

### Термины, характеризующие радиоактивные отходы

В силу технических причин и в целях обеспечения безопасности различные ядерные отходы обычно классифицируются в зависимости от уровня их радиоактивности, теплосодержания и потенциальной опасности. МАГАТЭ разработало определения, описывающие технические характеристики радиоактивных отходов, которые используются при обращении с такими отходами во многих странах мира. Однако в общих целях для достижения большего понимания можно использовать и упрощенные определения и объяснения наиболее важных терминов.

• **Период полураспада.** Данный термин относится ко времени, необходимому для того, чтобы радиоактивность любого радионуклида снизилась наполовину. Период полураспада большинства наиболее важных высокоактивных продуктов деления составляет около 30 или менее 30 лет; примером этому может служить цезий-137. У некоторых радионуклидов, например, йода-129, период полураспада равен нескольким тысячам лет. Для сравнения скажем, что период полураспада природного урана составляет 4500 миллионов лет, что приблизительно равно возрасту Земли.

• **Отходы, содержащие коротко- и долгоживущие радионуклиды.** Эти термины касаются периода полураспада конкретного радиоактивного элемента. Радионуклиды, период полураспада которых превышает 30 лет, обычно считаются долгоживущими.

• **Низкоактивные отходы (НАО)** содержат в себе ничтожно малые количества долгоживущих радионуклидов. Такие отходы, полученные в результате мирной ядерной деятельности в промышленности, медицине, научных исследованиях и в процессе производства ядерной энергии, могут включать в себя такие предметы, как упакованные перчатки, коврики, стекло, небольшие инструменты, бумагу и фильтры, которые подверглись радиоактивному загрязнению.

• **Среднеактивные отходы (САО)** имеют более низкие уровни радиоактивности, чем высокоактивные отхо-

ды, но их, тем не менее, необходимо экранировать во время транспортно-технологических операций. К таким отходам относятся смолы, используемые в реакторных операциях, или отвержденные шламы, а также части оборудования и кусочки металла. Для обработки и иммобилизации таких отходов используют коммерческие технологические процессы; широко практикуется приповерхностное захоронение или размещение таких отходов в наземных хранилищах. В некоторых странах построены или запланировано строительство приповерхностных подземных хранилищ в геологических формациях или под морским дном.

• **Высокоактивные отходы (ВАО)** производятся в процессе переработки отработавшего топлива ядерно-энергетических реакторов, в результате которой из них может быть извлечен уран и плутоний, пригодные для повторного использования в качестве ядерного топлива. Такие отходы содержат в себе высокоактивные долгоживущие тепловыделяющие трансурановые элементы и продукты распада. Жидкие ВАО можно эффективно хранить в баках на специально сконструированных установках. Перед окончательным захоронением и изоляцией от биосферы такие отходы необходимо обработать и отвердить. Не прошедшее переработку отработавшее топливо можно рассматривать как высокоактивные отходы.

• **Альфа-содержащие отходы** (называемые также трансурановыми, загрязненными плутонием материалами или альфа-отходами) включают в себя отходы, содержащие довольно долгоживущие излучающие альфа-частицы радионуклиды, что делает невозможным их приповерхностное захоронение в земле. Такие отходы производятся в основном в процессе переработки отработавшего топлива и изготовления смешанного окисного топлива. Захоронение таких отходов можно осуществлять таким же образом, как и захоронение ВАО.

### Экологическая оценка

Следуя рекомендациям Совещания по рассмотрению последствий чернобыльской аварии в 1986 г., МАГАТЭ развернуло международное исследование, нацеленное на использование существующих данных о состоянии окружающей среды, обусловленном выпадением радиоактивных осадков после чернобыльской аварии. Данное исследование, известное как „Обоснование модельных прогнозов“ (VAMP), направлено на использование преимуществ „природной лаборатории“ для обоснования моделей переноса радионуклидов в окружающей среде. Такие модели используются при оценке радиологического воздействия всех этапов ядерного топливного цикла. В рамках этого проекта исследования ведут четыре отдельные рабочие группы экспертов из научно-исследовательских институтов более чем 20 государств-членов

Агентства; в финансировании этого проекта принимает участие Комиссия европейских сообществ (КЕС). Реализация VAMP запланирована до 1992 г.

Кроме того, МАГАТЭ принимает участие в аналогичном международном исследовании модели биосферы (BIOMOVS), начатом в 1986 г. Шведским национальным институтом радиационной защиты (SSI). В рамках данного исследования, начатого до чернобыльской аварии, проходят проверку модели экологического переноса и биоаккумуляции радионуклидов и других изотопных индикаторов. Первоначальный график и программа этого исследования были изменены для сбора и оценки данных по чернобыльской аварии; теперь оно будет продолжено до 1991 г., — С. Хоссейн, Отдел ядерного топливного цикла и обращения с радиоактивными отходами

• **Основной акцент делается на демонстрацию возможностей безопасной изоляции от человека и окружающей среды любых радиоактивных отходов, включая наиболее высокоактивные, в течение требуемых периодов времени.** В большинстве стран, развивающих ядерную энергетику, имеются программы по изучению, разработке и демонстрации технологий безопасного обращения с радиоактивными отходами. Многие научно-исследовательские, опытно-конструкторские и демонстрационные проекты направлены на то, чтобы доказать наличие приемлемых методов безопасного длительного хранения радиоактивных отходов. Такие разработки и непрерывные исследования имеют важное значение в силу нескольких причин: с их помощью можно проверить новейшие концептуальные решения в области обращения и захоронения радиоактивных отходов; они поставляют новейшие экспериментальные данные, необходимые для усовершенствования компьютеризованных математических моделей, используемых для проведения оценок безопасности и возможных условий захоронения отходов в геологических формациях; наряду с аналитическим моделированием, обоснованием и лабораторными исследованиями они способствуют

проведению оценки возможностей подземного хранилища радиоактивных отходов надежно защищать здоровье населения в течение длительного периода времени. Дополнительные гарантии безопасного поведения радиоактивных отходов в длительной перспективе предоставляют результаты исследований естественных радиационных режимов, включая поведение радионуклидов в урановых рудных телах, которые существуют в земной коре в непо потревоженном состоянии в течение миллионов лет.

• **Некоторые государства строят или планируют строительство коммерческих установок по переработке и остекловыванию радиоактивных отходов.** Почти в половине государств, развивающих ядерную энергетику, планируется или осуществляется переработка отработанного топлива. Во Франции и Великобритании коммерческие установки по переработке отработанного топлива находятся в эксплуатации уже в течение почти десяти лет. Однако в начале 90-х годов планируется иметь действующие установки по переработке отработанного топлива в большинстве стран.

В целях усовершенствования технологии остекловывания отходов (иммобилизация отходов в

### Синтетическая порода

На демонстрационной установке в Лукас Хайт, Австралия, ученые проводят испытания материала Synroc (синтетическая порода), который можно использовать для иммобилизации высокоактивных отходов. Синтетическая порода состоит из трех минеральных солей титановой кислоты и небольшого количества металлического сплава. Эксплуатация этой установки позволит накопить практический опыт производства Synroc в промышленных или почти промышленных масштабах без использования радиоактивных материалов; в Австралии нет никаких планов строительства установки по производству Synroc с использованием радиоактивных материалов. Данная установка позволит также получить данные о конструкции установки по переработке радиоактивных отходов и провести предварительные оценки стоимости производства синтетической породы Synroc с использованием радиоактивных материалов.

Стратегия применения Synroc основана на том факте, что определенные природные минералы выдерживают экстремальные геологические режимы в течение миллионов лет. В любой породе содержатся небольшие количества радиоактивных элементов, например, урана, тория и калия, распределенных среди первичных минералов в виде слабых твердых растворов. Многие из таких минералов, например, циркон и полевой шпат, обладают способностью удерживать в себе небольшие количества радиоактивных элементов в течение тысячелетий. В Synroc радиоактивные элементы отходов иммобилизуются точно так же, как и твердые растворы в кристаллических структурах первичных минералов\*.

Австралия осуществляет разработку и испытания Synroc в сотрудничестве с Великобританией, Италией

и Японией. В Великобритании изготовлены небольшие образцы материала Synroc, содержащие радиоактивные отходы; в Японии планируется провести аналогичную работу с использованием заранее изготовленных образцов Synroc. Характеристики и поведение материала Synroc изучались в лабораториях Канады, Соединенных Штатов и Федеративной Республики Германии. В Австралии основное участие в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах принимает Австралийская ядерная научно-техническая организация (ANSTO) и Австралийский национальный университет (ANU), в котором в 70-х годах профессором А.Э. Рингвудом и его коллегами была разработана концепция синтетической породы.

В рамках национальных усилий ANU приготовил и провел испытания проб Synroc, содержащих радиоактивный уран и технеций. Кроме того, исследователи ANU провели геологические, кристаллографические и изотопные исследования природных минералов, подвергнувшихся воздействию высоких кумулятивных доз облучения в течение нескольких геологических периодов и содержащих количественно определяемые радиоактивные элементы. ANSTO приготовила и провела испытания на выщелачивание радиоактивных, содержащих актиниды, проб Synroc, а также провела отдельные испытания проб продуктов деления, являющихся побочным продуктом производства медицинских изотопов на исследовательском реакторе в Лукас Хайте. Были получены прекрасные результаты. Кроме того, пробы материала Synroc подвергали облучению быстрыми нейтронами на исследовательском реакторе. ANSTO сообщила, что во время экспериментов, продолжавшихся 6 месяцев, пробы выдержали облучение, эквивалентное 100000-летнему воздействию высокоактивных отходов, без каких-либо значительных физических повреждений или потери устойчивости к выщелачиванию.

\* „Синтетический материал Synroc“, А.Э. Рингвуд и С.Э. Кессон, *Формы кондиционирования радиоактивных отходов в будущем*, издательство „Эльзевир сайнс“ (1988 г.).

стекле или стеклоподобных материалах) некоторые государства построили или планируют построить небольшие опытные установки для демонстрации возможностей имеющейся технологии. В настоящее время имеется очень небольшое количество действующих установок по остекловыванию отходов, остальные находятся на стадии планирования или строительства. Недавно Австралийская ядерная научно-техническая организация (ANSTO) приступила к объединению своей небольшой демонстрационной установки Synroc с более крупной, на которой будут разрабатываться и изучаться альтернативные методы кальцинации радиоактивных отходов.

• В большинстве государств, имеющих ядерно-энергетические программы, разрабатываются

технологии захоронения высокоактивных отходов (ВАО) в глубоких геологических формациях. Факторы, влияющие на обращение с ядерными отходами, зависят от политики государства и степени реализации в нем различных этапов ядерного топливного цикла. Существует, однако, технически обоснованный международный консенсус относительно того, что в настоящее время предпочтительным вариантом является захоронение ВАО и/или отработавшего топлива в глубоких геологических формациях. Тем не менее, в рамках некоторых национальных программ продолжают исследования других альтернативных вариантов захоронения отходов, например, приповерхностное захоронение под морским дном (см. таблицы).

Низко- и среднеактивные отходы: стратегии обращения и захоронения

	Стратегии обращения	Тип захоронения (фактическое и/или предполагаемое)
Аргентина	сжигание в небольших масштабах	приповерхностное захоронение в земле
Бельгия	хранение обработанных и упакованных отходов	подземное хранилище
Болгария	хранение обработанных/необработанных и упакованных отходов	наземное хранилище/засыпка грунтом
Бразилия	хранение обработанных и упакованных отходов;	приповерхностное захоронение в земле
	сжигание в небольших масштабах	или хранилища на морском побережье
Великобритания	хранение обработанных и упакованных отходов;	приповерхностное захоронение в земле;
	сжигание в небольших масштабах	подземное хранилище; исследования в области приповерхностного захоронения под морским дном
Венгрия	хранение обработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле;
Германская Демократическая Республика	хранение необработанных и упакованных отходов;	подземное хранилище
Индия	захоронение упакованных отходов	
	хранение обработанных и упакованных отходов;	наземное хранилище/засыпка грунтом
	сжигание в небольших масштабах	
Испания	хранение обработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле
Италия	хранение необработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле
Канада	хранение обработанных/необработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле;
		подземное хранилище
Китай	хранение обработанных/необработанных и упакованных отходов; сжигание в небольших масштабах	приповерхностное захоронение в земле
Корейская Республика	хранение обработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле;
Куба	хранение обработанных и упакованных отходов;	подземное хранилище
	сжигание в небольших масштабах	наземное хранилище/засыпка грунтом
Нидерланды	хранение обработанных и упакованных отходов;	
	сжигание в небольших масштабах	подземное хранилище
Румыния	хранение обработанных и упакованных отходов;	
	сжигание в небольших масштабах	
Соединенные Штаты	хранение обработанных/необработанных и упакованных отходов; сжигание в небольших масштабах	приповерхностное захоронение в земле;
СССР	хранение обработанных и упакованных отходов;	наземное хранилище/засыпка грунтом
	сжигание в небольших масштабах	наземное хранилище/засыпка грунтом
Федеративная Республика Германия	хранение обработанных и упакованных отходов;	
	сжигание в небольших масштабах	подземное хранилище
Финляндия	хранение обработанных и упакованных отходов	подземное хранилище
Франция	хранение обработанных и упакованных отходов;	приповерхностное захоронение в земле;
	сжигание в небольших масштабах	наземное хранилище/засыпка грунтом
Чехословакия	хранение обработанных и упакованных отходов;	приповерхностное захоронение в земле;
	сжигание в небольших масштабах	подземное хранилище
Швейцария	хранение обработанных и упакованных отходов;	
	сжигание в небольших масштабах	подземное хранилище
Швеция	хранение обработанных и упакованных отходов;	
	захоронение упакованных отходов	хранилище на морском побережье
Югославия		подземное хранилище; наземное хранилище/засыпка грунтом
Япония	хранение обработанных и упакованных отходов	приповерхностное захоронение в земле; исследования в области приповерхностного захоронения под морским дном

## Главные темы

### Захоронение высокоактивных отходов/отработавшего топлива: программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

	Исследования на площадке	Выбор площадки	Подземные исследовательские лаборатории		
			Строительство	Исследования	Эксплуатация подземного хранилища (планируемая)
Аргентина	■				
Бельгия	■	■	■	■	
Бразилия	■				
Великобритания	■				
Индия	■		■	■	
Испания	■				2005–10
Канада	■		■	■	>2020
Китай	■				
Нидерланды	■				
Соединенные Штаты	■	■	■		2003
СССР	■				
Финляндия	■				
Франция	■	■			2009
ФРГ	■	■	■	■	>2000
Швейцария	■	■	■	■	>2020
Швеция	■	■			>2020
Япония	■	■			>2020

**Примечание.** Болгария, Венгрия, ГДР, Куба, Польша, Румыния и Чехословакия возвращают отработавшее топливо иностранному поставщику.

### Национальные планы по захоронению высокоактивных отходов и/или отработавшего топлива

	Захоронение в геологических формациях	Вид породы	Переработка		Форма кондиционирования отходов
			дома	за рубежом	
Аргентина	■	гранит	■		блоки стекла
Бельгия	■	глина		■	блоки стекла
Болгария				■	
Великобритания	■		■	■	блоки стекла
Венгрия				■	
ГДР				■	
Индия	■	гранит	■		блоки стекла
Испания	■	соль, глина, кристаллит		■	блоки стекла и отработавшее топливо в контейнерах
Италия	■	глина или кристаллит		■	блоки стекла
Канада	■	гранит		■	отработавшее топливо в контейнерах
Китай	■		■		блоки стекла
Куба				■	
Нидерланды	■	соль, глина		■	блоки стекла
Польша				■	
Румыния				■	
Соединенные Штаты	■	туф			отработавшее топливо в контейнерах
СССР	■	соль, кристаллит	■	■	блоки стекла
Финляндия	■	гранит		■	блоки стекла
Франция	■	глина, соль, гранит, кристаллический сланец	■	■	блоки стекла
ФРГ	■	соль		■	блоки стекла
Чехословакия				■	
Швейцария	■	гранит, осадочные породы		■	блоки стекла и отработавшее топливо в контейнерах
Швеция	■	гранит			отработавшее топливо в контейнерах
Япония	■	гранит, кристаллический сланец, туф	(1992) ■	■	блоки стекла

**Примечание.** Ни одно из государств-членов МАГАТЭ пока еще не сделало окончательного выбора площадки для строительства подземного хранилища высокоактивных отходов и отработавшего топлива. Указанные виды пород являются предметом рассмотрения и/или проведения исследований по классификации площадки. Болгария, Венгрия, ГДР, Куба, Польша, Румыния и Чехословакия возвращают отработавшее топливо иностранному поставщику.



• **Государства продолжают разработку более эффективной технологии обработки, кондиционирования и захоронения низкоактивных (НАО) и среднеактивных отходов (САО).** Опытные-конструкторские работы охватывают новые технологические процессы и методы, уменьшения объема отходов в местах их производства и после производства (т.е. сжигание и уплотнение). Кроме того, особое внимание начинают уделять исследованиям в области различных методов иммобилизации радиоактивных отходов. В прошлом захоронение некоторых видов НАО производилось после их незначительной обработки или вообще без какой бы то ни было обработки и/или кондиционирования. Осуществляется переориентация национальных программ и разработка методик, направленных на устранение отрицательного воздействия захороненных НАО на окружающую среду.

• **В целом ряде государств разработаны специальные методы финансирования программ обращения и захоронения радиоактивных отходов и снятия с эксплуатации ядерных установок.** К таким методам относится отчисление ядерными электроэнергетическими компаниями (или производителями радиоактивных отходов) небольшой платы за каждый киловатт-час произведенной электроэнергии для покрытия текущих и ожидаемых расходов на разработку, эксплуатацию и закрытие подземных хранилищ радиоактивных отходов. Учитывая огромные количества производимой электроэнергии, эти небольшие отчисления окажутся, по-видимому, достаточными для финансирования национальных программ по обращению и захоронению ядерных отходов. В абсолютном выражении общие ожидаемые издержки в значительной степени зависят от масштабов и потребностей ядерной энергетики и программы развития ядерного топливного цикла конкретной страны. В этом контексте подобные издержки являются относительно небольшими по сравнению с общим объемом производимой электроэнергии. В процентном отношении они составят, как правило, 2 – 6 % от общих издержек производства электроэнергии на АЭС, о чем свидетельствуют результаты исследований, представленные в МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР).

• **В будущем объем производимых радиоактивных отходов будет расти как в развивающихся, так и промышленно развитых странах, что обусловлено непрерывным ростом ядерной энергетики, а также снятием с эксплуатации и демонтажом старых ядерных реакторов.** По положению на октябрь 1989 г. в 31 государстве мира в соответствии с данными отчетов, представленных в МАГАТЭ, насчитывалось 531 действующих или строящихся ядерных энергетических реактора. В 67 странах действуют, строятся или запланированы 356 исследовательских реакторов. Еще 239 энергоблоков находились в конце 1988 г. в остановленном состоянии. Кроме того, в 17 государствах почти 100 ядерных установок находятся на различных стадиях снятия с эксплуатации.

На основании последних данных о наличии ядерно-энергетических мощностей в мире, которые были опубликованы АЯЭ/ОЭСР и МАГАТЭ, были произведены расчеты наличия ядерных отходов в 1988, 1990, 1995 и 2005 гг. (см. диаграммы на с.11). В

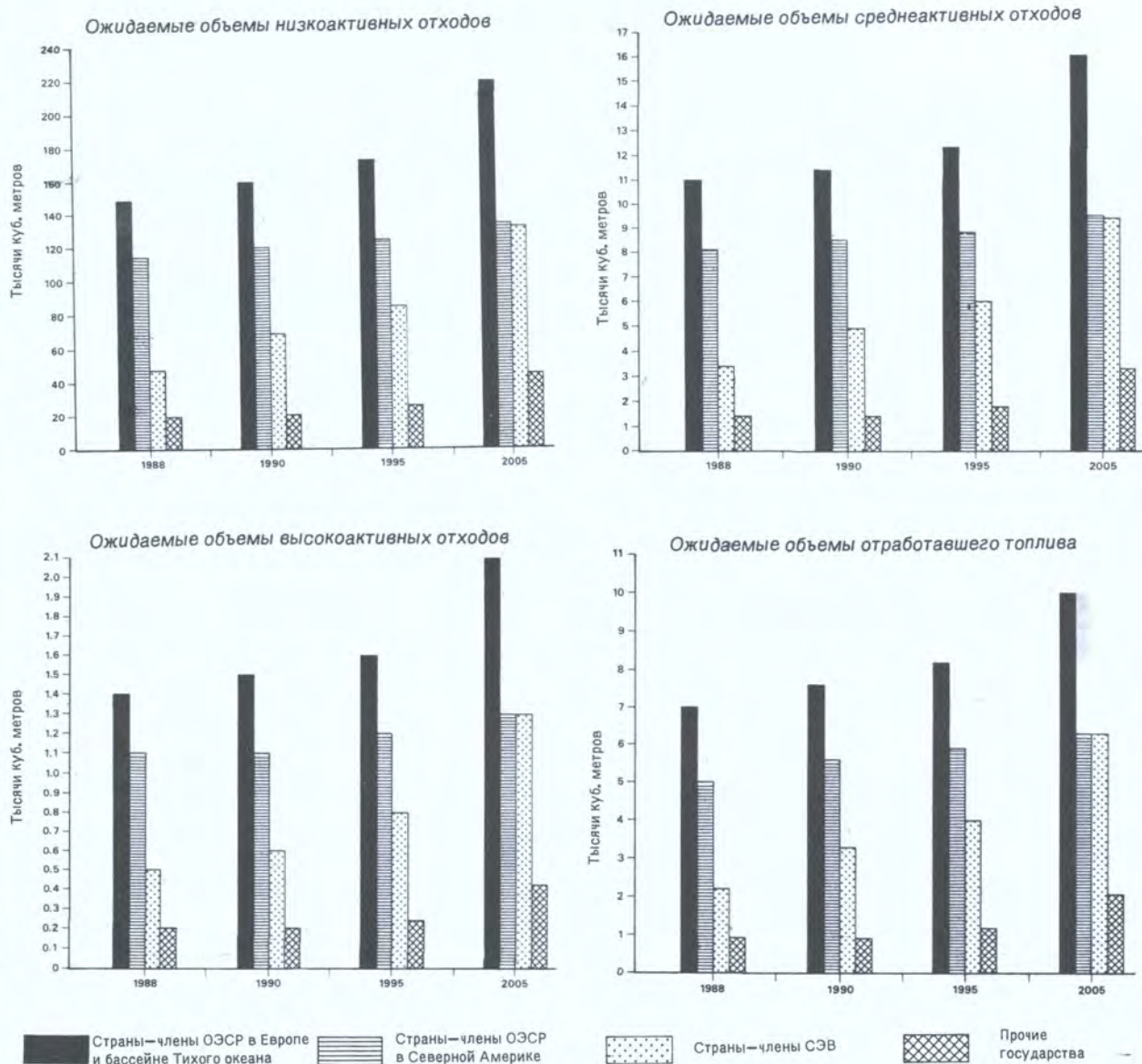
основе этих оценок лежит средний 30-летний срок службы атомных электростанций (действительные цифры могут отличаться от расчетных).

• **В области повседневного безопасного обращения с радиоактивными отходами перед развивающимися странами стоят иные проблемы (а, следовательно, существуют другие насущные потребности), чем перед промышленно развитыми государствами.** Одна из причин такой ситуации заключается в том, что их ядерно-энергетические программы находятся на ранних стадиях реализации или вообще только начинаются. Следовательно, они обладают меньшим опытом в этой области и очень часто имеют менее развитые общие промышленные и регулирующие инфраструктуры. Многие развивающиеся страны не имеют ядерно-энергетических программ, однако они вынуждены иметь дело с радиоактивными отходами, производимыми в результате использования радиоизотопов в промышленности, медицине, научных исследованиях и других областях. Для оказания помощи развивающимся государствам-членам в решении своих специфических проблем в области обращения с радиоактивными отходами МАГАТЭ оказывает им техническую помощь путем финансирования технических проектов, предоставления услуг экспертов, оборудования и подготовки кадров. (см. статью в данном номере Бюллетеня „Обращение с радиоактивными отходами в развивающихся странах“.)

• **Во многих государствах общественное мнение оказывает сильное влияние на прогресс в области обращения с радиоактивными отходами и, по-видимому, будет его оказывать и в будущем.** Несмотря на уверенность ученых и инженеров в возможности осуществления безопасного захоронения ядерных отходов с помощью современных технологий, очень часто общественность не уверена в этом. „Необходимо, чтобы во многих государствах были предприняты усилия для достижения более широкого понимания предлагаемых методов и степени их безопасности“, – заявил Генеральный директор МАГАТЭ Ханс Бликс. – „Совершенно очевидно, что для такого просвещения общественности могут потребоваться гораздо большие усилия, чем для инженерного решения этой проблемы“. За последние несколько лет значительно увеличилось число национальных и международных программ по информированию и просвещению общественности. Многие организации осуществляют идентификацию и разработку механизмов информирования и просвещения общественности. В настоящее время МАГАТЭ подготавливает к изданию Собрание первоисточников, в котором будут освещены основные вызывающие беспокойство у общественности вопросы, связанные с обращением и захоронением радиоактивных отходов. В сборнике будет дан обзор путей и способов обращения с ядерными отходами в различных странах, установления в них контактов с общественностью, а также путей разработки и реализации политики в данной области. Этот сборник должен стать справочником для государств в отношении вызывающих озабоченность проблем и возможных путей их решения.

• **Международное сотрудничество и обмены в рамках национальных программ с международными организациями по-прежнему играют важную роль и приносят выгоду всем заинтересованным сторонам.** Число совместных исследований, специаль-

Ожидаемые объемы отходов АЭС



Источники: АЯЭ/ОЭСР, МАГАТЭ.

ных рабочих групп и совместных проектов, финансируемых национальными и международными организациями, продолжает расти по мере признания различными организациями важности и выгоды взаимных усилий. Такие международные организации, как, например, Комиссия европейских сообществ (КЕС), МАГАТЭ и АЯЭ/ОЭСР, финансируют и принимают участие в различных технических и экологических исследованиях, связанных с проблемой обращения с радиоактивными отходами. Совместные исследования, аналогичные, например, проекту „Стрипа” в Швеции, по-прежнему позволяют их участникам получать ценные данные

и накапливать опыт. В настоящее время эти три организации запланировали или уже реализуют несколько новых совместно финансируемых экологических проектов.

Стратегии обращения с радиоактивными отходами

**Отходы низкой и средней активности.** Большинство национальных стратегий включает в себя обработку и кондиционирование НАО и САО. В течение последних нескольких лет в рамках многих национальных программ были созданы проекты и



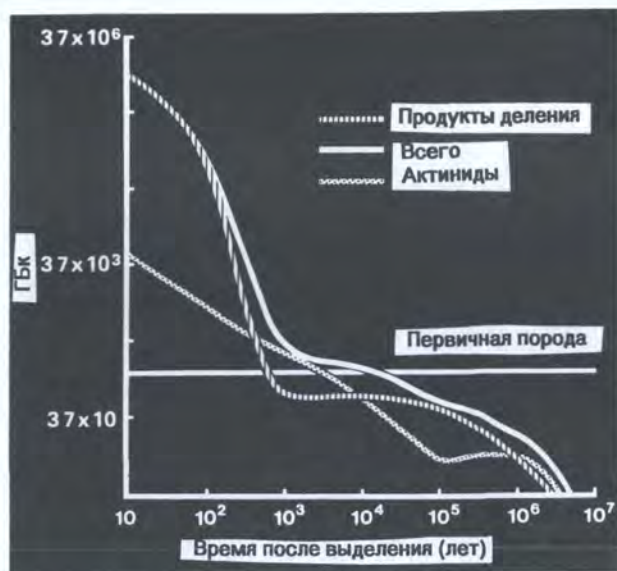
проводились активные исследования по разработке методов и технологий, позволяющих значительно уменьшить количество производимых отходов и их объем „после производства”. После обработки и/или кондиционирования отходы обычно упаковываются и помещаются в хранилище или подвергаются захоронению в специальной инженерно оборудованной установке (т.е. осуществляется приповерхностное захоронение или захоронение в бетонных траншеях).

В некоторых странах уже имеются действующие подземные хранилища или установки приповерхностного захоронения НАО и САО. В Германской Демократической Республике, например, подземное хранилище для реакторных отходов находится в эксплуатации с 1978 г. В Швеции в 1988 г. было завершено строительство подземного хранилища (SFR) на побережье Балтийского моря недалеко от Форсмарка. В других государствах также имеются установки для наземного хранения или приповерхностного захоронения НАО/САО.

**Отработавшее топливо и ВАО.** Отработавшее топливо хранится в начале под водой на реакторной площадке в специально сконструированном бассейне выдержки, с тем чтобы радиоактивный распад произошел во время промежуточного хранения. Затем отработавшее топливо во многих странах помещают в централизованное промежуточное хранилище или отправляют на установки химической переработки. Длительность нахождения отработавшего топлива в промежуточном хранилище зависит в основном от национальной политики. Как правило, до переработки отработавшее топливо находится в таком хранилище в течение 5 – 10 лет. В среднем ВАО и/или отработавшее топливо будут находиться в таком хранилище в течение 20 – 50 лет до их захоронения. С технической точки зрения радиоактивный распад во время промежуточного хранения облегчает последующее захоронение и обращение; наиболее быстрые темпы радиоактивного распада отмечаются в первые годы (см. диаграмму).

Центры централизованного хранения („отдельные хранилища” или установки АFR) отработавшего топлива построены или будут построены в целом ряде государств. В некоторых случаях они обусловлены необходимостью более эффективной интеграции всей системы обращения с радиоактивными отходами до их переработки или захоронения или ограниченными мощностями установок промежуточного хранения на реакторных площадках. Многие страны столкнулись с серьезными проблемами хранения отработавшего топлива на АЭС. По оценкам исследований, проведенных МАГАТЭ и АЯЭ/ОЭСР, к 2000 г. в мире будет иметься около 200000 метрических тонн отработавшего топлива легководных реакторов\*.

Сейчас в девяти государствах действуют или строятся установки по переработке отработавшего топлива и еще 11 стран отправляют или будут отправлять отработавшее топливо за границу для его последующей переработки. В настоящее время примерно половина государств-членов МАГАТЭ,



Уровень радиоактивности высокоактивных отходов со временем неуклонно снижается, причем наиболее резко он уменьшается в первые несколько сот лет. В конечном счете уровень радиоактивности будет ниже уровня радиоактивности природной урановой руды, которая первоначально использовалась для изготовления топлива. На данной диаграмме показаны уровни радиоактивности отходов в пересчете на одну тонну топлива.

Беккерель (Бк) — это международная единица измерений, указывающая на скорость спонтанного распада радиоактивного элемента или его дисинтеграции и выделения энергии. Один беккерель соответствует распаду одного атома в секунду. Беккерель по своему значению меньше кюри, который также иногда используется. Один кюри равен 37 Гбк.

имеющих ядерно-энергетические программы, планирует перерабатывать отработавшее топливо и выделять таким образом из продуктов деления уран и плутоний, пригодные для повторного использования в качестве топлива.

**Захоронение ВАО в глубоких геологических формациях — концепции и обоснование.** Почему захоронение в глубоких геологических формациях? Многие ученые считают, что захоронение ВАО в таких формациях является наиболее предпочтительным вариантом, имеющимся в настоящее время. Кроме того, они пришли к согласию, что целью такого захоронения является изоляция радиоактивных отходов от среды обитания человека в течение такого периода времени и в таких условиях, которые гарантируют, что любой последующий выход радионуклидов из подземного хранилища не будет связан с неприемлемым радиологическим риском даже в отдаленной перспективе\*.

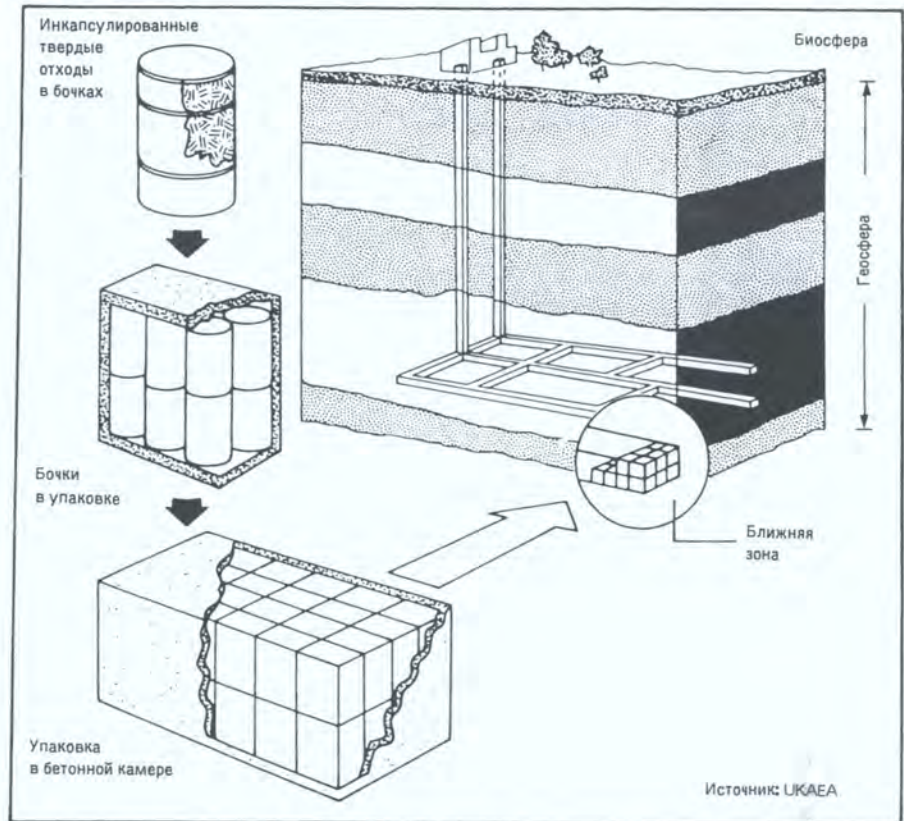
Этой цели можно добиться путем проектирования многокомпонентных систем, когда упаковка отходов (кондиционированные отходы, контейнер и внешняя упаковка), другие инженерные барьеры, а

\* Ядерная энергетика и топливный цикл: состояние дел и тенденции, часть С Годового отчета МАГАТЭ за 1989 г., Вена (1989 г.).

\* Исследования in-situ в государствах — членах ОЭСР, АЯЭ/ОЭСР, Париж (1988 г.).



При захоронении низко- и средне-активных отходов в глубоких геологических формациях в ряде стран стратегии основаны на подходе с использованием многочисленных барьеров, как показано на рисунке.



также подземное хранилище и специфические характеристики геологической системы (например, геология, гидрогеология) обеспечивают в совокупности многочисленные барьеры, препятствующие выбросу и переносу радионуклидов. Размещение соответствующим образом упакованных отходов, содержащих долгоживущие изотопы, на большой глубине в подходящих геологических формациях может гарантировать иммобилизацию и изоляцию отходов на время, в течение которого их радиоактивность в результате радиоактивного распада упадет до низкого или ничтожно малого уровня. Ученые считают, что радиологический риск для нынешнего и будущего поколений должен быть ограничен очень низкими уровнями, совместимыми с соответствующими национальными и международными нормами безопасности.

Демонстрация первых коммерческих подземных хранилищ кондиционированных высокоактивных отходов и/или отработавшего топлива, по-видимому, станет возможной в течение следующих 10–15 лет. А пока интенсифицируется проведение испытаний и аналитических исследований, направленных на углубление знаний о поведении кондиционированных отходов в длительной перспективе, а также на усовершенствование методов изоляции отходов и выбора площадок для их захоронения.

**Подземные исследовательские лаборатории.** В подземных исследовательских лабораториях Бельгии, Индии, Канады, Соединенных Штатов, ФРГ, Швейцарии и Швеции ученые и инженеры проводят детальные исследования площадок в формациях соли, глины, кристаллита и других типов пород. На некоторых таких исследовательских установках для демонстрации возможностей имеющейся техно-

логии внутри скважин, пробуренных в подземных отработанных горных выработках, были помещены на определенное время высокоактивные элементы. В ряде государств в настоящее время планируются или уже строятся подземные исследовательские установки, которые располагаются на потенциальных площадках размещения подземных хранилищ. Некоторые из этих стран принимают участие в работе первой международной подземной исследовательской лаборатории, созданной на шахте Стрипа в 1978 г. В рамках проекта Стрипа (сейчас идет второй год реализации его третьей фазы) будут вестись работы по разработке методов исследования площадок, геофизических методов, моделирования системы, каналовых эффектов и герметизации трещиноватой породы\*.

**Аналоги: природные лаборатории.** Одним из наиболее уникальных и сложных с научной точки зрения аспектов прогнозирования безопасности подземных хранилищ ВАО является использование результатов краткосрочных лабораторных исследований для оценки поведения таких хранилищ в длительной перспективе. Наилучшим способом получения доказательств кумулятивного эффекта миграции радионуклидов в течение десятков тысяч лет могут стать исследования природных аналогов.

Ряд национальных и международных организаций объединили свои усилия для реализации проектов изучения природных аналогов: ученые исследу-

\* Современный обзор политики и программ обращения с радиоактивными отходами. Бюллетень «Ядерные отходы», № 2, АЯЭ/ОЭСР, Париж (1988 г.).



**Свод практических правил проведения международных операций с радиоактивными отходами**

Учитывая обеспокоенность, связанную со сбросами и захоронением токсичных отходов в развивающихся странах, на 32-й регулярной сессии Генеральной конференции МАГАТЭ в сентябре 1988 г. была принята резолюция о разработке свода практических правил осуществления международных операций с радиоактивными отходами. Цель данного свода правил — служить руководством для правительств в деле предупреждения незаконных операций и сброса радиоактивных отходов.

В ответ на эту резолюцию в мае 1989 г. МАГАТЭ провело в Вене первое заседание группы экспертов. Эти эксперты представляли 20 государств-членов Агентства и три международных организации. Некоторые из основных обсуждавшихся на этом совещании вопросов были направлены на то, чтобы все международные операции с радиоактивными отходами осуществлялись на основе разрешений заинтере-

сованных государств в соответствии с их законами и регулирующими правилами, а также международно признанными нормами безопасности; запрещается экспорт радиоактивных отходов в какую-либо страну, не имеющую технических мощностей и/или административных возможностей обеспечить безопасное обращение и захоронение таких отходов; транспортировка отходов, являющихся предметом трансграничных перевозок, должна осуществляться в соответствии с общепринятыми международными правилами и нормами.

Окончательный вариант проекта свода практических правил будет составлен на следующем совещании группы экспертов в январе 1990 г., а затем в сентябре 1990 г. он будет представлен на утверждение Совета управляющих и Генеральной конференции МАГАТЭ.— П.Л. Дз, Отдел ядерного топливного цикла и обращения с радиоактивными отходами

ют несколько месторождений урановых руд в районе реки Аллигатор на Северной территории Австралии; на севере провинции Саскачеван в Канаде исследователи изучают месторождение урана в районе озера Сигара, причем особый интерес у них вызывает миграция радионуклидов в первичной породе, а также причины, по которым урановое рудное тело сохранилось в течение 1300 миллионов лет своего существования в относительно открытой геологической системе, насыщенной подземными водами; детальные исследования ведутся в районе месторождения тория около Покос де Кальдас в Бразилии и на площадке Окло (Природная лаборатория в Габоне) исследователи получили ценную информацию о долгосрочном хранении радиоактивных отходов.

**Захоронение НАО/САО в океанах.** Захоронение упакованных твердых радиоактивных отходов в морях является альтернативой захоронению некоторых видов отходов в земле. Ряд стран по-прежнему рассматривает возможность захоронения определенных видов упакованных отходов в океанах, которое изучается с 1949 г. и регулярно осуществлялось в прошлом некоторыми государствами. Однако в соответствии с положениями *Конвенции по предотвращению загрязнения морей сбросами отходов и другими веществами* (известной как ЛКС или Лондонская конвенция о сбросах), подписанной в 1972 г., государства-участники пришли к соглашению о введении необязательного моратория на сброс и захоронение радиоактивных отходов в морях, что помогло решить некоторые проблемы. (См. соответствующую статью в данном номере Бюллетеня: „Удаление радиоактивных отходов в море: доклад о состоянии дел“)

В рамках ЛКС МАГАТЭ определило ВАО как неподлежащие захоронению в море. Кроме того, оно опубликовало рекомендации для государств-участников конвенции о количествах и характере материалов, которые можно сбрасывать в море.

Данное определение постоянно пересматривается в целях отражения в нем изменений в философии радиационной защиты, усовершенствований методов моделирования поведения отходов в океане и нашего понимания воздействия захоронения радиоактивных отходов в море на морские организмы. В таких пересмотрах принимают участие международные эксперты из многих организаций, специализирующиеся в различных дисциплинах и отстаивающие различные точки зрения.

**Перспективы**

Короче говоря, время, которое потребовалось и еще потребуется для разработки, реализации и демонстрации безопасных и постоянных технических решений в области захоронения радиоактивных отходов, отражает политическое, экономическое и экологическое значение данной задачи для безопасности и здоровья населения, а также связанные с этим технологические проблемы. Однако не они стоят на пути прогресса. Существует международный консенсус относительно наличия и возможности демонстрации технических решений, обеспечивающих безопасное обращение и захоронение радиоактивных отходов. Однако для обеспечения прогресса в этой области необходимо решить институциональные и социально-политические вопросы, что, в свою очередь, требует продолжения реализации национальных и международных программ в области обращения с радиоактивными отходами, чтобы использовать имеющуюся общую технологическую и институциональную основу для удовлетворения потребностей конкретных программ. Во всех областях международное сотрудничество остается и должно оставаться активным и необходимым компонентом прогресса всех государств.