженерных барьеров безопасности;
- исследование характеристик зоны структурных нарушений, возникшей вследствие проведения горно-проходческих работ, и механической стабильности вмещающих пород;
- изучение механизмов задержания при миграции растворов в трещиноватых породах;
- разработка методик исследования площадки;
- сбор гидрогеологических и геохимических исходных данных.

На сегодняшний день приоритетными направлениями научно-исследовательской деятельности KAERI в области захоронения ВАО являются:

- доработка проекта референтной системы захоронения ВАО;
- выполнение всеобъемлющей оценки эксплуатационных характеристик системы захоронения;
- проведение геологических исследований;
- проведение исследований и экспериментов в ПИЛ KURT, призванных продемонстрировать, что концепция KRS удовлетворяет установленным критериям безопасности.

Референтная концепция корейской системы захоронения ОЯТ и ВАО

Следует отметить, что официальная политика обращения с ОЯТ в Республике Корея до сих пор не утверждена. В этой связи рассматриваются две альтернативные стратегии долгосрочного обращения с ОЯТ [38]:

- прямое захоронение без переработки в пункте окончательной изоляции типа KRS;
- прямое захоронение ОЯТ, произведенного реакторами CANDU, и пирохимическая переработка ОЯТ с реакторов PWR с последующим захоронением образовавшихся в результате переработки ВАО (рис. 24).

В 2006 году специалистами KAERI был предложен концептуальный проект геологической системы захоронения KRS, предназначенной для окончательной изоляции ОЯТ с реакторов типа PWR и CANDU. Корейская концепция захоронения ОЯТ во многом схожа со шведской концепцией KBS-3V (рис. 25). В основу проекта при его разработке были положены репрезентативные данные о гранитных формациях на территории страны. Результаты проведенных исследований подтвердили техническую осуществимость проекта по сооружению на территории Корейского полуострова пункта захоронения, способного вместить 20 000 тонн ОЯТ с 16 реакторов типа PWR и 16 000 тонн ОЯТ с четырех реакторов типа CANDU. Так, если предположить, что одна канистра может вместить 4 ОТВС PWR, то для захоронения всего объема ОЯТ понадобится порядка 11 000 таких канистр. При условии захоронения 297 ОТВС CANDU в одной канистре понадобится около 2 800 канистр. Основная функция, выполняемая канистрами, состоит в удержании радионуклидов в течение заданного периода времени. Сама канистра состоит из двух частей:

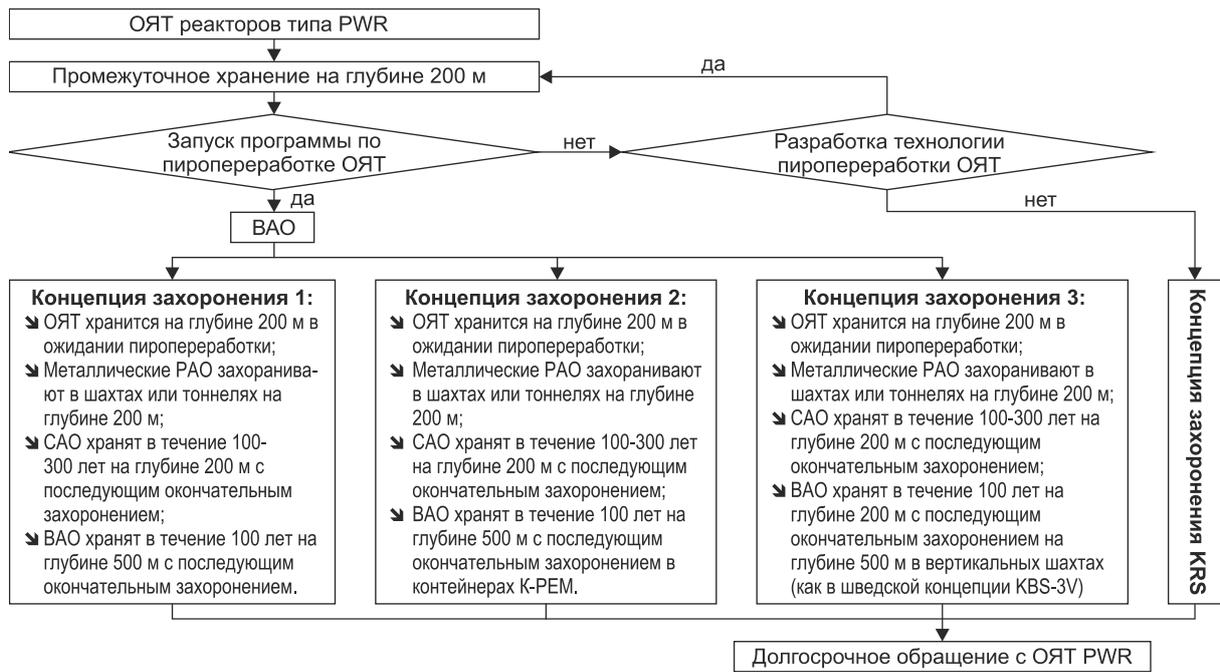


Рисунок 24 — Планы Кореи по обращению с ОЯТ, выгружаемого из реакторов типа PWR

внешней оболочки из меди, отличающейся повышенной коррозионной стойкостью, толщиной 5 см и внутренней вставки из чугуна, обеспечивающей механическую прочность. В табл. 13 приведено сравнение проектных требований, установленных для канистр в рамках концепции KRS, с проектными требованиями, установленными разработчиками финского проекта по захоронению ОЯТ.

Таблица 13. Сравнение проектных характеристик канистр для захоронения ОЯТ в Корее и Финляндии

Параметр	KAERI	Posiva
Период коррозионной устойчивости	1 000 лет	100 000 лет
Максимальная мощность дозы	0,5 Гр/ч	1 Гр/ч
Критичность	Кэф < 0,95	подкритич.
Температура на поверхности канистры	< 100°C	< 100°C
Режим нагрузки (давление)	определяется качественно	7 МПа + 7 МПа
Испытания на падение	2 м	-
Другое	количество первоначальных дефектов < 0,1%	просвет между внешней оболочкой и вставкой < 5%

Сам пункт захоронения планируется построить на побережье Корейского полуострова на глубине около 500 м. Система будет состоять из трех основных элементов (рис. 26): зоны захоронения; технических помещений и тоннелей, соединяющих подземную часть установки с поверхностью земли, в «контролируемой» зоне; технических помещений и тоннелей, соединяющих подземную часть установки с поверхностью земли, в «неконтролируемой» зоне.

Зона захоронения состоит из тоннелей захоронения; секционных тоннелей, соединяющих отдельные панели (секции) захоронения, и центрального тоннеля, соединяющего между собой «контролируемые», «неконтролируемые» зоны и секционные тоннели. На поверхности планируется расположить следующие объекты: завод по инкапсуляции, производственное здание, надшахтное помещение, пришахтный административный корпус, водоочистную установку, отопи-

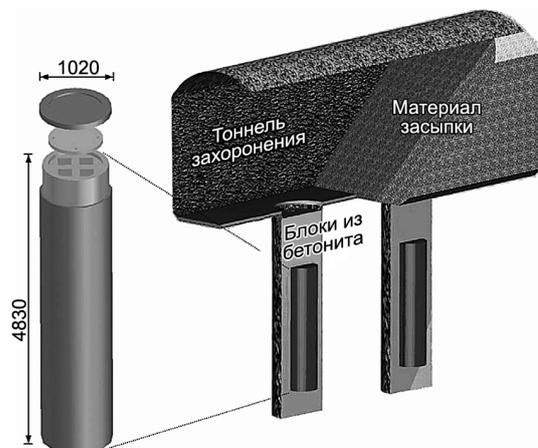


Рисунок 25 — Корейская референсная концепция захоронения ОЯТ (KRS) [42]

тельную котельную, информационный центр и др. Сам пункт захоронения будет располагаться непосредственно под заводом по инкапсуляции.

При разработке проекта пункта захоронения решающую роль сыграли следующие факторы:

- необходимо обеспечить разделение системы захоронения на «контролируемые» и «неконтролируемые» зоны. Так, все манипуляции с канистрами могут выполняться только в контролируемой зоне, работы по проходке тоннелей и засыпке – только в неконтролируемой зоне;
- на протяжении жизненного цикла установки граница между контролируемой и неконтролируемой зонами будет постепенно смещаться (рис. 26);
- на этапе эксплуатации пункта захоронения предусмотрено проведение работ по экскавации и засыпке тоннелей захоронения и секционных тоннелей;
- необходимо предусмотреть наличие двух эвакуационных выходов из каждого тоннеля, за исключением «глухих» тоннелей захоронения.

Учитывая вышесказанное, была разработана схема системы захоронения, показанная на рис. 27, предусматривающая разделение установки на контролируемую зону (слева) и неконтролируемую зону (справа). Таким образом, при осуществлении операций по захоронению канистр с ОЯТ будет происходить постепенное продвижение слева направо (см. рис. 26).

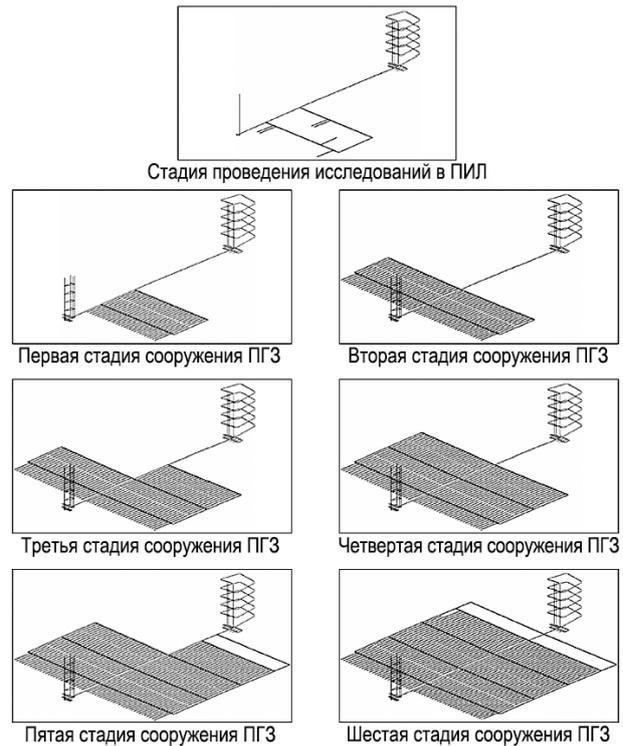


Рисунок 26 — Стадии сооружения пункта окончательной изоляции ОЯТ в Корее [40]

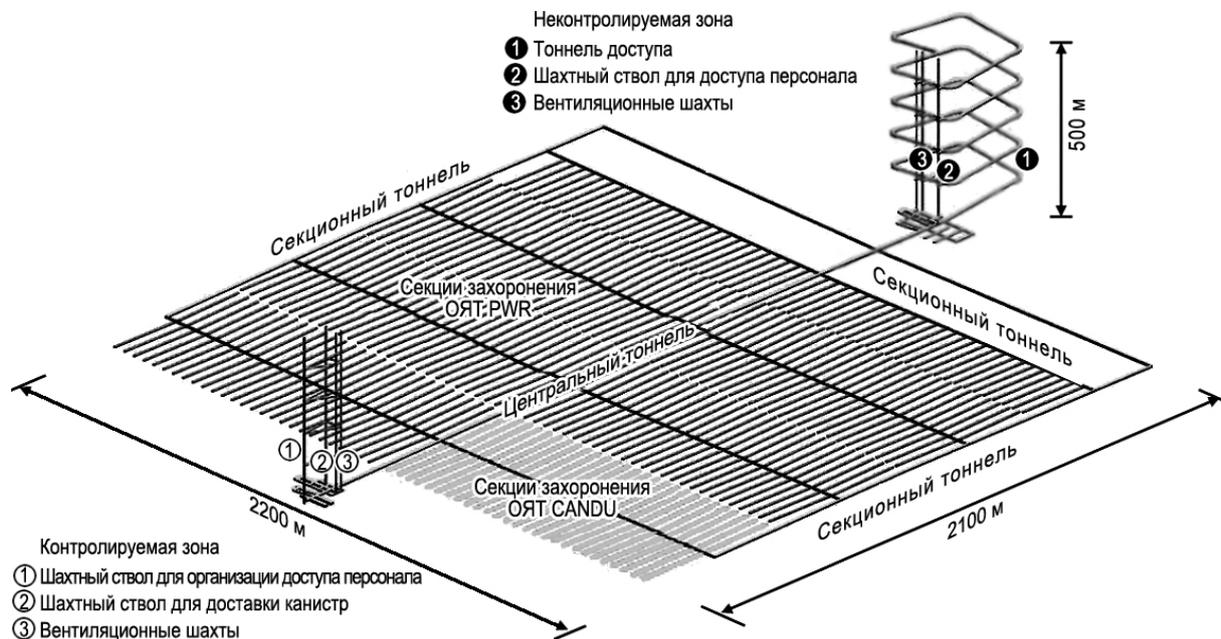


Рисунок 27 — Концептуальная схема корейского пункта захоронения ОЯТ [40]

Как уже говорилось ранее, канистры с ОЯТ планируется размещать вертикально в отсеках захоронения, запечатываемых пробкой из бентонита. Буфер состоит из отдельных блоков, спрессованных под высоким давлением. Блоки могут иметь форму колец, устанавливаемых вокруг канистры с ОЯТ, и дисков, устанавливаемых сверху и снизу. При разработке методики размещения канистр за основу был принят тот факт, что процесс захоронения будет практически непрерывным на всем протяжении эксплуата-

ции объекта, а проходка выработок для размещения технических помещений и прокладка коммуникаций будут осуществлены до начала эксплуатации самого пункта захоронения. При этом на этапе эксплуатации выделяют пять стадий проведения горнопроходческих работ, каждая из которых будет сопровождаться появлением новых тоннелей захоронения, а засыпка тоннелей будет осуществляться сразу после размещения в них канистр. Бурение отсеков захоронения будет выполняться одновременно с осуществлением операций по размещению в них канистр с ОЯТ. Также проект не предусматривает возможности для извлечения захороненных канистр с ОЯТ после закрытия установки: подобные операции возможны лишь на этапе эксплуатации пока тоннель захоронения не засыпан.

На рис. 26 наглядно представлены основные этапы сооружения пункта захоронения ОЯТ, согласно предварительным планам, утвержденным к 2012 году. Так, в случае если правительством Республики Корея была бы утверждена стратегия прямого захоронения ОЯТ, к 2020 году планировалось окончательно определиться с площадкой для строительства установки и приступить к сооружению подземной исследовательской лаборатории. В 2030-е гг. должно было начаться выполнение работ первой стадии, а на 2040 год было намечено завершение проходки всех тоннелей, предназначенных для окончательной изоляции ОЯТ CANDU. Также к этому моменту планировалось завершить проходку одного тоннеля для захоронения ОЯТ PWR, что в дальнейшем позволило бы избежать необходимости проведения горнопроходческих работ в непосредственной близости от уже захороненных канистр с ОЯТ CANDU.

Летом 2016 года правительство Республики Корея огласило новые планы по реализации проекта окончательной изоляции ОЯТ: утвердить площадку для строительства объекта должны к 2028 году, а завершение строительных работ намечено на 2052 год. При этом общая стоимость проекта была оценена в 55,4 млрд долларов США [41].

Концепция геологического захоронения ОЯТ CANDU и ВАО от пирохимической переработки ОЯТ PWR

Помимо сценария прямого захоронения всего объема накопленного ОЯТ, корейские специалисты проанализировали сценарий прямого захоронения ОЯТ CANDU и ВАО, образовавшихся в результате пиропереработки ОЯТ PWR (рис. 28). Вначале были определены четыре основные задачи проекта [38]:

- обеспечить совместное захоронение ВАО, образовавшихся в результате пирохимической переработки ОЯТ, и всех долгоживущих РАО;
- обеспечить безопасное хранение ВАО на протяжении длительного периода времени;
- повысить плотность размещения упаковок с РАО;
- обеспечить благоприятные условия для потенциального повторного извлечения захороненных отходов, а также возможность пересмотра решений, принятых на более ранних этапах.

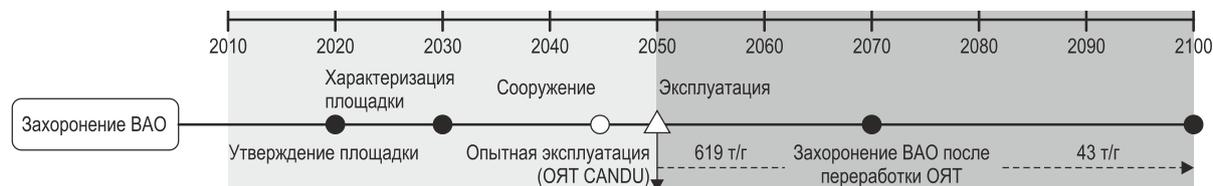


Рисунок 28 — Этапы осуществления второго сценария долгосрочного обращения с РАО в Корее [42]

В результате пирохимической переработки образуется три типа отходов. Первый тип – металлические отходы, обладающие недостаточно высокой удельной активностью для их отнесения к категории ВАО. Второй тип – остеклованные или помещенные в керамическую матрицу ВАО, образовавшиеся в результате расплавления солей LiCl-KCl. Последний тип ВАО – это отходы с повышенным тепловыделением, представляющие собой ВАО от очистки солей LiCl, помещенные в стеклянную или керамическую матрицу. Последнюю категорию планируется поместить на длительное промежуточное хранение в ожидании распада радионуклидов цезия и стронция. Что касается непосредственно самих процессов, в результате которых образуются эти типы РАО, то их можно разделить на четыре категории: разделка и расчехловка ОТВС с получением металлических отходов; волоксияция* с образованием сбросных газов; операции по уменьшению объема и очистке расплава солей LiCl. Таким образом, в ходе пирохимической переработки ОЯТ PWR будут получены три формы отходов: металлические, керамические и остеклованные, основные характеристики которых приведены в табл. 14. Расчеты были проведены для 10 тонн оксидного ОЯТ PWR с 4,5% содержанием ^{235}U и выгоранием 45 000 МВтсут/т после пяти лет выдержки [38].

* Высокотемпературное окисление ОЯТ солями щелочных металлов

Таблица 14. Характеристики отходов, образующихся в результате пирохимической переработки ОЯТ PWR

	Долгоживущие РАО			РАО со средним периодом полураспада	
	ВАО			САО	
	Металлические РАО	Керамические РАО	Остеклованные РАО	Керамические РАО	Остеклованные РАО
LiCl+KCl		LiCl+KCl	LiCl		
Основные радионуклиды	U + TRU + редкоземельные металлы	Cs + α	Sr + TPU + редкоземельные металлы	Cs	Sr
Вес, кг	3 158,53	0,65	963,21	600,94	67,99
Объем, л	470,7	0,3	419,8	231,8	30,5
Тепловыделение, Вт	-	0,9	4 200 (49,3 через 100 лет)	12 500 (6,72 через 300 лет)	6 000 (4,23 через 300 лет)
Тип контейнера	1	2	3	4	5
Глубина захоронения, м	200	500	500	200	200
Метод захоронения	Захоронение в шахтах или тоннелях	С отходами в контейнерах типа 3	Концепция KRS или захоронение в отсеках	Длительное хранение в тоннелях с последующей окончательной изоляцией	Длительное хранение в тоннелях с последующей окончательной изоляцией

Согласно оценкам, в результате переработки 10 тонн ОЯТ PWR должно образоваться около 3,16 тонн металлических отходов. В качестве метода их кондиционирования планируется использовать компактирование. Из-за незначительного тепловыделения таких РАО допускается их захоронение на глубине всего порядка 200 м. Кроме того, большие объемы металлических РАО образуются в ходе проведения работ по выводу из эксплуатации корейских АЭС. Эти отходы также будут захоронены совместно с металлическими РАО от пирохимической переработки ОЯТ PWR.

Для окончательной изоляции этого типа РАО будут использоваться особые контейнеры под названием с-MDP (упаковка для захоронения компактированных металлических РАО). Каждый контейнер с-MDP весом 13,3 тонны способен вместить 4 бочки с компактированными РАО. Один тоннель или шахта проектируемого пункта захоронения сможет вместить 855 контейнеров с РАО от переработки 26 000 тонн ОЯТ, произведенного 24 блоками реакторов типа PWR.

Согласно расчетам, из 10 тонн ОЯТ может быть получен один блок остеклованных ВАО весом 0,94 тонн, а в результате переработки всего ОЯТ с 24 реакторов PWR – 2 600 блоков ВАО (1 300 контейнеров). Начальный уровень тепловыделения таких отходов достаточно высок – порядка 4,2 кВт/блок или порядка 50 кВт/блок через 100 лет [38]. Основными радионуклидами в таких ВАО являются ⁹⁰Sr и ²⁴¹Pu. При этом 99% тепла, выделяемого в результате радиоактивного распада, придется на первые 100 лет после пиропереработки ОЯТ. Таким образом, такие РАО целесообразно хранить в течение 100 лет в открытом тоннеле [38].

Остеклованные ВАО от пиропереработки планируется поместить в двухцелевые контейнеры с облицовкой из меди для хранения и захоронения (SNDC) трех типов в зависимости от количества канистр, которые такой контейнер может вместить. Толщина стенок контейнера определена на основании требований радиационной защиты (150 мм) и скорости коррозии (10 мм).

Что касается керамической формы отходов, то на каждые 10 тонн переработанного ОЯТ придется 0,6 тонн ВАО или один блок керамических ВАО, а от переработки всего объема ОЯТ от 24 реакторов PWR – около 2 600 контейнеров по 6 бочек в каждом. Начальный уровень тепловыделения таких РАО достаточно высок и оценивается на уровне 2,0 кВт/блок. Основной радионуклид в таких РАО – ¹³⁷Cs, а большая часть радионуклидов должна распастись уже спустя 300 лет. Таким образом, через 300 лет хранения данный тип отходов будет относиться к категории САО, после чего такие отходы могут быть окончательно изолированы в пункте геологического захоронения. Для захоронения всего объема керамических САО от переработки ОЯТ с 24 реакторов PWR понадобится 9 тоннелей, в которых отходы будут храниться по меньшей мере в течение 300 лет, после чего пункт захоронения будет закрыт.

Вторая категория РАО, образующихся в результате пиропереработки ОЯТ – остеклованные САО, также из-за высокого уровня тепловыделения подлежит хранению на протяжении 300 лет, после чего эти РАО будут захоронены в 2 тоннелях, рассчитанных на прием всего объема остеклованных САО от переработки ОЯТ 24 реакторов PWR.

В основу проекта корейского пункта захоронения ВАО были положены следующие требования [38]:

- Система захоронения должна включать два отдельных уровня: на уровне 200 м (первый уровень) планируется окончательно изолировать отходы с незначительным уровнем тепловыделения, а на уровне

500 м (второй уровень) – ВАО. Отходы, преимущественно содержащие радионуклиды с коротким периодом полураспада, например, ^{137}Cs и ^{90}Sr , подлежат предварительному хранению и последующему захоронению на первом уровне.

- Тоннели первого уровня также будут использованы для хранения ОЯТ PWR в ожидании запуска промышленных мощностей по его пирохимической переработке.
- Каждый тип РАО будет окончательно изолирован в специально спроектированном тоннеле.
- Металлические отходы планируется захоронить либо в тоннелях, либо в камерах.
- Отходы, содержащие долгоживущие радионуклиды или обладающие значительным тепловыделением, перед захоронением подлежат промежуточному хранению в установке на уровне 500 м.
- В целях оптимизации условий для повторного извлечения отходы подлежат обязательному хранению в открытых тоннелях по меньшей мере в течение 100 лет.
- При разработке проекта следует использовать информацию, полученную при проведении НИОКР в ПИЛ KURT.

Учитывая перечисленные выше требования, были разработаны концепции для захоронения каждого типа РАО, образующегося от пирохимической переработки ОЯТ PWR (рис. 29). Так, металлические отходы и отходы, содержащие радионуклиды со средним периодом полураспада, планируется захоронять на глубине 200 м. При этом металлические отходы будут захоронены в камерах, а САО, помещенные в керамическую или стеклянную матрицу, подлежат хранению и окончательной изоляции в тоннелях. Таким образом, тоннели системы захоронения останутся открытыми на протяжении 100–300 лет в целях отвода тепла, а затем будут закрыты буфером. Керамические и остеклованные ВАО будут захоронены на глубине 500 м после предварительной выдержки в открытых тоннелях системы в течение 100–300 лет. Три возможные концепции захоронения ОЯТ и ВАО представлены на рис. 24.

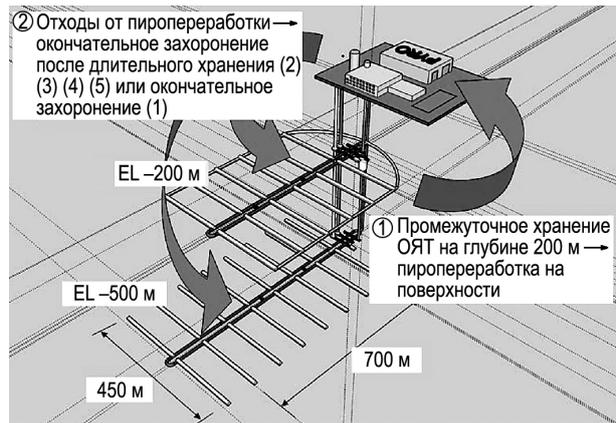


Рисунок 29 — Концепция захоронения разных категорий РАО, образующихся в результате пиропереработки ОЯТ PWR [40]

Корейскими специалистами сейчас изучается возможность захоронения ВАО в особых контейнерах прямоугольной формы (К-РЕМ*), обеспечивающих безопасность и эффективность длительного хранения отходов (рис. 30). Внешняя оболочка контейнера, способного вместить 2 канистры с остеклованными ВАО, изготовлена из титана. По мнению разработчиков, использование оболочки из титана толщиной 20 мм, повысит коррозионную стойкость и структурную стабильность упаковок с РАО, а двухслойный буфер позволит добиться улучшения тепловых характеристик конструкции [38].

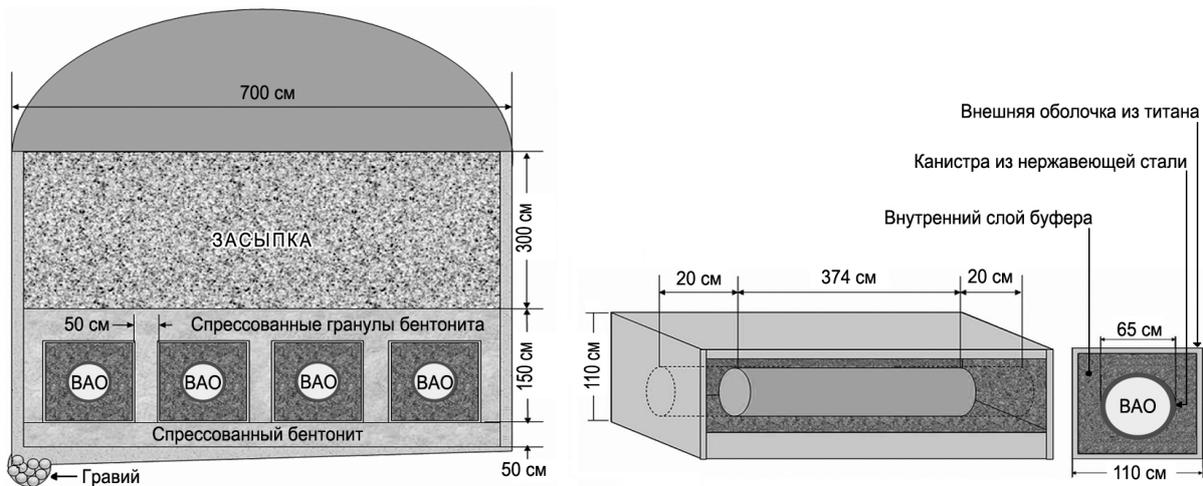


Рисунок 30 — Концепция захоронения ВАО с использованием контейнеров К-РЕМ [40]

* К-РЕМ – Korean Prefabricated EBS Module

Литература

1. 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.
2. Further studies for Ontario repository, World Nuclear News, 18 April 2016, по материалам сайта: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Further-studies-for-Ontario-repository-1804167.html> , заглавие с экрана, язык: английский.
3. Description of Alternate Locations, OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste, December 2016.
4. Environmental Effects of Alternate Locations, OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste, December 2016.
5. Cost and Risk Estimate for Packaging and Transporting Waste to Alternate Locations, OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste, December 2016.
6. Moving planned nuclear-waste site would cost billions: Ontario Power Generation, The Associated Press, Jan 04, 2017, по материалам сайта: <http://www.cbc.ca/news/technology/moving-planned-nuclear-waste-site-would-cost-billions-ontario-power-generation-1.3920766>, заглавие с экрана, язык: английский.
7. Progress Towards Long-Term Management of Used Nuclear Fuel in Canada, Mark Jensen, Jo-Ann Facella, Paul Gierszewski, Chris Hatton and Sean Russell, Workshop on the Fifth Worldwide Review "Challenging Issues in Deep Geologic Disposal of Nuclear Wastes", Fifth Worldwide Review — 2016.
8. Draft Consent-Based Siting Process for Consolidated Storage, US Department of Energy, January 12, 2017.
9. Draft Plan for Defense Waste Repository, US Department of Energy, December 2016.
10. Deep Borehole Disposal of Nuclear Spent Fuel and High Level Waste as a Focus of Regional East Asia Nuclear Fuel Cycle Cooperation, David von Hippel and Peter Hayes, Nautilus Institute, 2010.
11. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, Patrick V. Brady, Bill W. Arnold, Geoff A. Freeze et al., Sandia Report, SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, July 2009.
12. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report, Pat Brady, Bill Arnold, Susan Altman, and Palmer Vaughn, Sandia Report, SAND2012-7789, Sandia National Laboratories, September 2012.
13. Research & Development Program for the Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste Disposition in the United States, Timothy C. Gunter and Prasad K. Nair, US Department of Energy, Workshop on the Fifth Worldwide Review "Challenging Issues in Deep Geologic Disposal of Nuclear Wastes", Fifth Worldwide Review — 2016.
14. Feasibility of Lateral Emplacement in Very Deep Borehole Disposal of High Level Nuclear Waste, Gibbs, J.S., Dept. of Nuclear Engineering. Cambridge, MA, MIT, 2010.
15. US companies prepare for borehole field tests, Nuclear World Association, December 2016, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-US-companies-prepare-for-borehole-field-tests-2212167.html>, заглавие с экрана, язык: английский.
16. Team selected for US deep borehole field test, Nuclear World Association, January 2016, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Team-selected-for-US-deep-borehole-field-test-0801168.html> , заглавие с экрана, язык: английский.
17. Progress in Geological Disposal Program in Japan, Akira DEGUCHI, Hiroyuki UMEKI et al., Workshop on the Fifth Worldwide Review "Challenging Issues in Deep Geologic Disposal of Nuclear Wastes", Fifth Worldwide Review — 2016.
18. Japan's Siting Process for the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste: An International Peer Review, NEA No. 7331, OECD, 2016.
19. Indian programme on radioactive waste management, P.K. Wattal, Sadhana Vol. 38, Part 5, October 2013, pp. 849–857.
20. Estimating Nuclear Waste Production in India, M. V. Ramana et al., CURRENT SCIENCE, VOL. 81, NO. 11, 10 DECEMBER 2001.
21. India's Underground Radioactive Waste Disposal site at Gogi in Karnataka? VT Padmanabhan and Joseph Makolil, February 2015.
22. Radioactive Waste Management Practices in India, K. Raj *, K.K. Prasad, N.K. Bansal, Elsevier, Nuclear Engineering and Design, 236 (2006) 914–930, 2006.
23. Host Rock Characterization, In-Situ Experiments, Numerical TMH Simulations and Natural Analogue Studies in Indian Deep Geological Disposal Program, R. K. Bajpai, P. Shrivastava, P. K. Narayan, and K. Banerjee, Workshop on the Fifth Worldwide Review "Challenging Issues in Deep Geologic Disposal of Nuclear Wastes", Fifth Worldwide Review — 2016.
24. Nuclear Power in China, Nuclear World Association, Updated January 2017, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>, заглавие с экрана, язык: английский.

25. China's Nuclear Fuel Cycle, Nuclear World Association, Updated December 2017, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>, заглавие с экрана, язык: английский.
26. Third National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management of the People's Republic of China, Beijing, China, September, 2014.
27. Geological Disposal Program for High Level Radioactive Waste and the Plan for the Underground Research Laboratory in China, Ju Wang, Rui Su, Liang Chen, Xingguang Zhao, Yuemiao Liu, Zihua Zong, Workshop on the Fifth Worldwide Review "Challenging Issues in Deep Geologic Disposal of Nuclear Wastes", Fifth Worldwide Review — 2016.
28. IAEA PRIS – Reactor Details, Power Reactor Information System.
29. Radioactive Waste Management in the Republic of Korea, Radioactive Waste Management Programmes in NEA Member Countries, OECD/NEA Profile, 2016.
30. Radioactive Waste Management in the Republic of Korea, Radioactive Waste Management Programmes in NEA Member Countries, OECD/NEA Report, 2014.
31. Republic of Korea, Country Nuclear Power Profiles, IAEA, 2016.
32. Republic of Korea: Experience of Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-up, J.-I. Yun, Y.H. Jeong, J.H. Kim, Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-up; Processes, Technologies and International Experience, edited by William J. Lee, Michael I. Ojovan, Carol M. Jantzen, Woodhead Publishing Limited, 2013.
33. Experience of Siting Process for Radioactive Waste Disposal Facility in Korea, Yong-Rae Lee, KORAD, 2012.
34. Approval for Korean repository expansion, World Nuclear News, July 2016, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Approval-for-Korean-repository-expansion-2607164.html>, заглавие с экрана, язык: английский.
35. Korean Repository Realised, Caroline Peachey, Nuclear Engineering International, 22 July 2014.
36. Low and Intermediate Level radioactive Waste(LILW) Disposal Facilities, KEPSCO, подготовлено по материалам сайта: <https://www.kepco-enc.com/eng/contents.do?key=1544>, заглавие с экрана, язык: английский.
37. Approval for Korean repository expansion, Nuclear World Association, Updated July 2016, подготовлено по материалам сайта: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Approval-for-Korean-repository-expansion-2607164.html>, заглавие с экрана, язык: английский.
38. The Geological Disposal Concepts for the High-Level Radioactive Waste from a Spent Fuel Recycling Process in Korea, J. Y. LEE, D. K. CHO, M. S. LEE, H. J. CHOI, J. W. CHOI, J. H. CHA, WM2009 Conference, March 1-5, 2009, Phoenix, AZ.
39. Radioactive waste management and contaminated site clean-up KAERI underground research tunnel (KURT), подготовлено по материалам сайта: <http://capitalenergy.biz/?p=27813>, заглавие с экрана, язык: английский.
40. Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels Jongyoul LEE, Dongkeun CHO, Heuijoo CHOI & Jongwon CHOI, Journal of Nuclear Science and Technology, 44:12, 1565-1573, 2007.
41. Seoul Plans for Nuclear Waste Site, Korea JoongAng Daily, 26 July 2016, подготовлено по материалам сайта: <http://mengnews.joins.com/view.aspx?aId=3021743>, заглавие с экрана, язык: английский.
42. Radioactive Waste Management in Korea, Tae-Jin Park and Jong-Won Choi, Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), May, 2012, Hacettepe University.

Приложение 1. Сводная информация по проектам глубинного геологического захоронения ОЯТ и РАО, реализуемым в странах Азии, США и Канаде

Страна	Корея	Япония	США
Характеристики проекта			
Вид РАО	ОЯТ или ОЯТ/ВАО	ВАО/ТРУ РАО	ТРУ РАО (WIPP)
Ресурсы РАО	20 000 тонн ОЯТ с 16 реакторов типа PWR и 16 000 тонн ОЯТ с четырех реакторов типа CANDU	40 000 м ³ ВАО 19 000 м ³ ТРУ РАО	при общей вместимости ПЗ в 175 500 м ³ в установке размещено 90 900 м ³
Глубина заложения, м	500 м	более 300 м	650 м
Вмещающие геологические формации	гранит	не определены	соля
Способ доставки РАО в ПЗ	наклонный спуск	по вертикальному стволу шахты	по вертикальному стволу шахты
Ориентация РАО/этажность при вертикальной ориентации*	вертикальная /1 канистра	вертикальная для ВАО (1 канистра) и канистры захоронения с контейнерами, штабелируемыми в несколько уровней для ТРУ РАО	камеры захоронения с контейнерами, штабелируемыми в несколько уровней
Форма и упаковка	форма ВАО – стекло или керамика, внешняя оболочка канистры из меди, толщиной 5 см с внутренней вставкой из чугуна	остеклованные ВАО помещают в металлический контейнер, окруженный буфером из природного бентонита.	контейнеры, конструкция которых различается в зависимости от типа захораниваемых ТРУ РАО
Возможность повторного извлечения	не определена	предусмотрена	предусмотрена
Наличие специализированной организации	KORAD (Корейское агентство по обращению с радиоактивными отходами) с 2009 г.	NWMO (Организация по обращению с РАО) с 2002 г.	нет
Текущий статус	поиск площадки	предварительный геологический скрининг территории страны, разработка процедуры взаимодействия с населением	регулятор завершил рассмотрение отчета по обоснованию безопасности проекта
Сроки ввода в эксплуатацию	2050 г.	не определены	не известно
Длительность эксплуатации	до 2100 г.	около 50 лет	еще 25–35 лет
Плотность населения в районе размещения**, чел/км ²	517	337	353,2
Право вето у местного населения	процедура выбора площадки находится в процессе разработки	да	нет
Денежные выплаты муниципалитетам		да	да
Программа привлечения местного населения		разработана, но подлежит пересмотру	разработана
Площадка расположена вблизи ядерных объектов		не известно	нет

* количество канистр в одной вертикальной камере/скважине захоронения
 ** если площадка не определена, то указана плотность населения в стране

Страна	Китай	Индия	Канада	
Характеристики проекта				
Вид РАО	ВАО	ВАО	НСАО	ОЯТ/ВАО
Ресурсы РАО	точный реестр не определен	10 000 упаковок (каждая упаковка содержит по две-три канистры с ВАО объемом 45 л каждая)	160 000 м ³	5,2 млн ОТВС
Глубина заложения, м	500 м	500–600 м	680 м	500 м
Вмещающие геологические формации	гранит	граниты, гнейсы или базальтовые формации	известняк	магматические
Способ доставки РАО в ПЗ	по вертикальному стволу шахты	по вертикальному стволу шахты	по вертикальному стволу шахты	
Ориентация РАО/этажность при вертикальной ориентации*	вертикальная / 1 канистра	вертикальная / 1 канистра	камеры захоронения с контейнерами, штабелируемыми в несколько уровней/ горизонтальная ориентация	блоки из бенгонита будут штабелироваться в два уровня при горизонтальной ориентации самой ОТВС
Форма и упаковка	остеклованные ВАО в стальных контейнерах и в буфере из бенгонита	остеклованные ВАО в металлической канистре высотой 2 м	пучок ОТВС в медном цилиндрическом контейнере	канистры с ОТВС, заключенные в блоки из бенгонита
Возможность повторного извлечения	не определена	не определена		предусмотрена
Наличие специализированной организации	нет	нет		NWMO (Организации по обращению с ядерными отходами), с 2002 г.
Текущий статус	выбран регион размещения ПЗ, работы по характеристизации проводятся на пяти участках. Сооружение ПИЛ, которая в последствии станет частью ПЗ планируется начать в 2020 г.	поиск площадки для сооружения ПИЛ, которая бы в будущем могла бы стать частью самого пункта захоронения	получение разрешения на сооружение установки на площадке в муниципалитете Кинкардин ожидается в 2017 году	Скрининговые исследования на территории 9 муниципалитетов в провинции Онтарио
Сроки ввода в эксплуатацию	2050 г.	не раньше 2060 г.	2026 г.	2040–2045 гг.
Длительность эксплуатации	не определена	до 250 лет	не определена	26–63 года
Плотность населения в районе размещения**, чел/км ²	60	319	20,8	3,4
Право вето у местного населения	нет	нет		да
Денежные выплаты муниципалитетам	нет	нет		да
Программа привлечения местного населения	не разработана	не разработана		разработана
Площадка расположена вблизи ядерных объектов	нет	не известно	да	не известно

* количество канистр в одной вертикальной камере/скважине захоронения
** если площадка не определена, то указана плотность населения в стране