# ПРОБЛЕМЫ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

***Беляев А.М. (СПбГУ, Санкт-Петербург)***

Радиоактивными отходами (РАО) называются вещества в любом агрегатном состоянии, не подлежащие дальнейшему использованию, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами [5,6]. Радиоактивные отходы – побочные продукты технической деятельности, образующиеся на всех этапах атомной энергетики; а также при производстве, использовании и уничтожении ядерного оружия, при производстве и применении радиоактивных изотопов. РАО локализованы в относительно небольшом объеме, что принципиально отличает их от радиоактивных выбросов.

Радиоактивные отходы представляют собой смесь стабильных химических элементов и радиоактивных осколочных и трансурановых радионуклидов. Осколочные элементы с номерами 35-47; 55-65 являются продуктами деления ядерного топлива. В масштабах страны ежегодно только на энергетических реакторах АЭС вырабатывается 100 т осколочных элементов.

Опасность ионизирующего излучения для живых организмов заключается в том, что гамма-кванты, альфа- и бета-частицы, проходя сквозь клетки и ткани живых организмов, способны передавать им свою энергию, разрывая химические связи внутри молекул и вызывая изменения в их структуре.

Классификационные признаки РАО по времени жизни приведены в табл.1.

*Таблица 1.* Классификация РАО по времени жизни [6]

| Класс радионуклида | Период полураспада |
|---|---|
| Короткоживущие | Менее 1 года |
| Среднеживущие | 1–100 лет |
| Долгоживущие | Более 100 лет |

По агрегатному состоянию РАО подразделяются на жидкие, твердые и газообразные.

К газообразным РАО (ГРО) относят возникающие при производственных процессах и не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли с объемной активностью, превышающей допустимую объемную активность [5]. Это радон и пыль в горных выработках, радиоактивные газы, образованные при работе АЭС: $^{3}H$, $^{85}Kr$, $^{14}C$ и т. п.

К жидким РАО (ЖРО) относят не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, удельная активность которых более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства при поступлении с водой [5,6].

Из всех видов РАО наиболее распространены ЖРО. Так, на реакторе типа РБМК образуется около 100 тыс. $м^3$ в год, ВВЭР – 40 тыс. $м^3$ в год. При переработке ТВЭЛов их выдерживают в отстойниках примерно три года (при этом активность снижается примерно в 1000 раз), а затем на радиохимических заводах их измельчают и растворяют в горячей азотной кислоте. При этом образуется 10 %-ный раствор ЖРО. Таких отходов в России за год накапливается 1000 т [2,3].

К твердым РАО (ТРО) относят не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные ЖРО, удельная активность которых больше значений, приведенных в приложении П-4 НРБ-99. Основной источник ТРО – побочные продукты технической деятельности на всех этапах атомной энергетики – от производства топлива до работы ядерных установок.

По удельной активности ТРО и ЖРО подразделяют на три категории – низко-активные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО) [5].

*Таблица 2.* Классификация жидких и твердых отходов по уровню активности [5]

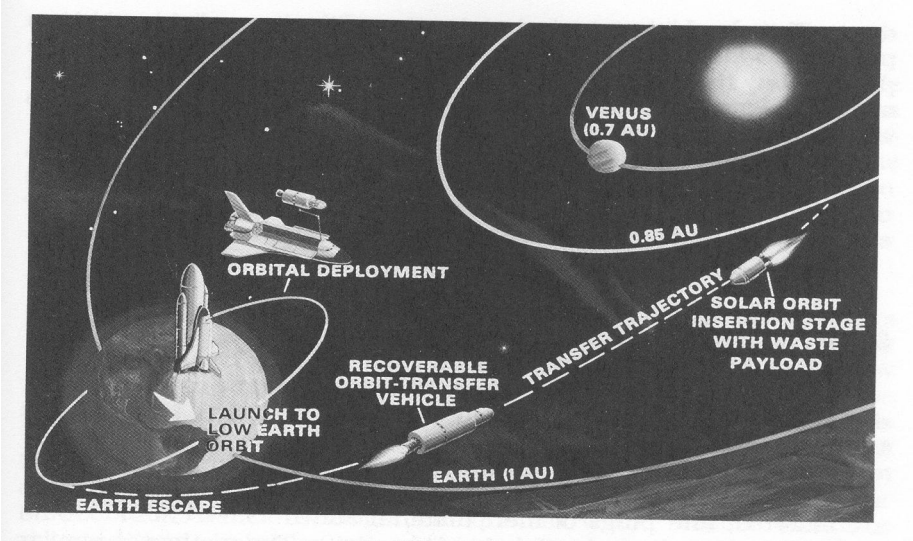
| Категория отходов | Удельная активность, кБк/кг | | |
|---|---|---|---|
| | Трансурановые радионуклиды | $\alpha$-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые) | $\beta$-излучающие радионуклиды |
| НАО | Менее $10^1$ | Менее $10^2$ | Менее $10^3$ |
| САО | $10^1$–$10^5$ | $10^2$–$10^6$ | $10^3$–$10^7$ |
| ВАО | Более $10^7$ | Более $10^6$ | Более $10^7$ |

Изоляция и захоронение РАО

Цель изоляции РАО – исключить возможность взаимодействия радиоактивных материалов с биосферой.

Существует много проектов изоляции долгоживущих РАО, например вывоз в космос за пределы земного тяготения (рис. 1).

Рис. 1.




РАО можно «сжигать» в мощных протонных ускорителях, что позволит превратить их в короткоживущие, но этот метод применим не ко всем радионуклидам [1]. В 2004 году была осуществлена трансмутация ядерных отходов с помощью лазера. Физики из Великобритании и Германии с помощью суперлазера VULCAN превратили $^{129}$I - изотоп йода, имеющий период полураспада 15.7 млн лет, - в $^{128}$I, период полураспада которого 25 мин. Тонкая золотая мишень, за которой поме-

щался образец $^{129}I$ облучали импульсами лазера длительностью 0.7 пс. Под действием лазерного луча мишень испарялась до состояния плазменного облака, причем электроны плазмы приобретали огромные скорости. Поток ускоренных электронов при торможении на ядрах золота образовывал вторичные □-кванты, которые, в свою очередь, выбивали из образца $^{129}I$ нейтроны, превращая часть его ядер в ядра $^{128}I$. Каждый лазерный импульс позволял получить около 3 млн ядер $^{128}I$. По мнению экспериментаторов, остается лишь развить этот метод до масштабов, необходимых для утилизации накопленных ядерных отходов. Насколько перспективна эта идея, пока не ясно [7].

Захоронить РАО – значит поместить их в специальные пункты захоронения («могильники»), где они были бы выведены из сферы человеческой деятельности и биологических процессов. Необходимое время изоляции составляет сотни тысяч лет. Наземные хранилища вряд ли могут быть столь долговечными, ибо всегда существует опасность антропогенных или природных катастроф, способных их разрушить, что приведет к радиоактивному выбросу.

Удаление в море

Радиоактивные отходы, сбрасывались в море с кораблей в специальных упаковках, которые достигали морского дна либо в неповрежденном виде, либо взрывались для рассеивания радиоактивного материала в морской воде. При этом предполагалось, что радиоактивные вещества будут рассеиваться и разбавляться в море и мигрировать от места сброса под действием течений. Количество радиоактивных веществ, остающихся в морской воде, далее снижалось бы из-за естественного радиоактивного распада и перемещения радиоактивных веществ в отложения морского дна в процессе сорбции.

Метод удаления в море низко активных и средне активных отходов практиковался на протяжении некоторого времени такими странами как СССР, Бельгия, Франция, Федеративная Республика Германия, Италия, Нидерланды, Швеция и Швейцария, а также Япония, Южная Корея и США. Этот вариант не был реализован для отходов высокого уровня активности.

Захоронение РАО в открытых морях регулируется международными конвенциями. С 1972 года Лондонская конвенция запретила затопление отработавшего ядерного топлива и ограничила сброс низко- и среднеактивных отходов с судов. Согласно Лондонской конвенции, захоронение отходов со средним и низким уровнем активности разрешалось только за пределами континентального шельфа, где глубина более 4000 метров. Советский Союз присоединился к конвенции в 1975 году. В 1983 году на 7 Консультативном совещании представителей Сторон была принята Резолюция, призывающая временно воздержаться от захоронения в море всех видов РАО, а с 1993 года временный мораторий стал постоянным запретом. Последние резолюции так и не были ратифицированы Россией. Большинство стран выступает за запрещение захоронения любых видов РАО в морях. Особую позицию по данному вопросу занимают США, Франция, Великобритания и Япония, не отвергающие саму идею моратория, но настаивающие на переходном периоде.

Вместе с тем, возможность захоронения РАО на дне океанов продолжает обсуждаться. В Мировом океане есть огромные пространства, где накоплены мощные массы донных отложений толщиной до нескольких километров. Эти пространства представляют собой сравнительно пологие подводные склоны, плавно переходящие от мелковод-

ного шельфа к глубоководным равнинам дна океана. Именно подножие материкового склона и рассматривается как потенциальное место захоронения РАО. При сейсмических толчках и землетрясениях на материковом склоне возникают оползни и перемещения осадочного материала. Значительная его часть сносится к подножию склона и там откладывается на время, исчисляемое миллионами лет. Интенсивное поступление донных отложений со стороны материкового склона к его подножию получило название лавинной седиментации.

Оползень на материковых склонах и подножиях - широко распространен в океане. Имеется множество данных о масштабах подводных оползней в зоне материкового склона и материкового подножия. Например, в 1987 г. на материковом склоне Норвегии исследован оползень объемом 5700 кубокилометров. Эти массы осадков передвинуты на 900 км. Толщина сдвинутых блоков осадочных пород достигала 1,5 км при средних значениях 400 м. Ширина головной части оползня 290 км. Оползневые блоки оторвались от склона на глубине 1000 м и проползли 200 км до глубины 2000-2500 м. Общая площадь срыва составила 34 тыс. кв. км.

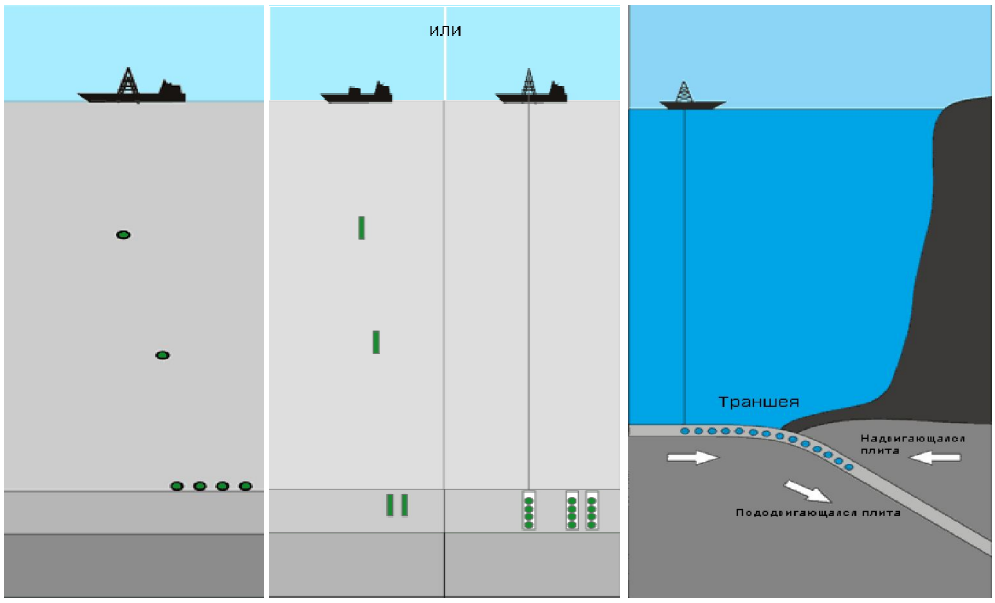
Следует отметить, что эти грандиозные объемы донных отложений состоят из глинистых частиц, обладающих способностью к максимальной адсорбции и обеспечивающих наиболее плотную упаковку и консервацию любых объектов, оказавшихся в конечном пункте перемещения оползня. Есть предложения по искусственному созданию оползней путем подземных взрывов в глубоких скважинах материкового склона.

Наиболее удобными для захоронения РАО считаются глубоководные желоба Тихого океана, так как дно желобов расположено между двумя противостоящими склонами – естественными ограничителями перемещения оползня. В этом случае, возможно осуществить прямое попадание оползня в намеченный пункт. Однако использование глубоководных желобов Тихого океана в целях захоронения РАО потребует длительных и тщательных исследований и прогнозов.

Захоронение под морским дном.

Этот вариант предполагает захоронение под морским дном контейнеров с радиоактивными отходами низкого, среднего и высокого уровня активности в соответствующую геологическую среду ниже дна океана на большой глубине. Этот вариант рассматривался Швецией и Великобританией. Для реализации этого варианта остеклованные радиоактивные отходы планировалось упаковать в коррозионно-стойкие контейнеры или, которые помещались бы, по крайней мере, на 4000 метров ниже уровня воды в породы морского дна. Захоронение радиоактивных отходов могли быть размещены в скважинах, просверленных на глубину 800 метров ниже морского дна, с расположением самого верхнего контейнера на глубине около 300 метров ниже морского дна.

Рис. 2. Захоронение РАО на дне мирового океана.




Удаление в зоны субдукции.

Надвигание одной литосферной плиты на другую в зоне субдукции приводит к образованию разлома (желоба), возникающего на некотором расстоянии от морского берега. Идея для этого варианта состояла в том, чтобы захороненные в зоне разлома отходы, увлекались вглубь земной коры. Однако зоны подвижек плит имеются в лишь ряде мест на поверхности Земли и никакая страна, производящая радиоактивные отходы, не вправе рассматривать вариант захоронения в глубокие морские желоба без поиска международного решения этой проблемы. Впрочем, такой вариант не был нигде реализован, так как он является одной из форм захоронения РАО в море и поэтому не разрешен международными соглашениями.

Захоронение в горных породах материков.

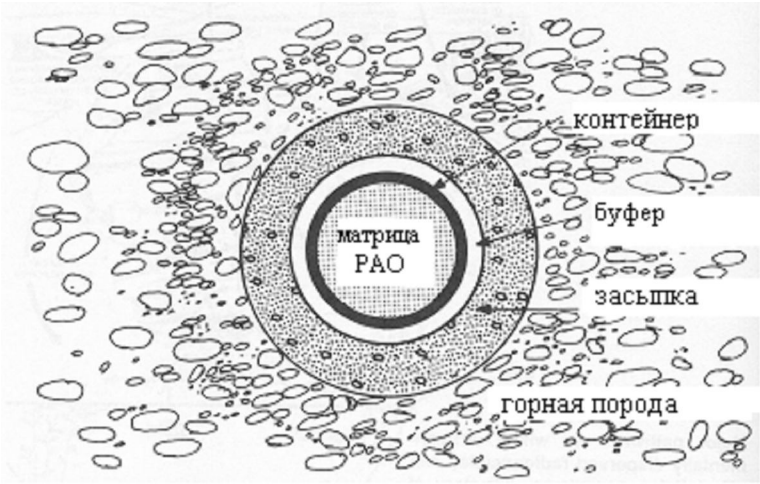
Концепция долговременной изоляции РАО в специальных могильниках, сооруженных в горных породах основана на том, что залежи естественных радионуклидов (ЕРН) – месторождения урана, находятся в определенных участках земной коры в течение сотен тысяч и даже миллионов лет.

Наиболее удобно и выгодно хранить отходы на месте их возникновения. Это экономит время, средства, снимает проблему безопасной транспортировки. В данном случае перспективно захоронение РАО в скважинных могильниках (если позволяют геологические условия). Проходка скважин большого диаметра не требует значительных капитальных затрат и позволяет производить захоронение ВАО в сравнительно небольших по размерам геологических блоках пород. Зарубежный и отечественный опыт продемонстрировал обеспечение гарантий безопасности и высокую экономическую эффективность захоронения ЖРО среднего и низкого уровней активности путем их закачки в водоносные горизонты с застойными водами, непригодными для бытового использования. При этом эффективно их подземное отверждение.

Общепризнанной концептуальной основой безопасного захоронения ВАО является принцип «мультибарьерной стратегии» (рис. 3), или «глубокоэшелонированной обороны», в соответствии с которым изоляция отходов должна обеспечиваться несколькими барьерами [2,3,4]. Для отвержденных отходов такими барьерами служат:

консервирующая матрица,
коррозионно-стойкий контейнер,
буфер из слабопроницаемого сорбционного материала,
горная порода, окружающая могильника.

Рис. 3. Принцип мультибарьерной стратегии.




Первым барьером является консервирующая матрица, материал которой должен надежно воспрепятствовать растворению радионуклидов в подземных водах. В зарубежных странах в качестве такой матрицы в основном используется боросиликатное стекло. К консервирующим матрицам относится, в частности, «Синрок» – керамическая минеральная масса, в которую входят минералы Ba – холландит, Zr – цирконолит, Ti – перовскит и рутил. «Синрок» получают путем спекания тонкого порошка соответствующего состава при 1200 °С. В промышленных масштабах его использование до настоящего времени не проводилось. По-видимому, стоимость этой технологии окажется очень высокой [2].

В России в качестве консервирующей матрицы используется алюмофосфатное стекло. Его недостатками (по сравнению с боросиликатным стеклом) являются большая растворимость в воде, которая значительно повышается с ростом температуры, а также быстрая раскристаллизация при температуре выше 200 °С. При этом переход стронция из стекла в раствор предотвращается образованием новой кристаллической фазы – гояцита, а практически весь цезий из стекла переходит в раствор. Недостатки боросиликатных и алюмофосфатных стекол стимулируют проведение активных исследований по разработке более надежных матричных материалов. Тем не менее, к настоящему времени значительная часть жидких ВАО уже отверждена в алюмофосфатной матрице. Поэтому захоронение РАО в горных породах должно произ-

водится с учетом свойств консервирующей матрицы из алюмофосфатного стекла [2].

Главная задача контейнера – предотвратить контакт радионуклидов с подземными водами в течение 300–1000 лет, т. е. срока, достаточного для того, чтобы концентрации Sr и Cs снизились до безопасного уровня, а общая радиоактивность отходов достигла значений, соизмеримых с урановыми рудами. В качестве материала для контейнеров предлагается использовать нержавеющую сталь, титан, циркониевый сплав, медь, коррозионно-стойкий чугун и др. Контейнеры, в которые разливаются алюмофосфатные стекла на ПО «Маяк», представляют емкости из обычной стали толщиной 3 см. Захоронение предполагается проводить в пеналах из нержавеющей стали (в каждом таком пенале находится по три контейнера с ВАО).

В Швейцарии остеклованные в боросиликатном стекле РАО предполагается помещать в стальные контейнеры с толщиной стенок 30 см, что, предположительно, обеспечит их безопасное захоронение (на глубине более 1000 м) до 100 тыс. лет[4].

Третьим барьером является сорбционноемкий материал, заполняющий пространство между контейнером и стенками ячейки (или ее бетонной облицовки), куда помещают контейнер с отходами. В качестве такого материала обычно рас-сматриваются бентониты и цеолиты. Некоторые авторы указывают на преимущества использования для этой цели материалов коры выветривания, развитой на породах повышенной основности [3].

В большинстве проектов как сорбционный барьер «буфера» и «забивки» предусматривается применение бентонитовых глин с примесью кварцевого песка. Добавка последнего предназначена для повышения теплопроводности материала. Высокую перспективность для использования в качестве сорбционного барьера имеют эпигенетические минералы, образовавшиеся по основным и ультраосновным породам. К этим минералам относятся: монтмориллонит, хлорит, серпентин, разнообразные слоистые алюмосиликаты, гидроокислы железа, титана, марганца и др. Наиболее важная особенность данных минералов заключается в их способности сорбировать широкий спектр радионуклидов. Стоимость таких материалов достаточно низка. Кроме сорбции радионуклидов, «буферы» и «забивки» из-за низкой водопроницаемости препятствуют контакту ВАО с трещинными водами. Насыщенный водой материал буфера служит средой, через которую массообмен ВАО с трещинными водами осуществляется посредством диффузии. Данный механизм способствует наиболее эффективному использованию сорбционных свойств материала [2].

Буфер выполняет пространство между контейнером с отходами и вмещающими породами. Забивочным материалом заполняется горная выработка после того, как во всех ячейках размещены контейнеры. С помощью «буферов» и «забивок» можно создать условия, препятствующие миграции радионуклидов. В общем случае таким условиям отвечает восстановительная слабощелочная среда. Понижение окислительно-восстановительного потенциала может быть обеспечено за счет введения в «буферы» и «забивки» примеси углистых сланцев или других углеродсодержащих материалов.

В начальный период существования могильника ВАО наибольшую опасность для ОС будут представлять $^{90}Sr$ и $^{137}Cs$, которые обеспечивают основной вклад в уровень радиоактивности и характеризуются относительно высокой растворимостью в подземных водах. Задачей

дорогостоящих коррозионно-стойких контейнеров, используемых в западных технологиях захоронения ВАО, является изоляция радионуклидов от подземных вод до тех пор, пока их концентрация не снизится до безопасного уровня. В принципе эта задача может быть решена за счет использования дешевых сорбционноемких минералов, таких, как монтмориллонит, хлорит, серпентин, разнообразные слоистые алюмосиликаты, гидрослюды, с добавлением углистых сланцев, в которых равновесное содержание цезия и стронция в тысячи раз превышает аналогичный параметр в водном растворе.

Несмотря на привлекательность «многобарьерной защиты», следует учитывать, что обычные конструкционные материалы в масштабе геологического времени разрушаются, например бетон – за 100 лет, сталь – за 10–1000 лет. Лишь некоторые дорогостоящие материалы типа золота, платины и, возможно, свинца, меди, определенных видов стекол и плавленого камня считаются достаточно стойкими. Поэтому основным барьером на пути миграции радиоактивных веществ должна быть сама геологическая среда, которая при надлежащем выборе ее типа и участка гораздо стабильнее, чем любые искусственные барьеры [2].

Если к упаковкам с РАО нет доступа воды, то даже при разрушении конструкции и прямом контакте отходов с породой коэффициент диффузии радионуклидов в матрице и грунте столь мал, что за миллионы лет они могут переместиться всего на несколько метров. Контакт же с водными потоками приводит к выносу радионуклидов из матрицы в горный массив. Поэтому безопасность хранилища напрямую зависит от способности миграции радионуклидов в потоке грунтовых вод.

Хранилища и пункты захоронения – это геотехнологические системы, имеющие важные особенности. Прежде всего горная порода, в которой они размещаются, должна характеризоваться низким содержанием вод и высокой водонепроницаемостью. Массивы скальных пород обычно обводнены на большую глубину, разбиты тектоническими трещинами, нередко перемяты. Наименее водопроницаемы массивы каменной соли. Однако и в них существуют капиллярные каналы, заполненные рассолом, которые медленно передвигаются к источнику тепла, т. е. мигрируют в сторону РАО. Еще одна особенность поведения воды при захоронении отходов в полостях внутри соляных массивов – ее испарение на теплом дне полости и конденсация на более холодном своде. В результате свод растворяется и полость постепенно перемещается вверх – «всплывает». Этот процесс весьма медленный, но оценки показывают, что за время существования пункта захоронения полость может всплыть на десятки метров.

Большое значение имеет совместимость конструкционных материалов, особенно наружного слоя упаковки РАО, с породой и грунтовой водой. В зависимости от материала контейнера, температуры, типа вод и породы нужно учитывать как выщелачивание стеклоблоков, бетонных, битумных и керамических блоков под действием вод, так и коррозию стальных или других оболочек. Так, в каменной соли в присутствии влаги коррозия металлических контейнеров. В породах типа базальта достаточно надежным считается захоронение остеклованных ВАО в многослойном контейнере из меди или нержавеющей стали с добавками B, Cd, Cu, Ti, Pb.

В последнее время многие страны придерживаются концепции окончательного удаления РАО в глубокие геологические формации: глины, скальные породы, каменную соль. Все больше сторонников завоевывает подход, согласно которому на страну или группу стран соз-

дается один пункт захоронения. Предоставить за плату земли для централизованного захоронения РАО (в основном в районе пустынь) в свое время выражали желание Судан, ЮАР, Намибия, Иран, Пакистан. Руководство МАГАТЭ намерено рассмотреть варианты строительства централизованных международных хранилищ ядерных отходов, чтобы сократить число площадок с РАО.

Геологическая среда как объект захоронения РАО

Требования к выбору геологической среды для захоронения РАО определяются причинами возможного проникновения радионуклидов из могильника в биосферу. К таким причинам относятся:

вывод могильника на поверхность в результате воздействия эрозионных процессов;

вынос радионуклидов из могильника подземными водами в биосферу;

захват ВАО внедряющимся магматическим расплавом и вынос их вместе с ним на поверхность;

вскрытие могильников скважинами и горными выработками в результате проведения геолого-изыскательских работ.

Международные исследования в нашей стране и за рубежом показали, что вместилищами РАО могут служить три типа горных пород – глины (аллювий), скальные породы (гранит, базальт, порфирит), каменная соль. Все эти породы в геологических формациях имеют широкое распространение, достаточную площадь и мощность слоев или магматических тел.

Физико-химические процессы, происходящие в системе ВАО – горная порода – подземные воды, могут способствовать как повышению, так и понижению надежности могильника. Размещение ВАО в подземных горных выработках вызывает прогрев вмещающих пород с нарушением физико-химического равновесия. В результате вблизи контейнеров с ВАО начинается циркуляция нагретых растворов, что приводит к минералообразованию в окружающем пространстве. В качестве благоприятных можно считать такие породы, которые в результате взаимодействия с нагретыми трещинными водами будут понижать свою водопроницаемость и повышать сорбционные свойства.

К наиболее благоприятным для могильников относятся породы, в которых реакции минералообразования сопровождаются закупоркой трещин и пор. Так, гидратация дунитов сопровождается приращением объема новообразованных фаз на 47 %, габбро – 16, диорита – 8, гранодиорита – 1 %, а гидратация гранитов вообще не приводит к самозалечиванию трещин. В пределах значений температур, соответствующих условиям могильника, реакции гидратации будут протекать с возникновением таких минералов, как хлорит, серпентин, тальк, гидрослюды, монтмо-риллонит, разнообразные смешанослойные фазы. Характеризуясь высокими сорбционными свойствами, эти минералы будут препятствовать распространению радионуклидов за пределы могильника[2].

Таким образом, изоляционные свойства пород повышенной основности под воздействием ВАО будут возрастать, что позволяет рассматривать эти породы как предпочтительные для строительства могильника. К ним можно отнести перидотиты, габбро, базальты, кристаллические сланцы повышенной основности, амфиболиты и др.

Пункт захоронения должен быть окружен зоной отчуждения, в которой допускается появление радионуклидов, но за ее границами активность никогда не достигает опасного уровня. Посторонние объекты

могут быть расположены не ближе, чем на расстоянии трех радиусов зоны от пункта захоронения. На поверхности эта зона носит название санитарно-защитной, а под землей представляет собой отчужденный блок горного массива.

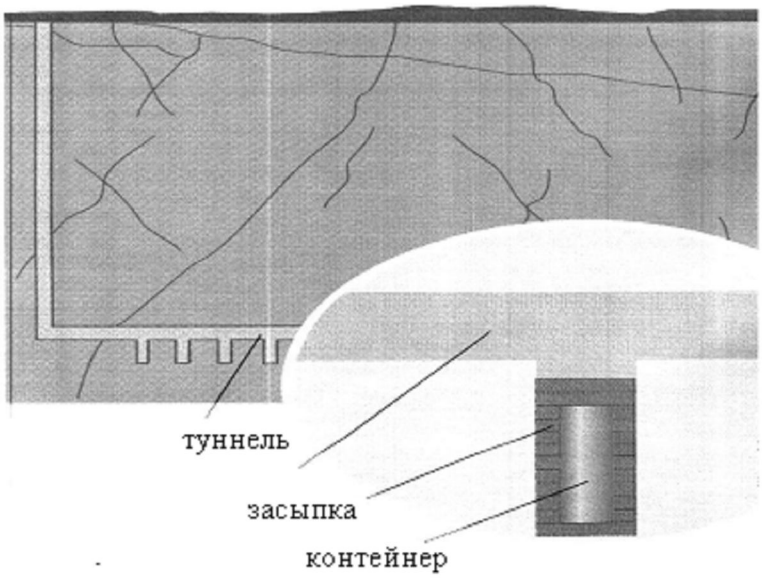
Отчужденный блок необходимо изъять из сферы человеческой деятельности на период распада всех радионуклидов, поэтому он должен располагаться за пределами месторождений полезных ископаемых, а также вне зоны активного водообмена. Проводимые при подготовке к захоронению отходов инженерные мероприятия должны обеспечить необходимый объем и плотность размещения РАО, действие систем безопасности и надзора, в том числе долговременный контроль за температурой, давлением и активностью в пункте захоронения и отчуждаемом блоке, а также за миграцией радиоактивных веществ по горному массиву.

Наиболее простым и экономичным решением является захоронение отходов непосредственно на территории предприятий атомной промышленности. Такие территории, как правило, достаточно хорошо изучены геологически, имеют развитую инфраструктуру охраны и коммуникаций, и, кроме того, отсутствует риск загрязнения ОС во время транспортировки РАО. Даже если геологические условия не отвечают оптимальным, тем не менее, в совокупности такое захоронение может отвечать критериям безопасности могильника.

Рис. 4. Рациональный ядерный цикл: на территории уранового месторождения последовательно производится добыча и обогащения урановых руд, обогащение урана, производство ядерного топлива и электроэнергии и захоронение РАО

Наиболее распространенный вариант подземных хранилищ для ВАО является сооружение скважинных могильников, что не требует больших капитальных затрат, и глубоких (500–1000 м) шахт в гранитных массивах. Шахты соединяются тоннелями, в которых, в свою очередь, бурятся скважины, в которые и помещают контейнеры с ВАО (рис. 5). Такие хранилища планируется построить в Финляндии к 2020 г., в Швеции, США и России (Нижнекамский гранитный массив). Кроме того, на Северо-Западе России также планируется строительство подобных хранилищ.

Рис. 5. Глубинное захоронение РАО в горных породах




Хранилища токсичных ВАО должны быть рассчитаны на тысячелетия и надежно защищены как от воздействия антропогенных факторов (катастрофы самолетов и т. д.), так и от природных воздействий. Поэтому для захоронения ВАО выбирают, как правило, кристаллические щиты, привлекающие стабильной геологической ситуацией, сохраняющейся более 1 млрд лет.

**Литература**

1. *Благоволин П.П., Казарицкий В.Д., Киселев Г.В.* и др. Трансмутация долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики // Атомная энергия. 1991. Т. 70, № 6.
2. *Кедровский О.Л., Шишиц Ю.И., Леонов Е.А.* и др. Основные направления решения проблемы надежной изоляции радиоактивных отходов в СССР // Атомная энергия. 1988. Т. 64, вып. 4.
3. *Лаверов Н.П., Канцель А.В., Лисицын А.К.* и др. Задачи геологических исследований в связи с проблемой безопасного захоронения радиоактивных отходов // Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Горно-металлургическое производство. 1990. Вып. 6.
4. *Лаверов Н.П., Омельяненко В.И.* и др. Геологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 1994. № 6.
5. *Нормы* радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. М., 1999.
6. *Основные* санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). Сан ПиН 2.6.1-99. М., 1999.
7. *Утилизация* ядерных отходов с помощью лазера? Природа №6, 2004г.