

# СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭМИССИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОЛЬЗА И ВРЕД

АНДЖЕЙ СТРУПЧЕВСКИ

**И**спользование электричества помогает людям удовлетворять их самые разные потребности, начиная с совершенствования производства и распределения продовольствия и кончая обеспечением здравоохранения и образования. Когда электричество доходит до конечных потребителей, его обычно считают чистым и безусловно полезным.

Однако производство электричества связано с выбросами различных веществ в окружающую среду. Некоторые из них являются вредными для здоровья человека. За последнее десятилетие повысилась осведомленность по проблемам окружающей среды, включая загрязнение атмосферы от различных энергетических систем.

В целях изучения указанных воздействий аналитики используют методологию сравнительной оценки рисков, которая добилась значительных успехов.

В начале 90-х гг. Европейская комиссия (ЕК) инициировала и успешно осуществила специальный проект под названием ExternE. Цель проекта заключалась в определении внешних издержек по различным энергетическим системам, которые несет общество и основную часть которых составляют расходы на здравоохранение.

На первом этапе проекта, продолжавшемся до 1995 г., внешние издержки по каждой энергетической системе оценивались специалистами из стран, обладающих наибольшим опытом применительно к конкретным системам (например, немецкими и английскими группами специалистов в области угольной энергетики и норвежскими специалистами в области гидроэнергетики).

На втором, заключительном, этапе проекта каждой страной были сделаны отдельные анализы всех энергетических систем, представляющих для нее интерес. Результаты этих исследований можно в настоящее время получить в ЕК в виде национальных докладов; они содержат самые качественные данные по сравнительным оценкам рисков, связанных с энергетическими системами.

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ И РАДИАЦИОННЫЕ ВЫБРОСЫ

Концентрации классических загрязнителей атмосферы (поллютантов), таких как макрочастицы, окиси серы и азота в крупных городах и промышленных районах, в настоящее время существенно превышают исторически сложившиеся фоновые уровни, считающиеся обычно естественными.

В процессе исследований было проведено сравнение измеренных концентраций двуокиси серы — типичного поллютанта от сжигания ископаемого топлива — с фоновыми концентрациями в удаленных от промышленных центров районах и с концентрациями, принятыми в качестве допустимых Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) (см. схему на стр. 20).

По оценке, сделанной в результате проведенного Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) исследования, 50% этого загрязнения являются следствием сжигания ископаемого топлива в процессе производства энергии.

Были изучены также и другие источники энергии, включая сжигание органических материалов, в основном в развивающихся

странах, в целях обеспечения бытовых потребностей, таких как приготовление пищи и отопление жилищ.

По данным Международного энергетического агентства ОЭСР, общее потребление биомассы в 1995 г. составило 930 т нефтяного эквивалента, при этом по меньшей мере треть населения мира пользуется биомассой в качестве основного источника энергии. Помимо разрушения окружающей среды в результате беспорядочного сжигания деревьев и кустарников использование биомассы внутри помещений приводит к образованию исключительно высоких уровней загрязнения атмосферы, что в свою очередь порождает острые респираторные заболевания и рак легких. Число летальных исходов, обусловленных сжиганием биомассы в развивающихся странах, велико.

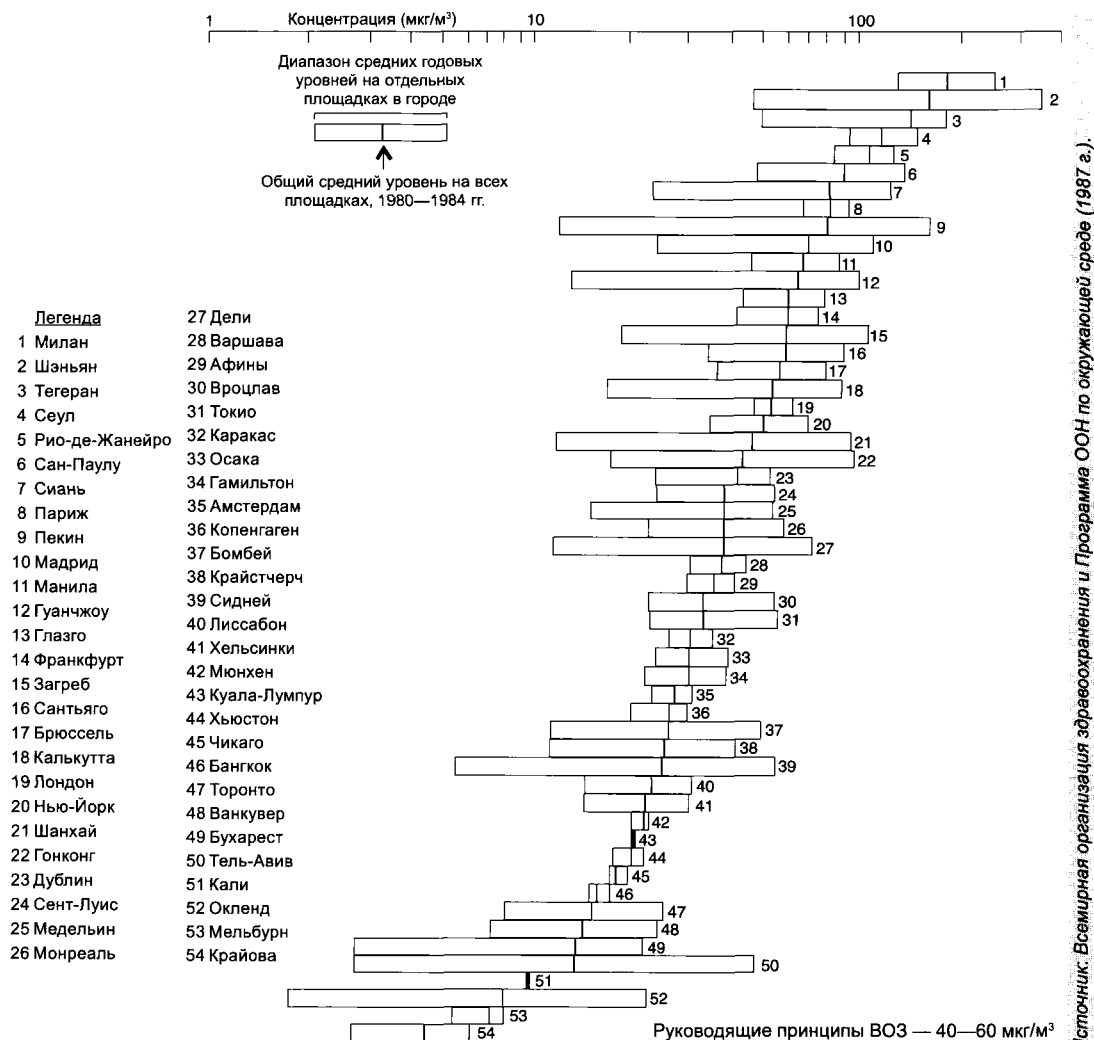
В Китае, например, где сотни миллионов бытовых печей образуют высокие концентрации загрязнителей внутри помещений, отмечается соответствующий рост хронических легочных заболеваний, рака легких, болезней сердца, а также пневмонии у детей, следствием которых, по оценке, является преждевременная смерть 1,4 млн. человек ежегодно.

С другой стороны, дополнительные дозы облучения населения при нормальной эксплуатации атомных электростанций составляют лишь весьма незначительную часть колебаний естественного радиационного фона. Уровни естественного фонового излучения во многих

---

Г-н Струпчевски — сотрудник  
Отдела безопасности ядерных  
установок МАГАТЭ.

## УРОВНИ ДВУОКИСИ СЕРЫ В ОТДЕЛЬНЫХ ГОРОДАХ



крупных регионах колеблются от менее 2 миллизивертов в год (мЗв/год) до 5 мЗв/год. Дополнительные дозы от ядерной энергии составляют обычно около 1—3 микрозивертов в год, или 1/1000 от колебаний в уровнях естественного фонового излучения.

В ряде стран были проведены крупномасштабные исследования различных групп населения, подвергшихся облучению малыми дозами радиации.

Сюда относится крупное эпидемиологическое исследование насчитывающей около 80 тыс. человек группы китайского населения, проживающей в районе Янцзиан с высоким уровнем фоново-

го излучения, и эквивалентной контрольной группы из соседнего района со значительно более низкими уровнями естественного фонового излучения. Исследование 1997 г. показало, что смертность от заболевания раком в районе с высоким уровнем фонового излучения была ниже по сравнению с контрольным районом. Статистическая достоверность исследования была сочтена недостаточной для количественной оценки его результатов. Однако эти результаты показывают, что какого-либо вредного воздействия малointенсивного излучения не наблюдалось.

Еще одно крупное исследование было проведено в Соеди-

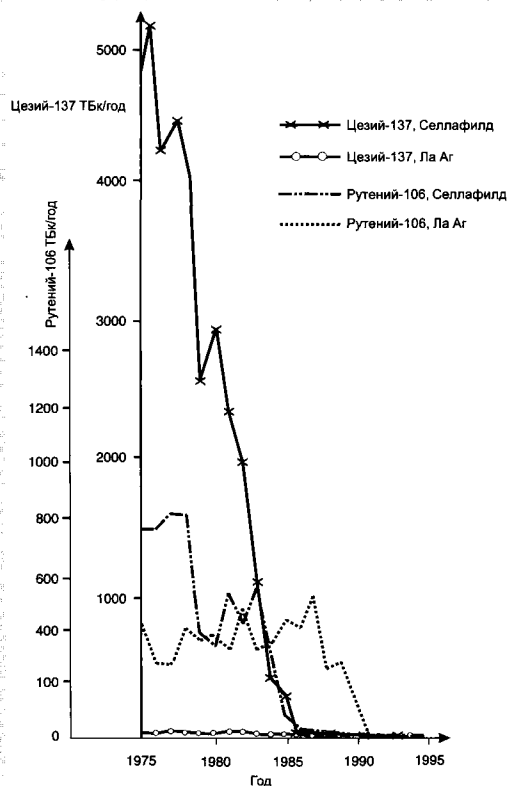
ненных Штатах, объектом которого стали 28 тыс. рабочих-строителей атомных судов, получивших в течение жизни дозы свыше 5 мЗв.

Хотя исследование 1991 г. проводилось с целью исключить так называемый “эффект здорового рабочего”, оно позволило установить, что смертность в группе, подвергшейся облучению, была на 24% ниже, чем в контрольной группе.

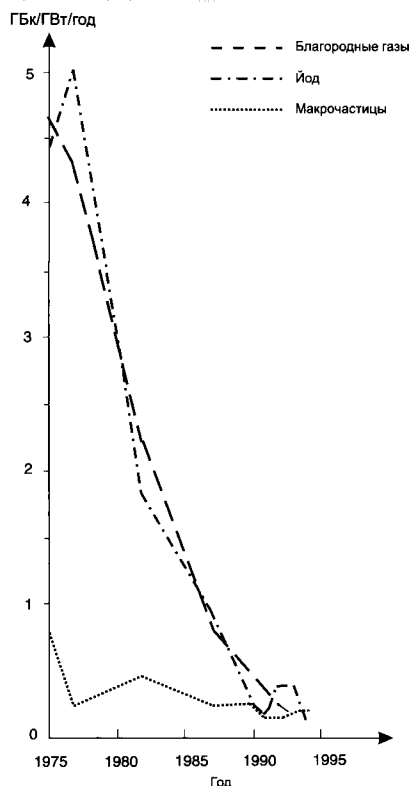
Дополнительные результаты были получены в процессе обследования 95 тыс. рабочих атомной промышленности, проводившегося в Соединенных Штатах, Канаде и Соединенном Королевстве Международным

# СОКРАЩЕНИЕ ГОДОВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ (ОТДЕЛЬНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ)

## ЗАВОДЫ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ



## АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



Источник: НКДАР ООН, 1993 и 1996 гг.

агентством по изучению раковых заболеваний. Опубликованные в 1995 г. результаты показали, что избыточный относительный риск применительно ко всем раковым заболеваниям (исключая лейкемию) составил минус 0,07; иначе говоря, это означает отсутствие повышенного риска. Опубликованные в 1997 г. данные обследования 115 тыс. японских рабочих атомной промышленности показали аналогичные результаты.

Все эти результаты были признаны статистически несостоятельными. Тем не менее указанные исследования, как и многие другие, проведенные в истекшее десятилетие, не подтвердили какого-либо увеличения смертности от раковых заболеваний вследствие облучения дозами малоинтенсивного излучения.

Совершенно по-иному выглядит ситуация в случае загрязне-

ния атмосферы, последствия которого поддаются непосредственному наблюдению. Связь между концентрацией загрязнителей и высокой смертностью была неоспоримо доказана в целом ряде случаев.

Документально лучше всего подтвержден эпизод с загрязнением атмосферы в Лондоне в 1952 г., следствием которого, по оценке, явилось увеличение общего числа летальных исходов примерно на 4 тыс. Другие случаи в Бельгии, Соединенных Штатах, Бразилии, Норвегии и Германии показали значительное увеличение смертности вследствие загрязнения атмосферы. Исследование, проведенное в Китае в 1994 г., также показало, что высокие концентрации  $SO_2$  в Пекине обусловили значительное повышение смертности.

В этих исследованиях оценка воздействия загрязненной атмо-

сферы проводилась за короткие периоды времени. Отсутствие долгосрочных эпидемиологических исследований затрудняло более тщательную оценку смертности вследствие загрязнения атмосферы.

В конце 80-х гг. анализы воздействия загрязненной атмосферы включали, как правило, лишь отдельные, произвольно отобранные и зачастую недостаточно представительные риски для здоровья человека.

В начале 90-х гг. международное научное сообщество не считало полученные результаты по хроническому воздействию загрязненной атмосферы достаточно доказанными для их использования в сравнительных оценках рисков.

Позже международное признание получили два крупных исследования, проведенных в Соединенных Штатах. Одно из них, опубликованное в 1993 г., каса-

лось оценки 6 тыс. человек из шести населенных пунктов США, а другое, проведенное в 1995 г., содержало оценку 552 тыс. взрослых в 151 городском районе. Оба исследования показали, что коэффициенты смертности, обусловленной хроническим воздействием загрязнителей атмосферы в течение длительных периодов времени, намного выше, чем аналогичные показатели для случаев более коротких периодов воздействия.

В 1997 г. результаты исследования, проведенного в США в 1995 г., были включены в проект ExternE ЕК в качестве основы для оценки смертности и сокращения средней вероятной продолжительности жизни в результате хронического загрязнения атмосферы.

Кроме того, в проекте ExternE 1997 г. было учтено воздействие двуокиси серы и окисей азота. Было показано, что эти поллютанты образуют вторичные макрочастицы, которые считаются исключительно опасными для здоровья человека ввиду их малых размеров, облегчающих им проникновение в легкие, где их воздействие приносит наибольший вред.

Независимые выводы ЕК хорошо согласуются с подготовленными МАГАТЭ руководящими принципами сравнительной оценки рисков, опубликованными в 1997 г. (*General Guidelines for the Comparative Assessment of Health and Environmental Impacts of Electrical Energy Systems — Общее руководство по сравнительной оценке воздействия электроэнергетических систем на здоровье человека и окружающую среду*).

В руководящих принципах содержится, далее, указание на необходимость проведения всесторонних сравнительных анализов рисков для здоровья человека на всех важнейших этапах производства энергии, а не только на этапе эксплуатации электростанций. Это было учтено в проекте ExternE с одним важным исключением. В нем не рассматриваются резервные системы, которые потребуются для энергии ветра и солнца в том

случае, если их вклад в энергообеспечение окажется существенным. Игнорирование этих внешних издержек заметно улучшает ситуацию применительно к электростанциям, использующим энергию солнца и ветра.

Тем не менее проект включил начальные этапы в оценку затрат, связанных с возобновляемыми источниками энергии, что представляет собой важный шаг вперед в области сравнительных оценок рисков, связанных с энергетическими системами.

В случае с ядерной энергией аналитики установили, что радиационные выбросы на этапе эксплуатации электростанции являются исключительно низкими. Допустимые дополнительные дозы облучения на атомных электростанциях регулируются в разных странах на уровнях от 0,08 мЗв/год в Соединенных Штатах до 0,3 мЗв/год в Германии. Однако реальные годовые дозы являются намного более низкими и колеблются обычно в диапазоне от 0,001 до 0,003 мЗв/год, а в отдельных случаях — до 0,03 мЗв/год.

Дозы, относящиеся к другим этапам ядерного топливного цикла, являются также низкими. Например, дозы на заводах по переработке во Франции составляют менее 0,02 мЗв/год. Эти данные отражают тенденцию к сокращению выбросов радиоизотопов на атомных электростанциях и установках ядерного топливного цикла (см. схемы на стр. 21).

Аналогичным образом существенно сократились выбросы радона из “хвостов” на фабриках по обогащению урана — до уровня, на котором в соответствии с исследованием 1998 г. их совокупное воздействие на здоровье примерно в 150 раз меньше воздействия уровней, определенных в 1993 г. Научным комитетом ООН по действию атомной радиации.

Радиоактивные выбросы от заводов по переработке являются весьма незначительными, иногда даже не поддающимися измерению. Однако некоторые

высвобожденные радиоактивные изотопы характеризуются чрезвычайно длительными периодами распада, и их интегрированное воздействие, накопившееся в течение длительного времени (100 тыс. лет), может привести к образованию значительных коллективных доз.

## ДОПУЩЕНИЯ И ПОДХОДЫ

В исследованиях по сравнительной оценке рисков для различных энергетических систем должны применяться сравнимые методологии. Однако на практике этого не произошло, и в основу исследований положены различные комбинации допущений и подходов.

Например, исследованиями не были охвачены болезни шахтеров, обусловленные пневмокониозом (более известным как “темные легкие”) или вдыханием радона, несмотря на то что количество их жертв достигает сотен тысяч. Это было сделано потому, что, по мнению аналитиков, меры по совершенствованию безопасности в горнодобывающей промышленности избавят людей от этих опасностей для здоровья. С другой стороны, в исследованиях учитывалось радоновое облучение шахтеров, занятых в добыче урана, хотя коллективные дозы облучения [на ГВт (эл.) в год] применительно к урану являются более низкими по сравнению с углем.

Следует привести также другие примеры.

■ Зачастую в исследованиях игнорируются различные загрязнители атмосферы, например двуокись серы или окиси азота, в то время как в случае с ядерной энергией прослеживаются все возможные пути поступления радиологически опасных веществ. Лишь в последнем исследовании ExternE рассматриваются все важные поллютанты.

■ Расчеты воздействия загрязнителей атмосферы на здоровье людей ограничиваются обычно расстоянием в 80 км или одной страной, при этом самое крупное исследование (ExternE) охватывает лишь территорию Европы.

Однако расчеты воздействия ионизирующего излучения производятся в масштабах всего мира.

■ Временные рамки в исследованиях поллютантов нередко ограничиваются настоящим временем, в то время как в случае с ионизирующей радиацией они раздвигаются все шире и шире, достигая в последнем исследовании ExternE 100 тыс. лет.

Нередко слишком легко отбрасывают тот факт, что радиоактивные продукты подвергаются распаду и в конечном счете исчезают, в то время как химические загрязнители остаются токсичными навсегда. Возможно, одной из причин такого подхода служит то, что в отношении распада радиоактивных веществ и путей их возможной фильтрации через биосферу имеются обширные данные; с другой стороны, в отношении долгосрочного поведения токсичных отходов от неядерных топливных циклов данных весьма мало или они вообще отсутствуют.

Отсутствие данных по вредному воздействию неядерных источников на здоровье часто использовалось для оправдания исключения некоторых касающихся здоровья человека внешних издержек применительно к другим энергетическим системам. Типичным примером этого являются издержки, связанные с начальным этапом использования возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии действительно не наносят ущерба окружающей среде в процессе эксплуатации электростанции, однако их развитие требует огромных материальных и энергетических затрат на этапе до строительства электростанции.

Последние сравнительные оценки показывают, что объемы стали и цветных металлов, необходимых из расчета на ГВт (эл.) в год для солнечных энергетических систем, в 30—150 раз выше, чем для ядерной энергии; даже объемы бетона и цемента, необходимые для солнечных энергетических технологий, в

## ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ИСКОПАЕМОМ ТОПЛИВЕ В ГЕРМАНИИ

| ТИП СТАНЦИИ                                                                      | УГОЛЬ*                    | ЛИГНИТ*   | НЕФТЬ*    | ГАЗ*     |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|----------|
| Содержание серы в топливе                                                        | 0,9%                      | 0,3%      | 0,2%      | 0%       |
| <b>ВЫБРОСЫ</b> (миллиграммы на кВт/ч)                                            |                           |           |           |          |
| Электростанция, SO <sub>2</sub>                                                  | 288                       | 411       | 1 088     | 0        |
| Полный цикл, SO <sub>2</sub>                                                     | 326                       | 425       | 1 611     | 3        |
| Электростанция, NO <sub>x</sub>                                                  | 516                       | 739       | 814       | 208      |
| Полный цикл, NO <sub>x</sub>                                                     | 560                       | 790       | 985       | 277      |
| Электростанция, макрочастицы (TSP)                                               | 57                        | 82        | 18        | 0        |
| Полный цикл, TSP                                                                 | 182                       | 511       | 67        | 18       |
| <b>ВНЕШНИЕ ИЗДЕРЖКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ</b> (затраты в милли-ЭКЮ на кВт/ч)    |                           |           |           |          |
| Ущерб для здоровья от электростанции/полного цикла                               | 11,9/13,4                 | 15,2/16,0 | 25,7/33,3 | 2,8/4,3  |
| Аварии                                                                           | без количественных оценок |           |           |          |
| Глобальное потепление                                                            | 3,0—110,5                 | 3,9—143,1 | 3,3—120,4 | 1,3—48,5 |
| Другие воздействия                                                               | 0,16                      | 0,23      | 0,64      | 0,04     |
| Полный цикл глобального потепления                                               | 3,4—125                   | 4,0—149   | 3,5—132   | 1,5—56   |
| Другие воздействия                                                               | 0,16                      | 0,23      | 0,64      | 0,04     |
| <b>ОБЩИЕ ВНЕШНИЕ ИЗДЕРЖКИ</b> (на ТВт/ч)                                         |                           |           |           |          |
|                                                                                  | 17—138                    | 20,2—165  | 37,5—166  | 5,8—60   |
| <b>ОБЩЕЕ СОКРАЩЕНИЕ СРЕДНЕЙ ВЕРОЯТНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ</b> (лет на ТВт/ч) |                           |           |           |          |
|                                                                                  | 141,5                     | 165       | 359       | 46       |

\* Уголь — пылевидный уголь, десульфуризация дымовых газов (ДДГ), восстановление окислов азота (денокс), пылеудаляющие системы (обеспыливание); лигнит — пылевидный лигнит, ДДГ, денокс, обеспыливание; нефть — пиковая электростанция; газ — газовая турбина, комбинированный цикл.

Источник: European Commission ExternE Project 1997.

## КОЛЛЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Коллективные дозы для замкнутого ядерного топливного цикла (чел.-Зв/ТВт-ч)

| ЭТАП                                                                | ФРАНЦИЯ    | ГЕРМАНИЯ | СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО |
|---------------------------------------------------------------------|------------|----------|-------------------------|
| <b>ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ</b>                                          |            |          |                         |
| население                                                           | 0,177      | 0,1      | 0,1                     |
| рабочие                                                             | 0,112      | 0,0058   | 0,7                     |
| <b>ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ</b>                                         |            |          |                         |
| население                                                           | 1,88       | 0,63     | 0,407                   |
| рабочие                                                             | 0,352      | 0,39     | 0,028                   |
| <b>ТЯЖЕЛАЯ АВАРИЯ</b> (доза на реактор-год)                         |            |          |                         |
| население                                                           | 0,019—2,9* | 0,019    |                         |
| <b>ПЕРЕРАБОТКА ТОПЛИВА</b>                                          |            |          |                         |
| население                                                           | 10,3       | 3,3      | 0,448                   |
| <b>УДАЛЕНИЕ ОТХОДОВ</b>                                             |            |          |                         |
| население                                                           | 0,166      | 0,14     |                         |
| Общая коллективная доза                                             | 13,0       | 4,6      | 1,7                     |
| Сокращение средней вероятной продолжительности жизни (лет на ТВт/ч) | 9,8        | 3,0      | 1,3                     |

\* Верхние расчетные значения для атомных электростанций (не включенные в расчеты для стран ЕС).

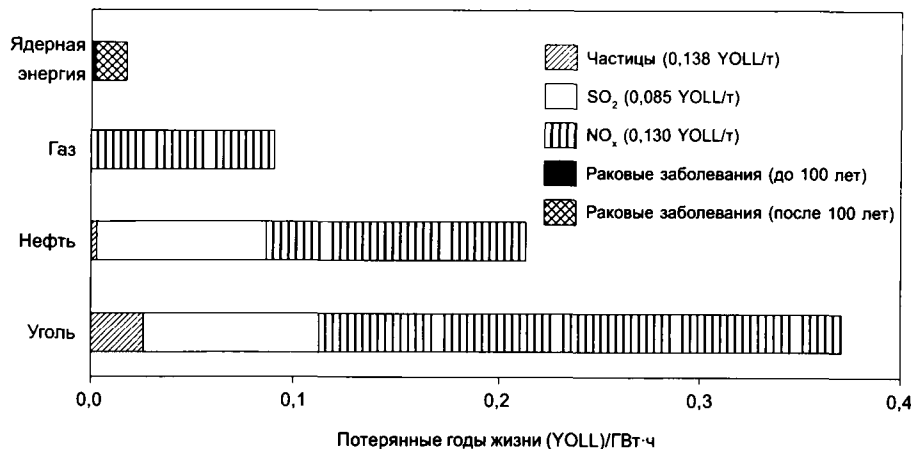
Источник: Исследование European Commission ExternE 1997 и SENES, UK, 1998. Данные, выделенные курсивом, скорректированы на основе исследования ЕК с использованием результатов SENES по добыче и обогащению урана.

шесть раз больше, чем для ядерных технологий.

Кроме того, потребности в электричестве для производства всех этих материалов и строительства солнечной электростан-

ции являются весьма большими, достигая 30% всего электричества, которое будет произведено в течение всего срока службы такой станции. Производство этого электричества также нано-

## СРАВНЕНИЕ РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Примечание: Сравнения на основе стоимости ущерба на тонну загрязнителя, оцененной в проекте ExternE ЕК; схема предоставлена А. Раблем, Франция.

сит ущерб здоровью и окружающей среде, поэтому в целом солнечные электростанции вносят свой вклад в загрязнение окружающей среды еще до начала производства электричества. Нередко данный аспект не принимался во внимание. Как уже отмечалось выше, многие из этих ошибок в большинстве случаев были устранены в последнем исследовании ExternE.

В интересах совершенствования сравнительных оценок рисков различные группы специалистов, принимающих участие в совещаниях технического комитета МАГАТЭ, внесли ряд предложений. Одно из предложений предусматривает введение определенного уровня риска, ниже которого отдельные опасности могут рассматриваться как слишком незначительные для включения в целях сравнительной оценки рисков. Установление такого предела воздействия всех энергетических систем на здоровье человека позволило бы обеспечить лучшую согласованность и сопоставимость оценок по сравнению с ныне действующей практикой, когда пределы воздействия устанавливаются в зависимости от разных расстояний и разных периодов времени или когда игнорируются некоторые этапы топливной цепочки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Хотя технологические усовершенствования позволяют существенно сократить негативное воздействие угольного топливного цикла на окружающую среду, эмиссии действующих и планируемых угольных электростанций продолжают оставаться высокими. В исследовании ExternE признается техническая возможность дальнейшего сокращения эмиссий. Однако в нем отмечается, что подобные сокращения связаны с резким увеличением стоимости строительства и с эксплуатационными убытками. Вследствие этого ожидается, что электрокомпании будут строить электростанции в соответствии с действующими регулирующими правилами, а не с техническими возможностями.

В результате исследований, проведенных во Франции, Германии, Швеции и Соединенном Королевстве, были определены важнейшие непосредственные источники радиологических опасностей, связанных с ядерным топливным циклом (см. таблицу на стр. 23).

В этих исследованиях все радиологические опасности были интегрированы применительно к населению мира и с учетом

весьма длительных периодов времени — до 10 тыс. и даже до 100 тыс. лет. Значительное радиологическое воздействие оказывают (каждый в отдельности) процессы добычи и обогащения руды, эксплуатации атомных электростанций и переработки топлива. Радиологические опасности, обусловленные другими этапами ядерного топливного цикла, также были рассчитаны, хотя они и были весьма незначительными.

Сравнительные оценки включают гораздо более консервативные допущения применительно к ядерным энергетическим системам в отличие от систем на ископаемом топливе, однако полученные результаты свидетельствуют о том, что связанные с производством электричества риски для здоровья являются наименьшими в сфере ядерной энергии. По расчетам, они в 100 раз меньше, чем для угля или нефти, и в несколько раз меньше по сравнению с газом (см. диаграмму).

В заключение следует отметить, что проведенные в истекшем десятилетии международные исследования подтверждают важность оценки внешних издержек, связанных со здоровьем человека, применительно ко всему топливному циклу энергопроизводящих систем. В целом к оценкам радиологических рисков применяются более консервативные подходы, чем к оценкам загрязнения атмосферы от других энергетических систем. Тем не менее полученные результаты свидетельствуют о том, что при нормальных условиях эксплуатации ядерная энергия оказывает негативное воздействие на окружающую среду и здоровье в меньших масштабах, чем ископаемое топливо. Оценки возобновляемых источников энергии продолжают оставаться неполными; в зависимости от принятых в исследовании допущений полученные в результате оценки эффекты по сравнению с ядерной энергией оказываются слегка заниженными или завышенными. □