

Обращению с ядерными отходами в условиях глобального потепления

Глобальное потепление-это серьезная угроза, которая оправдывает все практические меры по сокращению выбросов парниковых газов, а также оценку вариантов минимизации последствий изменения окружающей среды.

Ядерная энергетика имеет широко признанную роль, которую следует расширить, чтобы помочь в постепенном отказе от ископаемого топлива в то время, когда спрос на электроэнергию быстро растет. Однако необходимо добиться прогресса в области социального признания, как для быстрого внедрения реакторов нового поколения, так и для удаления ядерных отходов, особенно для долгоживущих высокоактивных отходов.

Что касается изменения климата, то серьезной проблемой является повышение уровня моря, повышенный риск штормов и наводнений. Поскольку большая часть нашей ядерной и другой промышленной инфраструктуры расположена в прибрежных районах, существует настоятельная необходимость рассмотреть вопрос о том, как защитить их от такого воздействия климата. Это возможно, иногда объекты сосредоточены на относительно небольших площадях.

При некотором нестандартном подходе концепции управления отходами могут быть разработаны таким образом, чтобы помочь уменьшить озабоченность, особенно когда наземные объекты для глубокого геологического захоронения могут быть расположены рядом с существующими ядерными установками. Даже если это еще не критично по времени, стоит начать обсуждение вариантов уже сейчас, учитывая длительные сроки выполнения таких проектов.

Концептуальный план

Реакторы и другие ядерные объекты строят на прибрежных территориях для их технических преимуществ, таких как простота доступа и наличие охлаждающей воды. Но это ставит их под угрозу повышения уровня моря.

Легкость доступа и хорошие гидрогеологические условия также могут сделать подходящие морские вмещающие пласты привлекательными для удаления отходов. Хотя подводное захоронение радиоактивных отходов запрещено международными конвенциями, это относится только к глубоководным вариантам за пределами национальных вод, а не к морским геологическим хранилищам, доступ к которым осуществляется с суши. Такие хранилища для отходов низкого и среднего уровня уже существуют (например, хранилище SFR в Швеции). Перспективные планы по созданию хранилищ отходов более высокой активности в Швеции и Финляндии предусматривают их размещение в прибрежных районах, которые в ближайшем будущем могут оказаться ниже уровня моря.

Несмотря на внешнее сходство, вариант глубоководного геологического хранилища, построенного на шельфе обычным способом с выходом на сушу, отличается от океанического захоронения под морским дном следующими параметрами:

- Захоронение отходов происходит на территории, которая находится в пределах границ страны, а не находится под международными водами;
- Система множественных инженерных барьеров может быть установлена со строгим контролем качества, чтобы обеспечить сдерживание на том же уровне, что и наземное хранилище;
- Отходы могут быть извлечены с помощью существующей технологии, если такое решение будет принято в будущем. Это не может быть заявлено для глубоководных вариантов океана.

Разделение поверхностных объектов по обращению с отходами и мест захоронения рассматривалось в других местах, особенно когда первые находятся на существующих ядерных объектах.

На рис. 1 схематически показаны три различных варианта хранилища. Топография, как правило, является основной движущей силой для потоков пресной воды под землей, причем потоки воды обычно уменьшаются в зависимости от глубины. Вблизи береговой линии более высокая плотность морской воды приводит к проникновению соленого клина под сушу, степень которого зависит не только от геологических условий, но и от антропогенных воздействий, таких как забор воды. Это упрощенное представление гидрогеологии иллюстрирует принципы, но не может охватить воздействие геологических условий на конкретных участках.

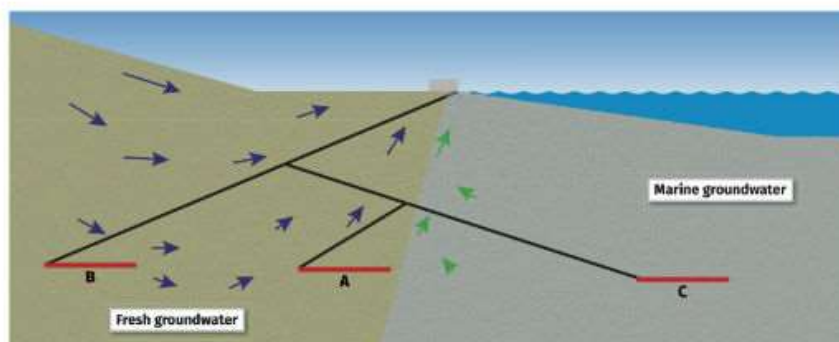


Рисунок 1. Схематическое изображение параметров хранилища: А - обычный – ниже приемного сооружения, расположенного на прибрежной равнине; В - ниже возвышенности внутри страны – доступ по пандусу из приемного сооружения; С - оффшорный – также доступ по пандусу

Внутренние и морские захоронения демонстрируют заметный контраст в гидрогеологических граничных условиях по сравнению с захоронениями ниже прибрежной равнины. Первые, как правило, имеют более высокие гидравлические градиенты, но более длинные транспортные расстояния до биосферы и, возможно, более высокое разбавление на границе геосфера/биосфера, если миграционный шлейф более рассеян. Последний имеет незначительный гидравлический градиент и эффективно обеспечит отсутствие выброса

радионуклидов в грунтовые воды, и даже если миграция действительно произойдет (например, в газовой фазе), будет очень высокое разбавление любого стока с морского дна. Поскольку холмистая/гористая местность будет представлять собой источник глубокого стока в пределах внутренних водосборных бассейнов, подземные воды будут менее засоленными. Ближе к побережью грунтовые воды будут более солеными.

В целом задачи строительства и эксплуатации хранилищ будут аналогичны для этих трех вариантов. Доступ к подводному хранилищу осуществлялся бы через пандусы, поскольку вариант шахт (например, для вентиляции, доступа человека), используемый в обычных конструкциях, был бы неприемлем, если нет удобно расположенных островов вблизи побережья.

Спустя долгое время после закрытия хранилища информация о его местонахождении может быть утрачена, что, возможно, приведет к непреднамеренному вторжению человека. Хотя этот риск был бы выше в равнинном хранилище по сравнению с внутренним холмом из-за человеческой деятельности, риск вторжения человека в море был бы чрезвычайно низок. В отсутствие вторжения инженерные барьеры и геологические условия обеспечат полное сдерживание в течение очень длительного периода времени и низкие уровни высвобождения после этого. Вопросы, подлежащие тщательному рассмотрению на концептуальной и объектно-специфической основе, включают возмущения, например образование химических шлейфов и/или подвижных коллоидов в системе адвективного потока.

Поскольку выброс и миграция радионуклидов будут происходить преимущественно за счет диффузии в море, такие вопросы вызывают меньшее беспокойство. Вместо этого проблемы заключаются в возмущениях, которые могут вызвать более быстрый перенос радионуклидов – например, в газовой фазе или из-за теплового конвективного потока воды.

Наконец, важную роль играют социально-политические факторы. Удаленность и изолированность, обеспечиваемые подводным вариантом, должны способствовать положительному восприятию хранилища, но обоснование безопасности должно убедить ключевые заинтересованные стороны, в частности местных рыбаков. Защита морской среды является глобальной проблемой, и, даже если она строго законна и сопряжена с незначительным риском для здоровья, любой вариант удаления, который может привести к выбросу радиоактивности в море, может вызвать противодействие в соседних странах.

Долгосрочная эволюция прибрежной среды

В контексте хранилищ долгоживущих отходов, где безопасность оценивается на протяжении сотен тысяч лет, необходимо учитывать изменения береговой линии в результате изменения климата и круговорота ледников.

В ближайшие столетия мы ожидаем дальнейшего таяния ледяного покрова и, следовательно, повышения уровня моря (рис. 2). Влияние таких изменений на

производительность прибрежного хранилища очень сильно зависит от местной топографии и батиметрии, но ключевыми вопросами являются:

- Первоначальное повышение уровня моря и постепенное затопление низменных прибрежных равнинных районов. В худшем случае - полное таяние ледяных шапок может привести к подъему уровня моря на 80 метров.
- В какой-то момент в будущем предполагается, что естественный цикл "ледникового периода" будет восстановлен. Следующий максимум "ледникового периода" приведет к общему снижению уровня моря на 150 м по сравнению с нынешним.
- После этого такие циклы будут повторяться в масштабе сотен тысяч лет, с тем же подъемом и падением уровня моря, но с воздействием местного поднятия или эрозии.

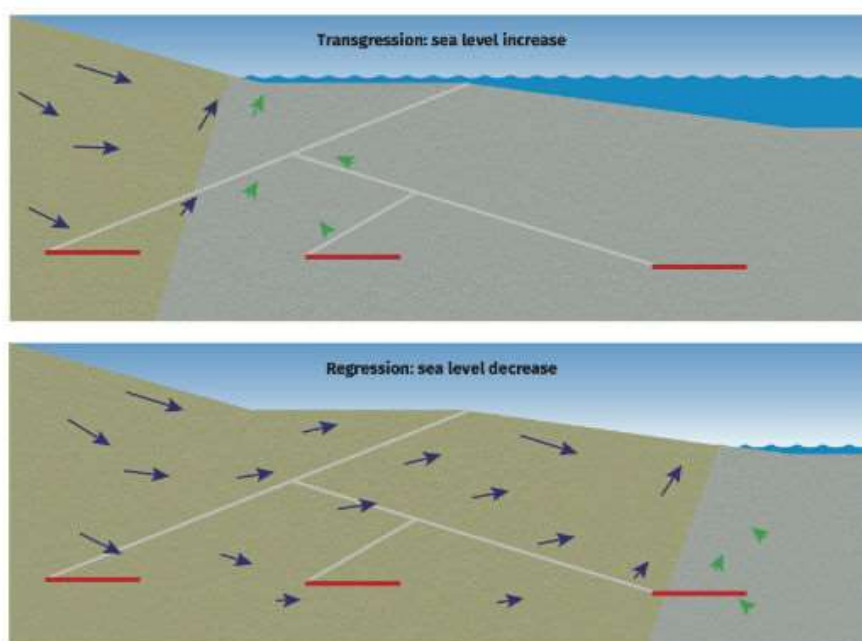


Рисунок 2. Схематическая иллюстрация последствий изменения уровня моря для трех вариантов хранилища (трансгрессия: повышение уровня моря, и регрессия: снижение уровня моря)

Прибрежное глубокое геологическое хранилище может быть создано в течение следующих двух десятилетий, а захоронение отходов - по крайней мере до конца столетия. Современные модели предполагают, что повышение уровня моря за этот период не превысит 1-2 м. Это не должно вызывать значительных эксплуатационных проблем, хотя при проектировании наземных сооружений необходимо учитывать более сильные штормовые волны.

В последующие два-три столетия, пока хранилище функционирует или находится под институциональным контролем, уровень моря может подняться на 10 м и

более. В настоящее время невозможно исключить "переломный момент" быстрого таяния ледяного покрова. В любом случае разумно предположить, что потепление приведет к отступлению из прибрежных районов и, возможно, к глобальному экономическому краху. Местные последствия будут зависеть как от рельефа местности, так и от технических контрмер. Даже если уровень моря поднимется быстрее, чем ожидалось, воздействие на глубоководное хранилище будет ограничено более медленной реакцией глубоководных вод на изменения поверхности.

После этого нет никакой научной основы для того, чтобы делать какие-либо предсказания. Действия человека могут доминировать над естественными климатическими циклами, но их воздействие зависит, например, от глобальных политических решений по ограничению выбросов, геоинженерии для уменьшения воздействия и возможности неизвестных переломных моментов или других катастрофических событий.

Что касается закрытого и герметичного хранилища, то главная проблема будет заключаться в том, может ли развивающийся солевой клин вызвать значительные изменения в химическом составе подземных вод или условиях стока. Прямое влияние на производительность, скорее всего, будет незначительным, поскольку инженерные барьеры должны быть обеспечены в течение тысяч лет.

Если подъем уровня моря может быть ограничен несколькими метрами, естественный цикл Земли будет стремиться к следующему ледниковому периоду. Как и выше, это также окажет огромное влияние на цивилизацию (например, из-за потери площади суши ледяными щитами, особенно в северном полушарии). Даже при активном климатическом контроле и стимулировании это повышение уровня моря не может быть остановлено, по крайней мере, в течение определенного периода времени. Предполагая дальнейшие ледниковые периоды в течение следующего миллиона лет, береговая линия в окрестностях хранилища может отступить на десятки километров в некоторых районах. Изменение гидравлических градиентов и гидрохимии в конечном итоге приведет к возникновению условий, сходных с условиями широких прибрежных равнин. Пресная вода вытеснила бы морскую воду из более мелких формаций, однако неясно, будет ли это также иметь место в более глубоких формациях. Пути потока из внутреннего хранилища могут быть увеличены, в то время как в морском хранилище длина путей уменьшится, а потоки соли или пресной воды вокруг хранилища будут выше.

Для более высоких широт влияние оледенения или, по крайней мере, образования вечной мерзлоты должно учитываться при оценке гидрогеологического и геохимического воздействия более низких уровней моря.

Адаптированные концепции хранилищ для оффшорных условий

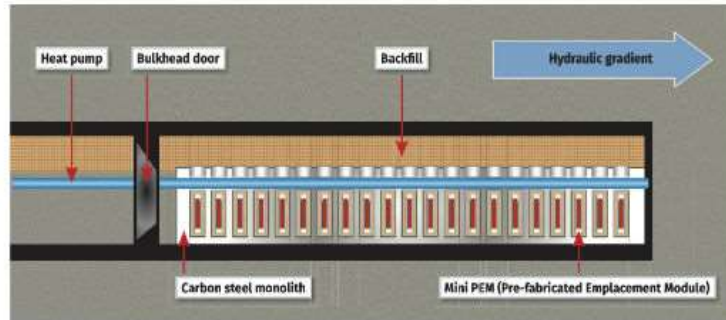
Существует много различных концепций геологического захоронения радиоактивных отходов, которые могут обеспечить достаточную производительность для конкретных типов отходов в конкретных геологических

условиях. В этом примере рассматривается отработавшее топливо из легководных реакторов или остеклованные высокоактивные отходы (ВАО) от переработки такого топлива, но он должен быть применим к другим видам топлива и отходов, образующихся в результате будущих поколений реакторов деления (или даже термоядерного синтеза).

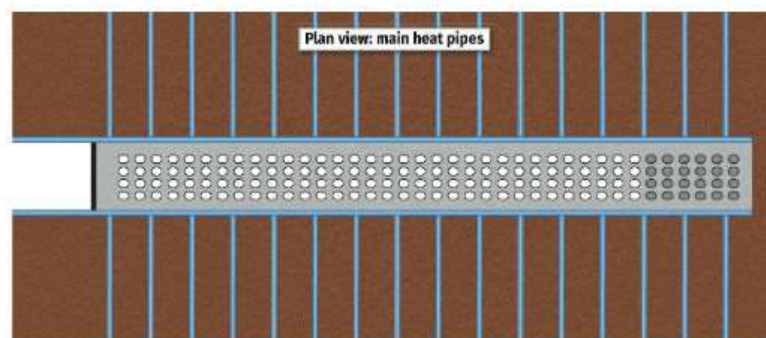
Общепринятые концепции отходов с более высокой активностью обычно включают одиночные упаковки отходов внутри металлического пакета. Для типичных складов отходов требуются туннели для размещения установок малого диаметра длиной от десятков до сотен километров. Более высокая плотность размещения отходов может быть достигнута за счет использования больших пещер и многоцелевых хранилищно-транспортно-утилизационных бочек, содержащих около 20 упаковок отходов. В качестве альтернативы отходы могут быть помещены в каналы в массивном стальном монолите. Более высокие плотности уменьшают площадь хранилища и облегчают логистику размещения. Меньшее количество выбитых пород снизит эксплуатационные риски (в основном связанные с земляными работами), воздействие на окружающую среду и затраты, но управление теплом становится все более серьезной проблемой.

Учитывая очевидные преимущества более высокой плотности размещения, стоит рассмотреть вопрос о том, как можно было бы решить проблемы, связанные с более высокой тепловой нагрузкой. Это может включать либо замедленную обратную засыпку, либо смесь активного и пассивного охлаждения с использованием тепловых насосов и тепловых труб. Последнее имеет то преимущество, что позволяет осуществлять более раннее закрытие, если это требуется в ответ на измененные граничные условия программы, а также позволяет использовать радиогенное тепло в качестве ресурса до тех пор, пока объект находится под активным управлением. В среде, где доминирует диффузия, инженерные барьеры могут быть сделаны более рентабельными. Например, вместо массивного пакета и толстого буфера можно было бы использовать гораздо меньший готовый модуль с любой дополнительной защитой, обеспечиваемой ограждающим стальным монолитом и засыпкой (в идеале с использованием материала, полученного в результате вывода атомной электростанции из эксплуатации - пример целостного управления отходами).

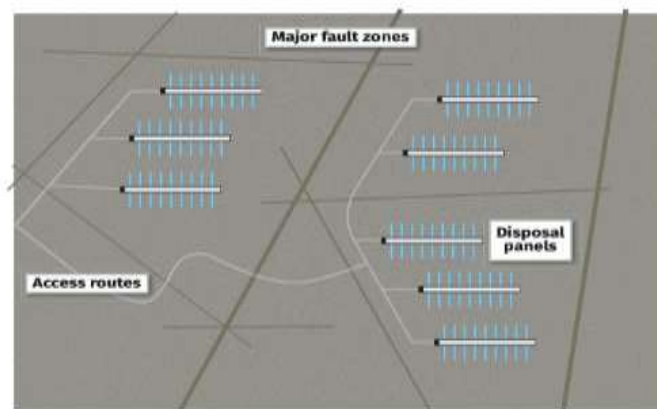
Чтобы обеспечить достаточное рассеивание теплового переходного процесса после такого управления, хранилища для захоронения отходов можно было бы хорошо отделить друг от друга – для оффшорной площадки это было бы менее проблематично, поскольку общая площадь хранилища вряд ли будет вызывать беспокойство. Для типичной вмещающей породы, в которой такие структуры, как крупные разломы, ограничивают области с лучшими свойствами, планировка может быть легко адаптирована для их использования, см. Рис. 3 (А, Б и В) ниже.



А



Б



В

Рисунок 3. Принципы адаптации планировки хранилища к геологическим структурам

Переход к целостному управлению отходами

Геологическое хранилище дает косвенную выгоду в виде вырытой добычи, которая может быть использована для строительства береговых оборонительных сооружений.

Согласно общепринятым концепциям, значительная часть таких отходов повторно используется в качестве засыпки, но с более целостной точки зрения управления отходами было бы полезно засыпать их более низкотоксичными радиоактивными отходами или другими химически токсичными отходами. Такое смешанное захоронение отходов считалось неприемлемым в прошлом из-за технических и социально-политических сложностей, но оно дает возможность экономически эффективно внедрить вариант глубокого захоронения отходов, которые традиционно обрабатывались поверхностным или приповерхностным захоронением. Почти все наземные места захоронения отходов в прибрежных районах подвержены риску повышения уровня моря, что потенциально требует создания дополнительных инженерных сооружений.

Здесь речь идет о странах, обладающих ядерной энергией и подходящими береговыми линиями, но выгоды, получаемые от такого проекта, могут сделать его очень привлекательным в качестве международного решения, принимаемого страной, не обладающей ядерной энергией. Для некоторых низменных островов повышение уровня моря является экзистенциальной угрозой, для борьбы с которой потребуются огромные финансовые ресурсы. Доход и занятость от Международного хранилища могли бы быть привлекательными, а защита от наводнений дополнительным преимуществом.

Источники:

1. <https://www.neimagazine.com>
2. <https://www.entrepriseetdecouverte.fr>

Подготовил А. Саликов