

# Оценка радиологической безопасности хранилищ отходов



## Обзор процедур, методов, проблем

Гордон Линсли

В последние годы были разработаны методы анализа безопасности хранилищ отходов в связи с возрастающими во всем мире усилиями найти оптимальные пути захоронения радиоактивных отходов. Результаты анализа безопасности должны учитываться при конструировании системы захоронения в целях обеспечения соответствия радиологическим критериям, установленным национальными органами.

В данной статье дан краткий обзор основных особенностей процедур анализа безопасности, указаны проблемы в этой области и показаны результаты некоторых анализов безопасности, проведенных разными методами\*.

### Радиологические нормы

Большинство используемых норм радиологической защиты основаны на рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Они включают систему ограничения доз, базирующуюся на трех основных принципах: обоснование практического метода, оптимизация защиты и ограничение индивидуальных доз облучения.

Система ограничения доз разработана для уровней излучения от реальных источников, например, при

производственных условиях или при регулируемом сбросе эфлюэнтв в окружающую среду.

Однако в случае захоронения радиоактивных отходов нет основания считать, что произойдет облучение человека, поскольку хранилища конструируются с расчетом обеспечить изоляцию отходов в течение очень длительных периодов времени. Для анализа безопасности разрабатываются различные сценарии, предусматривающие возможность утечки радионуклидов в окружающую среду и облучение людей, например, в результате миграции радиоактивности в связи с утечкой из хранилища или случайного проникновения воды в хранилище.

Предусматриваемые в конструкции хранилища меры предосторожности делают незначительной вероятность утечки, ведущей к облучению людей. Очень длительные периоды времени, на которые должны рассчитываться хранилища, делают необходимой разработку норм защиты будущих поколений людей и уменьшение неопределенностей прогнозирования.

С учетом этих аспектов в настоящее время разрабатываются радиологические критерии специально для захоронения твердых отходов. Выявляется тенденция к ограничению риска (так же, как и к ограничению дозы). Риск рассчитывается как вероятность того, что получаемая доза излучения умножается в связи с возможностью усиления вредного влияния на здоровье. В перспективе возможны такие события, которые окажут большое радиологическое воздействие (при малой вероятности их возникновения), например, повреждение хранилища метеоритами.

Такие критерии более точно отражают характер радиологической опасности при подземном захоро-

Г-н Линсли — сотрудник Отдела ядерного топливного цикла МАГАТЭ.

\* „Руководство по методам оценки безопасности” находится среди документов Агентства, входящих в *Серию по безопасности* и посвященных захоронению в геологических формациях, в неглубоком грунте и в море.

Фото наверху:

Важнейшие результаты в оценке безопасности хранилищ для захоронения отходов получают с помощью полевых изысканий и лабораторных испытаний. (Фото: AIF)

нении твердых отходов, но при их практическом применении могут возникнуть трудности. Это прежде всего относится к определению вероятности возникновения событий, ведущих к повышению радиации.

## Методология оценок безопасности

Большинство принципов, лежащих в основе приповерхностного захоронения, подходят для захоронения высокоактивных отходов в глубоких геологических формациях.

Для приповерхностного хранилища система захоронения представляет комбинацию следующих компонентов:

- тип отходов, форма отходов и, где это применимо, стабилизатор, контейнер, дополнительная упаковка и/или замедление миграции
- хранилище и его инженерные барьеры, включая засыпку выемок и грунтовое покрытие
- геосфера ближнего порядка (отложения, породы) на площадке хранилища
- окружающая человека среда (почва, поверхностные воды, неглубокие водоносные пласты, атмосфера, биота).

Анализ безопасности такой системы включает три основных компонента:

- идентификация явлений, могущих привести к утечке радионуклидов или повлиять на скорость таких утечек или на скорость переноса радионуклидов в окружающей среде

- определение вероятностей возникновения таких событий и количественная оценка их воздействия на систему захоронения

- расчет радиологических последствий утечек (т.е. определение индивидуальных доз и доз облучения населения и, при необходимости, оценка последующего воздействия на здоровье).

Первые два компонента относятся обычно к „анализу сценариев”, третий — к „анализу последствий”.

## Анализ сценариев

Явления, относящиеся к анализу сценариев для приповерхностных хранилищ, включают деятельность человека (например, строительство, сельское хозяйство, бурение на минеральные ресурсы), природные процессы и явления (эрозия, наводнение, движение грунтовых вод) и процессы, происходящие в отходах и хранилищах (образование газа, механическое нарушение почвы или пород на площадке хранилища).

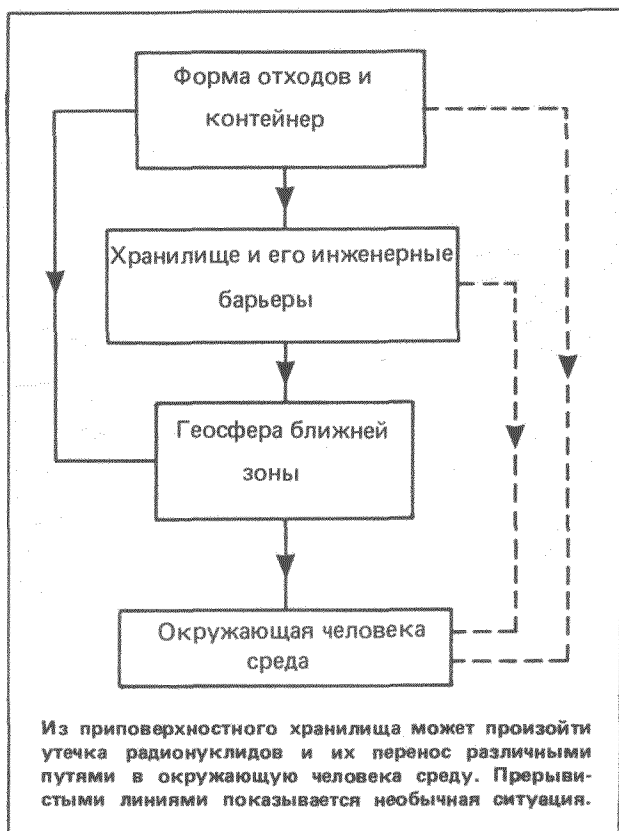
Результаты анализа сценариев предполагают определение сценариев (т.е. параметров утечки и переноса, необходимых для анализа последствий) и оценки вероятностей возникновения таких сценариев во времени. Когда анализы сценариев проводятся для определенных систем и площадок захоронения, можно не рассматривать подробно некоторые связанные с ними явления либо потому, что они очень маловероятны, либо потому, что их воздействие незначительно.

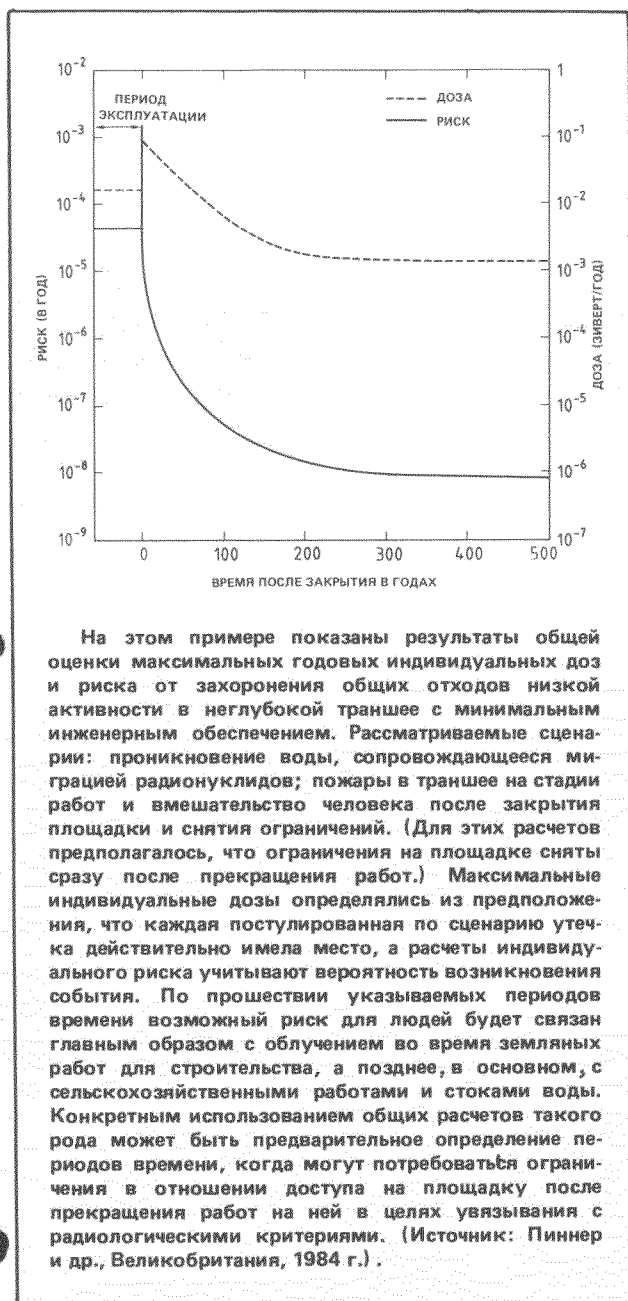
## Анализ последствий

Когда определены сценарии утечек из хранилища, должны быть оценены их последствия для человека. Определение последствий требует создания системы расчетов, дающей возможность моделировать перенос радионуклидов к человеку через окружающую среду и оценить дозу излучения.

В качестве первого шага составляется прогноз уровней утечек радионуклидов из хранилища с последующими оценками концентраций радионуклидов в различных составных частях окружающей среды. Второй шаг заключается в прогнозировании скоростей переноса освободившихся радионуклидов от различных составляющих окружающей среды к людям. Третий шаг — прогнозирование взаимодействия радионуклидов с людьми, сопровождаемое расчетом доз для отдельных лиц и для населения по каждому сценарию, определенному анализом сценариев.

Анализ последствий включает слежение за движением освобожденных радионуклидов к человеку по различным путям: потребление воды и жидких продуктов, купание и плавание, и косвенно через растения и домашних животных (в растения радионуклиды могут попасть благодаря ирригации или из верхнего слоя почвы).





Результаты общего анализа безопасности могут быть выражены различным способом в зависимости от выбранных радиологических критериев, например, в терминах вероятностей, в индивидуальных дозах, в индивидуальных рисках и в коллективных дозах и рисках (см. текст в рамке о результатах общего анализа).

## Общие и специфические для каждой площадки исследования

Следует делать различие между этими исследованиями. Общее исследование проводится обычно на ранней стадии планирования, когда площадка может

быть еще не установлена, и когда имеется мало необходимой для оценки информации. Предположения должны обобщаться, а значения параметров для моделирования могут быть получены только из научной литературы; их выбор требует мнения экспертов. Предположения и данные, необходимые для таких исследований, оказывают сдерживающее влияние, позволяющее избежать недооценки отсутствия нужной информации.

Общие исследования ценны тем, что они фокусируют внимание на наиболее важных с радиологической точки зрения аспектах и, тем самым, позволяют определить приоритеты в исследованиях. В частности, они определяют сценарии, пути переноса радионуклидов к человеку и те радионуклиды, которые будут наиболее опасны. Чем больше информации о конструкции хранилища отходов и о предполагаемом месте его размещения, тем реальнее и надежнее оценки.

Прежде чем лицензировать хранилище для захоронения отходов, необходимо провести исследование площадки для него. В этом исследовании используется вся имеющаяся о хранилище, месте его нахождения и окружающей среде информация.

В некоторых странах наблюдается в последние годы прогресс в составлении оценок безопасности от предварительных общих исследований до более реалистичных оценок на основе данных об определенных хранилищах и окружающей их среде. (См. прилагаемый текст в рамке 2, который заимствован из проекта Nagra-Project Gewähr, и показывает прогресс в отношении подземного захоронения высокоактивных отходов.)

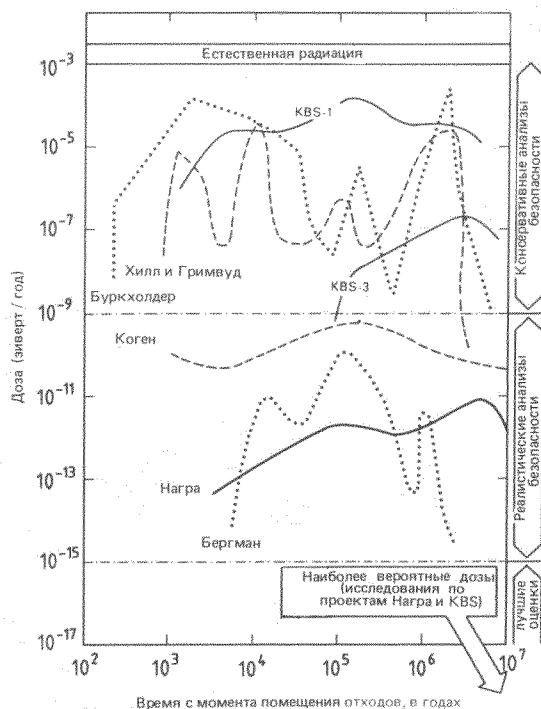
## Достоверность прогнозов на моделях

Поскольку оценка безопасности хранилищ радиоактивных отходов в большой степени зависит от использования математических моделей, необходимо знать, в какой мере можно полагаться на прогнозирование с их помощью.

Все модели окружающей среды неизбежно содержат неопределенность, связанную с их прогнозированием, поскольку они являются упрощенным представлением о сложных системах окружающей среды. Проблема неопределенности модели чрезвычайно тяжела для решения в связи с оценками безопасности хранилищ. Это связано с трудностями в получении необходимых экспериментальных результатов и измерений параметров окружающей среды, особенно когда речь идет о применении моделей к длительным периодам времени. Однако существует много различных подходов, использование которых может укрепить доверие составителей оценок безопасности к результатам применения моделей.

● В идеальном случае модель проверяется путем сравнения получаемых с ее помощью прогнозов с соответствующими наблюдениями. Полная проверка всех моделей, используемых в анализе безопасности хранилищ отходов, невозможна. Можно осуществить

## Прогресс в оценках безопасности



Здесь показаны результаты (ежегодно рассчитываемые дозы) различных исследований по безопасности окончательного захоронения высокоактивных отходов (ВАО) и элементов отработавшего топлива. Хотя эти исследования касаются различных видов отходов, их содержания, хранилищ и геологических сред, наблюдается общая тенденция к меньшим прогнозируемым индивидуальным дозам, поскольку в оценки вносятся больше реалистичности. Швецией подготовлены, по всей видимости, самые широкие анализы безопасности на сегодняшний день (KBS-1 в 1978 г. для остеклованных отходов низкой активности и KBS-3 в 1983 г. для регенерированного отработавшего топлива). Данные для исследований по захоронению в граните, а также геологические, гидрогеологические и геохимические данные взяты из результатов конкретных полевых изысканий. Исследования по KBS были подготовлены и одобрены правительством Швеции как демонстрация обращения с отходами, и они явились основой для принятия решения о выдаче лицензий на шведские атомные электростанции. Исследования в Швейцарии имеют аналогичную цель. Некоторые из ранее выполненных работ по руководству в этой области внесли значительный вклад в понимание поведения хранилищ и в разработку методологии проведения анализов. Расчеты модели Буркхолдера (США, 1976 г.) носили характер общих исследований для ВАО в пористых почвах. Расчеты Хилла и Гримвуда (Великобритания, 1978 г.) явились общими исследованиями для остеклованных ВАО в кристаллической породе. Ценность этих исследований заключается прежде всего в анализах чувствительности для оценки относительного значения параметров индивидуальных барьеров и в критериях для выбора мест расположения хранилищ. Исследования Бергмана (США, 1978 г.) касаются окончательного захоронения ВАО в описанных в общем виде соляных и сланцевых формациях. Выбор для захоронения соляных или ангидридных формаций приводит обычно к непредсказуемым дозам радиации на путях миграции радионуклидов. Из-за отсутствия воды в этих сухих породах полностью отсутствуют и механизмы „обычных“ утечек. Значительные дозы излучения возникают только по сценариям предполагаемых аварий, таких как проникновение воды через разломы или антропогенное вскрытие хранилищ. (Источник: проект Nagra-Project Gewähr, Швейцария, 1985 г.)

частичную проверку субмоделей с помощью лабораторных и полевых экспериментальных данных.

- В некоторых случаях менее надежную проверку можно провести путем сравнений с природными системами, содержащими радионуклиды естественно-го происхождения, например, Окло (Габон) и Морро де Ферро (Бразилия). Преимущество таких сравнений в том, что они реально свидетельствуют о процессах переноса радионуклидов на протяжении очень длительных периодов времени, которые должны учитываться при подземном захоронении отходов. Но такая проверка затрудняется тем, что еще недостаточно хорошо поняты экспериментальные условия, которые могут не подходить к среде, окружающей хранилище.

- Методом, позволяющим „обойти“ проблему неопределенности модели, может служить применение моделей „наихудшего случая“. Этот подход не определяет надежность прогнозирования, но вселяет уверенность в малой вероятности заниженных оценок. Он может использоваться для показа того, что дозы — ниже лимитов, как, например, в общих исследованиях, упоминавшихся ранее.

- Сравнения моделей играют большую роль в оценке безопасности. Они позволяют проверять числовую точность кодов моделирования, кроме того, сравнивать различные подходы к моделированию в прогнозировании переноса радионуклидов при определенных обстоятельствах. Это часто приводит к появлению ценных идей. В настоящее время проводятся различные международные оценки моделей, связанных с подземным захоронением отходов: поддерживаемые Швецией INTRACOIN (геосферические модели дальнего переноса радионуклидов), HYDRACOIN (модели движения грунтовых вод) и BIOMOVE (биосферические модели переноса радионуклидов).

- Статистические методы можно использовать для оценки влияния неопределенности в величинах входных параметров отдельной модели на неопределенность прогнозов на всех моделях. Совершенно очевидно, однако, что такой вид анализа неопределенности не определяет действенность самой модели.

Нелегко доказать надежность прогнозов в отношении переноса радионуклидов из подземных хранилищ, и зачастую это делается опосредствованно. Достоверность прогнозов на моделях можно повысить путем совместного использования различных методов, таких как сравнение моделей с целью определения их действенности и анализ неопределенности параметров.

## Исследования продолжаются

В целом результаты исследований по безопасности показывают, что радиологическое воздействие хранилищ отходов незначительно, и можно достичь его соответствия нормам радиологической защиты. Однако имеются значительные неопределенности в оценках, связанные, главным образом, с длительными периодами времени. Многие из проводимых в настоящее время исследований в этой области имеют целью уменьшение неопределенностей.

Интересно отметить, что прогресс в данной области достигается в результате проводимых на международном уровне работ по сопоставлению и проверке действенности моделей, а также дискуссий на международных форумах.