

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ: МИФ И РЕАЛЬНОСТЬ

NO. 3 | ФЕВРАЛЬ 2006 | РУССКАЯ ВЕРСИЯ

# ***Ядерный топливный цикл***

***Публикация, посвященная ядерным проблемам No.3***

**АВТОРЫ: ЮРГЕН КРОЙШ, ВОЛЬФГАНГ НОЙМАНН, ДЕТЛЕФ АППЕЛЬ (Главы 1 и 3) и ПИТЕР ДИЛЬ (Глава 2)**

## ***Содержание***

Ядерный топливный цикл

Добыча урана

Обращение с ядерными отходами

Литература



HEINRICH  
BÖLL  
STIFTUNG

## Авторы

**Детлеф Аппель** изучал геологию в Ганновере и Вене. Занимался исследованиями в области ядерной энергии с 1971 до 1981 гг. в Университете Ганновера, где получил учёную степень в 1979 г. С 1981 г. - независимый консультант, инспектор в области «экологических геофизических исследований». Специализируется на разработке стратегии и индивидуальных решений по сохранению грунтовых вод и почв, анализе экологического воздействия, радиоактивных свалках, заброшенных загрязнённых объектах, окончательных захоронениях радиоактивных отходов.

**Питер Диль** исследует проблемы, связанные с добычей урана с 1982 г., когда он присоединился к местной экологической группе, выступающей против урановых разработок в Юго-Западной части Германии. В конце 1980-х и в начале 1990-х занимался созданием сети экологических групп, работающих по проблемам, связанным с добычей урана в Европе. С 1995 г., возглавляет Урановый проект Всемирной службы информации по энергетике (WISE), которая была основана в Амстердаме и обеспечивает информационные услуги для антиядерных групп во всём мире.

**Юрген Кройш** родился в 1952 г. Изучал геологию в Марбурге и Ганновере, специализируется на геофизике, геологической инженерии и гидрогеологии. С 1980 г. – инспектировал и консультировал в области обращения с токсическими и радиоактивными отходами в рамках своей работы для организации Gruppe Ökologie e.V. С 1988 г. - директор Intac GmbH, которая занимается консультациями и предоставляет стратегические и инспекционные услуги в области технологий и окружающей среды.

**Вольфганг Нойманн** - физик. Он изучает ядерные вопросы в рамках Группы экологов Института научных исследований в Ганновере. Как инспектор и оценщик, Вольфганг Нойманн работает с группами граждан, экологическими ассоциациями, членами парламента, агентствами и администрациями федеральных, земельных и муниципальных уровней. Написал большое количество исследований и оценочных работ в этой должности. С 1999 он является членом комитета по снабжению и утилизации Комиссии по безопасности реакторов (RSK), а также комитета по защите от радиации АЭС Комиссии по радиационной защите (SSK) в Федеральном Министерстве по экологии и ядерной безопасности. Перед этими назначениями он был членом «Комиссии по радиации» в Немецком союзе за окружающую среду и защиту природы (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.).

Публикация, посвященная ядерным проблемам, No. 3:

Ядерный топливный цикл

Автор: Юрген Кройш, Вольфганг Нойманн, Детлеф Аппель и Питер Диль

© Heinrich Böll Foundation 2006 г.

Все права защищены



В соавторстве с

Данный доклад не обязательно отражает взгляды Heinrich Böll Foundation.

Публикация регионального представительства Heinrich Böll Foundation в Южной Африке, в сотрудничестве со штаб-квартирой Heinrich Böll Foundation.

Контакты:

Региональное представительство Фонда имени Генриха Бёлля в Южной Африке,

PO Box 2472; Saxonwold, 2132; South Africa..

Тел.: +27-11-447 8500. Факс: +27-11-447 4418. [info@boell.org.za](mailto:info@boell.org.za)

Фонд имени Генриха Бёлля в Германии,

Heinrich Böll Stiftung, Hackesche Höfe, Rosenthaler Str. 40/41, D-10178 Berlin, Germany,

Tel: +49-30 285 340, Fax: +49-03 285 31 09, [info@boell.de](mailto:info@boell.de); [www.boell.de](http://www.boell.de)

Фонд имени Генриха Бёлля - российское представительство,

Грузинский пер., 3-231, 123056 Москва

Тел.: +7-495 254 14 53; Факс: +7-495 9358014; [info@boell.ru](mailto:info@boell.ru); [www.boell.ru](http://www.boell.ru)

# 1 Ядерный топливный цикл

Использование атомной энергии требует использования различных предприятий. Каждый из этих объектов представляет опасность. Это и радиоактивная пыль в шахтах по добыче урана, потенциальные и фактические радиационные проблемы даже при нормальной эксплуатации предприятий, и несчастные случаи как с персоналом, обслуживающим ядерные установки, так и с людьми, живущими поблизости, заканчивая возможным загрязнением грунтовой воды в репозитории для радиоактивных отходов.

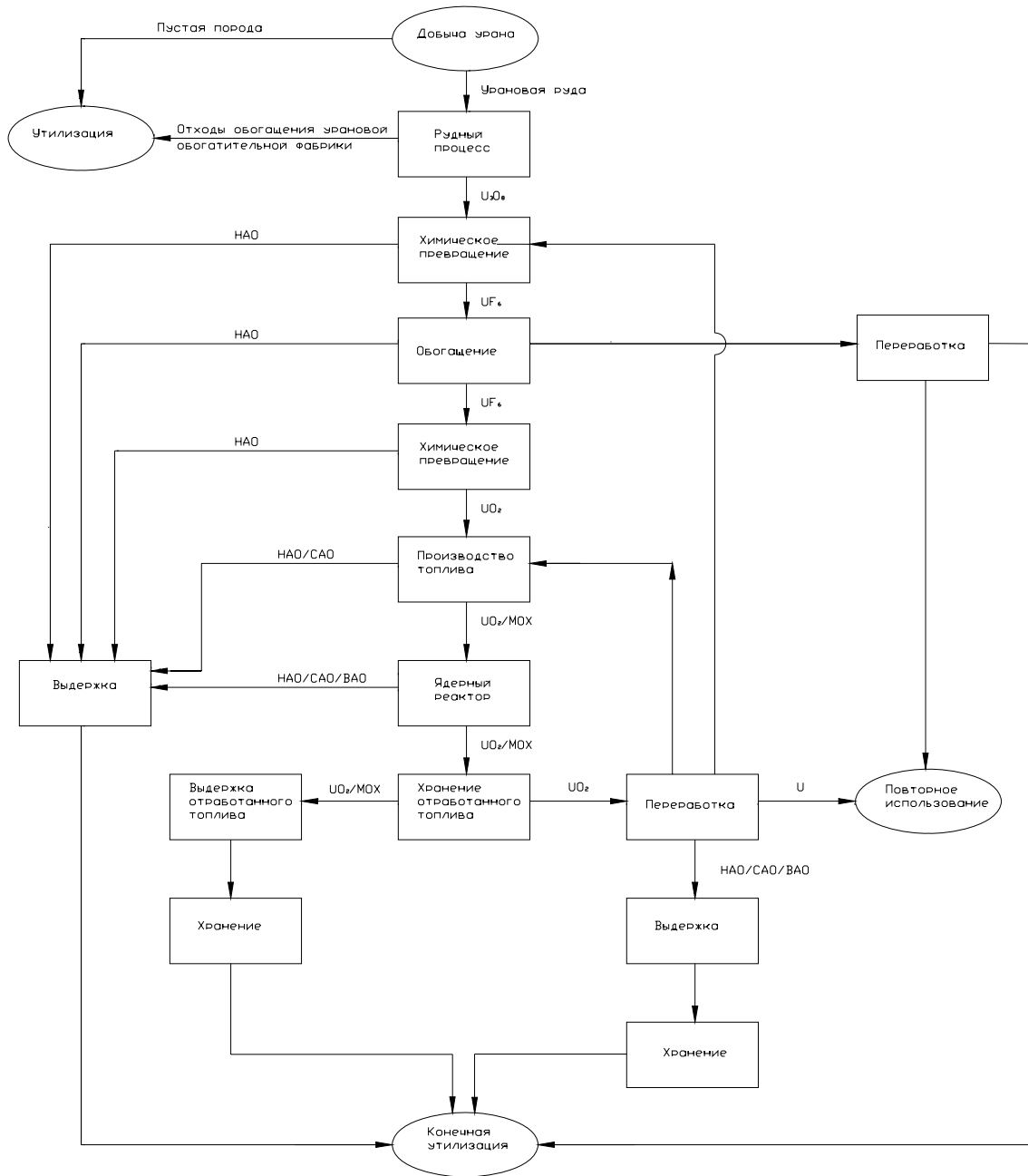
Необходимые шаги для того, чтобы уран стал топливным элементом показаны на следующей иллюстрации (рис. 1). После использования уранового топлива на атомной электростанции и его выдержки в бассейне есть два возможных способа переработки ОЯТ (отработавшего ядерного топлива). Первый способ - прямое захоронение, второй - подвергнуть переработке. Подвергнуть переработке означает отделить уран от плутония в ОЯТ, изготовить новые топливные элементы с этим материалом и повторно использовать в ядерном реакторе. Большинство стран, использующих ядерную энергию, не подвергает ОЯТ переработке. Более подробная информация по переработке дается в следующей главе.

Обогащение приводит к появлению большого количества обедненного урана (т.н. хвосты). Каждое предприятие по обогащению производит несколько тысяч тонн этого материала в год. По экономическим причинам дальнейшая судьба этого материала не определена. Может быть, что только малая часть будет использована (вне ядерного топливного цикла), а от остального нужно будет избавиться полностью.

Радиоактивные отходы производятся в каждой ядерной установке. Отходы могут быть классифицированы как низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО). По сравнению с другими категориями, высокоактивные отходы составляют небольшое количество по объему, но сосредотачивают в себе большинство радиоактивности. Основными видами высокоактивных отходов являются: отработавшее топливо, подлежащее «прямому» захоронению, полученные в процессе переработки остеклованные радиоактивные отходы (РАО), а также радиоактивные материалы, находящиеся внутри реактора. Существует большое разнообразие низко- и среднеактивных отходов. Количество отходов зависит от типа реактора и требований по обращению с отходами, включая захоронение; эти факторы отличаются в зависимости от страны. Например, 1300-мегаваттный реактор с водой под давлением в Германии производит приблизительно 60 кубометров низкоактивных и среднеактивных отходов и около 26 тонн ОЯТ каждый год. После вывода из эксплуатации АЭС, на таком реакторе образуется 5 700 кубометров низкоактивных отходов. Для Германии вычислено, что используя ядерную энергию, исходя из срока службы реактора в 35 лет, будет произведено приблизительно 300 000 кубометров отходов для захоронения.

С переработкой или без переработки, но хранилище для окончательного захоронения ядерных отходов необходимо. Это верно не только для большого количества низко и среднеактивных отходов, но также и для отработавшего топлива, потому что, например, отработавшее смешанное оксидное топливо не перерабатывается в промышленном масштабе. Исключением является Франция, где небольшое количество такого топлива удалось переработать. В мире не существует репозитория (места окончательного захоронения) для высокоактивных отходов и отработавшего топлива. Хранилища для низко- и среднеактивных отходов работают в некоторых странах с ядерными программами. Необходимо, чтобы репозиторий появился как можно быстрее. Если место захоронения будет выбрано и спроектировано правильно, то репозитории способны уменьшить опасность по сравнению со всеми другими вариантами обращения с РАО. Необходимо управлять негативными эффектами атомной энергетики

**Рис. 1. Идеализированное представление топливного цикла с переработкой и без переработки: как можно его реализовать**



Источник: Gruppe Ökologie

## 2 Добыча урана

### Введение

Эра урана, добываемого в промышленных масштабах, началась с конца Второй мировой войны, когда этот материал добывался как стратегический ресурс. Для получения этого сырья для ядерной бомбы были предприняты большие усилия с огромными издержками. Поначалу никто не придавал значения воздействию радиации на здоровье рабочих и окружающую среду. Соединенные Штаты получали уран из разнообразных источников, в основном из своих и канадских месторождений. Советский Союз, до обнаружения больших отечественных месторождений, основал огромную горнодобывающую промышленность для получения урана в европейских государствах-сателлитах, в отдельных частях Восточной Германии и Чехословакии, а также в Венгрии и Болгарии. В это время более чем 100 000 человек тяжело трудились в рамках восточногерманского проекта «Wismut», чтобы добыть то же количество урана, которое сейчас могут добыть несколько сот человек на каком-нибудь канадском месторождении.

В 1970-х уран всё больше и больше становится коммерческим ресурсом для выработки ядерной энергии, ситуация начала изменяться: рынок развивался — теперь правительства больше не были единственными заказчиками урана — были установлены экологические стандарты для добывающей промышленности. С концом Холодной войны большая потребность в добыче урана исчезла, так как вторичные ресурсы, запасы сырья или материал для ядерной бомбы стали доступными для гражданского использования. В настоящее время вторичными ресурсами снабжают почти половину ядерной индустрии, и это оставляет шанс на выживание только самым экономичным шахтам по добыче урана. Однако из-за быстрого истощения вторичных ресурсов и предложений о расширении производства ядерной энергии, сделанных в нескольких странах, ситуация меняется снова: уран может еще раз стать редким ресурсом, который будет добываться по высокой (экологической) стоимости.

### Горная промышленность урана: технология и влияние

При средней концентрации 3 г/тн в земной коре, уран не очень редкий металл. Добыча имеет смысл только в месторождениях, содержащих концентрации по крайней мере порядка 1000 г/тн (0,1 %); руды с более низким содержанием в настоящее время добываются только в чрезвычайных обстоятельствах. Концентрации, имеющие промышленное значение, имеются в различных частях мира. Эти залежи различаются геологическим расположением, размером, количеством содержащегося в руде урана, условиями доступа к месторождению. На Плато Колорадо на западе Соединенных Штатов, где его содержание в руде – 0,1-0,2 процента, уран добывался в тысячах небольших шахт до начала 1980-х, когда цена на этот материал резко упала. В то же время на озере Эллиот (Онтарио, Канада), в Восточной Германии и Чехословакии уран добывался в течение многих десятилетий главным образом в очень больших подземных шахтах и часто с более низким содержанием в руде. Когда восточногерманские операции по добыче урана были остановлены в 1990 г., цена на их продукцию была приблизительно в десять раз выше цен на мировом рынке.

После окончания Холодной войны продолжились разработки только самых выгодных месторождений. Большая концентрация в руде встречается редко – на реке McArthur в месторождении под землёй (Саскатчеван, Канада) добывается материал с содержанием урана 17,96%. Наиболее низкая концентрация в руде - в открытой шахте Рёссинг, в Намибии (0,029%).

Большое количество урана добыто традиционно — в открытых или подземных шахтах. За исключением нескольких месторождений в Канаде, содержание урана в рудах обычно ниже 0,5%, поэтому нужно добыть очень большое количество руды, чтобы получить уран. В шахтах

рабочие не защищены от радиоактивной пыли и газа радона, повышающих риск заболевания раком лёгких. На ранних стадиях добычи урана после Второй мировой войны шахты были плохо вентилируемы, что приводило к необычайно высоким концентрациям пыли и радона в воздухе. В 1955 г. обычные концентрации радона в шахтах «Висмута» были приблизительно 100 000 Бк/кубометр, с максимумами 1,5 миллиона Бк/кубометр. В общей сложности 7163 восточногерманских шахтёра умерли от рака лёгких между 1946 и 1990 гг. Для 5237 из них, профессиональное воздействие было признано причиной болезни. В Соединённых Штатах Конгресс признал ответственность правительства за здоровье первых шахтёров (главным образом, индейцев Навахо) только в 1990 г., приняв закон о компенсации подвергшимся радиации. Административные препятствия для того чтобы получить компенсацию, были настолько высоки, и капитал, ассигнованный для этой программы, был настолько недостаточен, что многие шахтёры (или выжившие члены семьи) получили компенсацию только после принятия нового закона в 2000 году.

В течение добывающего цикла большие объёмы загрязнённой воды, выкачанные из шахты и спущенные в реки и озёра, попадают в окружающую среду. Сточные воды из месторождения «Рабит Лэйк» в Канаде, например, вызвали увеличение массы урана в донных отложениях залива Hidden Bay реки Уоллостон (Wollaston). В 2000 году содержание урана в донных отложениях в 8 раз превышало природный уровень. С тех пор оно росло быстрее, чем в геометрической прогрессии и между 2000 и 2003 годом увеличилось в 10 раз. В речных донных отложениях в районе месторождения «Висмут» (Wismut) концентрации радия и урана в 100 раз больше, чем природная норма.

Вентиляция шахт, снижающая опасность для здоровья шахтёров, выпускает в атмосферу радиоактивную пыль и газ радон, увеличивая риск заболевания раком лёгких для людей, живущих поблизости. На «Висмуте» (шахта Schlemka-Alberoda), например, в общей сложности 7426 миллионов кубометров (235 m<sup>3</sup>/s) загрязнённого воздуха были выброшены в атмосферу в 1993 г., со средней концентрацией радона 96 000 Бк/кубометр.

Отвалы образуются в открытой шахте, например, когда тоннели проложены через безрудные зоны или концентрация урана в руде слишком низкая. Отвалы часто содержат повышенные концентрации радионуклидов по сравнению с нормальной породой. Такой материал продолжает угрожать людям и окружающей среде и после закрытия шахты, так как он источает газ радон и радиоактивную воду. Груды отвалов урановых шахт «Висмута» в области Schlemka/Aue содержат объём 47 миллионов кубометров и покрывают область 343 гектара. Отвалы часто сваливали в непосредственной близости от жилых районов. В результате, были обнаружены высокие концентрации радона в воздухе (приблизительно 100 Бк/кубометр) на обширных территориях. В некоторых местах концентрация радона была даже выше - 300 Бк/кубометр. Это продолжалось пока радиоактивный материал не был изолирован. Независимый институт экологии (Ecology Institute) обнаружил, что при продолжительной жизни в такой области риск заболеть раком лёгких достигает 20 случаев при концентрации 100 Бк/кубометр и 60 случаев при концентрации 300 Бк/кубометр - в расчёте на 1000 жителей. Кроме того, отвалы часто использовали в смеси с гравием или цементом для строительства дорог. Таким образом, гравий, содержащий повышенные радиоактивные концентрации, был распределён на больших территориях.

В некоторых случаях уран добывают из низкосортной руды выщелачиванием. Это делается из экономических побуждений, если содержание урана в руде слишком низкое. Щелочная или кислая жидкость вводится в массу материала и проникает вниз, где откачивается для дальнейшей обработки. В Европе, например, в Восточной Германии или Венгрии, эта технология использовалась до 1990 г.

В процессе выщелачивания по-прежнему существует опасность выбросов пыли, газа радона и выщелачивающей жидкости. После завершения процесса выщелачивания, в особенности

если руда содержит сульфид железа (случай Тюрингии в Германии и Онтарио в Канаде), могут появиться новые проблемы.

Доступ к воде и воздуху может стать причиной непрерывного бактериального производства кислоты в отвалах, что ведет к самопроизвольному выщелачиванию урана и других загрязнителей в течение многих столетий с возможным постоянным загрязнением грунтовых вод.

Пока выщелачивание не является востребованным из-за снижения цен на уран, но оно может снова заинтересовать производителей, если добыча руд с низким содержанием урана начнёт снова представлять экономический интерес.

Альтернативный способ – добыча растворением (solution mining). Эта технология, также известная как «выщелачивание на месте залегания», включает в себя введение щелочной или кислой жидкости (например, серной кислоты) через скважины в залежи урановой руды, и выкачивание обратно. Таким образом, эта технология не требует удаления руды с места добычи. Эта технология может использоваться только там, где месторождения урана расположены в водоносном слое в водопроницаемой породе, не слишком глубоко (приблизительно 200 м) в основании, и граничащие с водонепроницаемой породой.

Преимущества этой технологии - уменьшенный риск несчастных случаев и облучения для персонала, низкая стоимость, не требуется много места для складирования отходов. Главные недостатки - риск отклонения выщелачивающих жидкостей от месторождения урана и последующего загрязнения грунтовой воды, и невозможность восстановления естественных условий в зоне выщелачивания после окончания операций. Возникшая загрязненная смесь или свалена на поверхности в некоторых водохранилищах, или введена в так называемые глубокие ликвидационные колодцы.

Исторически выщелачивание использовалось в большом масштабе там, где есть крупные месторождения - оно включало ввод миллионов тонн серной кислоты, в Stráz pod Ralskem, Чешская Республика, в различных местах в Болгарии, и немного в Königstein, в Восточной Германии. В случае Кёнигштайна, в общей сложности 100 000 тонн серной кислоты были введены с жидкостью в месторождение руды. После закрытия месторождения, 1,9 миллиона кубометров этой жидкости остаётся в порах породы; ещё 0,85 миллиона кубометров такой жидкости находятся где-то между зоной выщелачивания и предприятием по обработке. Жидкость содержит высокие концентрации опасных примесей. Если сравнивать с допустимыми для питьевой воды концентрациями, то кадмия там больше в 400 раз, мышьяка - в 280, никеля - в 130, урана - в 83 раза. Эта жидкость представляет опасность с точки зрения загрязнения водоносного слоя. Проблема загрязнения грунтовой воды намного серьёзнее в Чехии, в Stráz pod Ralskem, где было закачано 3,7 миллиона тонн серной кислоты: 28,7 миллиона кубометров загрязнённой жидкости до сих пор содержатся в зоне выщелачивания, расположенной на территории размером 5,74 кв. км. Кроме того, загрязнённая жидкость распространилась вне зоны выщелачивания горизонтально и вертикально, подвергая угрозе заражения территорию примерно в 28 кв. км. и 235 миллионов кубометров грунтовой воды.

С уменьшением цен на уран в течение прошлых десятилетий, выщелачивание по технологии «добыча растворением» - единственный способ, использующийся в США. Выщелачивание в естественных залежах получает широкое распространение по всему миру в случае с месторождениями с низким содержанием урана. Новые проекты реализуются в Австралии, России, Казахстане, и Китае.

Руда, добытая в открытых или подземных шахтах сначала выщелачивается на специальном заводе. Завод обычно располагается около шахт, чтобы сократить количество транспортировок. Затем уран обрабатывается с помощью гидрометаллургического процесса. В большинстве случаев как средство выщелачивания используется серная кислота, хотя также применяется и щёлочь. Поскольку в процессе выщелачивания из руды выделяют не только уран, но и несколько других элементов (молибден, ванадий, селен, железо, свинец и мышьяк), нужно выделить уран из этой смеси. Конечный продукт, произведённый на заводе, обычно называемый «жёлтый пирог» (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> с примесями), упаковывается и отправляется в бочках. Главная опасность,

следующая из процесса обогащения - выбросы пыли. Закрывая завод по добыче урана, нужно избавиться от больших количеств радиоактивно загрязнённых отходов безопасным способом.

Отходы от процесса обогащения, отходы с урановой обогатительной фабрики имеют форму жидкого раствора. Они обычно откачиваются в искусственные водоёмы для конечного захоронения. Количество произведенных отходов фактически равно количеству добытой руды, так как извлеченный уран представляет только незначительную долю от общей массы. Таким образом, количество радиоактивных отходов (РАО), произведённых на тонну (t) урана, обратно пропорционально качеству руды (концентрации урана в руде).

Самый большой в мире искусственный водоём около завода по производству урана - Rössing в Намибии; он содержит более 350 миллионов тонн твёрдого материала. Аналогичные объекты в Соединённых Штатах и Канаде содержат до 30 миллионов тонн твёрдого материала. В Восточной Германии - 86 миллионов тонн.

Однако раньше отходы в некоторых случаях просто выбрасывались в окружающую среду без всякого контроля. Самый тревожный пример - в Монтане (Габон) такая практика продолжалась до 1975 г.: филиал французской компании Cogéma добывал уран там с 1961 г. В течение первых пятнадцати лет эксплуатации отходы с завода по производству урана сбрасывались в ближайший ручей. В общей сложности около двух миллионов тонн отходов с этого завода были выброшены в окружающую среду, загрязняя воду и опускаясь в донные отложения в речной долине. Когда добыча прекратилась в 1999 году, радиоактивные отходы вместо вывоза и утилизации покрыли тонким слоем почвы, склонной к эрозии.

Не считая удалённого урана, жидкие отходы содержат все элементы руды. Поскольку продукты полураспада урана (торий-230 и радий-226) из руды не выделяют, раствор содержит до 85 процентов от природной радиоактивности руды. Из-за технических ограничений не может быть извлечён весь существующий в руде уран. Поэтому жидкий раствор содержит немного остаточного урана. Кроме того, жидкий раствор содержит тяжёлые металлы и другие загрязнители, типа мышьяка, так же как и химические реактивы, добавленные в процессе дробления.

Радионуклиды, содержащиеся в урановых отходах, обычно испускают в 20-100 раз больше гамма-радиации по сравнению с природным уровнем. Гамма-радиация локализована и ее уровень быстро уменьшается при увеличении дистанции.

Когда поверхность отвалов высыхает, мелкий песок разносится ветром. Небо было тёмным от бурь, разносящих радиоактивную пыль по деревьям, расположенным в непосредственной близости от восточногерманских свалок отходов около завода по обработке урана до того момента, пока свалки не были защищены покрытиями. Впоследствии радий-226 и мышьяк были найдены в образцах пыли в этих деревьях.

Радий-226 в отходах распадается с образованием радиоактивного газа радон-222, продукты распада которого могут вызывать рак лёгких при вдыхании. Часть радона улетучивается. Норма выброса радона не зависит от процента содержания урана в отвалах; она зависит главным образом от общего количества урана, первоначально содержавшегося в добытой руде. Выброс радона - главная опасность, которая остаётся после того, как урановые шахты закрыты. Американское агентство по охране окружающей среды (EPA) оценило риск заболеть раком лёгких у жителей, проживающих поблизости от неизолированных свалок РАО на расстоянии до 80 гектаров, как два случая на сто человек.

Когда радон распространяется при помощи ветра, много людей получают небольшие дозы радиации. Хотя риск для человека не слишком велик, об этом нельзя забывать из-за большого количества людей, которых эта проблема затрагивает. Принимая во внимание беспороговый дозовый эффект, EPA оценило, что залежи отходов уранодобывающей промышленности, существующие в Соединённых Штатах (по состоянию на 1983 г.), могли вызвать 500 смертельных случаев от рака лёгких в течение 100 лет, если бы не было предпринято никаких контрмер.

Вытекание загрязнённой жидкости из отвалов - ещё одна большая опасность. Такие утечки создают риск загрязнения грунтовых и поверхностных вод. Опасные для людей уран и мышьяк попадают в питьевую воду и рыбу. Проблема утечек очень важна в случае с кислотными жидкостями, поскольку радионуклиды более подвижны в кислой среде. В отходах, содержащих сульфид железа, происходит самоподдерживающееся производство серной кислоты, что увеличивает скорость перемещения радионуклидов в окружающую среду. Утечка из хранилища отходов в Хельмсдорфе («Висмут») происходила на уровне 600 000 кубометров ежегодно; только половину от этого количества удавалось останавливать и откачивать обратно в хранилище, пока не заработала установка по обработке загрязнённой воды. По сравнению со стандартами для питьевой воды в составе жидкости в Хельмсдорфе содержалось: сульфаты – в 24 раза больше, мышьяк – в 253 раз больше, уран – в 46 раз больше. В районе венгерского завода по хранению урановых отходов Récs, загрязнённая грунтовая вода перемещается со скоростью 30-50 м ежегодно в направлении источников питьевой воды ближайшего города.

В связи с длинным периодом полураспада радиоактивных элементов необходимо в течение длительного времени поддерживать безопасность хранилищ отходов на высоком уровне, однако хранилища подвержены многим видам эрозии. После ливня могут сформироваться овраги; растения и животные могут повредить хранилища, что увеличит выброс радона и сделает хранилище более восприимчивым к климатическому воздействию. В случае землетрясений, сильного дождя или наводнений, хранилища могут быть полностью повреждены. Например, это случилось в 1977 г. в Гранте, Нью-Мексико (США) и привело к утечке 50 000 тонн жидкой смеси и нескольких миллионов литров заражённой воды, в 1979 г. в Черч Рок, Нью-Мексико, это привело к утечке более 1000 тонн жидкой смеси и приблизительно 400 млн. литров зараженной воды.

Иногда, из-за подходящих характеристик, сухие РАО использовались для строительства домов или для захоронения мусора. В построенных из такого материала домах, были обнаружены высокие уровни гамма-излучения и концентрации газа радон. Американское агентство по охране окружающей среды (EPA) оценило риск получить рак легких для жителей таких домов, как 4 случая на 100 человек.

### ***Очистка выработанных месторождений***

На заре развития уранодобывающей промышленности, после Второй мировой войны, горнодобывающие компании оставляли шахты в том виде, в котором они были на момент исчерпания месторождения: в США не считалось нужным что-либо предпринимать даже в случае с открытыми месторождениями, не говоря уже об утилизации произведённых отходов; в Канаде, РАО завода по переработке урана часто просто сваливались в ближайшие озера.

В Канаде и Соединённых Штатах, всё ещё существуют сотни небольших шахт по добыче урана, где никаких работ по утилизации и восстановлению не предпринималось. В некоторых случаях, чиновники всё ещё пытаются определить владельцев, которые могли бы считаться ответственными за утилизацию отходов, время от времени правительственным ведомством приходится утилизировать отходы на этих участках за свой счёт (по крайней мере, они объявляют об этом). Пример успешной программы по утилизации – это большая шахта Джекпайл Пагуайт в Нью-Мексико. Значительная работа, которая приближается к завершению, была произведена для утилизации отходов больших шахт «Висмут» по добыче урана в Восточной Германии.

Очистка необходима не только для неработающих шахт, но также и по завершении выщелачивания месторождений: от произведённых жидких отходов необходимо безопасно избавиться, и грунтовая вода, загрязнённая вследствие процесса выщелачивания, должна быть восстановлена до чистого состояния. Восстановление грунтовой воды - очень трудоёмкий процесс, невозможно восстановить её качество до изначального, хотя и применяются сложные насосы и схемы обработки. В Соединённых Штатах усилия по восстановлению воды были

приостановлены во многих случаях, после того, как годы перекачки и обработки воды не привели к ощутимому уменьшению количества загрязняющих веществ. После этого стандарты по очистке воды были смягчены.

Тогда как урановые месторождения главным образом расположены в отдалённых областях, где грунтовая вода едва пригодна для питья, всё-таки многие места разработок находились в плотно населённых областях, в частности, в тех местах, где с помощью выщелачивания добывали уран для Советского Союза. Если программы по восстановлению идут полным ходом в Германии и Чешской Республике, то в Болгарии не делается ничего.

Чтобы ограничить выброс загрязняющих веществ в окружающую среду, нужно решить проблему избавления от РАО. Идея вернуть отходы туда, откуда была добыта руда не обязательно является верным решением. Хотя большинство урана было извлечено из руды, это не сделало её менее опасной: совсем наоборот. Большинство радионуклидных примесей (85 процентов всей радиоактивности и всех химических примесей) всё ещё присутствуют. С помощью механических и химических процессов использованная урановая руда находится в такой форме, в которой радионуклиды стали более подвижны и более восприимчивы к перемещению в окружающую среду. Поэтому в большинстве случаев сброс отходов в подземные шахты невозможен; там они находились бы в прямом контакте с грунтовой водой.

Это похоже на ситуацию с хранением отходов в открытых шахтах. Здесь также существует непосредственный контакт с грунтовой водой и утечки повышают риск загрязнения грунтовой воды. Преимущество хранения в шахтах только одно – это относительно хорошая защита от эрозии. В большинстве случаев отходы сваливаются на поверхности земли из-за отсутствия других вариантов. В этом случае есть возможность принимать меры защиты. Обязательно необходимо защитить РАО от эрозии.

В Соединённых Штатах подробные инструкции для захоронения отходов были разработаны Агентством по охране окружающей среды (ЕРА) и Комиссией по ядерному регулированию (КЯР) в 1980-х гг. Эти инструкции не только определяют максимальные концентрации загрязняющих веществ в почве и допустимые выбросы загрязняющих веществ (в частности для радона), но также и промежуток времени, в течение которого предпринятые меры должны работать: 200-1000 лет, желательно без активного обслуживания. На основании этих инструкций более чем дюжина мест, где скопились РАО, была приведена в порядок. Частично путем покрытия РАО слоем из глины и горной породы, и частично посредством переноса отходов в более подходящие места, чтобы избежать опасности при наводнении или загрязнения грунтовой воды.

В Канаде, напротив, меры, принятые для утилизации отходов уранового производства, являются намного менее строгими; для РАО в области озера Эллиот, Онтарио, например, такие меры включают в себя «водное покрытие» как единственный «защитный барьер». Около урановых шахт в Восточной Европе и экс-СССР ситуация разная: в Восточной Германии, Венгрии и Эстонии в настоящее время места урановой добычи пытаются очистить и решить проблему РАО, а в Чешской Республике, на Украине, в Казахстане и Кыргызстане всё ещё не разработаны меры восстановления. 100 миллионов тонн отходов в Актау (Казахстан) даже не оборудованы временным покрытием; поэтому, большое количество пыли продолжает рассеиваться по окрестностям. Отходы в Киргизии расположены на крутых склонах и подвергаются опасности распространения из-за оползней.

Стоимость утилизации отходов охватывает чрезвычайно широкий диапазон. Верхний предел цен установили правительства в Соединённых Штатах и Германии. Если исходить из произведённой продукции, то утилизация отходов, образовавшихся при производстве фунта U3O8, составляет \$14. Эта цифра превышала стоимость фунта U3O8 до того, как началось недавнее повышение цен. Нижний предел отмечен в Канаде - US\$ 0,12; это отражает необычайно низкие экологические стандарты, применяемые в случае месторождения Элиот Лэйк.

Чтобы избежать продолжения ситуации, в которой брошенные шахты приходится очищать за средства налогоплательщиков, добывающая промышленность обязана начинать

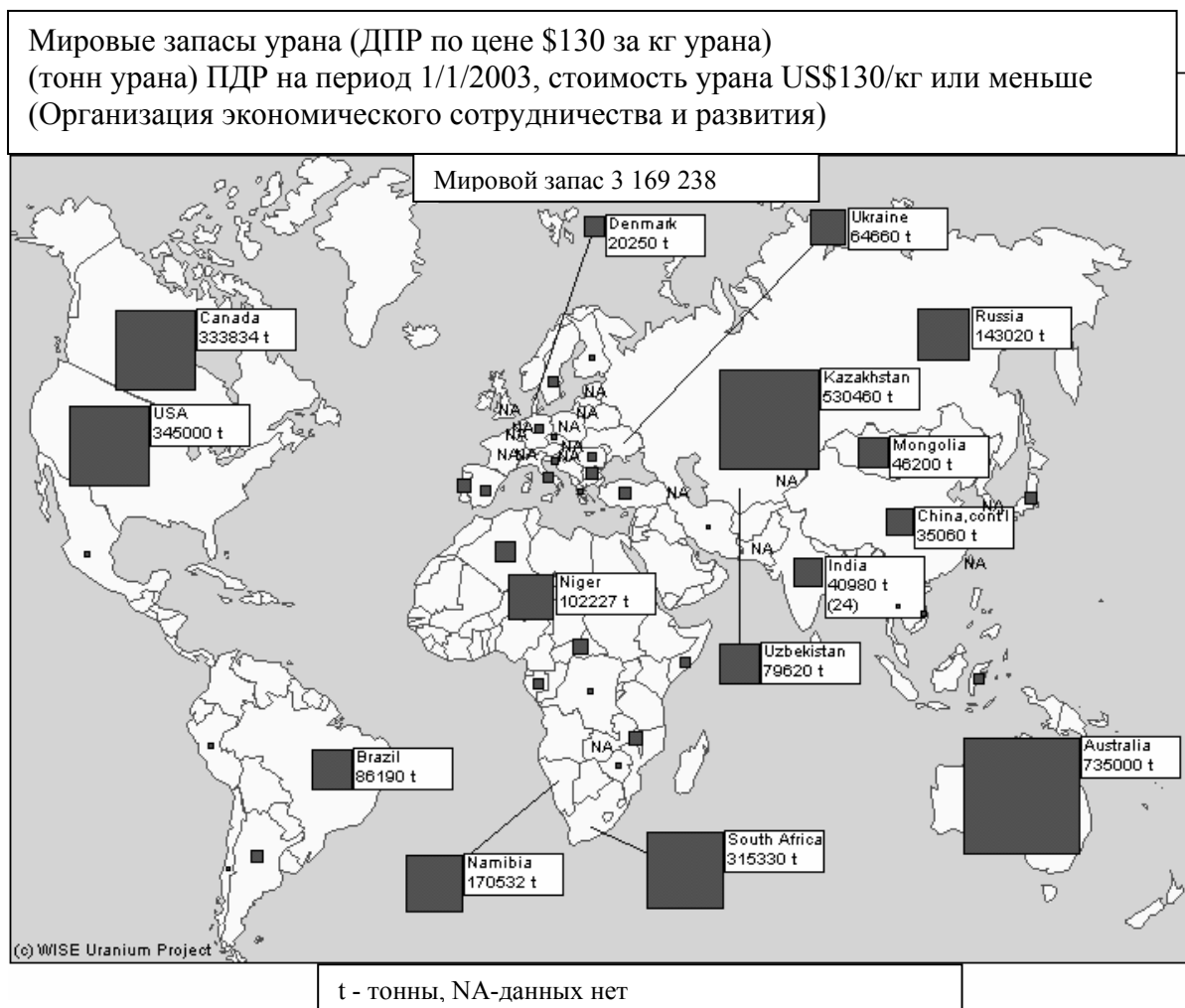
отчисление денег на утилизацию отходов в тот момент, когда начинается добыча. Но даже эта мера не может гарантировать, что не будут привлечены средства налогоплательщиков: средства, отложенные для очистки от РАО мест урановой добычи, принадлежавших обанкротившейся Atlas Corp в Моабе (Юта, США), например, составляют лишь три процента от стоимости программы очистки, которая тянет на US\$ 300 миллионов. В Австралии закрытие Рэйнджер Майн стоит около 176 миллионов австралийских долларов, из которых есть лишь 65 миллионов. В случае, если бы компания ERA, которой принадлежит Рэйнджер Майн, обанкротилась - налогоплательщикам пришлось бы платить за утилизацию отходов.

## Запасы урана

### Первичные ресурсы

Месторождения урана обычно классифицируются по размеру подтвержденных запасов руды и стоимости её извлечения. Согласно авторитетной «Красной Книге» (АКК 2004), «известные ресурсы», которые можно добыть так, чтобы стоимость была ниже \$130/кг (эквивалентный US\$50/фунт U3O8) составляют приблизительно 4,6 миллиона тонн урана во всём мире. Кроме того, так называемые «необнаруженные запасы», которые можно добыть за те же деньги, составляют 6,7 миллиона тонн урана, плюс 3,1 миллиона тонн урана, стоимость добычи которого неизвестна. Так как «необнаруженные запасы» - как следует из названия — являются лишь теоретически подтвержденными, дальнейшее обсуждение будет ограничено «известными ресурсами», включая категории ДПР (Достаточно проверенные ресурсы) и ПДР I (Предполагаемые дополнительные ресурсы I). Рис. 2 показывает мировую карту ДПР, добыча которых стоит менее US\$130/кг урана (WUP 2005).

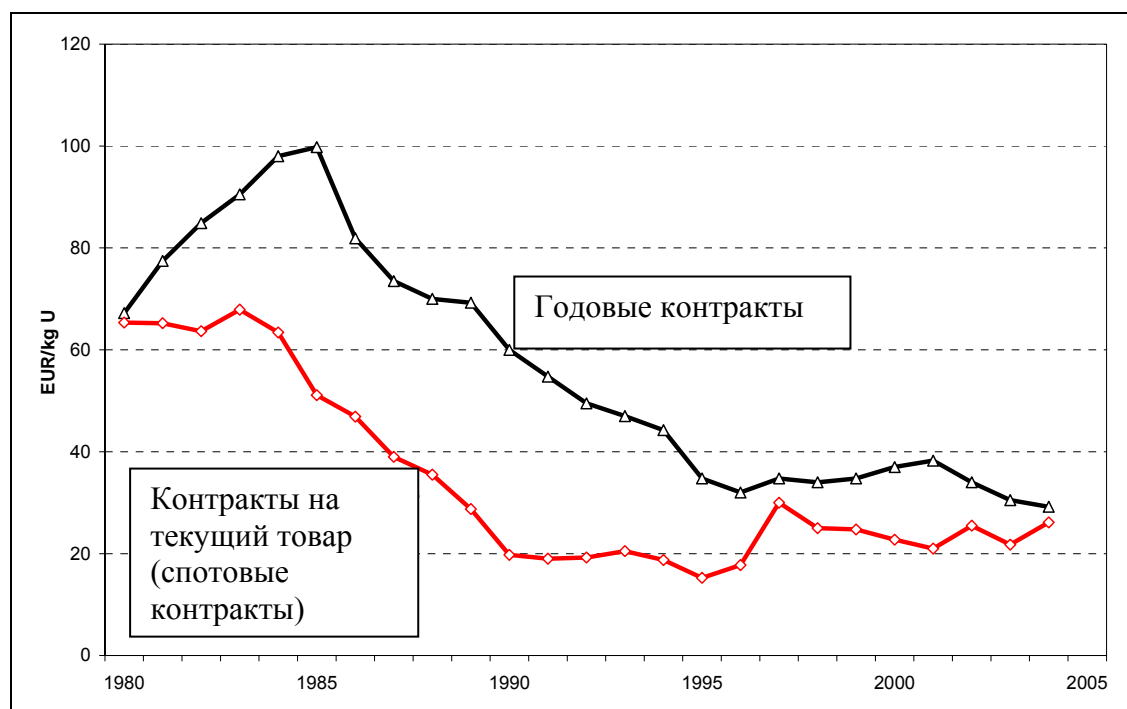
Рис. 2.



Уран, в отличие от любого другого сырья, найден на всех континентах. Но лишь немного стран являются основными источниками урана, в особенности если речь идет о рудах с высоким содержанием урана, которые можно добыть по низкой цене.

Достигнув пика приблизительно в US\$ 43/фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> в конце 1970-х, цена урана на рынке скоро опустилась до US\$ 10/фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. В конце 2000 г., она даже опускалась до самого низкого уровня - US\$ 7/фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, но затем начала подниматься снова, достигнув US\$ 33/фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 10 октября 2005 г.. Средняя цена урана по «спотовым» и годовым контрактам в Европе с 1980 до 2004 г. показана на Рис. 3 (ESA 2005).

**Рис. 3. Цены на Уран (Агентство поставки Евроатома)**



В течение двух десятилетий из-за снижения цен на уран работы по разведке месторождений урана свелись к минимуму. Но теперь они снова растут, в частности с тех пор, как цена на уран на рынке достигла в сентябре 2004 г. US\$ 20/фунт U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>; много геологоразведочных компаний открылись заново или изменили свой подход. В результате новые данные могут увеличить количество известных источников. В то время как открытие крупномасштабных месторождений не является невозможным, всё-таки более вероятно, что ведущиеся работы выявят в основном небольшие месторождения с низким содержанием урана в руде. Единственное исключение - Ши Крик (Саскатчеван, Канада), где, возможно, обнаружено крупное месторождение. Впервые за 20 лет.

Несколько месторождений урана в настоящее время недоступны для добычи из-за политических препятствий. Самый известный пример – это крупное месторождение в Джабилуке на территории Северной Австралии. Участок окружен Национальным парком Какаду, но включен в список мирового наследия ЮНЕСКО. Из-за препятствий со стороны традиционных владельцев (коренных народностей), компания ERA была вынуждена остановить разработку месторождения и засыпать склон, на котором уже велась работа. Другой пример - Кроунпойнт, в Нью-Мексико (США). По этому проекту, осуществлявшемуся на земле Навахо, было приостановлено действие лицензии в мае 2000 г. по запросу от местных истцов. Тем временем, Совет Навахо (одна из народностей североамериканских индейцев) издал закон, запрещающий добычу и переработку урана на земле Навахо. Закон вступил в силу 29 апреля 2005 г., но может быть изменен федеральным правительством.

Лицензия на добычу урана на озере Маклин (Саскатчеван, Канада) была аннулирована в сентябре 2002 г. решением суда по требованию местной экологической организации. Однако компания Cogema, которой принадлежит месторождение, добилась в марте 2005 г. возобновления работ через суд.

Предполагаемые новые шахты по добыче урана в индийских провинциях Джарканд, Андхра Прадеш, и Мегхалаи встретили сильное сопротивление коренных жителей и экологических групп.

Оппозиция состоит не только из экологических организаций или коренных жителей: в Австралии три штата (Квинсленд, Виктория и Западная Австралия) запретили добычу урана. Хотя это и не удерживает геологоразведочные компании, идущие на риск ради продолжения работы в этих штатах. Они очевидно надеются на пересмотр политики, зная, что действующее федеральное правительство благосклонно относится к добыче урана.

В дополнение к тем месторождениям, где уран добывается как основной ресурс, существует несколько типов месторождений, где уран - только сопутствующий продукт, добываемый вместе с золотом, медью или фосфатами.

В Южной Африке весь уран добывается как побочный продукт добычи золота. Однако, учитывая неблагоприятный обменный курс местной валюты и недавние низкие цены на уран, в настоящее время остался всего один золотой рудник (Ваал Ривер), добывающий ещё и уран. Кроме того, малая доходность многих южноафриканских золотых рудников может повлечь за собой закрытие многих шахт, уменьшая перспективы развития урановой добычи.

Шахта «Олимпик Дам» в Австралии работает на очень большом месторождении меди. Уран добывается как побочный продукт. Несмотря на низкое содержание урана (0,053%), общее количество урана там составляет 302 000 тонн - это самое крупное урановое месторождение в мире. В настоящий момент происходит дискуссия об удвоении годового объёма добычи.

Фосфат имеет среднее содержание урана от 0,005 до 0,02%. Потенциальное содержание урана в известных мировых запасах фосфата находится в диапазоне 5-15 миллионов тонн урана (эта цифра не содержится в оценках, приведённых выше). Главные месторождения расположены в Иордании, Марокко, Соединённых Штатах и Мексике. Существуют различные технологии, чтобы выделить уран – в мире работает около 400 установок, использующих мокрый процесс с фосфорной кислотой, которые могут обеспечить производство до 11 тысяч тонн урана в год дополнительно. В то время как множество заводов по добыче урана было построено в странах, таких как Соединённые Штаты, Канада, Испания, Бельгия, Израиль и Тайвань, большинство из них было закрыто из-за недавнего снижения цен на уран, но их перезапуск мог бы стать экономически выгодным снова с повышением цен на уран.

Кроме того, несколько типов больших, но малопродуктивных месторождений урана не включены в мировые оценки урановых ресурсов, самые известные – месторождения чёрного сланца с содержанием урана от 0,005 до 0,04%. Из-за их большой протяжённости по площади они содержат очень большие запасы урана – 169 230 тонн в Роннебурге (Германия), 254 000 тонн в Ранштаде (Швеция), и 4-5 миллионов тонн в Чаттануге Шале (США). Но кажется, даже сторонники ядерной энергетики не уверены, что эти запасы урана когда-либо будут использованы: «Чёрный сланец содержит большой запас урана, добыча которого будет сопровождаться очень высокими издержками производства, развитие которого потребовало бы огромных шахт, перерабатывающих заводов и хранилищ РАО, что привело бы к серьёзной экологической оппозиции. Кроме того, область Роннебург в настоящее время - предмет многомиллиардного проекта восстановления «Висмута». Поэтому месторождения чёрного сланца представляют долгосрочный ресурс, для разработки которого потребуется, чтобы рыночные цены на уран достигли US\$ 130/кг, а также преодоление экологической оппозиции, что впрочем необходимо в случае всех трёх месторождений» (МАГАТЭ 2001).

Другой потенциальный запас урана, обсуждаемый время от времени – это морская вода: она содержит 3 мг/т урана, но полный запас оценен в 4 миллиарда тонн. Продолжаются исследования относительно улучшения технологии добычи, но пока этот способ

неконкурентоспособный с учётом текущих цен на уран, энергетический и экологический баланс ещё не оценён.

### **Вторичные ресурсы**

Вторичные ресурсы – ресурсы, для которых не требуется обрабатывать урановую руду. Они включают уран из других источников, таких как отработавшее топливо, оружейный уран и обеднённый уран, плюс имеющиеся запасы выделенного урана.

**Уран из отработавшего топлива:** Извлечение урана из ОЯТ в настоящее время осуществляется на перерабатывающих заводах в Ла-Аг (Франция) и Селафилд (Великобритания). Однако до настоящего времени лишь незначительная часть полученного урана была использована для изготовления нового топлива. И нет никаких надежд, что ситуация может измениться в ближайшем будущем.

Как было обнаружено в недавнем сообщении французского Суда аудиторов, предприятие Электриситэ де Франс (ЭФ) произвело запас переработанного урана (ПУ) на 250 лет вперёд. Из 1050 тонн ОЯТ, ежегодно образующегося во Франции в настоящее время, 850 тонн подвергаются переработке в Ла-Аг (кроме того, существуют 100 тонн отработавшего МОКС-топлива, которые не могут быть переработаны вообще). В результате переработки извлечено приблизительно 816 тонн урана и 8,5 тонны плутония. Для долгосрочного хранения примерно 650 тонн из этого количества обращены в более устойчивую оксидную форму. Уран, восстановленный на бывшем перерабатывающем заводе Маркул, так и не был использован для производства нового топлива. Он всё ещё находится в Маркуле, в форме жидкого уранилнитрата: 3800 тонн, принадлежащие ЭФ, и 4800 тонн, принадлежащие СЕА и Согёма.

Использование переработанного урана (ПУ) проблематично по нескольким причинам. Из-за того, что ПУ загрязнен искусственными изотопами урана U-232 и U-236, при обработке необходимы специальные меры предосторожности: U-232 и его продукты распада увеличивают дозу облучения персонала, а U-236, как нейтронный поглотитель, требует более высокого уровня обогащения. Как следствие, использование ПУ становится не очень привлекательным на существующем рынке: изготовление из него ядерного топлива в три раза дороже по сравнению с природным ураном. По причинам, связанным с применяемой технологией, единственный завод, подходящий для обогащения ПУ во Франции (принадлежит компании Eurodif) не может работать с этим материалом из-за опасности загрязнения искусственными изотопами. Для производства двух тепловыделяющих сборок на основе ПУ, которые затем были испытаны на АЭС Круас, материал был обогащён на иностранном (по-видимому, в России) центрифужном заводе.

**Разбавление ВОУ:** Высокообогащенный уран (ВОУ) из списанных ядерных боеголовок может быть смешан с низкообогащенным ураном (НОУ) для использования в качестве ядерного топлива.

В 1993 г., Соединённые Штаты и Россия заключили соглашение ВОУ-НОУ, согласно которому Россия должна была поставлять обеднённый уран, изготовленный из 500 тонн ВОУ в Соединённые Штаты в течение двадцати лет. Это количество ВОУ представляет собой эквивалент 153000 тонн естественного урана, а его конверсия задействует 92 миллиона разделительных единиц.

Поставки согласно этому соглашению (НОУ, полученный из 30 тонн ВОУ, ежегодно заменяет приблизительно 9000 тонн природного урана) продолжатся до 2013 г.

Тем временем, Соединённые Штаты начали смешивать собственный ВОУ. В общей сложности для этих целей выделено 153 тонны ВОУ; приблизительно 39 тонн уже переработаны, остальное будет переработано до 2016 г. (NEA 2004)

К сожалению, в ВОУ содержится не только U-235, но и большое количество U-234. Если «нежелательный» уран-234 оказывается в ядерном топливе, то скорее всего топливо не сможет соответствовать принятым стандартам. Поэтому желательно смешивать ВОУ с материалом, в котором содержание U-234 низко.

В России данная проблема решается путём обогащения урановых хвостов (радиоактивные отходы добывающей промышленности) и получения смеси с содержанием 1,5% по урану-235, для чего используются избыточные мощности центрифужных заводов. Этот подход в дальнейшем позволит России выполнить обязательства по соглашению ВОУ-НОУ, не затрагивая запасы природного урана. Наиболее интересно, что обогащение хвостов требует большего количества мощностей, нежели тех же мощностей высвобождается при разбавлении ВОУ (Diehl 2004). Огромное количество работы для создания ВОУ, таким образом, сделано впустую; происходит лишь восстановление урана в прежнем состоянии.

**Уран за счёт обогащения «хвостов»:** Отходы, являющиеся результатом обогащения урана, называют обеднённым ураном или «хвостами». Они находятся в форме гексафторида урана (UF<sub>6</sub>) и всё ещё содержат некоторое количество делящегося изотопа урана U-235, который может быть извлечён дальнейшим обогащением. С 1996 года «хвосты» западноевропейских обогатительных компаний Уренко (URENCO) и Евродиф (Eurodif) посылают в Россию для дообогащения. В России обогащают не природный уран, а эти хвосты на предприятиях, принадлежащих Росатому - Российскому Федеральному Агентству по атомной энергии (ранее - Минатом). Продукт, полученный через дообогащение, - главным образом материал, эквивалентный природному урану. Этот продукт посылают назад в Уренко и Евродиф, в то время как вторичные «хвосты» остаются в России, где они далее повторно обогащаются до состояния, аналогичного природному урану. Этот материал используется для разбавления ВОУ. Судьба оставшихся «хвостов», в количестве не менее двух третей от ввезённого, до сих пор неизвестна. В мае 2005 г., компания Cogéma/Areva объявила, что подписано соглашение с российским Техснабэкспортом о передаче технологии обесфторивания, которая позволяет переводить гексафторид урана (UF<sub>6</sub>) обратно в форму U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, что является более подходящей для хранения формой. В августе 2005 г. Росатом объявил, что «хвосты» могут быть использованы в быстрых реакторах (!).

В настоящее время Уренко и Евродиф посылают 7000 тонн урановых «хвостов» в Россию для дообогащения ежегодно и получают обратно около 1100 тонн эквивалентного природному урану. Eurodif, кроме того, получает 130 тонн урана в форме UF<sub>6</sub>, обогащённого до 3,5 процентов. Для Urenco и Eurodif дообогащение связано прежде всего с уклонением от утилизации хвостов. Для Росатома вследствие этих контрактов возникает возможность использовать избыточные мощности по обогащению. Urenco предполагает, что контракт на дообогащение с Россией будет разорван после 2010 г. Детали относительно бизнеса дообогащения могут быть запрошены у Питера Диля (Diehl 2004).

Если цена на уран будет расти, обогатительные компании пойдут по пути использования радиоактивных отходов обогащения. Таким образом они снизят потребности в природном уране за счёт дообогащения. И будут производить такое же количество урана, используя меньшее количество природного материала.

**Запасы природного и низко-обогащённого урана:** Доступна только небольшая часть информации о запасах низко-обогащённого и природного урана в мире. Это одна из причин неуверенности в прогнозах относительно развития уранового рынка. Природные запасы урана составляют 41 633 тонны, а запасы ВОУ составляют эквивалент 23 440 тонн природного урана (NEA 2004); но эти данные ненадежны, так как информация из большинства стран недоступна .

### **Замена урану**

Продолжительность использования урана может быть продлена за счёт использования других делящихся материалов, например плутония, или изотопа урана-233, который может быть получен через облучение тория.

**Плутоний (МОКС-топливо):** Что касается топлива, которое используется в легководных реакторах - расщепляющийся изотоп урана U-235 может быть заменен изотопом

плутония-239. Его смешивают с природным или немного обогащённым ураном, чтобы получить смешанное оксидное топливо (МОКС). Пригодный для использования плутоний может быть получен за счёт переработки ОЯТ или из ядерного оружия. Центр Международной безопасности и Сотрудничества в Стэнфордском Университете оценивает общее количество оружейного плутония в 92 тонны, этого хватит, чтобы заменить 11 040 тонн природного урана, а количество энергетического плутония - в 252 тонны, которые смогут заменить 30 240 тонн природного урана. Некоторые особенности производства и обращения с МОКС-топливом таковы, что против его использования выступают некоторые политики. В частности, беспокойство вызывает опасность и экологические последствия переработки ОЯТ, необходимой для выделения плутония, а также необходимость транспортировок на большие расстояния.

В сентябре 2000 г., Соединённые Штаты и Россия подписали соглашение об утилизации оружейного плутония, согласно которому каждая страна утилизирует по 34 тонны этого материала в течение следующих двадцати пяти лет. Плутоний должен быть использован для изготовления МОКС-топлива. С этой целью Соединённые Штаты планируют построить завод по производству МОКСа на объекте Саванна Ривер Сайд в Южной Каролине, в то время как российский завод должен быть построен в Северске, недалеко от Томска. Сборки с американским плутонием были изготовлены на заводах в Кадараше и Маркуле во Франции и доставлены для испытаний в Катобу (Южная Каролина) в апреле 2005 г.

Плутоний, произведённый в коммерческом реакторе, может быть выделен во время переработки ОЯТ. Пока такая переработка главным образом имеет место в Европе, в Ла-Аг (Франция) и Селафилде (Великобритания), но только некоторая часть накопленного ОЯТ подвергается переработке. В дополнение к экологическим проблемам, связанным с этим процессом, переработка имеет ограничения: свежее топливо (которое превращается в ОЯТ, поступающее на переработку), должно быть сделано из природного урана. В противном случае, если свежее топливо сделано из переработанного материала, нежелательные изотопы загрязнят выделенный плутоний. В 2003 г. АЭС Евросоюза (они пока главные потребители МОКС-топлива), использовали МОКС с общим количеством плутония - 12,12 тонн, что эквивалентно 1450 тоннам природного урана и 0.97 млн единицам разделения.

**Торий:** Индия, ведущая страна по количеству месторождений с низким содержанием урана и с большими месторождениями тория, как и другие страны, рассматривает создание топливного цикла на основе тория. Сам торий (Th-232) не подвергается ядерному делению и таким образом не может поддерживать цепную реакцию, но когда он подвергается нейтронному облучению, то превращается в расщепляющийся изотоп урана U-233, который может использоваться в качестве реакторного топлива. Процесс, однако, требует сильного нейтронного источника, ядерного реактора на урановом или плутониевом топливе для облучения тория. Таким образом, торий не исключает, а только уменьшает потребность в уране. Уран-233 может быть выделен при переработке и превращен в топливо или сожжен. Однако эта технология довольно-таки трудноосуществима, так как отработавшее ториевое топливо очень плохо растворяется в азотной кислоте (это требуется во время переработки), а уран-233 представляет серьёзную радиационную опасность из-за присутствия урана-232 и сильных гамма-излучающих продуктов его распада.

Прототипы реакторов на основе тория (AVR в городе Jülich и THTR 300 в городе Hamm-Uentrop, Германия) были закрыты вследствие технических проблем. Их топливо было сделано из тория и высокообогащённого (!) урана, помещенных в графитовую оболочку.

Даже если бы технологические проблемы ториевого топливного цикла были решены, запасы тория также ограничены, а эксплуатация привела бы к новым экологическим проблемам.

Южная Африка планирует начать эксплуатацию реактора PBMR (доп. информацию смотри в статье Энтони Фрогатта, выпуск 2). Однако, этот тип реактора использует только уран, несмотря на свою схожесть с THTR 300).

## Выводы о ресурсах урана

Мировые ресурсы урана могут быть описаны следующим образом: известные первичные ресурсы (возможно добывать при рыночной цене до US\$ 130/кг) включают 4,6 миллиона тонн урана. Вторичные ресурсы добавляют еще 0,21 миллиона тонн природного уранового эквивалента (это добавляет пять процентов к природным ресурсам). Трудно определить, сколько урана можно получить из ОЯТ или за счёт дообогащения – это сильно зависит от наличия и мощности производственных установок). Кроме того, плутоний может заменить около 0,04 миллиона тонн природного урана.

## Спрос и предложение на уран

В 2003 г. во всём мире номинальная производительность урановых шахт составила 47260 тонн. Но в реальности произведено было лишь 35 772 тонн или 76 процентов от уровня общей производительности. С другой стороны, потребление в том же самом году составило 68 435 тонн урана. Таким образом, шахты обеспечили лишь 52 процента, остаток был обеспечен вторичными ресурсами. Учитывая, что вторичные ресурсы иссякнут менее чем через десять лет, производство урана из шахт должно будет почти удвоиться, чтобы удовлетворить спрос. А это значит, что будет построено много новых шахт, так как увеличение производства невозможно только за счёт существующих мощностей. Однако увеличить добычу в короткие сроки невозможно, для этого потребуются около десяти лет или больше. Кроме того, есть лишь немного месторождений, готовых к разработке, так как исследования почти не велись в течение прошлых двух десятилетий из-за низких цен на уран. И так как известные запасы урана в рудах с высоким содержанием очень ограничены, увеличение производства должно будет происходить за счёт месторождений с низким содержанием урана в руде. Это приведёт к чудовищным экологическим последствиям. Если предложения о расширении использования ядерной энергии в мире будут поддержаны, то все вышеописанные проблемы усугубятся.

Таблица 1. Ежегодное производство урана по странам в 2003 г. (WNA 2005)

Номер	Страна	Тонн урана	% мировой добычи	Примечания
1.	Канада	10457	29,2 %	
2.	Австралия	7572	21,2 %	
3.	Казахстан	3300	9,2 %	
4.	Россия	3150	8,8 %	с)
5.	Нигер	3143	8,8 %	
6.	Намбия	2036	5,7 %	
7.	Узбекистан	1770	4,9 %	
8.	Соединённые Штаты	846	2,4 %	
9.	Украина	800	2,2 %	с)
10.	Южная Африка	758	2,1 %	а)
11.	Китай	750	2,1 %	с)
12.	Чешская Республика	345	1,0 %	
13.	Бразилия	310	0,9 %	
14.	Индия	230	0,6 %	с)
15.	Германия	150	0,4 %	б)
16.	Румыния	90	0,3 %	с)
17.	Пакистан	45	0,1 %	с)
18.	Аргентина	20	0,1 %	
	Общее мировое количество	35772	100,0 %	

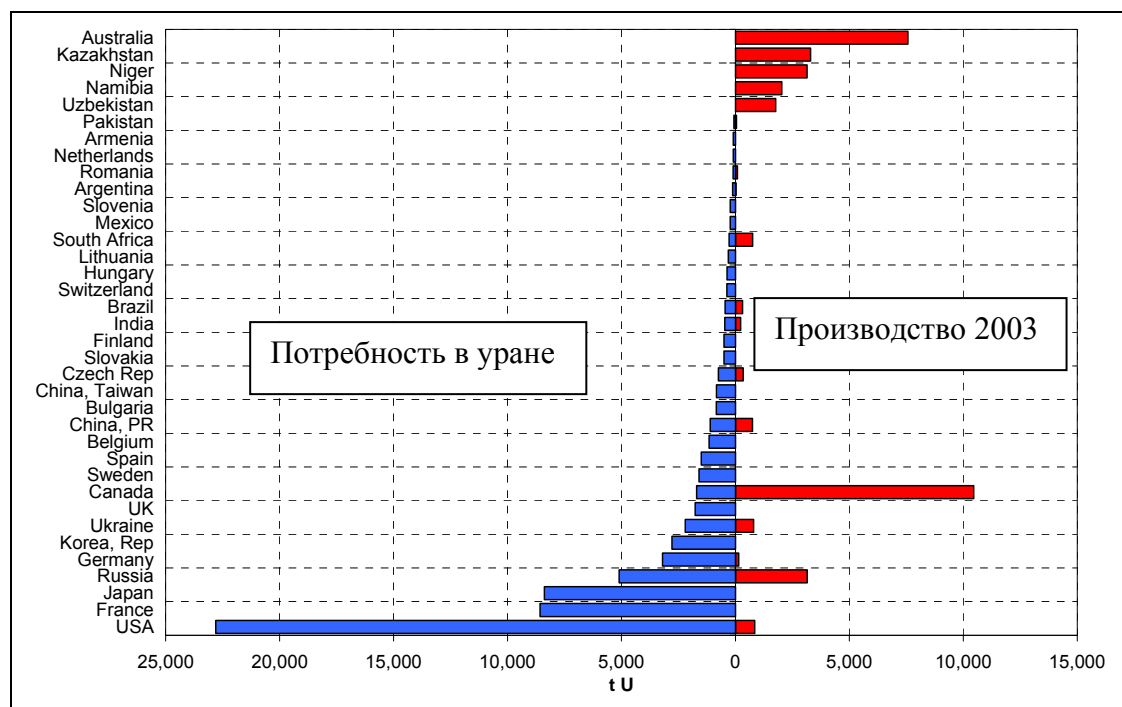
а) Уран, извлекаемый при добыче золота

б) В результате вывода АЭС из эксплуатации

с) Оценка WNA

Другой аспект - региональная неустойчивость спроса и предложения. Ни одна страна-потребитель, за исключением Канады и Южной Африки, не может удовлетворить спрос на уран с помощью собственного производства. И многие современные крупномасштабные потребители, за исключением Соединённых Штатов и России, имеют незначительные запасы урана. Только семь стран производят больше урана, чем необходимо для внутренних потребностей (если таковые имеются), см. Рис. 4 (NEA 2004).

Рис. 4. Потребность в уране и его производство в 2003 г. (тонн урана)



Особенно серьёзной является ситуация в России: начиная с распада Советского Союза, Россия была отрезана от главных ресурсов урана, главным образом в Казахстане. При современных масштабах производства 3150 т/г (2003), запас России будет истощён через пятнадцать лет. Кроме того, ежегодные потребности самой России составляют 5100 тонн урана (2003), что превышает производство на 1950 тонн. Кроме того, у России имеются планы построить несколько новых реакторов. В отсутствие урана, страна столкнётся с серьёзным кризисом через довольно короткое время. Российские чиновники теперь даже предлагают вести добычу на месторождениях в Якутии (больших, но с низким содержанием урана) только для того, чтобы добыть хоть что-то. Это желание подстёгивается тем фактом, что свободные обогатительные мощности используются не для обогащения природного урана, а для дообогащения импортных «хвостов», чтобы иметь материал для разбавления ВОУ. Количество мощностей, требуемое чтобы получить этот материал из природного урана, было бы существенно ниже. Таким образом, высвободилась бы часть мощностей, первоначально используемых для производства ВОУ.

Эта ситуация должна быть особенно интересна Европейскому союзу (ЕС), так как в 2003 году Россия поставила в ЕС около 35% от всех ядерных материалов. Эти поставки состояли из: 3400 тонн природного урана, 1000 тонн урана, полученного в результате дообогащения хвостов, и 1300 тонн урана, полученного за счет разбавления ВОУ.

Индия и Китай намереваются претворить в жизнь программы по ядерной энергии и таким образом станут потенциальными крупномасштабными потребителями урана. Однако они располагают только очень ограниченными запасами этого материала.

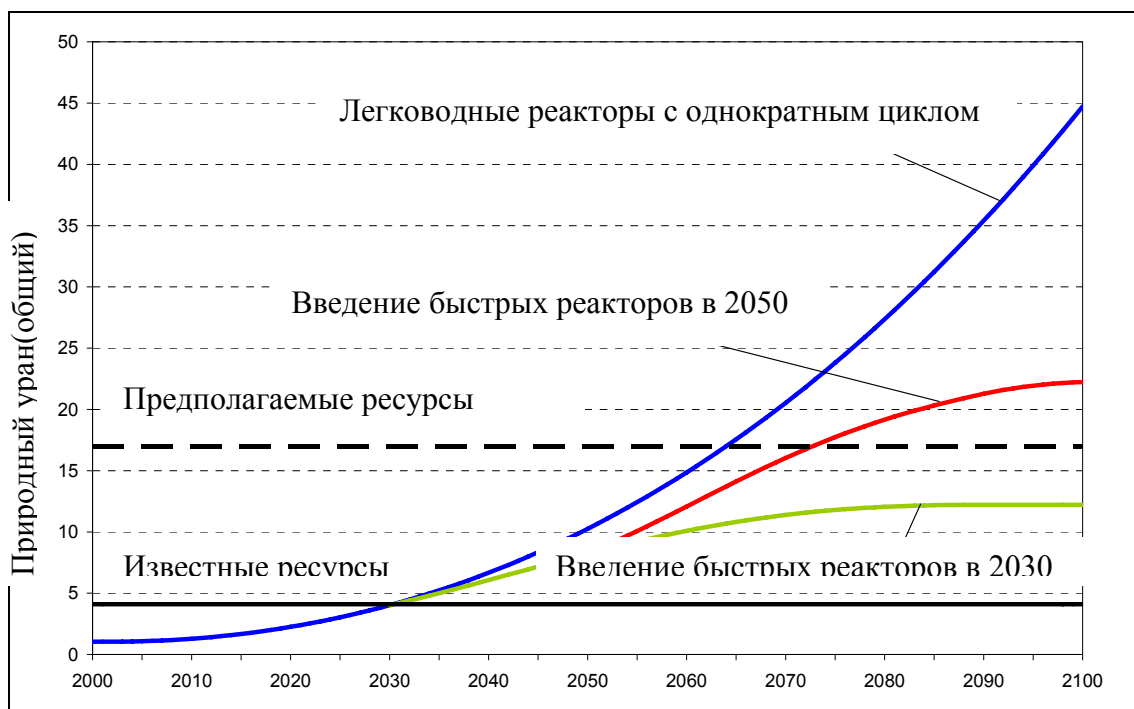
Индия, не присоединившаяся к Договору о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), испытывавшая ядерное оружие в 1974 г., не имеет никакого доступа к иностранным ресурсам урана. Собственные ресурсы Индии небольшие и с низким содержанием урана. Но, не имея другого выбора, Индия в настоящее время планирует разрабатывать новые месторождения в нескольких частях страны, провоцируя разъярённое коренное население и экологические организации. Усилия Индии в области ториевого цикла нужно рассматривать в этом же контексте. Однако есть некоторые признаки того, что Индия пытается найти политическое решение этой дилеммы: 31 марта 2005 г. она ратифицировала Конвенцию по ядерной безопасности, которая открывает индийские АЭС для иностранных инспекций.

Китай хотел бы импортировать уран из Австралии, однако это пока невозможно из-за международных обязательств поставщика. Китай не желает допускать инспекторов МАГАТЭ на свои объекты, что необходимо для подтверждения мирных целей китайской ядерной программы. Несмотря на всё это, в феврале 2005 г. Китай и Австралия начали переговоры, направленные на то, чтобы сделать урановые поставки возможными.

Но даже если бы все эти проблемы были преодолены, должен быть учтён ещё один аспект: насколько хватит подтверждённых запасов урана. Известные ресурсы могли бы удовлетворять сегодняшние потребности в течение семидесяти лет. Однако строящиеся новые реакторы увеличат потребление урана. Рис. 5 показывает, сколько урана потребуется в будущем при условии, что ядерная энергетика останется на сегодняшнем уровне эффективности в области выработки электроэнергии (NERAC 2002). При существующем плане развития и использовании урана в однократном цикле (не подвергая переработке) в реакторах на лёгкой воде, известные ресурсы урана истекли бы приблизительно в 2030 г., а предполагаемые ресурсы - приблизительно к 2060 г. Поэтому ядерная энергетика сможет существовать только при условии новых разработок урана — ценою высоких экологических и экономических издержек.

Ограничения известных запасов урана могли быть преодолены массивным использованием быстрых (бридерных) реакторов. Бридерная технология могла бы увеличить период использования известных урановых запасов до 60 лет. Однако технические проблемы привели к закрытию всех опытных реакторов, за исключением одного в России. Россия и Китай всё ещё считают эту технологию способной удовлетворить их потребности в электроэнергии.

**Рис. 5. Мировое использование запасов урана**



## **Заключение**

### ***Расширение добычи урана, в то время как проблемы прошлого не решены***

- *Возрождающаяся горнодобывающая промышленность создаст новые экологические проблемы и долги, в то время как существующие проблемы - наследие Холодной войны - всё ещё не решены во многих странах.*

### ***Известные запасы становятся недостаточными для удовлетворения увеличивающегося спроса***

- *Известные месторождения руды могут удовлетворять спрос до 2030 г. (без переработки ОЯТ), предполагаемые ресурсы закончатся приблизительно к 2060 г. Поэтому урановая промышленность будет обращать всё большее внимание на месторождения с низким содержанием урана в руде, что ведёт к серьёзным негативным экологическим последствиям.*
- *Вторичные ресурсы в настоящее время обеспечивают почти половину потребностей в уране, однако их количество составляет пять процентов от мировых запасов природного урана.*

### ***Нехватка добывающих мощностей***

- *Уранодобывающая промышленность должна удвоить производство в течение приблизительно десяти лет, чтобы удовлетворять сегодняшний спрос. Но существующих мощностей для этого не хватит. Лишь небольшое количество новых шахт может быть открыто в этот срок, а подготовка дополнительных шахт займёт длительное время.*
- *Какой-либо рост спроса может быть удовлетворён только увеличением добывающих мощностей.*

### ***Региональные несоответствия спроса и предложения***

- *Наиболее крупные потребители урана имеют очень небольшие его запасы и должны будут импортировать этот материал. Только семь стран обеспечивают свои нужды и могут экспортировать уран.*
- *Особенно сомнительной является ситуация в России, которая стоит на пороге серьёзного кризиса. Этот кризис будет иметь влияние на поставки урана в ЕС, который в настоящее время зависим от России.*
- *Проблемы со снабжением урана будут развиваться быстрее, если Индия и Китай, не имеющие значительных урановых ресурсов, начнут обещанное масштабное развитие атомной энергетики.*
- *Кроме того, возникнут серьёзные проблемы в области охраны урановых грузов, направляющихся в Россию, Индию, и Китай.*

### **3 Обращение с ядерными отходами**

#### **Транспортировка**

Без транспортировки радиоактивных материалов ядерная энергетика не сможет существовать, потому что транспортировки обеспечивают связь между отдельными стадиями ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Примеры транспортируемых материалов – гексафторид урана, новые и отработавшие топливные элементы, и многие виды РАО. Во всем мире ежегодно совершается приблизительно 100 000 транспортировок, связанных с ЯТЦ; в Германии происходит около 10 000 перевозок ежегодно. Часть транспортируемого сырья преодолевает длинные расстояния, например, гексафторид урана от Германии до России (приблизительно 1000 км по земле) или плутоний с перерабатывающего завода во Франции в Японию (больше чем 15 000 миль по морю). В некоторых местах происходит сосредоточение транспорта (перерабатывающие предприятия, временные предприятия хранения, порты). В интересах безопасности населения и транспортных рабочих, система транспортировок должна быть хорошо продумана, с учётом возможных несчастных случаев и радиационного облучения транспорта. В большинстве стран ядерные транспортировки ограничиваются одним-двумя маршрутами. Например, немецкие АЭС снабжаются топливом, произведённым в Швеции, тогда как шведские электростанции снабжены топливом, сделанным в Германии.

Для транспортировки радиоактивных материалов применяют рекомендации МАГАТЭ. Рекомендации направлены на уменьшение опасности до «приемлемого» уровня. Философия безопасности основана на том, как упаковать радиоактивный материал. Требования по надёжности упаковки зависят от того, какой материал находится внутри. Для транспортировки высокорadioактивного вещества контейнер должен выдерживать серьезные нагрузки. Требования следующие: выдерживать падение с высоты 9 м на плоский объект, падение с высоты 1 м на стальной брусок, температуру 800°C в течение 30 минут, погружение на глубину 15 м на 8 часов. Эти требования часто критикуются, потому что подобные стандарты могут обеспечить некоторую безопасность, но не учитывают всех возможных опасностей. Например, такие требования по безопасности не гарантируют сохранность контейнера при столкновении с транспортным объектом, передвигающимся со скоростью 80 км/ч на скалистой площадке, или при нахождении в туннеле, где происходит пожар в течение 30 минут. В таких случаях, произойдет выход радиации в окружающую среду и сильное облучение населения.

В последние годы случилось небольшое количество несчастных случаев при транспортировках в рамках ЯТЦ. Информации об утечках радиации не публиковалось. Однако было заявлено о существенном увеличении числа транспортировок из-за ввода в строй новых АЭС, хранилищ отходов и т.п. в некоторых странах. К счастью, никаких серьезных несчастных случаев до сих пор не происходило. Но это всё-таки возможно при каждой транспортировке.

Нельзя добиться абсолютной безопасности при транспортировке радиоактивного материала. Не существует эффективной защиты транспортного средства и контейнера от террористических нападений. Несчастные случаи или террористические атаки во время транспортировки высокоактивных отходов, ОЯТ, плутония могут привести к смертельным дозам облучения в непосредственной близости и в пределах нескольких километров от места аварии. В таком случае потребовалось бы переселение или эвакуация людей, живущих в радиусе нескольких километров (Large and Associates 2004).

## Переработка ОЯТ

В шестидесятых и начале семидесятых годов прошлого столетия, существовала мечта: бесконечная работа атомных электростанций, обеспечивающих всю необходимую энергию дёшево. ЯТЦ тогда казался «вечным двигателем». После использования свежего уранового топлива в реакторах его требовалось переработать, чтобы выделить уран и плутоний, затем использовать эти материалы для производства нового топлива для бродерного реактора, где количество плутония в топливе увеличивается. Отработавшее в бродере топливо нужно было снова переработать, чтобы получить ещё больше плутония. Однако мечта не осуществилась. Ввиду проблем в области безопасности, несовершенства экспериментальных реакторов и высокой стоимости, программы развития бродеров были приостановлены в большинстве стран. Сначала - в Соединённых Штатах (в 1977 году), несколько лет спустя - в Германии, и позже - в Великобритании и Франции. Сегодня только Япония, Россия и Индия имеют интересы в области бродерных реакторов. Однако разработки в этих странах идут медленно и отстают от запланированных сроков. В дополнение к описанной ситуации можно отметить, что основная причина переработки ОЯТ пропала. Без развитой бродерной технологии непрерывная «переработка» топлива невозможна. Однако ядерная промышленность в некоторых государствах продолжает переработку. Теперь выделенные уран и плутоний планируют использовать уже в легководных реакторах в виде МОКС-топлива. Не в каждой такой стране есть предприятия, осуществляющие переработку ОЯТ. Например, в Германии было принято решение отказаться от переработки в 1989 году, исходя из экологических соображений и экономических причин. Немецкое ОЯТ перерабатывается во Франции и Великобритании; там же, но в гораздо меньших количествах перерабатывают ОЯТ из Бельгии, Швейцарии и некоторых других стран. В эксплуатации сейчас находятся следующие перерабатывающие предприятия:

Табл. 2. Перерабатывающие предприятия в мире:

<i>Страна</i>	<i>Местоположение</i>	<i>Производительность [т/год]</i>
<i>Франция</i>	<i>Ла-Аг (UP2-800)</i>	<i>1 000</i>
	<i>Ла-Аг (UP3)</i>	<i>1 000</i>
<i>Великобритания</i>	<i>Селлафилд (B205)</i>	<i>1 500</i>
	<i>Селлафилд (THORP)</i>	<i>1 200</i>
<i>Россия</i>	<i>«Маяк» Челябинск (RT1)</i>	<i>600</i>
<i>Япония</i>	<i>Токай Мура (Токай)</i>	<i>100</i>
<i>Индия</i>	<i>Таранур (PREFRE)</i>	<i>400</i>
	<i>Калтаккам (KARP)</i>	<i>100</i>

Источник: WISE-Paris

Все данные в таблице номинальные - как правило, ни один из заводов не достигает этих объёмов производительности. В частности, известно, что THORP в Селлафилде никогда не работал на полную мощность. Следует отметить, что переработка в военных целях производится во Франции, Великобритании, России и Индии, а в Соединённых Штатах и Северной Корее переработка ведётся только в целях оборонной промышленности.

Переработка – сложный химический процесс. ОЯТ разрезают на куски и погружают в азотную кислоту. После этого выделяют уран и плутоний, а остальные материалы (отходы) подвергаются дальнейшей обработке. В результате переработки появляются:

- *плутоний*
- *уран*

- *низко-, средне- и высокоактивные отходы*
- *радиоактивные выбросы в атмосферу и сбросы в водоёмы*

Если подвергнуть переработке восемь отработавших урановых топливных элементов, то из полученных материалов можно сделать один МОКС-топливный элемент, что будет сопровождаться образованием огромного количества РАО.

### **Плутоний/МОКС**

В настоящее время результатом переработки в гражданских целях является плутоний. Обычное топливо легководных реакторов содержит приблизительно 1% плутония. Теоретически ежегодно можно выделять 5-6 тонн плутония.

Плутоний должен быть использован для производства МОКС-топлива. В действительности очень трудно использовать весь этот материал. Во всем мире существуют только небольшие производственные мощности для производства МОКСа. В промышленном масштабе производство существует только во Франции и Бельгии. Завод по изготовлению МОКС-топлива в Селлафилде работает с 2001 года, но его эксплуатация не была идеальной и включала в себя грубые ошибки персонала. В России нет завода для изготовления МОКСа, в Японии и Индии существуют только небольшие экспериментальные установки. Таким образом, вопрос повторного использования плутония остается туманным. Технологии, связанные с окончательным захоронением этого материала, не разрабатываются, существует лишь вариант иммобилизации плутония (смешивание с высокоактивными отходами и жидким стеклом/керамикой).

Вопросы безопасности и доз облучения при работе с МОКСом более значимы, нежели в случае с урановым топливом:

- *Плутоний более радиоактивен. Вдыхание менее 0,1 мг плутония смертельно.*
- *Риск, связанный с критичностью при обращении и производстве плутония намного выше, чем в случае с ураном.*
- *Существует риск распространения плутония как в течение процессов переработки и изготовления МОКСа, даже если они протекают без аварий, так и вследствие несчастных случаев при переработке, хранении, транспортировке и обращении с плутонием, а также при изготовлении МОКСа и его транспортировке.*
- *Легководные реакторы первоначально не были разработаны для использования в них МОКСа. Работа с таким топливом возможна только при снижении требований по безопасности (реактор менее стабилен, остановить его сложнее).*
- *При использовании МОКСа количество плутония в активной зоне увеличивается, радиологические последствия более опасны.*
- *Более высокие уровни выделения тепла и нейтронной радиации приводят к тому, что количество сложностей при транспортировке, хранении, и использовании МОКС-топлива возрастает.*
- *При современном положении вещей и с использованием существующих технологий невозможно использовать МОКС в промышленном масштабе. Окончательное захоронение плутония вызовет затруднения, связанные с более высоким тепловыделением, нейтронной радиацией и критичностью. По сравнению с прямым захоронением уранового топлива, это более сложно, опасно и дорого.*

### **Уран**

Уран достигает приблизительно 99 процентов от отработавшего топлива. В большинстве стран только малая часть (или даже вовсе никакая) переработанного урана попадает снова в

реактор (в гражданском секторе). Эта часть включает в себя небольшое количество делящегося урана и большие количества нуклидов урана с нежелательными радиационными характеристиками. Большая часть выделенного при переработке урана просто хранится. Небольшое количество урана используется для изготовления брони и артиллерийских снарядов, а также при производстве самолётов. По сути выделенный из ОЯТ уран бесполезен, так как его невозможно использовать в реакторах, так что следует запретить его применение в других областях, где целесообразно использовать нерадиоактивные материалы. Для этого материала не разработаны технологии окончательного захоронения или новые подходы по обращению.

### ***Отходы***

Долгоживущие радионуклиды, первоначально сконцентрированные в ОЯТ, после переработки оказываются распределёнными между разными видами радиоактивных отходов переработки. Некоторые виды отходов – высокоактивны и выделяют большое количество тепла. Благодаря переработке количество радиоактивных отходов увеличилось в 100 раз или больше, по сравнению с объёмом ОЯТ. Это происходило на всех установках по переработке, кроме Ла-Аг, где для некоторых видов РАО применяли свои методы.

Все отходы необходимо строго учитывать и обеспечивать их временное хранение. Это ведёт к повышенным дозам радиации во время безаварийной работы и риску несчастных случаев и аварий. В частности, РАО хранят в жидком виде, что создаёт дополнительную опасность. В Селлафилде только небольшая часть отходов, произведённых на заводе THORP с 1994 г., была остеклована. Экспериментальный перерабатывающий завод WAK в Германии был закрыт в 1990 г.; приблизительно 80 кубометров жидких высокоактивных отходов хранятся на предприятии до сих пор. Запланированное остекловывание должно серьёзно уменьшить риск несчастного случая при хранении и транспортировке. Но радиация и тепловыделение остаются серьёзной проблемой даже в этом случае.

### ***Излучение***

Радиоактивное излучение во время растворения топлива, выделения урана и плутония, обработки и хранения отходов - неизбежно. Несмотря на системы защиты и профилактические меры часть радионуклидов все же попадает в атмосферу. Количество радиации, выбрасываемой ежегодно перерабатывающими заводами Селлафилд и Ла-Аг, в десятки и даже тысячи раз больше, чем выбросы с легководных реакторов (Marignac и Coeytaux 2003). В результате люди облучаются вследствие радиоактивного загрязнения почвы, зданий, фауны и флоры. Согласно немецким нормам, оба перерабатывающих завода не получили бы лицензию в Германии. (Око-Institut 2000). В некоторых исследованиях отмечается, что выбросы влияют на заболеваемость лейкемией у детей (около Ла-Аг уровень в 3 раза превышает обычный, около Селлафилда – в 10 раз). Прямое влияние на заболеваемость лейкемией со стороны перерабатывающих предприятий окончательно не доказано, но и не опровергнуто. Кроме того, проводились исследования по определению уровня облучения различных птиц и морских животных. Оказалось, что мясо птиц и морских животных, подвергшихся облучению радиацией с перерабатывающих предприятий, не удовлетворяет нормам ЕС по импорту пищевых продуктов.

Радиация с перерабатывающих предприятий распространяется не только на соседние области. Жидкие РАО попадают в океан и широко разносятся течениями. Радионуклиды из Селлафилда были обнаружены на побережье Ирландии. Традиционные рыбацкие нации вроде Норвегии опасаются радиоактивного загрязнения в районах промысла, например в Арктике.

### ***Отсутствие экономической выгоды от переработки***

Кроме вышеупомянутых аргументов, к негативным аспектам переработки можно отнести:

- *В случае с легководными реакторами цель переработки недостижима. Использование полученного из ОЯТ урана в промышленном масштабе пока невозможно из-за отсутствия технологий. Следовательно нет экономически оправданных инструментов для экономии урана, а также нет способа уменьшить количество плутония в РАО, подлежащих захоронению. В докладе для французского правительства от 2000 г., было сообщено, что переработка и МОКС-топливо в лучшем случае помогут уменьшить потребности в уране на 10%, а также снизить на 15% количество плутония в отходах (Marignac и Coeytaux 2003).*
- *Серьёзные аварии на перерабатывающих заводах реальны. В частности, существует пример, когда разрыв трубы привел к утечке 83 кубометров растворенного ОЯТ. В официальных публикациях сообщалось, что никакого воздействия на окружающую среду не произошло, так как утечка произошла в изолированное помещение. Но эта утечка была обнаружена только спустя несколько месяцев, и только удачное стечение обстоятельств не привело к серьёзным последствиям.*
- *В связи с переработкой ОЯТ на Ла-Аг каждый год осуществляется приблизительно 450 транспортировок плутония или содержащих плутоний материалов. Общая протяженность всех транспортировок по Франции составляет 250 000 км. Здесь не учитываются транспортировки урансодержащих материалов. Очевидно, что топливный цикл без переработки требовал бы куда меньше транспортировок.*
- *Переработка увеличивает число объектов, способных стать мишенями террористических атак. Помимо транспортируемых материалов, такими мишенями могут быть отдельные объекты крупных комплексов. В частности, если самолет врежется в хранилище для ОЯТ или жидких высокоактивных отходов или же в здание для хранения выделенного плутония, то последствия превзошли бы по масштабам аварию на Чернобыльской АЭС.*
- *Переработка неэкономична. Несколько исследований на примере Германии, произведенных OECD/NEA, сравнили замкнутый топливный цикл и однократный. В результате было обнаружено, что цикл с переработкой дороже на 14-50% (Gruppe Ökologie 1998). Новые данные, рассчитанные для Соединённых Штатов, показали увеличение расходов на 80% в случае, если топливный цикл будет включать в себя переработку (Випп 2003). Несмотря на то, что выводы этих исследований в пользу переработки, экономическая нецелесообразность – более важный фактор.*

В заключение необходимо сказать, что переработка ОЯТ не несёт в себе ощутимой выгоды для безопасности, физической защиты, утилизации отходов или экономики.

### **Временное хранение**

Независимо от типа ядерного цикла (с переработкой или без) необходимо организовать временное хранение ОЯТ и радиоактивных отходов. Для отработавшего топлива и отходов с высоким уровнем активности требуется длительное время хранения для снижения тепловыделения и уровня радиоактивности. Для низко- и среднеактивных отходов необходимо организовать временное хранение на период между различными стадиями обращения с ними и окончательным захоронением.

Для хранения ОЯТ используются три подхода (МАГАТЭ 1995):

- *влажное хранение в бассейне выдержки*
- *сухое хранение в специальных контейнерах*

- *сухое хранение в емкостях, помещенных в вертикальные или горизонтальные шахты, стенки которых усилены бетоном*

Только в некоторых случаях влажное хранение (в Швеции) и сухое хранение (в одном из четырнадцати хранилищ в Германии) осуществляются под землёй. Сухое хранение обеспечивает более низкую вероятность аварий, так как нет систем охлаждения, которые могут выйти из строя, а вероятность коррозии ниже. По этим причинам, а также из экономических соображений, в последние годы предпочтение отдают сухому хранению ОЯТ. С другой стороны, механические воздействия на оболочку выше в случае с сухим хранением, а также должна быть гарантия сохранности контейнеров в течение нескольких десятилетий. Состояние контейнеров в течение такого длительного срока трудно прогнозировать. Это зависит от типа топлива и типа контейнера. Хранилища часто не имеют удовлетворительного защитного барьера против излучения (влажное хранение) или не имеют подходящих средств наблюдения за излучением (сухое хранение). Также нет никакой эффективной системы многоуровневой защиты в случае серьезных воздействий, например крушения самолёта. В большинстве случаев есть только один барьер (сухое хранение в контейнерах) или никакого (влажное хранение в Ла-Аг, Франция). Сравнение уровней безопасности показывает, что преимущество остается за хранением в контейнерах, но риск излучения всё же остаётся. Можно повысить уровень безопасности, но это экономически невыгодно.

Хранилища могут быть расположены на территории АЭС или на некотором удалении (в случае централизованного национального хранилища). Хранение на АЭС предпочтительнее, так как сокращается количество транспортировок. Например, в Германии в последние годы главенствовала именно эта тенденция (BFS 2005).

Приблизительно 95 процентов всех радиоактивных отходов - низко- или среднеактивные. Такие отходы хранятся в наземных хранилищах. В случае длительного периода хранения необходимо кондиционирование помещения по соображениям безопасности. Это особенно важно для газообразных и жидких отходов. Такая процедура снижает вероятность выбросов радиации в процессе обращения с РАО. Однако долгий срок хранения и газ, выделяющийся вследствие взаимодействия между РАО, материалом, с помощью которого они изолированы, и упаковкой могут представлять проблему для безопасности, особенно если для иммобилизации использовался бетон.

В случае серьезных аварий возможны большие выбросы радиации, несмотря на более низкую активность отходов по сравнению с ОЯТ и высокоактивными отходами. Например, в результате падения самолета. Из-за более низкого уровня радиоактивности таких РАО стандарты безопасности ниже, чем те, которые установлены для хранения ОЯТ или высокоактивных отходов.

Хранение низко- и среднеактивных отходов может быть осуществлено около реактора или в централизованном хранилище. Предпочтительнее выглядит первый вариант, так как он не требует транспортировок и соответствующих затрат.

Необходимо учитывать риск террористических атак, которые могут быть направлены как против АЭС, так и против хранилищ ОЯТ. Реакторы могут стать основной мишенью, но опасный потенциал больших хранилищ (например, на европейских перерабатывающих заводах) как минимум сопоставим с АЭС. В то же время контейнерное хранение ОЯТ вызывает стойкую неприязнь атомной промышленности в некоторых странах, например в Германии. Кроме того, доступ к хранилищам проще за счет меньшего количества мер физической защиты. Поэтому временные хранилища также могут стать целью для террористов.

## **Окончательное захоронение**

### **От чего нужно избавиться?**

Производство энергии на АЭС — так же как и деятельность в определенных областях науки, медицины, и промышленности — связано с появлением радиоактивных отходов (РАО). Излучение, исходящее от РАО, может вызывать генетические мутации и раковые заболевания, и, таким образом, представляет опасность для людей и окружающей среды. Поэтому радиоактивные отходы должны быть изолированы от окружающей среды. Методы обращения с РАО определяются уровнем их опасности. Этот уровень главным образом определяется по типу и интенсивности радиоактивного излучения, а так же по сроку, в течение которого радиоактивное вещество остается опасным для людей и окружающей среды. Дополнительные факторы – такие свойства РАО, как например интенсивность выделения тепла.

Подробно спектр радиоактивных отходов, возникающих в различных странах, и различия в обращении с ними зависят не в последнюю очередь от того, включает ли ядерная программа той или иной страны переработку ОЯТ, как, например, во Франции, или ОЯТ планируется захоранивать. Страны, которые не подвергают ОЯТ переработке, рассматривают его де-факто и де-юре как отходы.

Период времени, в течение которого отходы представляют угрозу людям и окружающей среде, зависит от периода полураспада различных радиоактивных элементов, содержащихся в РАО. Элементы с периодом полураспада менее 30 лет обычно называются короткоживущими. Радионуклиды с более длинным периодом полураспада называются долгоживущими и содержатся в высокоактивных РАО, а иногда и в отходах средней активности. Большая часть этих отходов образуется в результате производства атомной энергии. Один из радионуклидов особенно длинного периода полураспада – уран-235 (период полураспада: 704 миллиона лет). В процессе производства атомной энергии появляется большое количество радиоизотопов с разными периодами полураспада - например, плутоний-239 (период полураспада - 24110 лет), цезий (период полураспада – 30,2 года), кобальт 60 (период полураспада – 5,3 дня), которые могут быть обнаружены в различных категориях отходов.

Тепловыделение происходит вследствие распада. У многих радиоизотопов период полураспада недолог, что облегчает обращение с ними. Для окончательного захоронения отходов, однако, продолжающееся выделение тепла может создавать такие проблемы, которые связаны с длительным воздействием тепла на изолирующие материалы.

Несмотря на то, что защитные меры и принципы безопасности при обращении с РАО в большинстве стран похожи, есть четкие отличия относительно методов переработки отходов, выбранных для различных типов РАО. Причинами этих отличий служат, например, экономические или организационные условия, связанные с масштабами национальной атомной программы и ответом на вопрос «переработка ОЯТ - да или нет?».

Основные критерии для определения метода переработки РАО - тип, интенсивность радиоактивного излучения, период полураспада доминирующих радиоизотопов. РАО делятся на следующие категории:

- *низкорadioактивные отходы*
- *РАО промежуточного уровня (среднеактивные)*
- *высокорadioактивные отходы*

Низко- и среднеактивные отходы, содержащие, прежде всего, короткоживущие радиоизотопы, период полураспада которых менее или равен 30 годам, и отходы, в которых содержатся радиоизотопы с большим, чем 30 лет периодом полураспада, хранятся отдельно. Высокоактивные изотопы с коротким сроком полураспада образуются в результате военных

программ и учитываются только в тех странах, которые ведут военные программы. В Соединенных Штатах для захоронения таких отходов был организован репозиторий в соляной шахте около Карлсбада, Нью-Мексико (1999). Отходы, появляющиеся в результате производства атомной энергии, обычно содержат большое количество долгоживущих радиоизотопов, которые утилизируют вместе со среднеактивными РАО. Однако из-за различного уровня тепловыделения, есть потребность в разделении этих категорий.

В зависимости от типа отходов и требований по безопасности, для различных типов определены различные методы захоронения. Для короткоживущих изотопов в составе низко- и среднеактивных РАО захоронение предусмотрено в наземных установках (такая практика установлена во Франции и Соединенных Штатах) или близко к поверхности (Швеция и Финляндия) (см. главу 5). Все долгоживущие и высокоактивные отходы должны быть захоронены под землей, в глубоких геологических формациях.

В отличие от этой международной практики, после принятия решения о репозиториях в Горлебене и Конраде, РАО в Германии начали разделять по уровню тепловыделения, а период полураспада играет незначительную роль. В отличие от некоторых других стран (Франция), это позволяет Германии решать проблему отходов с низким уровнем излучения с помощью локальных хранилищ. А часть низкоактивных РАО можно использовать в коммерческой деятельности, если уровень радиации ниже уровней, установленных в Декрете о Радиационной защите (STRLSCHVO 2001). В других странах (Франция) низкорadioактивные отходы помещают в наземные хранилища, построенные специально для таких целей.

### ***Фактическая ситуация***

Научно-техническая дискуссия об управлении РАО происходит как минимум с тех же пор, когда началось обсуждение грани между военным и гражданским использованием атомной энергии. Уже в 1950-60-х гг. XX столетия обсуждался широкий диапазон методов обращения с отходами. Помимо окончательного захоронения, все еще обсуждающегося сегодня, этот диапазон включал в себя такие экзотические варианты, как утилизация РАО в космосе или в Антарктических ледниках. В первую очередь дискуссия касалась среднеактивных долгоживущих изотопов и высокоактивных РАО, включая ОЯТ. В течение шестидесятих годов прошлого столетия была принята концепция окончательного захоронения этих отходов в глубинных геологических формациях. Выбор места в различных странах зависит от геологической ситуации и местных политических и социальных условий. Решающими факторами для выбора метода обращения с РАО служат стандарты безопасности и экономические аргументы.

Утилизация низко и среднеактивных РАО менее затруднена. На заре развития атомной энергетики происходило захоронение в морях, а в некоторых странах РАО помещали в долговременное наземное хранилище. В 1993 году Лондонская Конвенция остановила захоронение РАО в морях. Сегодня в нескольких странах уже действуют или строятся репозитории для окончательного захоронения низко- и среднеактивных отходов. В Германии также запланировано осуществить геологическое захоронение. Для репозитория на месте железного рудника Конрад, в городе Зальцгиттере, в 2000 году была выдана соответствующая лицензия.

Окончательное захоронение означает помещение РАО в репозиторий, разработанный специально для изолирования отходов от людей и окружающей среды. Обычно захоронение не подразумевает намерений когда-нибудь извлечь отходы обратно. В зависимости от типа отходов и периода времени, в который они будут излучать радиацию, РАО помещают в наземном сооружении или захороняют в подземных шахтах. На поверхности утилизация возможна только для короткоживущих низко- и среднеактивных РАО. Наземные репозитории - сооружения, изолирующие отходы от людей и окружающей среды посредством технических барьеров. Эти сооружения требуют контроля и обслуживания. Для геологических репозиториях долгосрочная

защита людей и окружающей среды обеспечивается геологическими барьерами, которые не требуют обслуживания (см. главу 4).

В настоящий момент репозитории для долгоживущих высокорadioактивных отходов не существует, хотя в течение семидесятых и даже шестидесятых годов прошлого столетия несколько стран предпринимали шаги, направленные на обеспечение окончательного захоронения отходов. Однако почти все страны стоят перед фактом отсутствия разработанных программ обращения с отходами. Главная причина - недооценка научно-технических и социальных проблем, связанных с реализацией таких планов. Сопrotивление населения планам захоронения отходов возродило обсуждение вопросов обращения с отходами. Относительно далеко продвинулись в планировании и осуществлении своих программ лишь США (объект Юкка Маунтайн) и Финляндия (АЭС Olkiluoto).

### ***Принципы и требования в области безопасности***

На международном уровне главные цели в области безопасности при утилизации радиоактивных отходов состоят в следующем:

- *Окончательное захоронение должно гарантировать, что люди и окружающая среда защищены от радиации и других опасностей.*
- *Потенциальные эффекты окончательного захоронения для людей и окружающей среды не должны ухудшить сложившуюся ситуацию.*
- *Будущие поколения не должны быть обременены трудностями вследствие сегодняшней деятельности по захоронению РАО.*
- *Потенциальное влияние окончательного захоронения на людей и окружающую среду других стран не должно быть серьезнее, чем влияние в пределах осуществляющей захоронение страны.*

Во многих государствах, включая все страны Европейского союза, вышеуказанные принципы были отражены в законодательстве и требованиях по безопасности. В частности, это верно для радиационных стандартов, действующих при захоронении РАО. Также указанные принципы применяются для совершенствования стандартов. Как пример можно привести введение принципа минимизации влияния в законодательство нескольких странах, включая Декрет о радиационной защите Германии.

Стандарты для долгосрочной оценки безопасности репозитория указывают максимальную приемлемую дозу облучения людей и связанный с этим риск заболеть раком. Действующие стандарты разных стран определяют в качестве максимальной дозу в диапазоне от 0,1 до 0,3 мЗвт ежегодно. Обычно стандарты, связанные с риском, находятся в диапазоне от 10 в минус 4-й степени до 10 в минус 6-й степени. Это означает, что только один человек из 10 000 или 1 миллиона соответственно, облученный в течение всей жизни максимальной допустимой дозой, может заболеть раком.

Стандарты могут быть применены к репозиторию только после того, как территория его размещения всесторонне исследована. Применение требования минимизации облучения может быть применено только на стадии утверждения проекта и строительства. Принципы минимизации включают в себя:

- *исключение необязательного излучения или загрязнения людей и окружающей среды;*
- *поддержание радиоактивного облучения или загрязнения на минимальном уровне, насколько это возможно с использованием передовых технологий в каждом конкретном случае — даже если существующие дозы облучения или уровень загрязнения ощутимо ниже принятых стандартов.*

В дополнение к радиационным требованиям есть требования в области защиты окружающей среды, которые необходимо учитывать и выполнять. В Германии требуется учитывать т.н. принцип озабоченности, записанный в Водном Акте. Этот принцип требует защитить водные ресурсы, особенно грунтовые воды, от радиоактивного загрязнения или любого другого загрязнения в случае захоронения РАО.

Для последовательного достижения объявленных целей Международная комиссия по радиационной защите предлагает включить в каждую фазу проектирования репозитория улучшенные меры защиты от радиации (ICRP 1998). Это означает применение обоснованной процедуры, включающей концепцию изменения безопасности (система мультибарьера), для выбора подходящей площадки для репозитория. Похожая идея в сочетании с требованиями по защите грунтовых вод отражена в разработанном, но еще не опубликованном документе «Принципы безопасного окончательного захоронения», который разработан немецким федеральным департаментом по радиационной защите (BFS 2004).

Немецкий комитет по процедуре выбора площадки (AKEND) предложил новую процедуру выбора места для репозитория, в которой отражены следующие радиологические и нерадиологические требования, учитывающие вклад геологических барьеров в долговременную безопасность:

- *В случае нормального функционирования репозитория, не должно быть никакой утечки вредных веществ из изолированной зоны в течение одного миллиона лет. Должен быть продемонстрирован запас прочности в отношении изоляции опасных веществ.*
- *В случае экстраординарных событий, должны быть соблюдены существующие стандарты в отношении влияния на людей и окружающую среду.*

В целом эти требования должны помочь найти подходящую площадку для репозитория: выбранный участок должен наилучшим образом удовлетворять правилам поиска и определения площадки, разработанным на основе современных научно-технических знаний, и в любом случае удовлетворять основным требованиям по безопасности.

### ***Почему репозитории располагают в глубоких геологических формациях?***

В рамках общих требований по окончательному захоронению, главная цель утилизации РАО в глубоких геологических формациях - изоляция отходов от людей и окружающей среды в течение долгого периода времени. Во всем мире этот принцип применяется к высокоактивным и долгоживущим среднеактивным РАО. Сегодня лучшим вариантом считается захоронение в шахте, специально построенной для этих целей.

Напротив, короткоживущие низко- и среднеактивные РАО в большинстве стран утилизируют на небольшой глубине под землей или даже в наземных сооружениях. В отличие от этого подхода, в Германии довольно рано (1963-1967 гг.) было принято решение утилизировать все виды РАО в глубоких геологических формациях. Главными причинами для этого послужили плотное заселение Германии и интенсивное использование земли и воды (Schwibach 1967). Этот альтернативный подход к утилизации РАО был осуществлен в Германии, когда произошло первое «испытательное» захоронение в закрытой соляной шахте (Asse II) рядом с Вольфенбюттелем (1967–1978 гг.), а затем когда короткоживущие низко- и среднеактивные РАО захоронили в Морслебене (1978–1998 гг.).

Можно смело утверждать, что захоронение в глубоких геологических формациях имеет решающие преимущества по сравнению со всеми другими вариантами наземной утилизации РАО, а именно:

- *большое расстояние между отходами и биосферой;*

- высокая и долгосрочная эффективность в сдерживании радионуклидов и прочих вредных веществ геологическими барьерами;
- медлительность геологических процессов, включая миграцию веществ в геосфере, и, как следствие, надежность выводов о функционировании репозитория в течение долгого времени;
- пассивное функционирование главных барьеров (геологических барьеров) системы захоронения, не требующих контроля и ремонта.

Кроме того, свойства геосферы, обеспечивающие эти преимущества, могут подвергнуться влиянию человека только в незначительной степени. Поэтому долгосрочная безопасность репозитория не зависит от технического и экономического потенциала будущих поколений. Предполагать что-либо об этом потенциале труднее, нежели спрогнозировать геологические изменения (Buser 1997; Gruppe Ökologie 2001; AKEND 2002). Кроме того, вскрытие репозитория в случае войны или террористического акта является маловероятным.

Очевидно, что эти преимущества равны для всех видов радиоактивных отходов, но они не рассматриваются как необходимые для изоляции короткоживущих изотопов всеми странами и учреждениями, т.е. используются не везде. Однако эти преимущества эффективны только если площадка для репозитория была отобрана с учетом аспектов безопасности и если пригодность продемонстрирована с помощью доказательств долгосрочной безопасности.

### ***Окончательное захоронение – обязательно ли оно с и без использования атомной энергии***

Радиоактивные отходы различного происхождения уже существуют во всех странах с ядерными программами или исследованиями. Эти отходы уже не исчезнут, даже если отказаться от атомной энергии. Управление этими отходами остается необходимым.

Задержки в появлении репозитория для долгоживущих высоко- и среднеактивных РАО в разных странах показывают, что утилизация отходов – огромная научно-техническая и общественная проблема. Эта проблема будет расти вместе с увеличением количества отходов. Напротив, отказ от производства ядерной энергии облегчит решение проблемы утилизации РАО: с одной стороны, количество отходов, которые нужно захоронить, будет легче разделить на разные категории и собрать в отдельных местах, что облегчит выбор площадки для репозитория; с другой стороны, готовность людей одобрить строительство репозитория увеличится. Напротив, неограниченное использование атомных электростанций значительно увеличило бы требования по вместимости репозитория или даже привело бы к потребности в нескольких репозиториях.

### ***Какие проблемы возникают при окончательном захоронении?***

Захоронение РАО в наземных репозиториях не обладает преимуществами геологического захоронения (Gruppe Ökologie 2001): отходы помещены непосредственно в пределах биосферы и было бы рискованно оставить репозиторий без внимания, оценив его, как пассивную систему барьера. Вклад геологических барьеров в защиту людей и окружающей среды несравненно выше. Поэтому технические барьеры требуют особых мер контроля и ремонта. Доступность РАО и террористическая опасность – проблемы, которые требуют обеспечения дополнительных защитных мер, сдерживающих нежелательное вмешательство. Хотя наземные репозитории предназначены исключительно для короткоживущих радионуклидов, содержащихся в низко- и среднеактивных РАО, они нуждаются в наблюдении в течение нескольких столетий, чтобы гарантировать защиту для людей и окружающей среды. Гарантии надежности таких сооружений - условны. Таким образом оказывается, что окончательное захоронение в наземных репозиториях

может быть и является экономически удобным решением на сегодня, но оно рискованно и может привести к новым проблемам для будущих поколений.

Хотя захоронение радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях расценено и позиционируется сегодня как самый безопасный способ утилизации РАО, такой вариант тоже таит в себе проблемы. Так или иначе, существуют возражения против этого варианта, которые заключаются в следующем:

- *несопоставимость периода, в который РАО остаются опасными для людей и окружающей среды, с периодом, на который можно гарантировать надежность геологических барьеров;*
- *отсутствие возможностей наблюдения за изменениями геологических барьеров после закрытия и опечатывания репозитория;*
- *невозможность вмешаться в случае прекращения функционирования или отказа индивидуальных барьеров;*
- *необратимость окончательного захоронения после закрытия репозитория.*

Всё это верно, но эти опасения могут быть учтены если подходить к выбору участка со всей осторожностью, предусматривая долговременную безопасность с учётом всех значимых аспектов. Нельзя игнорировать и то, что варианты утилизации с возможностью восстанавливать отходы могут создать нежелательные последствия для долгосрочной безопасности.

Окончательное захоронение РАО в скальных породах, способных сдерживать радионуклиды, таит в себе определённую проблему: газ, выделяющийся из РАО, может повредить геологический барьер. С одной стороны, выделение газа в репозитории может приводить к образованию трещин в породе, с другой стороны, изменение химической среды вблизи РАО может облегчить или ускорить распространение радионуклидов. Выделение газа главным образом свойственно низко- и среднеактивным РАО. Согласно фактическим оценкам, влияние этого аспекта не является однозначным аргументом против геологического захоронения, но на него нужно обратить пристальное внимание при оценке долгосрочной безопасности и в процессе проектирования репозитория.

### ***Свидетельство долгосрочной безопасности, изоляции и период действия свидетельства***

Все геологические формации и все площадки, предназначенные для окончательного захоронения РАО, имеют свои преимущества и недостатки. Это рождает методологические требования для доказательства пригодности выбранного участка. Существуют требования и к процессу захоронения в глубоких геологических формациях, хотя он и считается наиболее предпочтительным вариантом с точки зрения безопасности. Свидетельство долгосрочной безопасности для какой-либо площадки может быть подвергнуто сомнению ввиду вышеупомянутых неудобств. Это сомнение вырастает из-за того, что рассматривается очень долгий временной отрезок, в течение которого доступа к РАО не будет.

Из-за длительности периода полураспада некоторых радионуклидов (см. главу 1), некоторые виды РАО представляют опасность для людей и окружающей среды в течение большого времени. Как следствие, изоляция отходов необходима в течение очень долгого времени. Наука не может дать надёжный прогноз в отношении репозитория, особенно его геологических барьеров, на весь период времени, в течение которого РАО сохраняют значительную опасность и должны быть изолированы от биосферы. Долгосрочное функционирование геологических барьеров зависит не в последнюю очередь от геологических и климатических процессов будущего. Некоторые из этих процессов бросают вызов надёжному долгосрочному планированию, но всё-таки обеспечивают основу для утверждений о долгосрочной безопасности репозитория.

Очевидно, что в настоящий момент невозможно предоставить научные доказательства того, что РАО будут надёжно изолированы в течение всего периода, пока сохраняется опасность для людей и окружающей среды. AKEND утверждает, что можно предсказать состояние геологических барьеров на следующий миллион лет, и что свидетельство долговременной безопасности может быть рассчитано на этот период (AKEND 2002). В других странах требования по долговременной безопасности похожи, но рассматривают куда меньший срок (до 10 000 лет). Однако, несмотря на уменьшение надёжности прогноза с увеличением рассматриваемого периода, нельзя игнорировать прогнозы, выходящие за рамки указанных временных периодов.

Неточности прогнозов могут усиливаться ввиду недостатка информации о репозиториях, о взаимодействии между отходами разных типов, о технических и геологических барьерах, учитываемых в прогнозах. Сейчас имеется возможность наблюдать за отходами и барьерами, однако невозможно наблюдать за течением процессов в репозитории, ведь нигде пока нет площадки захоронения, существующей долгое время. Но даже если появится геологический репозиторий и пройдёт достаточно времени, всё равно доступа внутрь не будет, как и возможности изучать происходящие там процессы.

Согласно AKEND, это означает, что принципы долговременной безопасности должны быть определены уже на стадии поиска площадки для репозитория (AKEND 2002). Эти принципы нужно знать и для того, чтобы делать более точные прогнозы. И возможность составить прогноз должна существовать уже на стадии выбора площадки. С другой стороны, получаемая для прогнозов информация должна действительно соответствовать результатам исследований площадки и необходимо предпринять все усилия, чтобы ликвидировать пробелы и неточности в массиве информации.

### ***Восстанавливаемость***

Восстанавливаемость означает возможность восстанавливать отходы (ОЯТ и прочие высокоактивные РАО) со складов в случае необходимости и без больших технических усилий. Восстанавливаемость радиоактивных отходов - проблема, обсуждаемая на международном уровне и сводящаяся к восстановлению ОЯТ. Восстанавливаемость захороненных отходов и обратимость процессов утилизации в настоящее время рассматривают во многих программах по обращению с РАО во всём мире (например, Соединённых Штатах, Швеции, Финляндии). Аргументы в пользу восстанавливаемости главным образом связаны с безопасностью, этическими и экономическими аспектами (NEA 2001), например:

- *технические проблемы, касающиеся безопасности, которые обнаружены после захоронения отходов, а также изменения в требованиях безопасности*
- *возвращение ресурсов из репозитория*
- *использование альтернативных методов обращения и утилизации РАО, которые могут появиться в будущем*
- *реагирование на изменения в общественном сознании и в восприятии риска*
- *свобода действия для будущих поколений.*

Окончательное захоронение – основная задача в любом плане, обсуждаемом в рамках международной дискуссии о восстанавливаемости. Прежде чем утилизация может быть закончена, нужно пройти через несколько фаз захоронения. Доступ к отходам становится всё более и более трудным с каждой фазой, и технические усилия, требуемые для восстановления, также увеличиваются. После запечатывания репозитория восстановление может быть произведено только с помощью горнодобывающих технологий. Нет никаких согласованных определений или точных описаний различных фаз. Период, в течение которого возможно простое

техническое восстановление, упоминаемый в разных странах, составляет от десятилетий до нескольких столетий.

Процесс обеспечения долгосрочной безопасности репозитория основан на тщательно выбранной пассивной необслуживаемой системе безопасности. Без предусмотренной фазы восстановления (облегченный доступ к отходам) безопасное состояние репозитория наступит довольно быстро. Однако если предполагается доступ с целью восстановления, то состояние пассивной безопасности будет достигнуто позднее – в зависимости от фаз восстановления. До тех пор будут требоваться различные меры безопасности в виде мониторинга и контроля, надёжность которых трудно гарантировать. Кроме того, активные меры по обеспечению безопасности требуют устойчивых социально-экономических условий, которые также нельзя гарантировать в течение длительного времени.

Этические принципы в отношении восстанавливаемости, в особенности свобода действий для будущих поколений, неубедительны. Неприемлемо бороться за выполнение этического принципа, если это неизбежно приводит к снижению безопасности. Защита текущих и будущих поколений сама по себе представляет фундаментальное этическое требование. Эта защита имеет самый высокий приоритет, потому что при отсутствии безопасности все другие аспекты становятся в значительной степени незначительными. Даже если выбор между различными вариантами остаётся открытым для будущих поколений, первичная ответственность решить проблему радиоактивных отходов всё ещё лежит на нынешнем поколении. Обсуждение восстанавливаемости не должно задерживать процесс организации репозитория, а желание обеспечить восстанавливаемость не должно мешать возведению хорошо оборудованных репозитория. С другой стороны, программа организации репозитория может включать в себя меры по обеспечению восстанавливаемости отходов. Недавно новая концепция, включающая расширенный мониторинг и облегченную восстанавливаемость, была предложена в Швейцарии. Она позволит «контролировать долгосрочную геологическую утилизацию» с использованием экспериментальных и пилотных установок, а также предусматривает организационные меры (ЕКРА 2000). В рамках проекта «Entsorgungsnachweis» уже выяснена техническая осуществимость этой концепции (NAGRA 2002), в настоящий момент происходит процесс принятия решения в отношении её реализации.

### ***Международные подходы к выбору участка для репозитория***

При выборе площадки (то есть места для безопасной утилизации отходов) используются различные подходы. Это обусловило ряд очевидных различий в процессе выбора площадки, существующих между разными странами. Главные причины различий:

- *различные концепции классификации мест утилизации и хранения РАО*
- *различные политические и юридические требования*
- *различные геологические условия в области исследований (национальная территория)*
- *различные требования для площадки (подходящая, самая лучшая)*

Во многих странах, действия по поиску площадок под репозитории начались в семидесятых. Выбор участка был расценён как научно-техническая задача. Прозрачность и отслеживаемость процесса принятия решения или вообще не учитывались, или учитывались в незначительной степени. В некоторых случаях существовало настолько сильное влияние на исследователей извне, что решение принималось не в результате заранее утверждённой процедуры, а под влиянием прочих аргументов (например, Gorleben, Германия; Юкка Маунтаин, Соединённые Штаты). Соответственно, ни один из национальных процессов выбора площадки из начатых в семидесятых, не привёл к вводу в эксплуатацию репозитория для высокоактивных РАО и ОЯТ.

Отрицательный опыт процессов по выбору площадок и общественные тенденции последних десятилетий привели к возросшему участию общественности в принятии решений во многих странах. Выбор площадки больше не расценивается как простой научно-технический процесс, а требует рассмотрения определённых социальных предпосылок и демократической легитимизации. Отслеживаемость и прозрачность процесса выбора площадки под репозиторий, а также готовность общества принять выбор, являются важными составляющими принятия решений во всем мире. Процесс должен включать в себя такие шаги, как:

- *определение необходимых процедур и критериев перед каждым этапом работ*
- *поэтапный подход, ясная структура процесса с определённым порядком работ и чёткой системой принятия решений и процедурой лицензирования*
- *участие общественности в процессе, начиная с ранних стадий (сотрудничество)*
- *учёт социо-научных критериев*
- *обоснование используемых критериев*

Однако национальные подходы различны вследствие описанных выше различий между странами и не все считают нужным предпринимать эти шаги.

Недостаток общественной поддержки при выборе площадки и низкая степень легитимности принятого решения - следствие того, что значение общественного участия часто недооценивается. Исключения - Швейцария и Швеция, Финляндия в некоторой степени. В контексте принятия решения ясно, что любые существенные шаги по выбору площадки и обращению с РАО будут сопровождаться всесторонним вниманием со стороны общественности. Население не желает безоговорочно верить техническим решениям, смысл которых для него не ясен. Ключевая особенность пошаговой организации репозитория состоит в том, что решения, принимаемые на разных стадиях, обратимы (NEA 2004).

Как пример передовой процедуры выбора площадки в таблице 3 представлены рекомендации Немецкого комитета по процедуре выбора площадки (AKEND). Особенности процедуры состоят во включении научно-технических и социо-научных критериев, а также в ясности процедуры выбора (состоит из пяти этапов).

Таблица 3. Этапы процесса: критерии, оценка, процедуры, и общественное участие

Этапы Процесса	Процедуры, Критерии, Оценка	Общественное участие
<p><b>Этап 1:</b> Идентификация областей, определение минимальных требований</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• геологические критерии исключения и минимальные требования</li> </ul>	<p>Для полной процедуры (этапы 1 – 5):</p>
<p><b>Этап 2:</b> Выбор некоторых областей с особенно благоприятными геологическими условиями</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• анализ геологических данных</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• учреждение информационного центра</li> <li>• комитет контроля проверяет соответствие правилам процесса</li> </ul>
<p><b>Этап 3:</b> Идентификация и выбор области для дальнейшего исследования (минимум три участка)</p> <p><i>вернитесь назад, если требуется</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• научно-плановые критерии исключения</li> <li>• социально-экономический потенциальный анализ</li> <li>• научно-плановые критерии оценки</li> <li>• спецификация программ для исследования поверхности и соответствующих критериев оценки</li> <li>• готовность исследовать поверхность</li> <li>• геологические и геодезические аспекты</li> </ul>	<p>Начиная от этапа 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• форум граждан как центральный элемент участия</li> <li>• центр компетентных экспертов поддерживает форум граждан</li> <li>• круглый стол участников</li> <li>• определение и готовность участвовать в этапах 3 и 4 голосованием</li> <li>• подготовка региональных концепций разработок</li> <li>• заключительное решение местного совета/советов</li> <li>• ориентирование на результаты голосования общественности и местных советов в конце этапа 5</li> </ul>
<p><b>Этап 4:</b> Определение участков для подземного исследования (минимально два участка)</p> <p><i>вернитесь назад, если требуется</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• исследование поверхности и оценка</li> <li>• оценка безопасности</li> <li>• готовность приступить к подземной программе исследования</li> <li>• разработка критериев испытаний</li> </ul>	
<p><b>Этап 5:</b> Решение относительно площадки</p> <p><i>вернитесь, если требуется</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• подземное исследование и его оценка</li> <li>• критерии безопасности</li> <li>• сравнение различных исследуемых участков</li> </ul>	
<p>Лицензирование участка</p>		<p>Источник: AKEND (2002)</p>

## **Альтернативы утилизации**

В дополнение к изоляции радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях есть несколько других альтернатив, которые обсуждались в прошлом и которые частично осуществляются, например:

- **Отправка в космос**

*Это предложение, которое главным образом обсуждалось в Соединённых Штатах на ранних этапах проектирования хранилищ для долгоживущих РАО. Преимущество: радиоактивные отходы будут постоянно удаляться из человеческой среды обитания. Из-за высокой стоимости это применимо лишь к небольшим количествам отходов (высокорadioактивные отходы). Кроме того, есть значительный риск с многочисленными последствиями, если при запуске произойдет катастрофа. Если бы этот путь утилизации был осуществим вообще, то он всё равно был бы использован лишь некоторыми странами из-за сложной технологии.*

- **Захоронение в Антарктическом льду**

*Идея представляет собой утилизацию РАО в Антарктическом льду. Во многих областях возраст льда в Антарктиде составляет 15 миллионов лет и имеет толщину 4 км. Ситуация гарантированно не будет изменяться в обозримом будущем. Однако есть существенные вопросы относительно геофизических и геохимических свойств ледяных масс и их воздействия на глобальный климат. Также, потребовались бы изменения в международных юридических нормах и политических соглашениях. На данный момент ни одна страна не рассматривает данную идею.*

- **Захоронение отходов в море**

*Захоронение низко- и среднеактивных отходов в море, разрешенное МАГАТЭ, не осуществлялось с 1983 г. в соответствии с добровольным мораторием, и было запрещено в 1993 г. Лондонской Конвенцией. Идея заключалась в захоронении низкоактивных отходов в таких местах океана, где преобладает низкая смешиваемость слоев воды, низкая скорость течений и высокая плотность. Идея захоронения в море высокоактивных отходов не рассматривалась всерьёз.*

- **Утилизация на морском дне**

*В начале восьмидесятых некоторые государства - члены OECD/NEA - проанализировали другой метод утилизации высокоактивных отходов - на морском дне. Глубоководное морское дно имеет благоприятные свойства, толстые слои осадка имеют высокий потенциал задержания радионуклидов. Вероятность несчастного случая относительно низка. Однако нет никаких проверенных технологий для создания донных хранилищ. Такой метод требовал бы поправки к вышеупомянутой Лондонской Конвенции. Этот метод активно не исследуется.*

### **Утилизация на небольшой глубине под землей**

Для утилизации на небольшой глубине под землёй короткоживущих низко- и среднеактивных отходов создана продвинутая современная технология. Многие страны либо находятся в процессе разработки объектов для захоронения таких РАО, либо уже имеют действующие (например, в Европе, Соединённых Штатах, Японии, Южной Африке). Здесь изоляция отходов в течение относительно короткого промежутка времени (менее 300 лет) обеспечена выбором подходящего геологического барьера и строительством технических и геотехнических барьеров. Кроме того, ведётся мониторинг. После проверки таким объектам могут присвоить статус обычного

хранилища. Из-за долгого периода полураспада у высокоактивных РАО, включая ОЯТ, эта технология к ним не применима.

## **Альтернативы**

Вопросы о том, есть ли какие-нибудь альтернативы захоронению в глубоких геологических формациях, часто поднимаются в общественных дискуссиях. Этические принципы, такие как экономия ресурсов или свобода выбора действий будущих поколений, играют существенную роль. Рассмотрим наиболее часто обсуждаемые в мире альтернативы:

- *разделение и трансмутация*
- *долгосрочное временное хранение*

### **Разделение и трансмутация**

Разделение и трансмутация означают преобразование долгоживущих и токсичных радионуклидов в менее токсичные с как можно более коротким периодом полураспада. Трудности, связанные с организацией хранилищ для изоляции РАО в течение особо длительного времени заставили рассматривать трансмутацию долгоживущих радионуклидов как потенциальное решение для проблемы радиоактивных отходов. Идея в том, что программа трансмутации преобразовала бы проблему долгосрочной изоляции РАО в менее трудную проблему хранения отходов в течение нескольких десятков или сотен лет.

Для трансмутации необходим перерабатывающий завод, чтобы отделить долгоживущие радионуклиды от прочих. Впоследствии происходит преобразование долгоживущих радионуклидов в короткоживущие путём обработки в реакторе (критичный реактор, который является устройством для трансмутации, или подкритичный реактор, который нуждается во внешнем источнике нейтронов, чтобы поддерживать цепную реакцию).

Даже самые сложные схемы трансмутации (в теории) не способны переработать все долгоживущие радионуклиды, а кроме того они нарабатывают большое количество новых РАО. Таким образом, необходимость в репозитории для высокоактивных РАО сохраняется. Никакая схема трансмутации не в состоянии работать со всеми радионуклидами, так как многие из них не могут быть преобразованы. Например, трансмутация Тс-99 и I-129 не на 100 процентов эффективна, даже при многократной трансмутации. Наконец, появляются новые долгоживущие продукты деления актинидов (деление актинидов не на 100 процентов эффективно с точки зрения избавления от них). Это означает, что есть фундаментальные и существенные ограничения, которые не могут быть преодолены даже с помощью сложной и очень дорогой трансмутации. Более того, всё это рождает необходимость управлять химическими и ядерными объектами куда более опасными, нежели репозиторий.

Единственный экономический довод в пользу такого метода состоит в том, что появится новое подразделение в ядерной промышленности, занимающееся трансмутацией. Стоимость систем трансмутации будет предельно дорога даже по сравнению с миллиардами, расходуемыми на программы организации репозитория.

Наконец, разделение радионуклидов, необходимых для трансмутации, увеличит риск ввиду того, что обеспечит свободный доступ к расщепляющимся материалам. Все процессы разделения, включая те, что имеют репутацию «устойчивых к распространению» на самом деле лишь увеличивают риск (Zerriffi и 2000 Makhijani).

Но трансмутацию рассматривают не только в контексте управления отходами текущего поколения ядерных реакторов. В Европе (особенно во Франции) и Японии, большинство схем трансмутации являются продолжением ядерной программы, как часть нового ядерного цикла.

Заключение французской «Commission Nationale D'Evaluation» относительно трансмутации таково, что она может быть оправданной при появлении реакторов четвёртого поколения, которых пока не существует (CNE 2005). В любом случае, от остающегося количества радионуклидов нужно избавляться как от долгоживущих радиоактивных изотопов. Поэтому трансмутация не представляет реальную альтернативу геологическому захоронению.

### *Долгосрочное временное хранение*

При долгосрочном хранении радиоактивных отходов (например, в Нидерландах), безопасность гарантируется социальным контролем. Это предполагает наличие в будущем существующих ныне научных и экономических возможностей, а так же способность и готовность всех членов общества осуществлять управление и принимать необходимые меры. Стратегия долгосрочного хранения имеет множество технических и этических аргументов в свою пользу. Она состоит в подходе, при котором одно поколение передало бы следующему мир с «равными возможностями при приёме на работу», и так далее для поколений, приходящих после, таким образом сохраняя существующие варианты и избегая трудностей отдалённого будущего. Согласно идее «катящегося подарка», текущее поколение возлагает на себя ответственность обеспечить наследникам необходимые навыки и ресурсы, чтобы иметь дело с любой проблемой, которую текущее поколение передаёт. Однако если существующее поколение задерживает строительство объектов утилизации отходов, ожидая новых технологий, или потому что хранение более дёшево, то не следует ожидать, что будущие поколения поведут себя иначе. Такой подход в действительности всегда передавал бы ответственность за реальные действия будущим поколениям и по этой причине может быть оценён как неэтичный.

Самый существенный недостаток долгосрочной стратегии хранения связан с предположением о стабильности будущих обществ, и их продолжающейся способности соблюдать стандарты безопасности. Существует естественная тенденция общества привыкать к существованию поблизости от мест хранения отходов, игнорируя связанные с этим риски. Такие риски увеличиваются со временем, если не обеспечено надлежащего наблюдения и обслуживания объектов с РАО, что может привести в будущем к причинению вреда природе и общественному здоровью. Есть много известных примеров катастрофических экологических ситуаций, унаследованных из прошлого, что заставляет обратить внимание на этот недостаток стратегии (NEA 1995).

Требование иметь в наличии различные варианты действий для будущих поколений также предполагает непрерывность существующих экономических и научных ресурсов. Если происходят социальные изменения, вроде войн и т.п., которые поглощают экономические и научные ресурсы и возможности, то сохранение вариантов в области хранения РАО может дать противоположный эффект. В результате будущие поколения больше не будут в состоянии следить за отходами, уровень безопасности снизится, а свобода действий будет ограничена. Нельзя перекладывать проблемы утилизации отходов на будущие поколения.

Решающий аргумент - это то, что прогнозы долгосрочного социального развития гораздо менее точны, чем прогнозы функциональной эффективности геологических барьеров, действующих как пассивные системы запечатанного репозитория. Поэтому нет никакого реалистичного решения в области безопасной утилизации радиоактивных отходов, кроме захоронения в глубоких геологических формациях. Общее преимущество состоит в том, что скальные формирования ввиду своих физико-химических свойств непроницаемы для жидкостей. Частично эти свойства остаются неизменными в течение нескольких геологических периодов, так что изоляция вредных отходов от попадания их в биосферу гарантирована в течение миллиона лет. Главный критерий, однако – правильный выбор участка захоронения на основе процедуры, учитывающей различные критерии.

## *Утилизация отходов четвёртого поколения реакторов*

В случае с реакторами четвёртого поколения ядерное лобби снова обещает реализовать замкнутый топливный цикл, в котором будет находиться не только уран и плутоний, но и все трансурановые нуклиды. Таким образом, период изоляции РАО, который нужно обеспечить в этом случае меньше - до 1000 лет. Два компонента чрезвычайно необходимы для осуществления этой мечты:

- *разделение нуклидов в отработанном топливе с высокой эффективностью*
- *трансмутация трансурановых нуклидов в реакторе*

Поэтому так называемый символический топливный цикл должен быть осуществлён на основе быстрых реакторов и новых видов тепловых реакторов.

Кажется, что это останется мечтой, как и замкнутый топливный цикл, придуманный в шестидесятых годах прошлого столетия. Ведь необходимо гигантское количество перерабатывающих заводов для разделения нуклидов. Все проблемы, связанные с газообразными выбросами и утечками радиоактивных материалов, с управлением радиоактивными и/или токсичными отходами, с безопасностью и возможными серьёзными несчастными случаями будут куда серьёзнее, чем на нынешних перерабатывающих предприятиях. До сих пор программы развития быстрых реакторов терпели неудачи из-за технических проблем. Нет никакой причины полагать, что ситуация изменится в будущем. Миллиарды евро необходимы для научных исследований по проектам трансмутации и разделения. Поскольку невероятно, что все долговечные нуклиды могут быть отделены и преобразованы, встаёт большой вопрос относительно того, позволит ли это всё уменьшить временной период, в который нужно изолировать РАО.

В заключение отметим, что реализация «символического топливного цикла» крайне маловероятна по причинам технического и экономического характера, а также по причинам, связанным с безопасностью, ядерным нераспространением, физической защитой.

# Литература

## ССЫЛКИ

AKEND (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte) (2002). Site Selection Procedure for Repository Sites – Recommendations of the AkEnd. Final report, December 2002.

BFS (Bundesamt für Strahlenschutz) (2004). Grundsätze für die sichere Endlagerung. Bundesamt für Strahlenschutz. Entwurf, November 2004.

——— (2005). Dezentrale Zwischenlagerung – Bausteine zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.

Bunn, M., et al. (2003). The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. DE-FG26-99FT4028, Cambridge, Massachusetts, December 2003.

Buser, M. (1997). Which is More Stable: A Rock Formation or a Social Structure? NAGRA Bulletin, no. 30.

CNE (Commission Nationale D'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des dechets radioactifs) (2005). Commission Nationale D'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des dechets radioactifs. Rapport D'Evaluation, no. 11, Juin 2005.

Diehl, Peter (1995). Uranium Mining in Europe – The Impacts on Man and Environment. *WISE News Communique* 439/440, September, special edition.  
<http://www.antenna.nl/wise/439-440/cont.html>.

——— (2004). Re-enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia. November.  
<http://www.wise-uranium.org/pdf/reenru.pdf>.

EKRA (Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle) (2000). Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Schlussbericht vom 31.01.2000. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie, und Kommunikation.

ESA (Euratom Supply Agency) (2005). Annual Report 2004.  
<http://europa.eu.int/comm/euratom/ar/ar2004.pdf>.

Gruppe Ökologie (1998). Analyse der Entsorgungssituation in der Bundesrepublik Deutschland und Ableitung von Handlungsoptionen unter der Prämisse des Ausstiegs aus der Atomenergie. Im Auftrag der Heinrich Böll Stiftung, Hannover, August 1998.

——— (2001). Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle (Comparative Evaluation of Disposal Options for Radioactive Wastes). Abschlußbericht. Im Auftrag des Projektträgers des BMBF und BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung, Förderkennzeichen 02 E 9350.

——— (2005). Wiederaufarbeitung deutscher Brennelemente im Ausland. Prepared for Robin Wood, Hanover, Juni 2005.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (1995). International Atomic Energy Agency: Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. Report No. TS-R-1.

- (1997). International Atomic Energy Agency: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna.
- (2001). Analysis of Uranium Supply to 2050. STI/PUB/1104, ISBN 92-0-100401-X, Vienna, May 2001, 103 pp.  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1104\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1104_scr.pdf).
- (2003). Safety and Engineering Aspects of Spent Fuel Storage. 1996 edition (as amended 2003), Vienna.
- ICRP (International Commission of Radiological Protection) (1998). Radiation Protection Recommendations as Applied in the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. Publication 81. Annals of the ICRP, vol. 28, no. 4.
- Large and Associates (2004). Potential Radiological Impact and Consequences Arising from Incidents Involving a Consignment of Plutonium Dioxide under Transit from Cogema La Hague to Marcoule/Cadarache. Report Ref-No R3108-A6, prepared for Greenpeace International, March 2004.
- Marignac, Y., and X. Coeytaux (2003). The Unbearable Risk – Proliferation, Terrorist Threats and the Plutonium Industry. Report prepared for “The Greens/European Free Alliance” in the European Parliament, June 2003.
- NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) (2002). Project Opalinus Clay; safety report. Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitriified High-level Waste and Long-lived Intermediate-level Waste. Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- NEA (Nuclear Energy Agency) (1995). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes. A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency.
- (2001). Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste – Reflections at the International Level.
- (2004). Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management – Experiences, Issues and Guiding Principles. NEA report no. 4429.
- (2004). Uranium 2003 – Resources, Production and Demand. OECD Nuclear Energy Agency / International Atomic Energy Agency, ISBN 92-64-01673-2, Paris 2004, 302 pp.  
<http://www.oecdbookshop.org/>.
- NERAC (U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee) (2002). A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. December 2002.  
<http://www.ne.doe.gov/nerac/FinalRoadmapforNERACReview.pdf>.
- Öko-Institut (2000). Ermittlung der möglichen Strahlenexpositionen der Bevölkerung aufgrund der Emissionen der Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield und La Hague. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Februar 2000.
- Schwibach, J. (1967). Research on the Permanent Disposal of Radioactive Wastes in Salt Formations in the Federal Republic of Germany. In: IAEA (1967), publication STJ/PUB/156, pp. 465-477.

STRLSCHVO (Strahlenschutzverordnung) (2001). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001. BGBl I, S. 1714.

WNA (World Nuclear Association) (2005). World Nuclear Association homepage. <http://www.world-nuclear.org/>.

WUP (WISE Uranium Project) (2005). WISE Uranium Project homepage. <http://www.wise-uranium.org/>.

Zerriffi, H., and A. Makhijani (2000). Nuclear Alchemy Gamble: An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy. Prepared for the Institute for Energy and Environmental Research, May 2000. <http://www.ieer.org/reports/transm/>.

## *Фонд имени Генриха Бёлля*

Фонд Генриха Бёлля является политическим фондом, близким к партии «Союз 90/Зелёные» (Германия), располагающимся на Hackesche Hoefe в сердце Берлина. Фонд обладает самостоятельным юридическим статусом и в своем нынешнем виде существует с 1997 г..

Приоритетной задачей Фонда является политическое просвещение в пределах Германии и за границей, содействие расширению участия граждан в общественной и политической жизни, углублению взаимопонимания между народами.

Фонд поддерживает деятельность в области искусства и культуры, науки и исследований, а также международного сотрудничества. Его деятельность нацелена на достижение справедливого миропорядка. Фонд пропагандирует фундаментальные политические ценности, такие как экология, демократия, гендерное равенство, солидарность и отказ от насилия.

Посредством международного сотрудничества и взаимодействия с партнерами – в настоящее время осуществляется около 100 проектов в почти 60 странах – Фонд стремится усиливать экологическую и гражданскую активность на глобальном уровне, способствовать обмену идеями, всегда быть наготове.

Сотрудничество Фонда Генриха Бёлля с партнерами в области общественно-политических образовательных программ носит долгосрочный характер. Важную роль здесь играют программы обменов и программы обучения для активистов, которые увеличивают обмен опытом и улучшают политическое взаимодействие.

Фонд Генриха Бёлля имеет приблизительно 180 постоянных сотрудников и приблизительно 320 членов, которые обеспечивают финансовую и нематериальную помощь.

Ральф Фукс и Барбара Унмусиг входят в управляющий совет. Доктор Биргит Лобак – генеральный директор Фонда.

Два дополнительных органа образовательной работы Фонда: «Зелёная Академия» и «Феминистский Институт».

В настоящее время Фонд имеет представительства в США и на арабском Ближнем Востоке, в Афганистане, Боснии и Герцеговине, Бразилии, Камбодже, Хорватии, Чешской Республике, Сальвадоре, Грузии, Индии, Израиле, Кении, Ливане, Мексике, Нигерии, Пакистане, Польше, России, Южной Африке, Сербии, Таиланде, Турции, и офисе для ЕС в Брюсселе.

В 2005 г. Фонд имел в своём распоряжении почти 36 миллионов €.

Heinrich Böll Stiftung, Hackesche Höfe, Rosenthaler Str. 40/41, D-10178 Berlin, Germany, Tel: +49-30 285 340, Fax: +49-03 285 31 09, [info@boell.de](mailto:info@boell.de); [www.boell.de](http://www.boell.de)

**Ядерная энергия: миф и реальность** – является одной из шести публикаций Фонда Генриха Белля, посвященных проблемам атомной энергетики. Публикации приурочены к 20-летней годовщине аварии на Чернобыльской АЭС. Издание дает современный обзор происходящих в настоящий момент дебатов относительно использования атомной энергии в мире. Целью издания является предоставление исследовательской информации специалистам, журналистам, активистам, общественности.

Серия публикаций, посвященных ядерным проблемам

Редактор: Феликс Кристиан Маттес

Ядерная энергия: мифы и легенды. Автор: Г. Розенкранц

Ядерный реактор как источник опасности. Автор: А. Фроггатт

Ядерный топливный цикл. Авторы: Кройш, В. Ньюманн, Д. Аппель, П. Диль

Ядерная энергия и проблема ядерного распространения. Автор: О. Нассауэр

Экономические аспекты ядерной энергетики. Автор: С. Томас

Ядерная энергия и климатические изменения. Автор: Ф. Кр. Маттес



В соавторстве с

Публикации по проблемам ядерной энергетики на [www.boell.de/nuclear](http://www.boell.de/nuclear)