

# ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОЦЕНКА ПОДХОДОВ

КЕН БРЭГГ И ФЕРРУЧЧИО ДЖЕРА

**Б**езопасное обращение с радиоактивными отходами, образующимися на всех стадиях ядерного топливного цикла, представляет значительную техническую, экономическую и социальную проблему. Помимо этого, необходимо также распоряжаться отходами, являющимися результатом использования ядерных материалов в медицине, научных исследованиях и промышленности. В некоторых странах вопрос о том, как осуществляется обращение с такими отходами, является предметом дискуссий, что может неблагоприятно сказаться на применении в будущем ядерных технологий. В данной статье рассматривается проблема захоронения твердых радиоактивных отходов, причем особое внимание уделяется вопросам безопасности.

Основное различие между захоронением и другими операциями по обращению с отходами, такими как хранение или кондиционирование, состоит в том, что целью захоронения является окончательное решение проблемы отходов, при условии обеспечения защиты населения и окружающей среды от возможного ущерба. При этом извлечение захороненных отходов не предполагается, однако в отношении твердых отходов, захороненных в специально оборудованном месте, это обычно возможно, если в будущем возникнет такая необходимость.

За последние десятилетия было предложено несколько вариантов захоронения твердых радиоактивных отходов. К ним относятся приповерхностное захоронение, глубокое геологическое захоронение, а также захоронение на дне моря или в придонных слоях.

Согласно Лондонской конвенции 1972 г. в настоящее время запрещается захоронение твер-

дых радиоактивных отходов в море. Таким образом, остаются только два общих варианта захоронения.

Ключевое решение, которое при обращении с отходами необходимо принять как можно раньше, касается того, какие виды отходов пригодны для захоронения в хранилищах различных типов, предусмотренных национальными планами по захоронению отходов. Логически это должно привести к разделению отходов на различные категории на основании предусмотренных методов захоронения.

Отличительной чертой большинства типов отходов является продолжительность жизни радиоактивных компонентов. Таким образом, долгоживущие отходы, на распад которых до практически безвредных уровней требуются десятки или сотни тысяч лет, должны захораниваться в геологических хранилищах, в то время как захоронение короткоживущих отходов возможно в приповерхностных сооружениях.

Независимо от долговечности содержащейся в отходах радиоактивности, хранилища проектируются для эксплуатации на основе сочетания принципов изоляции и защитной оболочки. Защитная оболочка может включать различные физические барьеры (форма и упаковка отходов, инженерно-технические компоненты, природная среда и т. п.), которые, как ожидается, обеспечат защиту отходов в начальный период. В результате постепенной деградации этих барьеров могут произойти медленное выделение и перенос грунтовыми водами остающейся части общего количества радиоактивных веществ, изначально содержащихся в отходах. Обычно это считается нормальной эволюцией системы захоронения. Для того

чтобы приступить к созданию сооружения для захоронения отходов, необходимо также располагать знаниями о поведении компонентов системы и о том, каким образом их трансформация в будущем может воздействовать на показатели их функционирования. Такие знания приобретаются при проведении оценок безопасности, целью которых является обеспечение достаточной уверенности в том, что нормы безопасности для предложенной системы будут соблюдаться как в настоящее время, так и в будущем. Оценка безопасности в отношении захоронения радиоактивных отходов является итеративным процессом, который должен осуществляться с различной степенью детализации на критических стадиях процедуры разрешения (см. схему на стр. 56).

Общепринятая практика проведения оценок заключается в установлении взаимозависимости категорий отходов и вариантов захоронения (см. таблицу на стр. 57). Применяются также общие сценарии антропогенного вмешательства, которые, как считается, соответствуют различным типам установок для захоронения отходов (о них говорится ниже).

## ПРИПОВЕРХНОСТНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ

Приповерхностное захоронение — это способ захоронения радиоактивных отходов, содержащих короткоживущие радионуклиды в объемах, которые подвергнутся распаду до незначительных с радиологической точки зрения величин в течение нескольких десятков или сот

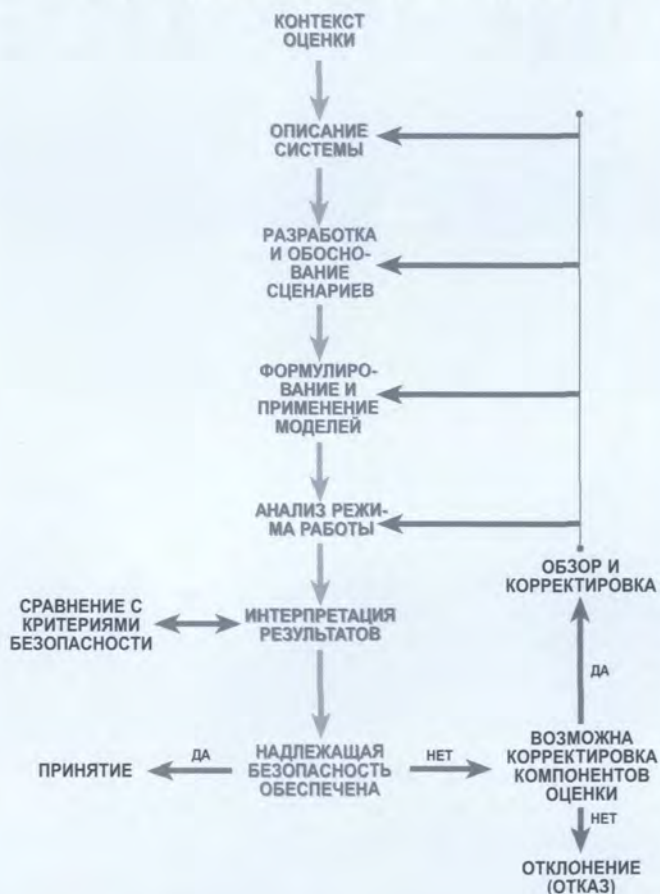
---

*Г-н Брэгг и г-н Джера — штатные сотрудники Отдела радиационной безопасности и безопасности отходов МАГАТЭ.*

лет. Отходы с приемлемо низкими концентрациями долгоживущих радионуклидов могут также захораниваться в приповерхностных хранилищах. Существуют два основных типа хранилищ: а) установки неглубокого залегания, которые состоят из единиц захоронения, расположенных над поверхностью земли (земляные валы и т. п.) или под ней (траншеи, котлованы и т. п.), и б) установки, в которых отходы размещаются на несколько большей глубине в скальных пустотах или скважинах. В первом случае толщина покрытия над отходами обычно равняется нескольким метрам, а во втором случае толщина слоя скальной породы над отходами может составлять несколько десятков метров.

Отличительной особенностью приповерхностного захоронения является требование по проведению официального контроля над площадкой хранилища в течение определенного периода времени. Логическое обоснование подобного требования состоит в том, что официальный контроль обеспечивает охрану отходов от антропогенного вмешательства или от других процессов, которые могут вызвать нарушение целостности защитных барьеров. Оценка безопасности подобных установок предполагает обычно исследование ряда различных сценариев, включая антропогенное вмешательство в ходе жилищного строительства, ведения сельского хозяйства, бурения скважин для водопотребления, а также дорожного строительства и возведения структур коммерческого назначения. Потребность в официальном контроле сохраняется все то время, пока результаты оценки безопасности показывают, что радиологические последствия в рамках различных сценариев могут превысить нормальные пределы соотношения доза/риск. С точки зрения безопасности официальный контроль снимается лишь тогда, когда оцененные воздействия сценариев, для предотвращения которых проводится официальный контроль, соответствуют требованиям безопасности.

## ПРОЦЕСС ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ



Ключевое решение, которое должно быть принято в этом отношении, касается определения разумной продолжительности периода официального контроля. Это является также одним из важнейших элементов определения критериев приемлемости отходов для размещения их в данном хранилище. В настоящее время на международном уровне существует, в общих чертах, согласие по вопросу о том, что периоды проведения контроля могут достигать нескольких сот лет. В некоторых случаях принимаемые на современном этапе решения в сфере регулирования позволяют предполагать, что потребность в официальном контроле может сохраняться значительно более длительные периоды времени. Это может породить проблемы относительно надежности обязательства, не имеющие

оговоренного срока действия, и моральной оправданности возложения на будущие поколения такого долгосрочного бремени.

Поскольку в большинстве сценариев вмешательства, за исключением бурения скважин, речь не идет о проникновении более чем на несколько метров от поверхности земли, преимуществом большей глубины изоляции могут стать менее жесткие требования в отношении официального контроля. Очевидно, что это должно быть подтверждено оценкой безопасности на основе конкретных случаев.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ

Единственным приемлемым решением для долгоживущих отходов, содержащих искусственные радионуклиды и определяемых в проекте глоссария МАГАТЭ по

## ВАРИАНТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ И ЭТАЛОННЫЕ СЦЕНАРИИ ВМЕШАТЕЛЬСТВА ЧЕЛОВЕКА

Вариант захоронения	Вид отходов	Сценарии вмешательства	Примечания
Геологическое захоронение в стабильных породах низкой проницаемости, обычно на глубине не менее 200 м	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Высокоактивные отходы</li> <li>■ Отработавшее топливо (заявленное в качестве отходов)</li> <li>■ Другие долгоживущие отходы (ПРВ обычно исключаются по практическим соображениям)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Повреждение контейнера с отходами при бурении</li> <li>■ Проникновение в хранилище при бурении (отходы не затронуты)</li> <li>■ Бурение через шлейф загрязненной воды</li> <li>■ Проникновение в хранилище при горных работах</li> </ul>	Вероятность вмешательства весьма мала. Она должна быть сведена к минимуму при выборе площадки и оценена на основе параметров конкретной площадки
Приповерхностное захоронение; хранилище в пустотах горных пород	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Короткоживущие отходы с низкими и средними уровнями радиоактивности (ОНСУР)</li> <li>■ ОНСУР, превышающие критерии приемлемости отходов для малоглубинного захоронения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Повреждение контейнера с отходами при бурении</li> <li>■ Бурение через шлейф загрязненной воды</li> <li>■ Проникновение в хранилище при горных работах</li> </ul>	Бурение рядом с хранилищем может быть частью сценария нормального развития
Более крупные установки для изоляции/скважины	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Вышедшие из употребления радиоактивные источники</li> <li>■ ОНСУР, превышающие критерии приемлемости отходов для малоглубинного захоронения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Повреждение контейнера при бурении или прохождении вблизи него</li> <li>■ Жилая застройка</li> </ul>	Вероятность вмешательства относительно низка. Должна определяться на основе параметров конкретной площадки
Приповерхностное захоронение; малоглубинное хранилище	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Короткоживущие, ОНСУР</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Строительство</li> <li>■ Жилая застройка</li> <li>■ Комбинация указанных выше сценариев</li> </ul>	По завершении официального контроля вероятность вмешательства высока
Приповерхностное захоронение больших объемов долгоживущих материалов с низкой удельной активностью	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Отходы предприятий по добыче и обогащению тория и урана</li> <li>■ Другие ПРВ</li> </ul>	Сценарии в основном аналогичны сценариям для других видов деятельности, связанных с приповерхностным малоглубинным захоронением	По завершении официального контроля вероятность вмешательства высока. Учитывая долговечность отходов, вероятность вмешательства равна единице

безопасности как радиоактивные отходы, содержащие значительные уровни радионуклидов с периодом полураспада свыше 30 лет, является геологическое захоронение в объекте, расположенном в соответствующих горных породах на глубине по меньшей мере нескольких сот метров. Примерами такого типа отходов являются отработавшее топливо и высокоактивные отходы (ВАО) от переработки топлива. Эти отходы, содержащие обычно до 99% генерируемой в рамках ядерного топливного цикла общей радиоактивности, теплотворны и характеризуются интенсивной радиоактивностью. В других видах низко- и среднеактивных отходов уровни долгоживущих радионуклидов могут быть слишком высокими для приповерхностного захоронения. Некоторые государства-члены сочли

возможным решить проблему долгоживущих отходов низкой и средней активности, размещая их в тех же геологических хранилищах, которые предназначены для захоронения отработавшего топлива и ВАО. В качестве альтернативного решения в отдельных случаях рассматривается захоронение по меньшей мере части таких отходов на глубину нескольких десятков метров от поверхности земли.

В геологических хранилищах помимо обеспечения глубокого геологического размещения обычно имеются различные в высшей степени надежные инженерно-технические барьеры. Радионуклидам потребовалось бы преодолеть большие расстояния, чтобы достичь доступной окружающей среды; таким образом, согласно оценкам, в течение многих тысячелетий не ожидается

какого-либо радиологического воздействия. Длительность периодов, подлежащих рассмотрению в процессе оценки безопасности, и большой промежуток времени, который должен пройти, прежде чем, по оценкам, возникнут радиологические последствия, порождают неопределенность в результатах оценки. Из-за этого при представлении ситуации в отношении безопасности как экспертам, так и членам общества, не являющимся специалистами в данной сфере, могут возникнуть проблемы. Многие считают, что оценки доз или риска на отдаленное будущее не заслуживают доверия, поскольку невозможно предсказать состояние биосферы и образ жизни людей в то время. Вследствие этого под сомнение ставится вся ситуация в отношении безопасности. Для того чтобы преодолеть, хотя бы

частично, трудности в сфере взаимопонимания, в настоящее время изучается ряд подходов, включая применение стандартных или стилизованных моделей биосферы, использование дополнительных индикаторов безопасности на основе потоков и концентраций природных радионуклидов, а также исследование природных аналогов в поддержку исходных положений, используемых при моделировании в процессе оценки. Не следует ожидать, что данные подходы заменят обычную аргументацию, представляемую для обоснования того, что система захоронения отходов в состоянии обеспечить приемлемую гарантию надлежащей безопасности. Скорее, они служат дополнительными доводами, ценность которых в том, что с их помощью можно различными способами аргументировать связанные с безопасностью конкретные случаи. Это само по себе считается позитивным фактором, поскольку такие доводы в отношении безопасности могут оказаться более убедительными для различных секторов общества.

### ДОЛГОЖИВУЩИЕ ОТХОДЫ И ПРВ

Существует особый класс радиоактивных отходов, содержащих лишь природные радиоактивные вещества и характеризующихся значительным объемом. Эти отходы являются долгоживущими, но обладают сравнительно малой удельной активностью. Наибольшие объемы таких отходов образуются в процессе переработки урановых руд в целях получения топлива для производства ядерной энергии. Имеются также огромные объемы других отходов с аналогичными характеристиками, которые образуются в процессе других видов промышленной деятельности, таких как добыча фосфатов для производства удобрений или добыча углеводородов. Их называют отходами ПРВ (природных радиоактивных веществ). Отходы ПРВ обычно не включаются в ядерный сектор и поэтому не подпа-

дают под контроль регулирующих органов, которые контролируют другие радиоактивные отходы, хотя хвосты, образующиеся в процессе добычи и обогащения урановой руды, в большинстве стран подпадают под действие регулирующего контроля в качестве одного из видов радиоактивных отходов. Это приводит к тому, что аналогичные виды отходов регулируются существенно различными способами.

Долговечность радионуклидов, содержащихся в хвостах, которые образуются в процессе добычи и обогащения руды, а также в других отходах ПРВ, казалось бы, указывает на необходимость значительного уровня их изоляции. Однако в некоторых странах имеются сотни миллионов тонн таких отходов, и размещение их всех в геологических хранилищах нецелесообразно. Если осуществить такое захоронение невозможно, отходы размещаются в традиционных насыпях шахтных хвостов, оснащенных надежными инженерными системами защиты. Инженерно-технические характеристики системы защиты гарантируют соответствие нормальных выбросов и получаемых доз облучения традиционным критериям доза/риск. Однако не следует ожидать, что инженерно-технические барьеры системы защиты сохраняют исходные эксплуатационные характеристики на протяжении всего периода, в течение которого отходы представляют опасность (сотни тысяч лет). Помимо этого, существует проблема неприемлемых доз, которые могут иметь место вследствие вмешательства. Как упоминалось выше, в рамках официального контроля можно обеспечить техническое обслуживание и текущий ремонт барьерных конструкций системы защиты, а также предотвратить вмешательство в течение срока их службы, но маловероятно, чтобы это можно было осуществлять все то время, которое в конечном счете обусловлено долговечностью радиологической опасности.

### НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ОТХОДОВ

За последние несколько лет МАГАТЭ осознано необходимость определения и постепенного согласования основных принципов и критериев, которые должны применяться в области захоронения радиоактивных отходов различных видов. Это не такая простая задача, как может показаться на первый взгляд. Приходится иметь дело с существенно различающимися временными рамками — от нескольких десятков до сотен тысяч лет. Для большинства людей очень сложно осознать масштабы времени, превышающие период жизни нескольких поколений. Трудно также рассчитать долгосрочные показатели функционирования инженерно-технических и природных компонентов системы захоронения, которые были бы убедительными для больших групп общества. Еще сложнее определить поведение отдельных лиц и общества в целом на протяжении таких временных отрезков.

Однако по некоторым из предложенных критериев необходимо проведение оценки обоих параметров (например, критерий риска требует оценки вероятности будущего события и его последствий). С этими значительными временными рамками связана проблема неопределенности. Нет ничего необычного в том, что даже при наилучшем на данном этапе понимании поведения инженерно-технических, геологических и биологических компонентов системы существует достигающая нескольких порядков величины неопределенность в окончательных результатах оценки эксплуатационных характеристик системы. Более того, нет также ничего необычного и в том, что на определенной стадии процесса оценки аналитики могут прийти к выводу, что дальнейшие сокращения неопределенности не представляются разумно достижимыми. Это означает, что регулирующие и другие директивные органы, воз-

## СТАТУС ТРЕБОВАНИЙ И РУКОВОДСТВ МАГАТЭ ПО БЕЗОПАСНОСТИ В ОТНОШЕНИИ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

МАГАТЭ издало ряд требований и руководств по безопасности для различных видов радиоактивных отходов и вариантов их захоронения.

■ **Приповерхностное захоронение.** Публикация *Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов* была выпущена в 1999 г. в качестве Требования по безопасности. Были изданы два Руководства по безопасности: одно в 1994 г. — *Выбор площадок для установок по приповерхностному захоронению*, а другое в 1999 г. — *Оценка безопасности приповерхностного захоронения радиоактивных отходов*.

■ **Хвосты добычи и обогащения урановых и ториевых руд; другие отходы, содержащие природные радиоактивные вещества (ПРВ).** Руководство по безопасности *Обращение с радиоактивными отходами, образующимися в процессе добычи и обогащения урановых/ториевых руд*; разработка планируется в 2001 г.

■ **Геологическое захоронение.** Одна публикация — *Геологическое захоронение радиоактивных отходов* — готовится к изданию в качестве Требования по безопасности. В стадии подготовки находится еще одна публикация — *Аспекты безопасности геологического захоронения*, — планируемая к изданию в качестве Руководства по безопасности. Руководство по безопасности — *Выбор площадок для установок по геологическому захоронению* — было издано в 1994 г.

можно, будут вынуждены принимать решения при неопределенностях, намного больших, чем те, с которыми им приходилось сталкиваться.

Другой элемент, проявившийся в прошлом, заключается в том, что нормы и требования по захоронению различных видов отходов рассматривались зачастую изолированно друг от друга. Это может привести к непоследовательности при оценке каждого их вида, что нежелательно с чисто технической точки зрения, но еще более нежелательно с точки зрения восприятия обществом.

Для решения данного вопроса МАГАТЭ осуществляет разработку общих рамок оценки приемлемости установок, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов различных видов. Осуществление любого подхода потребует, как минимум, надлежащего инженерно-технического практического опыта и снижения доз в соответствии с принципом оптимизации радиационной защиты. Однако следует учитывать практические аспекты

соблюдения устанавливаемых в конечном счете принципов и критериев. Это трудная задача, если принимать во внимание разнообразие объемов отходов, их активности и долговечности. Несмотря на эти проблемы, уже достигнут определенный прогресс в данной области, и ожидается, что в ближайшее время появятся общие рамки. Вероятно, в течение ближайших нескольких лет это найдет отражение в единых требованиях и руководствах по безопасности.

При дальнейшем проектировании и строительстве хранилищ в большинстве стран существенную роль играет степень доверия со стороны различных слоев общества. Хотя вышеупомянутые оценки безопасности по-прежнему пользуются доверием специалистов, занятых в этой области, их, безусловно, недостаточно для обеспечения уверенности у широких слоев общества. МАГАТЭ в курсе этих различий между заинтересованными сторонами и ищет пути для их ликвидации посредством привлечения к

осуществлению будущих рабочих программ лиц, культурно-социальные характеристики которых в значительной мере различаются. Наряду с упомянутой выше работой по множественным подходам к оценке безопасности установок по захоронению отходов, Агентство разработало также документ по принятию решений в сфере регулирования при наличии значительных неопределенностей, связанных с оценкой функционирования и безопасности на протяжении весьма значительных периодов времени.

В отношении выработки современных норм безопасности МАГАТЭ в рамках Программы НБРО занимается разработкой широкого круга требований и руководств по безопасности (см. статью на стр. 30). Существуют также отдельные документы в рамках этой программы, имеющие отношение к захоронению радиоактивных отходов (см. вставку на данной странице).

Очевидно, что основное внимание в начальный период уделялось разработке документов по приповерхностному захоронению. Это соответствовало пожеланиям государств-членов. Установки для приповерхностного захоронения требуются гораздо большему числу стран для радиоактивных отходов, образующихся в лечебных учреждениях и промышленности, чем для отходов, образующихся в процессе добычи и переработки урановых руд или эксплуатации АЭС. Тем не менее отмечается существенный прогресс в разработке руководящего документа в отношении отходов добычи и обогащения урана. Разворачивается также работа по составлению требований и руководства по безопасности в отношении геологического захоронения.

Таким образом, ожидается, что в течение ближайших нескольких лет появится полный комплекс современных требований и руководств по безопасности, которые вместе со вспомогательными техническими документами охватят все аспекты захоронения радиоактивных отходов. □