

# Варианты захоронения и их влияние на безопасность, стоимость и обработку РАО

Теро Varjoranta  
Директор STUK

CEG Workshop Stockholm  
26-27.4.2006

## Содержание

- Общие вопросы; Выбор варианта захоронения и его последствия является сложной оптимизационной задачей
- Варианты захоронения в различных странах
- Основные соображения безопасности
- (Дополнительные материалы)

## Варианты захоронения РАО

- В АО – только одно надежное решение: захоронение в глубоких геологических формациях
- НСАО -
  - имеется большой набор вариантов
  - Более 80 "приповерхностных могильников"
  - достаточное понимание и опыт (хороший и не очень впечатляющий)

## Вариант захоронения является одним из элементов пошагового, но комплексного подхода

- национальная основа; законы, правила, ответственные за принятие решений, одобрение населения, программа по атомной энергетике (разделы по прошлому, настоящему и будущему)
- структура по обращению с РАО
- данные о количестве РАО, характеристика и анализ
- варианты захоронения и концепция
- выбор площадки и ее характеристика
- проект могильника
- критерии приемлемости РАО
- сооружение
- эксплуатация
- закрытие
- меры после закрытия

## Выбор варианта захоронения является оптимизационной задачей

- **национальное законодательство** и структура надзора
- **национальный** - региональный - **местный**
- что нужно захоронить
- характеристики отходов (количество, активность и время жизни, опасные химикаты и др.)
- количества РАО
- **другие соображения по захоронению на национальном уровне**
- **площадки-кандидаты**: геология, гидрология, геохимия
- **стоимость** вариантов
- **доверие, этическая ответственность, одобрение**
- пассивная или активная безопасность; а если вблизи поверхности?
- другие возможности и задачи (международный объект, региональный)

(В Финляндии: важно **утилизация ОЯТ** и **утилизация НСАО**)

## Выбор варианта захоронения: Стоимость также является оптимизационной задачей

- работа по лицензированию и надзору, критерии, что является реально- и практически выполнимым,
- выбор площадки,
- приобретение земли,
- проектирование, сооружение, эксплуатация и закрытие объекта, контроль и мониторинг после закрытия (корректирующие действия),
- необходимость повторного обращения или переупаковки
- создание инфраструктуры, местной - региональной - национальной
- создание путей (дороги, ж/д и др.), транспорт
- анализ безопасности,
- достижение доверия; национальное и международное,
- связи с другими частями национальной программы; прошлое, настоящее и будущее,
- важность планирования обращения с РАО: минимизация производства отходов

## Выбор варианта захоронения: Стоимость также является оптимизационной задачей (продолжение)

- Исследование OECD/NEA от 1999 г.:
  - может значительно отличаться в разных странах
  - в некоторых странах планирование и лицензирование стоят дорого
  - экономика необычная: сооружение стоит больше, чем эксплуатация
  - неглубокое захоронение обычно дешевле, чем захоронение в горных формациях
- организованный контроль после закрытия могильника стоит денег
- различные схемы финансирования

## Основной мотиватор: Доверие

### В ЧЕМ

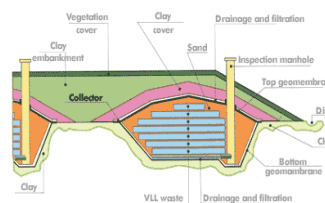
- изоляция (площадка, конструкция, надежное обоснование)
- обоснование безопасности (пассивные способы вмести активных мер, конструкция, управление неопределенностью, моделирование, аналоги, записи)
- Основные варианты по НСАО: ОНАО, неглубокое поверхностное захоронение, техническое приповерхностное захоронение, горные выработки

### КЕМ

- исполнителем
- учеными
- инженерами
- надзором
- принимающими решения
- заинтересованными группами
- населением

## Захоронение очень низко-активных РАО (ОН РАО)

- Удельная активность ОНАО не более 100 Бк/гр
- ОНАО кондиционированы, например, упакованы в тюки или завернуты в пластик
- Могильник ОНАО, например, в Morvilliers во Франции, состоит из траншеи в глиняной породе
- Могильник имеет дренаж и систему внешнего покрытия, которая предотвращает поступление дождевой воды и подземных вод в объем РАО



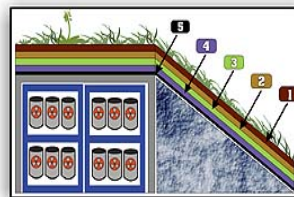
## Простое неглубокое захоронение

- РАО для простого неглубокого захоронения кондиционированы и упакованы соответствующим образом (например, отверждены, размещены в бетонные контейнеры)
- Обычно могильник размещается в сухой среде над уровнем грунтовых вод
- Траншеи засыпаются грунтом
- Чтобы предотвратить поступление дождевой воды в могильник организуется верхнее непроницаемое перекрытие
- Большинство первых могильников (например, в США и Великобритании) были такого типа



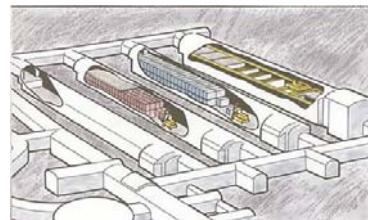
## Инженерное приповерхностное захоронение

- Упаковки кондиционированных РАО помещают в бетонные бункеры
- Пространство между упаковками РАО заполняется например цементным раствором
- Бункеры перекрываются бетонными плитами и уплотняются битумом (закрытый бункер) или трудно проницаемым покрытием, которое размещается поверх заполненного бункера (открытый бункер)
- Бункеры защищаются слоями покрытия (изолирующий слой, дренажный слой, слой препятствующие проникновению и эрозии)
- Предусмотрена дренажная система под бункерами
- Большинство современных приповерхностных могильников относятся к данному типу



## Захоронение в горных выработках

- Горные выработки для захоронения упаковок с НСАО сооружались на глубине от нескольких десятков метров (Швеция, Финляндия) до нескольких сотен метров (Германия)
- В сухих геологических формациях, таких как соль, никаких инженерных конструкций не требуется, кроме упаковок РАО и заполнения пустот
- В насыщенных геологических формациях, например, в граните, нужны инженерные конструкции, такие как бетонные бункеры или шахты, в частности для РАО средней активности



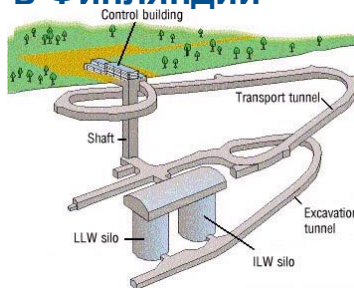
## Могильники для НС РАО

Страна	Площадка	Период	Концепция
США	Beatty, Nevada Barnwell, SC Richland, Wash. Clive, Utah	1962 - 1993 1971 - 1965 - 1995 -	Ранние простые неглубокие могильники в земле, К середине 90-х – инженерные приповерхностные могильники
Великобритания	Drigg Dounreay	1959 - 1957	Простые неглубокие могильники в земле / инженерные приповерхностные могильники
Франция	Centre de la Mance Centre de l'Aube Morvilliers	1969 - 1994 1992 - 2003 -	Простые / инженерные приповерхн. Инженерные приповерхн. могильн. Простые неглубокие могильники для ОНАО
Германия	Asse Morsleben	1967 - 1981 - 1999	Захоронение в горных выработках Захоронение в горных выработках

Страна	Площадка	Период	Концепция
ЮАР	Vaalputs	1986 -	Простые неглубокие могильники
Швеция	Forsmark	1988 -	Захоронение в горных выработках
Финляндия	Olkiluoto Loviisa	1992 - 1998 -	Захоронение в горных выработках
Япония	Rokkasho	1992 -	Инженерный приповерхностный могильник
Испания	El Cabril	1992 -	Инженерный приповерхностный могильник
Чехия	Dukovany	1994 -	Инженерный приповерхностный могильник
Норвегия	Himdalen	1998 -	Захоронение в горных выработках
Словакия	Mochovche	2000 -	Инженерный приповерхностный могильник

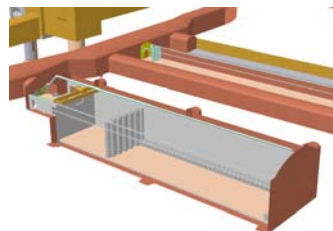
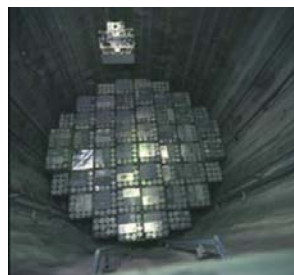
## Концепции захоронения в Финляндии

- Гранитные шахты (Olkiluoto) или боксы (Loviisa) на глубине 60 - 110 м в кристаллиновой породе
- Боксы для захоронения САО усилены бетонными конструкциями для создания барьера для изоляции
- ЖРО отверждены в битуме (Olkiluoto) или в цементе (Loviisa)
- Система инженерных барьеров должна сохранять эффективность по крайней мере 500 лет
- Активный организованный мониторинг не требуется (только поддержание архивов и некоторый контроль использования земли)



## Концепции захоронения в Финляндии

- Основные функции безопасности:
  - изоляция обеспечивается упаковками РАО
  - медленное поступление воды в модули захоронения
  - осаждение (напр. С-14) из-за щелочных условий
  - сорбция поверхностей инженерных барьеров
  - медленная миграция радионуклидов в геосфере
- Экспертиза обоснований безопасности:
  - Loviisa в 2006 г. (из-за расширения объекта)
  - Olkiluoto в 2007 г. (продление на 15 лет)



## Основные функции безопасности

### Инженерные барьеры

- исходный контеймент
- химически благоприятные условия
- механически стабильная окружающая среда
- сопротивление проникновению

### Среда обитания

- изоляция от грунтовых вод или малый расход грунтовых вод
- удерживающая способность радионуклидов
- сопротивление проникновению

### Организованный контроль

- отмечает необходимость корректирующих действий
- снижает вероятность человеческого проникновения

## Инженерные барьеры

Барьер	Материалы	Функции безопасности	Ключевые параметры
<b>Форма РАО и контейнер</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• иммобилизирующий агент (цементный раствор, битум, полимеры)</li> <li>• бетонный или металлический контейнер</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• механическая стабильность</li> <li>• ограничение поступления воды</li> <li>• удержание радионуклидов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• механическая прочность</li> <li>• скорость выщелачивания</li> <li>• темп физико-химического разрушения</li> </ul>
<b>Заполнение пустот</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• цементный раствор</li> <li>• глина, почва</li> <li>• щебень</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• механическая стабильность</li> <li>• ограничение поступления воды</li> <li>• осаждение радионуклидов</li> <li>• сорбция радионуклидов</li> <li>• контроль отвода газов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• пористость и проницаемость</li> <li>• удерживающая</li> <li>• сорбционная способность</li> </ul>

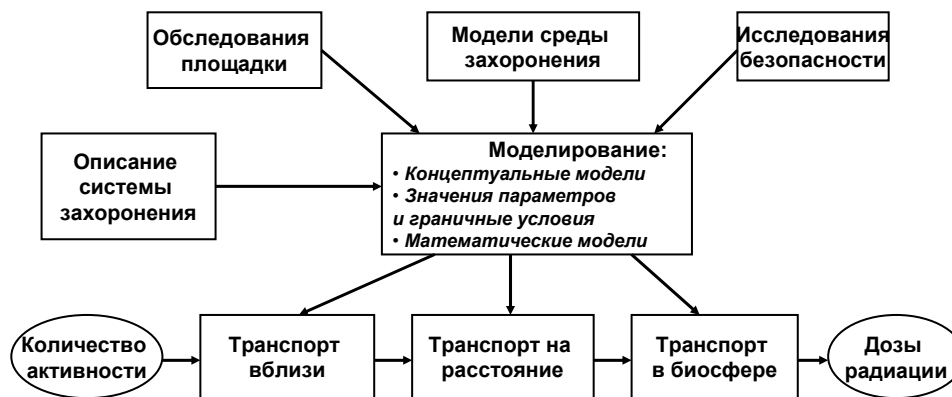
## Инженерные барьеры (продолжение)

Барьер	Материалы	Функции безопасности	Ключевые параметры
<b>Конструкционные материалы, облицовка</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• бетонные боксы и шахты</li> <li>• уплотнение асфальтом</li> <li>• облицовка глиной</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• механическая стабильность</li> <li>• ограничение поступления воды</li> <li>• изоляция радионуклидов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• механическая прочность</li> <li>• пористость и проницаемость</li> <li>• темп физ-хим разрушения</li> </ul>
<b>Дренаж</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гравий / песок</li> <li>• щебень</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ограничение поступления воды</li> <li>• контроль за скоростью выщелач</li> <li>• мониторинг</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• проницаемость</li> <li>• темп деградации (напр. блокировка)</li> </ul>
<b>Покрытие</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• глина, гравий, почва</li> <li>• бетонные плиты</li> <li>• мембраны из асфальта / полимеров</li> <li>• растительность</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ограничение фильтрации воды</li> <li>• предотвр. эрозии</li> <li>• пред.проникновения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• проницаемость, возможность отклонения воды</li> <li>• темп эрозии</li> <li>• простота извлечения</li> </ul>

## Среда пребывания – критерии выбора площадки

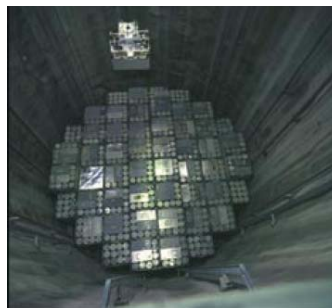
Характеристика	Функции безопасн.	Ключевые параметры
<b>Гидрология и геогеология</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ограничение поступления грунтовых вод</li> <li>• выход и миграция радионуклидов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• скорости осаждения и проникновения</li> <li>• гидравлическая кондуктивность и перенос</li> <li>• гидравлические градиенты (напор)</li> <li>• факторы дисперсии и растворения</li> </ul>
<b>Геохимия</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• стабильность инженерных барьеров</li> <li>• растворение и удержание радионуклидов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• концентрации агрессивных сред</li> <li>• состав грунтовых вод, pH, Eh</li> <li>• пористость скал/почвы и данные по сорбции</li> </ul>
<b>Геомеханика, Тектоника и сейсмика</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• стабильность инженерных барьеров</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• амплитуда и направление напряжений</li> <li>• параметры деформации</li> <li>• частота и амплитуда передвижения почвы или скал</li> </ul>
<b>Поверхностные процессы</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• предотвращение эрозии, оползней, наводнений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• скорость эрозии и выветривания</li> <li>• вероятность оползней</li> <li>• вероятность наводнений</li> </ul>

## Обоснование безопасности – Количественный анализ безопасности



## Резюме

- Существует большое разнообразие безопасных вариантов и опыта
- Захоронение является одним из элементов поэтапного, но комплексного подхода
- Захоронение и его стоимость: задача оптимизации в зависимости от страны
- Ключ к успеху: уверенность в изоляции и обоснованность безопасности для исполнителей, ученых, инженеров, принимающих решения, заинтересованных групп и населения



## Дополнительный материал

## История и решения в Финляндии

- Необходимость захоронения эксплуатационных отходов включена в лицензию на эксплуатацию (TVO 1977 г.)
- Решение Государственного Совета (10.11.1983)
  - к концу 1986 г., в органы надзора должны быть представлены планы и анализ безопасности по сооружению могильников
  - в 1992 г. могильники должны быть введены в эксплуатацию
- Концепция (захоронение в скальных выработках на площадке АЭС)
  - нет необходимости в транспортировке, которая выставляет дополнительные требования и увеличивает затраты
  - одобрение населением
  - сооружение является экономичным, однако небольшие объемы РАО повышают стоимость на блок. В случае нескольких производителей РАО могут быть более эффективными другие варианты
  - концепция захоронения ясна на ранней стадии – нет необходимости в переупаковке, что приводит к росту затрат и доз

## Реализация и надзорный контроль по первому могильнику НСАО в Финляндии



## Требования по приемлемости РАО

### Радиологические свойства

- Содержание радионуклидов, мощность внешней дозы, поверхностное загрязнение, возможность радиолиза

### Механические свойства

- Прочность на нагрузку и удар, возможность распухания, возможность выделения газов

### Химические свойства

- Коррозионная стойкость, скорость выщелачивания, состав жидкостей, воспламеняемость/горючесть, химически опасные вещества

### Свойства контейнера РАО

- Коррозионная стойкость, целостность, сопротивление нагрузке и удару

## Квалификация упаковок РАО

### Контроль радиологических свойств

- данные по исходным РАО
- Прямые спектрометрические измерения
- Представительные образцы и их анализ
- Использование корреляций (масштабные факторы)
- Расчетные методы

### Контроль физических, химических и биологических свойств

- Записи о содержании упаковок РАО
- Знание процессов обработки и кондиционирования
- Контроль за технологическими параметрами
- Мало- полу- полномасштабные тесты
- Взятие образцов и анализ
- Неразрушающий контроль

## Оценка работы

### Стадия контейнента

- акцентируется на анализе деградации инженерных барьеров из-за грунтовых вод (напр. коррозия, кислотное выщелачивание, сульфатация, щелочные реакции) или из-за самих РАО (напр. распухание, образование газов, реакции с сульфатами и другими составляющими)
- только ограниченные выходы летучих радионуклидов (напр. диффузия через трещины)
- для блоков могильников с хорошими инженерными барьерами безопасности (ИББ) стадия длится несколько сот лет

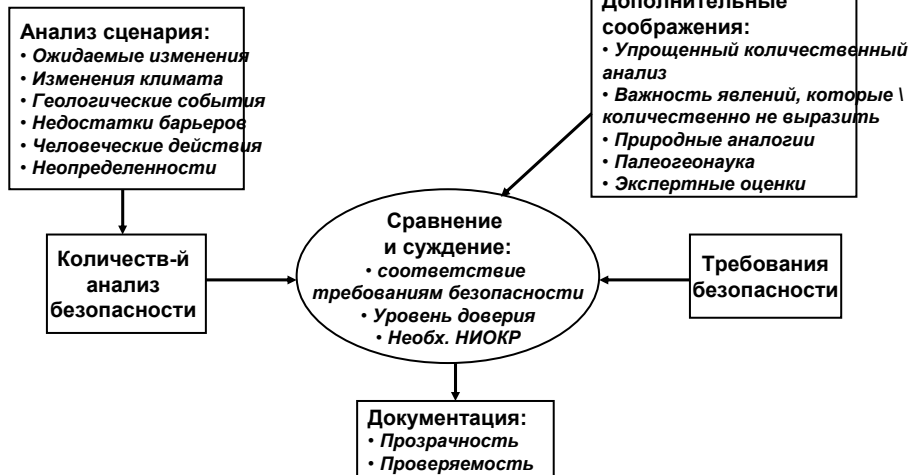
### Стадия изоляции

- из-за деградации ИББ образуются каналы выхода из могильника
- основными функциями безопасности в это время являются упаковки РАО, ограниченная растворимость радионуклидов (напр. из-за щелочной среды) и сорбция на материалах ИББ
- в длительной перспективе основными функциями безопасности будут медленные потоки грунтовых вод и сорбция на/диффузия в поверхности окружающих скальных пород
- для блоков могильников с хорошими ИББ стадия обычно длится тысячи лет

### Стадия возврата к природе

- Функции безопасности ИББ потеряны и эффективны только функции безопасности отдаленной перспективы

## Обоснование безопасности – анализ результатов



## Обоснование безопасности – Сбор и трактовка данных

