



### Захоронение ядерных отходов: процессы, происходящие в подземных хранилищах

*Оценка явлений в „ближней зоне“  
в целях безопасной длительной  
изоляции радиоактивных отходов*

Дж. Хейнонен и Ф. Джера

В настоящее время разрабатывается, строится и даже эксплуатируется (для некоторых видов радиоактивных отходов) большое количество различных систем подземных хранилищ. Эти системы основываются на различных конструкциях подземных хранилищ для разных геологических формаций.

В области захоронения радиоактивных отходов доминирует концепция многочисленных барьеров. Для подземных хранилищ, размещенных в геологической среде, в которой возможен перенос радионуклидов, необходимо, чтобы другие компоненты системы уменьшали такую возможность путем пре-

Г-н Хейнонен – бывший штатный сотрудник Отдела ядерного топливного цикла МАГАТЭ.

Г-н Джера – сотрудник Института экспериментальных моделей и конструкций (ISMES), Италия, Рим, 1-00187, Виа дей Кро-  
чефери, 44.

На фото показан туннель в базальтовой формации, относящейся к числу геологических сред, наиболее пригодных для захоронения ядерных отходов. Базальт – это плотная вулканическая порода, образованная потоками лавы, которые в течение почти 16 млн. лет постепенно покрывали землю слоями. (Источник: Атомный промышленный форум).

дотращения или ограничения подвижности радионуклидов.

Явления в „ближней зоне” — термин, который обычно касается самого хранилища, вырытого открытым способом, упаковок отходов и окружающей породы (см. текст в рамке) — достаточно понятны в отношении определенных типов породы и конструкций подземных хранилищ, а также при рассмотрении каждого явления в отдельности.\* Процессы в ближней зоне, рассмотренные в данной статье, касаются коррозии упаковок отходов, выщелачивания, химических и минералогических изменений, а также изменений движения подземных вод и переноса радионуклидов в дальнюю зону.

Для оценки эксплуатационных характеристик систем захоронения отходов с точки зрения удержания радионуклидов все перечисленные процессы необходимо рассматривать в комплексе. Именно такое объединение проблем является самой трудной частью оценки, которая требует проведения дополнительной работы для уменьшения неопределенностей в отношении эксплуатационных характеристик различных компонентов ближней зоны.

Например, термомеханические процессы в подземном хранилище, расположенном в твердой породе, могут повлиять на проницаемость породы и движение подземных вод таким образом, что их трудно будет удовлетворительно смоделировать. Кроме того, присутствие радиоактивных отходов может изменить химическую среду, а радиолиз — привести к окислению. С другой стороны, инженерные барьеры, окружающие радиоактивные отходы, можно сконструировать таким образом, что любая неопределенность в отношении влияния объединения различных процессов в ближней зоне и поведения различных компонентов системы в течение длительного времени будет компенсироваться их высокой способностью изолировать наиболее опасные радионуклиды.

Сохраняется необходимость в проведении глубинных исследований *in situ*, например, для уточнения некоторых процессов в ближней зоне, а также для количественного определения влияния некоторых параметров. Все это поможет суммировать влияние различных процессов в ближней зоне при оценке эксплуатационных характеристик системы захоронения отходов в целом. Крупные проекты, осуществляемые в ряде стран, помогут лучше понять явления, происходящие в ближней зоне, и будут способствовать распространению этих спе-

\* Более подробную техническую информацию можно найти в проекте технического отчета МАГАТЭ за июнь 1984 г. „Глубинное подземное захоронение радиоактивных отходов — воздействие на „ближнюю зону”, а также в проекте технического документа МАГАТЭ (октябрь 1983 г.) „Тепловое воздействие высокоактивных отходов на эксплуатационные характеристики компонентов глубинных подземных хранилищ в геологических формациях”.

### Явление в „ближней зоне” — определяющие условия

При оценке системы захоронения радиоактивных отходов, содержащих долгоживущие изотопы, в геологические формации необходимо знать долгосрочное поведение различных отходов. Совершенно очевидно, что наиболее важными характеристиками системы захоронения радиоактивных отходов являются те, что влияют на ее общие эксплуатационные характеристики, в частности, с точки зрения безопасности.

Для облегчения оценки эксплуатационных характеристик подземных хранилищ происходящие в них процессы делят на те, что происходят в ближней зоне, и те, что происходят в дальней зоне. Это условное разделение, т.к. между этими зонами не существует четко определенных физических границ. В данной статье обсуждаются процессы, происходящие в ближней зоне захоронения в различных геологических формациях, с использованием различных концепций захоронения отходов. Ближняя зона — это „хранилище, вырытое открытым способом, содержащее упаковки радиоактивных отходов, материалы засыпки или изолирующие материалы, а также те части окружающей породы, свойства которых были изменены или могут измениться в результате строительства подземного хранилища или под воздействием его содержимого”.

Каждая конкретная система захоронения радиоактивных отходов имеет характерное для нее количество фактически находящихся в ближней зоне компонентов с определенными свойствами, которые зависят от свойств окружающей породы и отходов, а также от инженерных аспектов конструкции хранилища. Большинство рассмотренных в статье явлений в ближней зоне связано с захоронением высокоактивных остеклованных отходов и отработавшего топлива, однако, там, где это было целесообразно, рассматривалось и воздействие, характерное для других видов радиоактивных отходов.

### Компоненты

Компоненты ближней зоны можно разбить на следующие группы: упаковки радиоактивных отходов, само хранилище и окружающая порода.

Упаковки отходов включают в себя отвержденные отходы, контейнеры и любые другие дополнительные барьеры при условии, что они являются составной частью упаковки.

Хранилище — это подземная установка, в которой размещаются упаковки с радиоактивными отходами. К нему относятся любые инженерные барьеры, отделяющие упаковку от окружающей породы, а также конструкционные материалы, как, например, материалы для отделки туннелей и скважин, а также материалы, используемые для засыпки и изоляции.

Окружающая порода, входящая в состав ближней зоны, это та часть среды захоронения отходов, физические свойства и химические условия которой в значительной степени изменяются в результате строительства хранилища. Фактическая протяженность этой измененной зоны будет зависеть от типа отходов, конструкции хранилища и структуры окружающей породы, однако в любом случае она не превысит нескольких десятков метров.

Ближняя зона окружена той частью породы, свойства которой лишь незначительно изменяются под воздействием хранилища; она также окружена и другими геологическими материалами, которые могут располагаться между окружающей породой и поверхностью земли. Геологическая среда, окружающая ближ-

нюю зону (т.е. дальняя зона), не рассматривается в данной статье. Однако она находится в тесном взаимодействии с ближней зоной, т.к. процессы, протекающие в ближней зоне, определяют основные условия переноса радионуклидов в геосферу. И наоборот, миграционный потенциал дальней зоны определяет количество и характер барьеров, устанавливаемых в ближней зоне.

К породам, которые в настоящее время рассматриваются в качестве потенциальных формаций для захоронения радиоактивных отходов, содержащих долгоживущие изотопы, относятся каменная соль, гранит и аналогичные кристаллические горные породы, глинистые формации, туф и базальт.

специальных знаний. Для разработки конкретных систем захоронения отходов, в частности, высокоактивных отходов, содержащих долгоживущие изотопы, необходимо провести сложные и длительные исследования на конкретных площадках.

В общем, рост знаний и совершенствование технологий повысят безопасность захоронения радиоактивных отходов, а экспериментальные данные позволят осуществлять проверку моделей, которые очень часто основываются на лабораторных экспериментах и теоретических расчетах.

### Коррозия упаковок с радиоактивными отходами

Подвижность радионуклидов, которая, как считают, зависит от выщелачивания подземными водами, невозможна до тех пор, пока упаковки отходов сохраняют свою целостность. Упаковки отходов состоят из отвержденных отходов, контейнера и, в случае необходимости, из других барьеров, как, например, второго внешнего контейнера, абсорбирующих материалов, химических связующих веществ, при условии, что они являются составной частью упаковки отходов. Можно спроектировать упаковки, которые будут сохраняться в течение почти любого периода времени. Предлагались конструкции упаковок, рассчитанные на эксплуатацию в течение 100 000 лет, однако, ожидается, что срок службы большинства упаковок радиоактивных отходов будет значительно короче.

Для изготовления упаковок можно использовать различные виды материалов. Некоторые концепции основываются на использовании материалов, устойчивых к термодинамическим воздействиям в среде хранилища. Другие материалы, хотя сами и не являются устойчивыми, образуют защитное покрытие, которое резко замедляет распространение коррозии. И, наконец, можно использовать более толстые слои материалов, скорость распространения коррозии в которых известна. Выбор упаковок для конкретных хранилищ будет зависеть от целого ряда факторов. К их числу относятся регламентирующие требования, изоляционные возможности других барьеров и экономические факторы.

### Выщелачивание подземными водами

В результате нарушения герметичности упаковок радиоактивные отходы в конечном счете вступят в контакт с водой или соляным раствором. Реакция матрицы отходов с водой приведет к некоторому растворению радионуклидов. Скорость реакции будет зависеть от формы и состава отходов, соотношения объема воды и площади вступающей в реакцию поверхности, фактического потока воды, протекающего по поверхности отходов, от температуры и некоторых других факторов, таких как, например, радиолиз.

Состав воды, вступающей в реакцию с отходами, зависит от состава вод в порах и трещинах окружающей породы. Ее состав может быть изменен веществами, содержащимися в буферных материалах и материалах засыпки, а также в материалах упаковок с радиоактивными отходами. Поток воды, омывающий упаковку, в большой степени определяется движением подземных вод в дальней зоне, от которого зависит общее количество воды, достигающей хранилища. Скорость потока можно еще больше уменьшить, поместив вокруг отходов материалы с низкой проницаемостью. Такие дополнительные барьеры могут уменьшить потоки воды до очень малых объемов и существенно ослабить выщелачивание многих радионуклидов.

### Радиационные эффекты

В результате воздействия излучения могут произойти три основных вида изменения среды ближней зоны: изменение формы отходов и любого буферного материала, изменение состава любой жидкости, омывающей отходы, и изменение окружающей породы. Благодаря защитным свойствам твердого вещества гамма-излучение будет полностью поглощено на расстоянии около одного метра от контейнеров с отходами. Бета- и альфа-излучения, проникающая способность которых значительно ниже, будут поглощены еще меньшим объемом материала. Однако, в результате радиолиза могут образоваться едкие вещества, которые ускорят коррозию контейнеров и усилят выщелачивание отходов. Как было установлено, другие радиационные эффекты, как, например, аккумулялирование энергии и изменения физических свойств породы и искусственных материалов, не имеют значения с точки зрения безопасности захоронения отходов.

### Тепловые эффекты

Энергия излучения, поглощенная веществом, превращается в тепло. Больше всего тепла генерируется в отработавшем топливе и высокоактивных отходах, однако, некоторое количество тепла излучают и другие виды радиоактивных отходов. В подземном хранилище поток тепла, излучаемого отходами, будет двигаться через контейнер и буферные

Во время проведения в 1977–1980 гг. серии экспериментов на шахте „Стрипа“ в центральной Швеции ученые провели оценку характеристик глубокого подземного захоронения ядерных отходов в крепкой кристаллической породе. На верхнем рисунке показано проведение ультразвуковых измерений во время полномасштабного эксперимента по нагреванию. На нижнем рисунке — эксперимент в области макропроницаемости, во время которого давление воды измерялось примерно в ста секциях и пятнадцати скважинах. (Источник: „SKBF KBS“, Стокгольм).



материалы к окружающей породе, повышая таким образом температуру всех компонентов ближней зоны и влияя на их физико-химические свойства. Фактическое распределение температуры в подземном хранилище будет зависеть от многих факторов, в том числе:

- Тип и возраст отходов
- Размеры и расположение контейнеров с отходами
- Объем и свойства буферных материалов и материалов засыпки
- Конструкция хранилища
- Тип окружающей породы

Пиковые температуры возникнут в хранилище через несколько десятилетий после помещения в него отходов. Были разработаны и проверены высоконадежные компьютерные программы, с помощью которых можно предсказать распределение температуры в хранилище практически на любое время.

Изучалось и продолжает изучаться влияние повышенных температур на различные формы радиоактивных отходов, на буферные материалы и засыпку, а также на окружающую породу. Возможное изменение движения подземных вод является одним из результатов теплового воздействия, имеющего особое значение для подземных хранилищ, которые расположены в граните или аналогичной кристаллической горной породе. Если по-

рода трещиновата и в трещинах имеется вода, что практически неизбежно для такой породы, учитывая размеры подземного хранилища, то в результате нагрева вязкость и плотность воды могут уменьшиться, а проницаемость некоторых трещин возрасти, что вызовет движение воды или даже образование конвекционных пор.

Цель исследований теплового воздействия заключается в разработке тепловых критериев для различных компонентов подземных хранилищ. Соблюдение тепловых критериев должно гарантировать отсутствие дополнительного воздействия, ослабляющего изоляционные способности системы захоронения радиоактивных отходов. В настоящее время наиболее строгие температурные ограничения касаются глинистых материалов, которые присутствуют в окружающей породе или в буферных материалах и засыпке. Считается разумным поддерживать температуру глинистых материалов на уровне ниже 100 °С. В каменной соли допускаются несколько более высокие температуры; в сочетании с более высокой теплопроводностью соли это означает, что хранилище, расположенное в соляной формации, может нести значительно более высокую тепловую нагрузку.

#### Термомеханические эффекты

Нагрев окружающей породы приведет к тепловому расширению и к результирующим напряжениям

ниям как в ближней, так и дальней зонах. В районе расположения подземного хранилища, строительство которого будет вестись открытым способом, первоначальные пластовые и, возможно, тектонические напряжения породы, в силу появления котлованов, могут локально изменяться. К воздействию этого относительно сложного поля напряжений прибавляется эффект тепловых напряжений. Имеется большое количество данных о термомеханических видах воздействия на соляную породу. Данные расчетов и наблюдений очень хорошо согласуются. В твердых породах, подобных граниту, деформации гасятся различными трещинами, которые практически невозможно достаточно хорошо смоделировать. В результате существует некоторое расхождение между теоретическими и экспериментальными данными.

О механическом поведении глинистых пород на глубине расположения подземных хранилищ имеется мало данных. Еще меньше известно об их термомеханическом поведении, т.к. до настоящего времени не проводилось никаких глубинных испытаний *in situ*. Аналогичная ситуация сложилась в отношении других подходящих для захоронения твердых пород. Маловероятно, что в результате термомеханического воздействия возникнут какие-либо особенные трудности; однако, для оптимизации конструкций подземного хранилища необходимо иметь данные о таком воздействии.

### Химические и минералогические изменения

Строительство подземных хранилищ открытым способом, установка контейнеров с радиоактивными отходами и размещение других материалов нарушают естественное равновесие между окружающей породой и водой в трещинах. В результате экскавационных работ в породу попадает кислород, что приводит к изменению напряжений и гидравлических градиентов на месте строительства. Все эти изменения потенциально могут привести к изменению минералогии твердых пород и химии подземных вод. Возможность химических и минералогических изменений увеличивается за счет повышения температуры, вызванного радиоактивными отходами. Однако, если при проектировании подземного хранилища использовались надежные тепловые критерии, то такие изменения должны быть незначительными и ограниченными небольшим объемом материала.

### Подземные воды

В силу того, что вода является основной средой переноса любых радионуклидов из контейнеров с радиоактивными отходами, то любые изменения в движении подземных вод могут представлять интерес.

На изменение движения подземных вод в ближней зоне могут повлиять четыре основных эффекта:

- Создание барьеров с низкой проницаемостью

- Дренажный эффект подземных экскавационных работ
- Изменения физических свойств твердой породы
- Нагрев за счет тепла, выделяемого радиоактивными отходами

Каждый вид приемлемых для захоронений пород обладает различным потенциалом миграции воды в ближней зоне. Как правило, для соли характерна высокая степень водонепроницаемости, и в ней отсутствует циркулирующая вода. В зоне захоронения отходов вода будет присутствовать лишь в виде небольших включений соляного раствора. Как правило, общее содержание воды составляет порядка 1–2% в пластовом месторождении соли и значительно меньше 1% в диapiческой соли. Миграция включений соляного раствора в сторону источников тепла является основным эффектом в ближней зоне соляной породы. Хотя это явление может значительно повлиять на химические условия, существующие вокруг отходов, и на коррозию контейнеров, объемы соляного раствора слишком незначительны, чтобы вызвать сильную миграцию радионуклидов.

На циркуляцию подземных вод в граните и аналогичных кристаллических горных породах влияет количество, характеристики и взаимосвязь трещин, а также региональный гидравлический градиент. Масса твердой породы, которая подходит для захоронения радиоактивных отходов, должна обладать очень низкой гидравлической проницаемостью, т.е. в ней должно быть очень мало трещин, пропускающих воду, так как трещины должны быть закрыты в результате давления вышележащих пород или образования вторичных минералов или в результате совместного действия этих двух процессов. Экскавационные работы по строительству подземного хранилища в такой геологической среде изменят поток подземных вод еще до размещения радиоактивных отходов в хранилище. Это произойдет в результате дренажного эффекта экскавационных работ, которые при атмосферном давлении сыграют роль карстового провала, а также в результате изменений проницаемости, которые могут быть вызваны изменением поля напряжений в трещинах, расположенных около отверстий.

После размещения отходов в хранилище и его засыпки в результате термомеханического воздействия и наличия буферных материалов и материалов засыпки может произойти дальнейшее изменение гидрологии ближней зоны. Из этого можно сделать вывод, что гидрогеологическое моделирование подземных хранилищ в твердой породе является сложной проблемой. Неопределенности в результатах моделирования могут компенсироваться большими возможностями дальнейшей зоны ограничивать миграцию радионуклидов или созданием в хранилище инженерных барьеров.

Глинистые породы обычно обладают очень низкой проницаемостью. В пластичной глине вода



**Изоляция:** формации туфа на испытательном полигоне в Неваде относятся к числу областей, которые исследуются Соединенными Штатами Америки в качестве потенциальных площадок для размещения геологических хранилищ высокоактивных отходов. Туф — это порода, образованная отвержденным и спеченным вулканическим пеплом, отложение которого происходило миллионы лет назад в виде отдельных пластов в результате извержения вулканов. (Источник: Атомный промышленный форум).

движется через поры, а в жесткой глине и в сланцах возможно движение воды по трещинам. Подходящей для захоронения отходов может считаться любая глинистая формация, которая не будет пересекаться водопроницаемыми трещинами. После размещения радиоактивных отходов, засыпки и запечатывания подземного хранилища условия в ближней зоне будут зависеть от конструкции хранилища.

Например, в подземном хранилище, конструкция которого основывается на сети скважин, пробуренных с поверхности, все скважины будут изолированы друг от друга, поэтому контейнеры будут находиться в более или менее прямом контакте с глиной. Если хранилище располагается в шахте, контейнеры с радиоактивными отходами могут размещаться в скважинах, пробуренных из штреков, или в самих штреках. В любом из двух последних случаев штреки будут засыпаться материалом, обладающим гидравлическими свойствами, которые, вероятно, будут отличаться от свойств ненарушенной глинистой породы.

В результате гидрогеология ближней зоны будет значительно отличаться от исходных условий, существовавших в формации. Однако, если соединительные каналы между хранилищем и поверхностью будут запечатаны, а новые проходы для подземных вод в результате последующих событий не образуются, то изменения в движении подземных вод в ближней зоне будут локальными и недолговременными, поэтому они не окажут большого влияния на общие эксплуатационные характеристики системы захоронения радиоактивных отходов.

Предполагается, что размещение радиоактивных отходов в подземных хранилищах, расположенных в туфе в ненасыщенной зоне, окажет незначительное воздействие на движение подземных вод. Тепловое поле в районе захоронения радиоактивных отходов будет отталкивать воду и уменьшит поток, омывающий контейнеры.

Воздействие на подземные воды в случае размещения хранилища в базальте будет аналогично в случае размещения подземного хранилища в granite.

**Перенос радионуклидов в дальнюю зону**

Все вышеописанные явления в ближней зоне нельзя рассматривать изолированно, наоборот, цель анализа должна заключаться в их сочетании и проведении реалистичной оценки возможности переноса радионуклидов в дальнюю зону.

Для подземных хранилищ, расположенных в граните или аналогичных кристаллических горных породах, утечка и перенос радионуклидов в основном будет определяться скоростью движения воды в трещинах. Минералы, содержащие двухвалентное железо, влияют на окислительно-восстановительный потенциал воды и могут ограничить и снизить растворимость многих актинидов до очень малых значений. Радионуклиды также могут диффундировать в основную массу породы и собираться на поверхности пор. В результате радионуклиды не будут уноситься с водой, проникающей через трещины.

Для подземных хранилищ, расположенных в соляных формациях, перенос радионуклидов в дальнюю зону возможен только в случае поступления в ближнюю зону дополнительных потоков жидкости из удаленных районов. В случае затопления подземного хранилища (соответствующая конструкция хранилища может сделать вероятность такого события крайне незначительной) перенос радионуклидов в дальнюю зону в значительной степени будет зависеть от схемы расположения хранилища.

Для хранилищ, расположенных в глинистых формациях, миграция радионуклидов будет регулироваться степенью диффузии, если только не произойдет никаких аномальных явлений и в формациях не образуются удобные для воды проходы. Для глинистой формации определенных размеров и с характерными гидравлическими свойствами можно показать, что радиоактивность сорбируемых радионуклидов упадет до незначительных уровней уже на расстоянии всего в несколько метров от контейнеров с радиоактивными отходами. С другой стороны, несорбируемые радионуклиды, как, например, йод-129, могут мигрировать в дальнюю зону и частично выходить за пределы формации, в которой расположены контейнеры с радиоактивными отходами.

Для подземных хранилищ, построенных в туфе, миграция радионуклидов через ближнюю зону будет зависеть, как и в других видах пород, от подвиж-

ности радионуклидов и величины потока жидкости. Замедление сорбированных радионуклидов будет в основном происходить за счет реакций с цеолитами, которые являются вторичными минералами, образовавшимися в результате изменений золы. Эффективность туфа в качестве геохимического барьера в значительной степени будет зависеть от содержания цеолитов. Следовательно, для оценки потенциального переноса радионуклидов в определенной формации туфа потребуются конкретные данные о движении жидкости и о минералогическом составе породы.

Если подземное хранилище расположено в базальте, то возникнет ситуация в какой-то степени аналогичная той, что характерна для случая размещения хранилища в граните, т.к. перенос радионуклидов будет происходить благодаря прохождению воды через трещины. Аналогичные неопределенности возникнут в отношении связи термомеханического воздействия с проницаемостью трещин и движением подземных вод. Неопределенности можно уменьшить с помощью конкретных данных о месте захоронения и создания эффективных инженерных барьеров.

**Проводимые в настоящее время и планируемые исследования**

Ниже перечислены виды деятельности, которая осуществляется в настоящее время или планируется на будущее и которая может внести свой вклад в улучшение понимания явлений в ближней зоне:

- Исследования движения подземных вод в различных геологических формациях
- Исследования миграции радионуклидов в различных породах и в различных гидрогеологических условиях
- Проверка моделей, в частности, идентификация, количественное определение и проверка некоторых параметров
- Исследование различных буферных материалов, включая испытания буферной массы, и всеобъемлющий анализ результатов
- Эксперименты в области теплопереноса в различных потенциальных породах, приемлемых для размещения подземных хранилищ
- Изучение движений породы, вызванных нагревом
- Усовершенствование методов оценки поведения породы, включая воздействие напряжений в породе и образование трещин
- Изучение химического и физико-химического поведения некоторых важных радионуклидов, например, механизмов растворения, выщелачивания и миграции актинидов