

# ЭНЕРГЕТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

№ 4 1997

Издание I E E R

## Медицинские последствия ионизирующей радиации

ДЭВИД САМНЕР,  
ХОВАРД ХУ  
И АЛИСТЕР ВУДВОРД

**И**онизирующая радиация может вызывать стохастические (редкие) и детерминистские (или нестохастические) последствия. Детерминистские эффекты возникают при превышении минимальной дозы облучения. Сверх данного уровня последствия наблюдаются у большинства подвергнувшихся облучению людей и уровень поражения возрастает в зависимости от дозы. С большой степенью уверенности можно предсказать появление и уровень детерминистских последствий для каждого пораженного. Радиационный ожог является примером детерминистского эффекта.

У взрослых нестохастические последствия являются доминирующими, когда доза облучения всего организма превышает примерно один зиверт. Исключением является появление временной стерильности у мужчин, наблюдающееся при получении единовременной дозы радиации около 0,15 греев<sup>1</sup>. У детей порог появления пороков и ненормального развития оценивается в 0,25 греев радиационного облучения полученного в течение до 28 дней в эмбрионный период.

Единовременные дозы облучения сверх 1 грея вызывают лучевую болезнь, симптомы которой могут включать рвоту, понос. Иногда болезнь сопровождается лихорадкой и геморроидальными явлениями. Летальный исход наступает в течение нескольких часов, дней или недель. В зависимости от полученной дозы облучения и его интенсивности может также возникнуть стерильность и радиационные ожоги. Доза, которая приводит к гибели половины пораженного населения в течение 60 дней в ус-



▲ Рабочий на предприятии по производству ядерного оружия, находящегося вблизи г. Ферналд, штат Огайо, производит погрузку тория в бочки.

ловиях неоказания медицинской помощи, именуется дозой ЛД50 (ЛД - летальная доза, 50-процентное поражение). Для взрослого человека она составляет 4 зиверта. Иногда 60-дневный срок также упоминается в названии дозы - ЛД50/60. Обычно определяется ряд различных доз ЛД50, в зависимости от количества дней (Т) после которого наблюдение за летальными исходами прекращается.

Для доз облучения менее порядка 1 зиверта наибольшую опасность представляют стохастические последствия. Основные стохастические последствия, раковые заболевания и наследственные генетические пороки могут проявиться через многие годы и десятилетия после облучения. Предполагается, что для появления подобных последствий не существует минимальных доз; по мере снижения дозы последствия по-прежнему возможны, но их вероятность становится меньшей. Однако неопределенности при получении низких доз (10 миллизивертов или менее) очень велики. В течение последних лет пересмотр оценок масштабов последствий ма-

СМ. МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НА С. 4

**С**отрудникам ИЕЕР часто задается вопрос о медицинских последствиях радиационного облучения. В настоящем Выпуске "Энергетики и безопасности" мы публикуем некоторые основные технические данные о том, каким образом рассчитываются указанные последствия, а также о правилах, накладывающих ограничения на размеры доз, получаемых персоналом и населением. На с. 10 читатель найдет расширенный раздел "Наука о критических массах", включающий в себя основную информацию о радиоактивном распаде, дозах и единицах измерения доз, международных стандартах радиационной защиты и о принятых в США ограничениях на выброс радионуклидов в атмосферу и воду. В статье на с. 3 описывается добыча и первичная переработка урана, исторически ставшая наиболее опасной стадией ядерного топливного цикла, и прива-щая к поражению значительного населения, в том числе и в странах, не располагающих атомной энергетикой и ядерным оружием. В статье на с. 7 описываются различные виды медицинских исследований, а также некоторые сложности и противоречия, возникающие при их истолковании. Результаты последнего исследования случая лейкемии в окрестностях радиохимического завода в Ла-Хай (Франция) приводятся на с. 18.

# Эпидемиологические исследования и восстановление доз

АНИТА СЕТ И АРЖУН МАКХИДЖАНИ

Эпидемиологические исследования изучают возникновение и распространение заболеваний среди населения. Как правило, эти исследования нацелены на выявление взаимосвязи между воздействием возбудителей заболеваний и состоянием заболеваемости среди населения. Имеется три основных типа эпидемиологических исследований. Сравнительные исследования сопоставляют воздействие на людей, подвергшихся заболеваемости, с воздействием на тех, кто этому заболеванию не подвергся. Исследования постоянной выборки лиц изучают различия в уровнях заболеваемости между подвергшимся и неподвергшимся вредному воздействию населением. В экологических исследованиях рассматривается уровень заболеваемости населения в определенном географическом районе на основе средних оценок вредного воздействия. Поскольку в экологических исследованиях не изучается реальный уровень индивидуального вредного воздействия, они менее аналитичны по сравнению с первыми двумя типами и, поэтому, к их выводам следует относиться с осторожностью.

В исследованиях фиксированной выборки группы лиц, где предметом изучения является подвергшаяся вредному воздействию группа населения, эпидемиологи рассчитывают относительный риск и соотношение рисков для зараженного населения путем оценки уровня заболеваемости или смертности среди подвергшегося вредному воздействию населения и последующего деления полученных результатов на данные уровня заболеваемости контрольной, не подвергшейся заражению, группы лиц. В эпидемиологических исследованиях может также сопоставляться количество смертельных случаев в результате раковых заболеваний среди пораженной группы наблюдаемых со средними показателями для всего населения. Присутствующий или дополнительный риск рассчитывается путем вычисления разницы (а не соотношения) между уровнями заболеваемости или смертности пораженного и непораженного населения. Во всех эпидемиологических исследованиях важно учитывать такие факторы, как возраст, пол и вредные привычки наблюдаемых (например, курение), поскольку уровень заболеваемости в значительной степени различается в зависимости от групп населения.

Исследования в области восстановления полученных доз оценивают степень воздействия на индивидуум или на группу населения такого возбудителя заболевания, как радиация. Для оценки степени воздействия необходимо знать количество загрязнителя, произведенного источником загрязнения (данные по выбросам), в определенной среде - атмосферу или воду, или обладание точными ретроспективными данными о попадании загрязнителей в атмосферу, воду и почву. Анализ путей заражения позволяет прояснить зачастую весьма комплексные способы, посредством которых загрязнители поражают людей через окружающую среду. Это позволяет преобразовать оценки выбросов в оценки получен-

ных доз. Например, загрязнители могут одновременно вдыхаться с воздухом и попадать внутрь организма вместе с загрязненной питьевой водой или пищей. Кроме того, население может получить дозы из источников, находящихся как вне, так и внутри организма. Исследования доз должны проводиться независимо от эпидемиологических исследований, но они могут помочь эпидемиологам сделать более точную выборку пораженных групп населения.

СМ. ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА С. 9

## Энергетика и безопасность

"Энергетика и безопасность" - бюллетень, посвященный вопросам ядерного нераспространения, разоружения и энергетической безопасности. Публикуется четыре раза в год Институтом проблем энергетики и окружающей среды, находящимся по адресу:

The Institute for Energy and Environmental Research  
6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912, USA

Тел. 1-301-270-3500; факс 1-301-270-3029

Электронная почта: [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)

Адрес в Интернете: <http://www.ieer.org>

Институт проблем энергетики и окружающей среды (IEER) обеспечивает общественность и официальные лица надежными, ясными и глубокими исследованиями по широкому кругу вопросов. Целью IEER является привнесение научного анализа в деятельность общественности для демократизации науки и создания более здоровой окружающей среды.

### Сотрудники IEER:

Аржун Макхиджани - президент  
Бернад Франке - исполнительный директор  
Пэт Ортмайер - координатор по внешним связям  
Анита Сет - координатор по международным связям  
Роберт Брукс - помощник координатора по международным связям  
Энни Макхиджани - научный сотрудник  
Луис Чалмерс - заведующий библиотекой  
Дайана Кон - библиотечкарь  
Марк Фиораванти - инженер  
Бетси Турлоу-Шилдс - администратор

### Благодарим наших спонсоров

Выражаем благодарность нашим спонсорам, благодаря поддержке которых стало возможным осуществление нашего глобального проекта по безопасности ядерных материалов:

• Фонду У.Элтона Джоунса • Фонду Джона Д. и Катрин Макартуров • Фонду CS • Фонду HKN.

Мы также благодарим других спонсоров IEER, поскольку в нашем глобальном проекте мы используем материалы, выработанные при осуществлении предоставленных ими грантов:

• Фонд "Паблик Уэлфер" • Фонд Джона Мерка • Фонд "Плошера" • Программу "Юнитариян Юниверсалист Витч" в Шелтер-Рок • Рокфеллер Файнэншл Сервисес • Благотворительный фонд Стюарта Р. Мотта • Фонд Таун-Крик • Фонд Беллона II • Фонд DJB.

Дизайн: Cutting Edge Graphics, Washington, DC

Фото: Роберт дель Тредичи. Атомик фотографс глэд  
Редактор английского издания: Анита Сет

### Русское издание:

Директор: Александр Пикаев

Научный консультант: Олег Бухарин

Весь тираж "Энергетики и безопасности" распространяется бесплатно.

Выпуск 4 английского издания вышел в свет в октябре 1997 г.

Адрес издательства: Милуская пл., 7

Издательский центр РГГУ

Тираж: 3 000

# Урановое бремя

РОБЕРТ БРУКС И АНИТА СЕТ

Со времени своего открытия в 1789 г. и до начала XX века уран использовался в качестве красителя и покрытия для керамики и стекла.<sup>1</sup> В период между началом XX века и 30-ми гг. он рассматривался в качестве отхода при производстве радия (который использовался при производстве различных инструментов и люминесцентного покрытия для часов, а также в медицинских целях). Крупномасштабная добыча урана началась только после открытия деления ядер в 1938 г. Хотя он встречается в природе в небольших количествах, уран добывается в шахтах, где его концентрация составляет от 0,1 до 0,5 процентов руды. В редких она превышает 10 процентов, как, например, в Саскачеванских месторождениях в Канаде, или достигает еще большей цифры. Существует четыре основных метода добычи:

- в открытых карьерах;
- в шахтах;
- путем закачивания растворителя "in situ". В этом случае растворитель, в частности, хлористая кислота, щелочь углерода и пероксид водорода, закачивается под землю с целью растворить содержащийся в руде уран. Жидкие отходы выкачиваются на поверхность.
- путем растворения отходов. Данный метод предусматривает добычу урана как сопутствующего продукта, содержащегося в крайне бедных рудах, которые образуются в результате добычи золота и фосфатов. Этот процесс предусматривает многократное прокачивание растворителя (серной кислоты или карбоната аммония) через руду с целью извлечения урана до тех пор, пока его концентрация в растворе не станет достаточно высокой.



▲ Урановые "желтые хвосты" в Эллиот-Лейк, провинция Онтарио, Канада. На "желтые хвосты" приходится более 95 процентов объема радиоактивных отходов ядерного топливного цикла (исключая шахтные воды).

Переработка урана заключается в извлечении урана из руды и его переработку в порошок оксида, подлежащий транспортировке. И добыча, и переработка урана приводит к воздействию на персонал, окрестное население и окружающую среду различного рода поражающих факторов. В целях лучшего понимания этих факторов, необходимо, прежде всего, понять состав урановой руды.

Природный уран состоит из трех излучающих альфа-частицы изотопов: U-238, U-235 и U-234. Кроме того, эти изотопы выделяют и гамма-излучение. Наиболее часто встречающийся изотоп, U-238 (он составляет 99,2 процента в природном уране), обладает периодом полураспада около 4,5 млрд.лет. Периоды полураспада U-235 (около 0,7 процентов) и U-234 (его доля составляет всего 0,005 процентов, но на него приходится почти половина радиоактивного излучения урана) составляют, соответственно, 704 млн.лет и 245 тыс.лет. Распад урана-238 приводит к появлению многих радиоактивных продуктов деления, включая торий-234 и -230, радий-226, радон-222 и полоний-218 и -214. Эти продукты деления всегда встречаются в руде вместе с природным ураном.

Уран радиоактивен и химически токсичен. Находясь вне организма, природный уран представляет лишь незначительную угрозу из-за своего относительно слабого гамма-излучения (в случае, если его воздействие не носит длительного характера). При вдыхании или попадании внутрь организма другим путем он, выделяя альфа-частицы, повышает риск заболевания раком легких или костных тканей. Продукты распада урана-238 создают дополнительные угрозы. Торий-234 распадается на месте, в то время как торий-230 имеет тенденцию к накоплению в костных тканях. Полоний накапливается в мягких тканях, а также в костях. Радий, как и кальций, накапливается на поверхности костей и, позднее, в костных матрицах. Радий является известным возбудителем рака костей. Это было обнаружено в результате печального опыта использовавших радий художников. Радий попадал внутрь их организма, когда они облизывали кончики кистей для получения тонких линий.

Газ радон-222 представляет собой продукт распада радия-226 и имеет период полураспада равный 3,82 дня. Радон и его продукты деления привели к росту заболеваемости раком среди персонала урановых рудников. Обычная подземная шахта - наиболее опасна для персонала из-за повышенного воздействия продуктов распада радона. Шахтеры вдыхают содержащийся в воздухе полоний-218, свинец-214, висмут-214 и полоний-214. Происходящий в легких распад этих радионуклидов и является основным путем поражения персонала урановых рудников. Воздействие радона и его продуктов распада измеряется в "рабочих уровнях" и "месячных рабочих уровнях" (см. с. 11).

СМ. УРАНОВОЕ БРЕМЯ НА С. 16

лых доз облучения приводил к их увеличению. Однако сами эти оценки остаются предметом разногласий. Ионизирующая радиация поражает генетический материал практически любой клетки, и может вызвать рак во многих тканях и частях организма. Частично поражающие эффекты зависят от способов облучения. Например, внешнее облучение, скажем, посредством рентгеновских или гамма-лучей, поражает ДНК в клетках или во многих органах таким образом, что раковые заболевания этих органов проявляются многие десятилетия спустя. Необходимо отметить, что чувствительность тканей к радиационному поражению неодинакова. Так, мускульные ткани менее чувствительны, чем костный мозг.

Существует много способов поражения организма радиацией изнутри. Продукты распада радона, находящиеся в подземных урановых рудниках, вдыхаются шахтерами и оседают в их легких. Частицы плутония-239 и других актиноидов которые, в основном, излучают высокоинтенсивные (high LET) альфа-частицы, попадают через дыхательные пути и оседают в эпителиях бронхов легких. Подобное облучение увеличивает риск рака легких. Кроме того, жидкие частицы могут поглощаться и распространяться по организму его кровеносными или лимфатическими системами. Некоторые элементы, как например, радий, стронций или йод, имеют тенденцию накапливаться в определенных органах. Так, йод-131 приводит к концентрации ионизирующей радиации в glandax, что делает их наиболее вероятным местом раковых заболеваний. Йод-131 также используется для лечения рака щитовидной железы, поскольку выделяемая им

радиация уничтожает раковые клетки наряду со здоровыми. Но в отсутствие заболеваний щитовидной железы радиация поражает исключительно здоровые клетки.

### Оценки риска раковых заболеваний в результате поражения ионизирующей радиацией

Оценки риска раковых заболеваний вследствие облучения ионизирующей радиацией приводятся различными институтами, прежде всего, Научным комитетом ООН по эффектам атомной радиации (UNSCEAR), Комитетом Национальной Академии наук США по биологическим эффектам ионизирующей радиации (BEIR) и Международной комиссией по радиологической защите (ICRP). Эти оценки, в основном, основаны на изучении лиц, переживших бомбардировку Хиросимы и Нагасаки, а также от различных групп населения, подвергшихся облучению в терапевтических или диагностических целях, либо на рабочем месте (при работе с радий-содержащими красителями или в урановых шахтах).

Исследования жертв атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки показали значительное повышение статистики раковых заболеваний при дозах свыше 0,2 греев. Эти дозы были получены внезапно, непосредственно после взрыва. При оценке рисков раковых заболеваний в результате получения низких доз ионизирующей радиации или доз, приобретенных вследствие медленного накопления, возник ряд проблем.

Первая проблема состояла в экстраполяции взаимосвязи между дозой и последствиями при проведении нисходящего анализа в направлении все более низких доз. Обычно предполагается, что существует линейная зависимость без выраженных пороговых значений - т.е. риск

СМ. МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НА С. 5

### НИЗКОАКТИВНАЯ РАДИАЦИЯ

Дозы радиации, при которых биологические последствия проявляются через определенный срок, подпадают под общее наименование "низкоактивная радиация". Поскольку при различных уровнях радиации наблюдаются различные физические эффекты, возникла известная путаница относительно верхнего порога низкоактивной радиации.

Понижение количества белых кровяных клеток проявляется уже при дозах в размере 0,1 грея (Gy). Однако поскольку при получении единовременной дозы менее 1 Gy основными долговременными последствиями являются стохастические эффекты, прежде всего, раковые заболевания, многие регулирующие органы полагают, что радиация менее 1 Gy относится к "низкоактивной". Большие дозы, получаемые в течение более длительного времени, также подпадают под определение "низкоактивной радиации", если они не приводят к возникновению немедленных последствий. Например, дозы радиации менее 0,05 Gy, получаемые в течение года, за 30 лет приводят к накоплению дозы в размере 1,5 Gy. Но они по-прежнему относятся к "низкоактивной радиации", поскольку не сопряжены с детерминистскими последствиями. В целом, термин "низкоактивная радиация" не следует понимать, как отсутствие риска или низкое количество общей энергии, накопленной в организме. Это - лишь уровень полу-

ченной радиационной дозы, не приводящий к немедленным проявлениям вредного воздействия.

Согласно данным доклада BEIR № 5, уровень заболеваемости переживших бомбардировку жертв Хиросимы и Нагасаки составляет 0,08 случаев смертельных раковых заболеваний в расчете на 1 зиверт полученной дозы. Это называется брутто-риском для низкоактивной радиации, поскольку здесь учитывается лишь эффект полученных единовременно доз в течение короткого промежутка времени. В обычной практике, основанной главным образом на изучении животных, предполагается наличие меньшего риска - от 0,04 до 0,05 случаев смертельных раковых заболеваний на 1 зиверт дозы, получаемой в период длительного времени. Это называется фактором нетто-риска. Хотя в литературе содержатся ссылки как на более низкие, так и на более высокие уровни риска в расчете на единицу радиационного воздействия, мы полагаем, что коэффициенты брутто- и нетто-рисков представляют собой разумный метод для практического использования. Более низкие оценки риска, защищаемые некоторыми представителями академического сообщества и промышленности, не должны, на наш взгляд, применяться в медицинской практике, поскольку они позволяют интерпретировать неопределенности в пользу более высоких доз.

—АРЖУН МАКХИДЖАНИ

заболевания прямо пропорционален дозе, без присутствия порога воздействия. Поскольку основным результатом низких доз облучения являются раковые заболевания - болезнь широко распространенная и вызываемая различными причинами, линейная беспороговая зависимость не поддается проверке. Тем не менее, имеются значительные радиобиологические свидетельства в поддержку этой теории и именно она обычно используется в целях защиты здоровья населения, в частности, при установлении стандартов.

Вторая проблема заключается в необходимости предположений об изменении расчетов риска заболеваемости раком в будущем. В конце концов, более половины людей, переживших бомбардировку Хиросимы и Нагасаки, до сих пор живы. В настоящее время наилучшие данные получаются при использовании модели относительного риска - т.е. риск заболеваемости раком оценивается как пропорциональный "спонтанному" или "естественному" риску. Если данная модель верна, следует ожидать растущее число случаев заболеваемости раком в результате радиоактивного поражения по мере старения жертв облучения.

Третья проблема связана с тем, что относительная биологическая эффективность облучения частично зависит от энергии радиации. Например, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что низкоэнергетические нейтроны и альфа-частицы могут быть более эффективны в плане причинения биологического ущерба по сравнению с высокоэнергетическими частицами (в расчете на единицу абсорбированной энергии)<sup>2</sup>. Таким образом, общепринятые предположения, основанные на неизменности качественных факторов, могут иногда приводить к неточным оценкам дозы.

Наконец, имеются неопределенности, связанные с воздействием низких доз и скорости их накопления при облучении низкоинтенсивной (low-LET) радиацией. Выводы, сделанные BEIR, ICRP и рядом других организаций, свидетельствуют о том, что низкие дозы и скорости их накопления при облучении низкоинтенсивной радиацией менее опасны с точки зрения заболеваемости раком, прежде всего, лейкемией, чем это вытекало бы из линейной экстраполяции данных по низкоинтенсивной радиации при высоких дозах и высоких темпах их накопления (т.е. при низких дозах и темпах накопления эффект не является линейным). К сожалению, эпидемиологическая база данных для оценки правильности указанных поправок весьма отрывочна.

Несмотря на потенциальные ограничения, большинство перспективных оценок раковых заболеваний продолжает основываться на использовании факторов риска, рассчитанных официальными комитетами по радиологической защите. Их современные оценки следующие:

- UNSCEAR, 1993:<sup>3</sup> 0,11 смертельных случаев заболевания раком на 1 чел.-зиверт при высоких дозах (сопоставимых с полученными при бомбардировках Хиросимы и Нагасаки). Для низких доз, UNSCEAR отметил, что по фактору сокращения риска "нельзя сослаться на какую-либо определенную цифру", но "ясно, что этот фактор невелик. Данные японских исследований

показывают, что он не превышает 2<sup>74</sup>. Для населения в возрасте от 18 до 64 лет (что соответствует возрасту, типичному для промышленной рабочей силы) фактор, равный 2, означает риск заболевания раком со смертельным исходом при низких дозах в размере 0,04 на чел.-зиверт.

- BEIR Committee, 1990:<sup>5</sup> 0,08 смертельных случаев раковых заболеваний на 1 чел.-зиверт при получении единовременной дозы, равной 0,1 зиверту. Указанные данные получены при изучении жертв Хиросимы и Нагасаки и не откорректированы на сокращение риска при низких дозах.
- ICRP, 1991:<sup>6</sup> 0,05 смертельных исходов на 1 чел.-зиверт для всего населения и 0,04 смертельных случаев заболевания раком на 1 чел.-зиверт для взрослого персонала. Обе оценки приводятся для низких доз и учитывают фактор сокращения темпов накопления дозы равный 2.
- Агентство охраны окружающей среды США использует фактор риска заболевания раком равный 0,06 на 1 чел.-зиверт<sup>7</sup>. Поскольку вероятность заболевания раком на 50 процентов превышает вероятность смертельных исходов, риск смертельных раковых заболеваний составляет 0,04 на 1 чел.-зиверт.

Оценки риска в расчете на единицу дозы могут быть опять подвергнуты существенным изменениям (как в большую, так и в меньшую стороны). Как отмечает BEIR, "большинство жертв атомных бомбардировок по-прежнему живы и показатели смертности среди них должны учитываться для получения надежных оценок рисков на продолжении всей жизни. Это особенно важно для тех из них, которые подверглись поражению будучи детьми или находясь в материнской утробе и в настоящее время достигли возраста, сопряженного с наибольшим риском заболевания раком<sup>8</sup>.

\* Перепечатано с разрешения издателя из: Nuclear Wastelands, Arjun Makhijani, Howard Hu, and Katherine Yih, eds. (Cambridge: MIT Press, 1995), Chapter Four "Health Hazards of Nuclear Weapons Production" (примечания объяснительного характера исключены).

1 1990 Recommendations of the International Committee on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*, vol.21, No.1-3. Oxford, New York: Pergamon Press, 1991, p. 15.

2 National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. *Health Effects of Exposures to Low Levels of Ionizing Radiation*, BEIR V. Washington, D.C. National Academy Press, 1990, pp. 27-30.

3 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation*. New York: United Nations, 1993, pp. 16-17.

4 *ibid.*, p. 17.

5 National Research Council 1990, pp. 5-6.

6 ICRP 1991, pp. 69-70.

7 U.S. Environmental Protection Agency. *Issues Paper on Radiation Site Cleanup Regulations*. EPA 402-R-93-084. Washington, D.C.: Office of Radiation and Indoor Air, September 1993, p. 7.

8 National Research Council 1990, p. 8.

# Исследование загрязнения и радиационного воздействия от завода Ферналд, штат Огайо (США)

Данная статья, первоначально опубликованная в нашем американском бюллетене "Сайенс фор демократик экшн" ("Наука за демократическое действие"), призвана предоставить российскому читателю некоторое представление о ситуации в Соединенных Штатах, связанной с изучением радиоактивности в результате функционирования предприятий по производству ядерного оружия. Мы также приводим критерии, представляющие важность для определения того, следует ли проводить медицинские исследования и каким образом это делать.

Ниже представлены два исследования по предприятию в Ферналде, где производился металлический уран для американской программы ядерного оружия. Одно из них посвящено окрестностям завода, другое - дозам для персонала. Оба из них были предприняты в рамках судебного разбирательства против компании "Нэшнл Лэд оф Охайо" (НЛО), подрядчика Министерства энергетики, управлявшего заводом с 1951 по 1985 гг. Принадлежавший Министерству энергетики Центр "Фид Материалз Продакшн" был расположен около г. Ферналд в штате Огайо (известен как завод Ферналд) и производил металлический уран, в основном, для предприятий по производству плутония, находящихся в Саванна-Ривер-Сайт (штат Южная Каролина) и Хэнфорд (штат Вашингтон). Завод Ферналд включал 10 производственных цехов и ряд вспомогательных зданий. На данном объекте находящийся в различных формах уран (рудные концентраты, лом, повторно извлеченный ураносодержащий материал) перерабатывался для получения металлического урана. Шесть хранилищ отходов на предприятии содержали как радиоактивные, так и нерадиоактивные химические вещества, включая изотопы урана, торий-230 (отходы от процесса производства урана), торий-232 и соли бария. Кроме того, шахты K-65, представлявшие собой расположенные в пределах объекта резервуары, содержали радий-226 (продукт распада выделяющего радон урана-238), некоторое количество тория-230 и различные нерадиоактивные токсичные вещества. В течение всего периода эксплуатации предприятия Министерство энергетики и его подрядчики постоянно утверждали, что окрестное население не подвергается вредному воздействию и что это воздействие находится в пределах установленных норм. Эти утверждения были оспорены в 1985 г. в ходе судебного разбирательства, начатого местным населением против НЛО. В 1985 г. Лиза Кроуфорд, ведущий истец, запросила данные наблюдений по последствиям широкоизвестного случая выброса урана в результате аварии на предприятии в конце 1984 г. и обнаружила загрязнение ураном скважины, которую она и ее семья использовали для получения питьевой воды. Ей также удалось узнать, что Министерство энергетики и НЛО знали о загрязнении в течение четырех лет, но не информировали ее. В действительности, завод Ферналд произвел ряд выбросов в воду и атмосферу радиоактивных и нерадиоактивных

вредных веществ, однако Министерство энергетики располагало лишь очень ограниченными данными по некоторым из них, и не имело данных по многим остальным. Среди указанных вредных веществ были: уран, торий, газ радон, радий, технеций-99, аммоний, плавиковая кислота, фтор, азотная кислота, керосин, хром и свинец. Наиболее опасные выбросы были связаны с утечками урана и газа радона в атмосферу. До сих пор не произведен детальный анализ выбросов нерадиоактивных вредных веществ, и существующих данных для такого анализа недостаточно.

## Выбросы урана

Внутренние оценки деятельности предприятия были начаты в 1985 г. и продолжались до закрытия завода в 1989 г. В начале 1985 г. НЛО оценивало объемы утечек урана за 34-летний период начиная с 1951 г. (когда в строй вступили некоторые объекты предприятия) примерно в 96 т. К 1987 г. оценки НЛО были увеличены до 136 т после включения в них наиболее серьезных утечек, имевших место в 50-е гг. Указанные официальные оценки имели целый ряд серьезных недостатков. Среди важнейших ошибок следует выделить следующие:

- Предположение о том, что, при отсутствии иных данных, выбросы были нулевыми.
- Использование сфабрикованных данных, показывавших, что выбросы были нулевыми, в то время как измерения в тех местах и в те сроки в действительности не проводились.
- Предположение, что очистное оборудование, предназначенное для удаления урана из высококислотных выбросов, всегда функционировало в рамках установленных производителем стандартов, несмотря на то, что внутренняя документация завода свидетельствовала об обратном.
- Использование неверных формул для расчетов выбросов производимых очистным оборудованием в условиях различной эффективности его работы.
- Неспособность рассчитать низкую эффективность работы пылеуловителя и частые проблемы с пылеулавливающим оборудованием.
- Низкая эффективность мер промышленной гигиены, в частности, радиоактивные материалы оставались высыхать в дверных проемах и в оборудовании, находящемся в неисправном состоянии.

В 1987 г. IEER нанял юридическую компанию "Уэйт, Шнайдер, Бэйлесс энд Чесли" для проведения ряда экспертных исследований по делу Ферналд. Проведенный IEER анализ документации показал, что администрация предприятия знала о многих недостатках при оценках выбросов. Например, неправильность формулы расчетов

для утечек из оборудования отмечалась в составленном в 1971 г. одним из инженеров предприятия меморандуме. Там эта формула характеризовалась как "врожденно фальшивая", поскольку при ее использовании получалось, что по мере устаревания оборудования количество выбросов должно уменьшаться - в полном противоречии с истиной.

Под давлением общественного мнения и судебного разбирательства компания "Вестингауз" - новый подрядчик (и не являющаяся ответчиком) - вновь пересмотрела официальные данные за период 1951-85 гг. и заявила, что объемы выбросов за данный период составили от 180 до 250 т. Хотя указанные оценки были существенно выше, они по-прежнему игнорировали многие известные факты. Например, неучтенные потери в течение всей 37-летней истории предприятия оценивались всего примерно в 300 кг, тогда как, согласно внутреннему документу завода, эти потери превышали указанную цифру в течение месяца. Во время судебного разбирательства в 1988-89 гг. IEER

сконцентрировался на оценках потерь урана, поскольку он являлся основным производимым материалом, и данные по другим материалам, попавшим в атмосферу, были незначительными или отсутствовали вообще. Наша деятельность носила подчеркнuto предварительный характер, главным образом, потому что IEER был не в состоянии получить доступ к важнейшим документам деятельности предприятия, а также к документации по эффективности оборудования по контролю за загрязнением. Более того, качество данных, которыми мы располагали, было весьма низким и некоторые из них отличались внутренней непоследовательностью. Тем не менее, мы пришли к выводу, что официальные оценки, скорее всего, ошибочны, и что в действительности выбросы превысили верхний официальный предел в 250 т, а предельно допустимые нормы концентрации урана в атмосфере были превышены, как минимум, несколько раз. Согласно оценкам IEER, выбросы урана находились в пределах от 270 до 1400 тыс.кг, при этом средняя оценка составляла 390 тыс.кг. Кроме того, IEER рекомендовал проведение дальнейших детальных исследований, поскольку сделанные выводы носили весьма предварительный характер. Министерство энергетики, выступавшее в качестве ответчика за своего подрядчика - НАО, достигло в середине 1989 г. договоренности об улаживании дела за 78 млн.долл., отметив при этом, что ни оно, ни его подрядчик не совершали каких-либо неправомерных действий, отрицая даже возникновение технических проблем. Часть указанной суммы была направлена на проведение медицинского наблюдения подвергнувшегося вредному воздей-

ствию населения. (Согласно условиям контракта с правительством, НАО располагала иммунитетом от несения какой-либо ответственности, включая и ответственность за игнорирование или нарушение правил эксплуатации). Впоследствии Центр по контролю и предотвращению заболеваний начал независимое исследование об уровне доз, полученных населением в результате деятельности завода Ферналд<sup>2</sup>. Подготовленный "Рейдиобайологикал Ассессментс Корпорейшн" (RAC) проект окончательного доклада данного исследования, обошедшегося в 4 млн.долл., был опубликован в августе 1996 г.<sup>3</sup> Он подтвердил обоснованность критики IEER в адрес официальных оценок выбросов урана в атмосферу и значительно сузил спектр оценки объема выбросов, сведя их диапазон между 270 и 360 тыс.кг. При этом наиболее вероятная оценка была названа в размере 310 тыс.кг. В таблице ниже приведены различные оценки выбросов урана с предприятия в Ферналде. В данной таблице указаны только средние оценки:

#### ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ УРАНА

Организация	Выбросы урана в атмосферу, кг	Выбросы урана в поверхностные воды, кг
НАО, начало 1985	96 000	74 000
"Вестингауз", 1987	136 000	74 000
"Вестингауз", 1989	180 000	160 000
IEER, 1989	390 000	оценки не проводились
RAC 1996	310 000	82 000

Источник: Помимо доклада RAC 1996 г. обзор дискуссии вокруг оценок объема выбросов, а также библиографию по этому вопросу см. в: Makhijani and Franke 1989.

После урегулирования судебного разбирательства по делу Ферналд был проведен целый ряд исследований по оценке выбросов радиоактивных материалов в результате деятельности других предприятий по производству ядерного оружия. Основываясь на анализе ранее засекреченных данных и внутривозводской документации, эти исследования пришли к общему выводу, что в действительности выбросы радиоактивных материалов в период эксплуатации данных объектов значительно превышали официальные оценки.

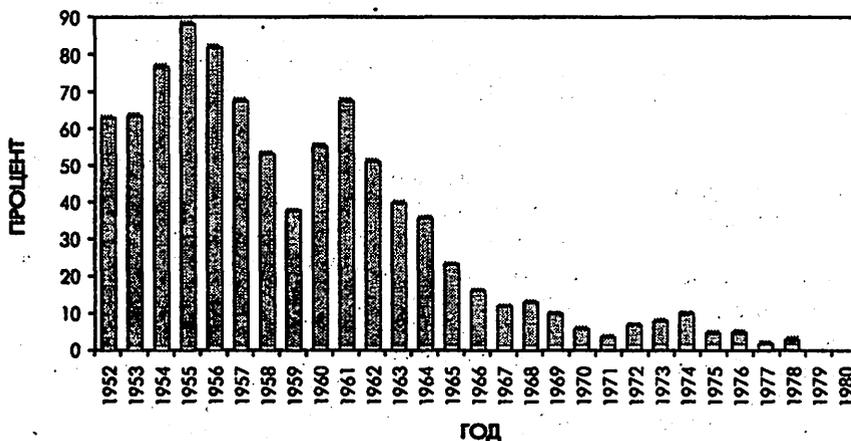
#### Персонал

Исследования IEER показали, что подобная ситуация имеет место и в отношении доз для персонала предприятий. При разбирательстве по другому судебному иску, возбужденному персоналом завода Ферналд, мы обнаружили, что вопреки официальным утверждениям о том, что персонал не получал доз сверх допустимых, более половины работников подвергались чрезмерному воздействию каждый год, за исключением одного, в период 50-х и начала 60-х гг., и что значительное количество работников получало повышенные дозы и впоследствии.

Центральная проблема заключалась в воздействии урановой пыли, проникавшей внутрь организма. И хотя после 1968 г. у многих работников измерялась концентрация урана в моче и в легких, эти измерения не использовались для оценки доз радиации и не регистрировались в медицинских картах. Таким образом, Министерство энергетики могло утверждать, что персонал предприятия не подвергался повышенному воздействию на основании их медицинских карт, игнорируя тот факт, что эти карты вообще не содержали оценок полученных внутри организма доз. Рисунок ниже показывает долю работников предприятия с накоплениями урана в легких, которые получили радиационные дозы в расчете на легкие свыше 15 рем, т.е. превышающие максимально допустимые для персонала дозы на тот период. Американские эпидемиологические исследования подвергнувшегося радиационному воздействию персонала нуждаются в серьезных уточнениях, поскольку они основаны на данных по дозам, полученных из внешних источников, и не учитывали воздействие радионуклидов, попавших внутрь организма. Более того, имеется много вопросов относительно точности, по крайней мере, некоторых данных по облучению из внешних источников.

Важно, чтобы оценки воздействия проводились на основе первичной информации, будь это данные по воздействию на персонал, или сочетание сведений, полученных в результате экологического мониторинга и анализа данных по выбросам для окрестного населения. При выработке реальных оценок необходимо тщательно анализировать качество информации и ее адекватность. Более того, если данные по выбросам крайне низкокачественны, как это обычно бывает в отношении исследованных IEER объектов Министерства энергетики, то оценка доз весьма затруднительна. Как правило, выработать оценки индивидуальных доз или доз для населения малой численности гораздо сложнее, чем для населения большой численности. В этих условиях, менее сложно и, иногда, более целесообразно исследовать вопрос о превышениях предельно допустимых в прошлом и в настоящее время норм воздействия в отношении радиоактивных или нерадиоактивных токсичных материалов. Например, среднюю концентрацию в атмосфере урана и некоторых других радиоактивных материалов по периметру границ предприятия можно определить и сопоставить с имеющимися правилами. При оценке доз, полученных окрестным населением, необходимо:

Доля персонала, подвергнувшегося ежегодному воздействию, средняя концентрация урана в легких, соответствующая дозе в расчете на легкое в 15 рем и более



Источник: D.Franke and K.R.Gurney, "Estimates of Lung Burdens for Workers at the Feed Materials Production Center, Fernald, Ohio", (Takoma Park: IEER, 1994), p.8.

1. Оценить во времени данные экологического мониторинга для атмосферы, воды и почвы, а также данные по выбросам.

2. Сопоставить данные экологического мониторинга и полученные в результате моделирования сведения о концентрации различных веществ в окружающей среде с прошлыми и действующими экологическими стандартами. Эти стандарты получены на основе предельно допустимых доз, что позволяет путем сопоставления с подлежащими регулированию уровнями концентрации выявить индивидуальные

## Выводы

Основываясь на наших исследованиях объектов Министерства энергетики США, IEER пришел к выводу, что проведение медицинских исследований на указанных предприятиях очень часто существенно затрудняется недостатком данных, их низким качеством, недостаточным статистическим учетом собранных сведений, и, в некоторых случаях, даже откровенной фабрикацией. Засекречивание и установление ограниченного доступа к необходимым сведениям зачастую создает дополнительные трудности. Вопрос о точности медицинских исследований крайне сложен, но посредством использования ряда принципов можно определить, были ли данные исследования проведены в соответствии с научными стандарта-

ми. гипотетические дозы облучения указанными концентрациями вредных веществ.

3. Оценить точность и полноту информации:

- Были ли учтены все радиоактивные материалы?
- Были ли рассмотрены все необходимые нерадиоактивные материалы?
- Если по некоторым материалам данные отсутствуют, были ли предприняты попытки рассчитать потенциальный объем выбросов или потенциальные объемы атмосферной концентрации на основе использования данных из других источников? Если нет, имеются ли какие-либо способы оценить важность того



или иного материала с точки зрения вредного воздействия?

4. Определить, были ли учтены все возможные пути радиоактивного воздействия и оценена относительная важность каждого из них. Пути воздействия включают: прямое воздействие через воздух и питьевую воду, загрязненную почву и пищу, или в результате концентрации в пищеварительном тракте (как это, например, происходит с иодом-131 и некоторыми другими органическими нерадиоактивными загрязнителями).

5. Проверить, были ли проанализированы или, хотя бы, упомянуты нераковые и синергетические эффекты.

6. Проверить, учитывались ли аварийные выбросы с предприятия и рассматривалось ли их воздействие на максимальные дозы.

7. Сопоставить факторы риска, используемые при оценке воздействия низкой радиации или нерадиоактивных токсичных веществ, с существующими нормативными документами.

8. Проанализировать введущие дискуссии относительно неопределенностей в обе стороны - исходя из каких обстоятельств реальные дозы и риски могут быть меньше или больше рассчитанных, и подлежат ли указанные неопределенности количественному измерению.

Раскрытие первичной информации и документации в сфере медицины и экологии, давление со стороны Конгресса, журналистов и неправительственных организаций сыграли очень важную роль в повышении качества исследований по медицинским и экологическим последствиям производства ядерного оружия. В настоящее время в Соединенных Штатах подобные исследования проводятся ведомствами, не связанными с Министерством энергетики, в ведении которого находятся американские заводы по производству ядерного оружия. Несмотря на то, что финансирование этих исследований проводится Министерством энергетики, за их осуществление и поиск подрядчиков отвечают другие правительственные ведомства, такие как Центр по контролю и предотвращению заболеваний и Национальный институт безопасности и здравоохранения на рабочих местах. Эта система возникла в результате того, что исследования, проводимые Министерством энергетики в период "холодной войны", были сочтены, как правило, недостоверными.

В настоящее время начинается реализация совместного российско-американского проекта в рамках Координационного комитета по исследованию радиационных эффектов по изучению медицинских последствий функционирования предприятия "Маяк" для его персонала и окрестного населения. Среди основных институтов, вовлеченных в этот проект, - московский Институт безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) Российской Академии наук, Филиал #1 Московского биофизического института в Озерске и Уральский научно-исследовательский центр радиационной медицины в Челябин-

ске. Представляется важным, чтобы при реализации этого проекта, как и других медицинских исследований, открыто публиковались сведения по медицинским и экологическим аспектам в целях повышения доверия общественности к его результатам, а также для проведения независимых оценок его выводов.

- 1 Подробнее см.: Arjun Makhijani, Release Estimates of Radioactive and Non-Radioactive Materials to the Environment by the Feed Materials Production Center 1951-85 (Takoma Park: Institute for Energy and Environmental Research, 1988); and Arjun Makhijani and Bernd Franke, Addendum to the Report 'Release Estimates of Radioactive and Non-Radioactive Materials to the Environment by the Feed Materials Production Center 1951-85 (Takoma Park: Institute for Energy and Environmental Research, 1989).
- 2 К сожалению, не был сделан запрос на изучение воздействия нерадиоактивных токсичных материалов.
- 3 RAC подготовила ряд промежуточных и окончательных вариантов доклада, на основе которых и был составлен доклад 1996 г. Среди основных из них, имеющих отношение к данной статье, следующие: Voilleque et al., Fernald Dosimetry Reconstruction Project: Tasks 2 and 3: Radionuclide Source Terms and Uncertainties, Draft Report (Neeses, South Carolina: Radiological Assessments Corporation, 1993); а также Killough et al., Fernald Dosimetry Reconstruction Project: Task 6: Radiation Doses and Risks to Residents from FMPC Operations from 1951-1988, Draft Report (Neeses, South Carolina: Radiological Assessments Corporation, 1996).

## ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

СО СТР. 2

Исследования доз и эпидемиологические исследования представляют собой важный инструмент в определении взаимосвязи между загрязнителем и медицинскими последствиями. Однако их результаты могут иметь неявный характер из-за целого ряда имеющихся трудностей:

- Неточные и неполные данные по загрязнителям. В целом, легче оценить дозы для персонала, который, как правило, подвергается постоянному наблюдению (хотя часто и недостаточному), чем для окрестного населения, по которому обычно не имеется данных. Однако информация по нерадиоактивным токсичным материалам зачастую недостаточна как в отношении персонала, так и местного населения.
- Трудности в выделении подвергшегося заражению населения. Например, персонал группируется в зависимости от полученных внешних доз от бета- и гамма-радиации, поскольку данные по внутренним дозам, как правило, недостаточны. Если подвергшееся вредному воздействию население не может быть сгруппировано исходя из уровней полученных доз, крайне затрудняются оценки дополнительного риска. Это имеет особое значение в случае, если небольшая группа подвергшегося сильному воздействию населения попадает в одну более широкую группу с лицами с относительно невысоким заражением.
- Трудности с наблюдением лиц в течение длительного периода. Период времени между заражением и воз-

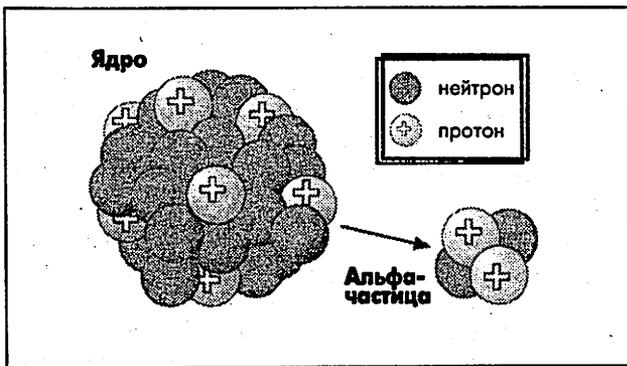
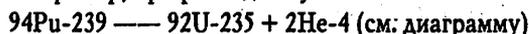
СМ. ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА С. 19

# Радиоактивный распад

**Р**адиоактивные элементы обладают нестабильным ядром. Поэтому они трансформируются в другие элементы, при этом, как правило, происходит эмиссия частиц (а иногда и их поглощение). Этот процесс, называемый радиоактивным распадом, обычно приводит к излучению альфа- и бета-частиц из ядра. Некоторые радионуклиды приобретают стабильность после одного распада, однако другие распадаются на нестабильные элементы. В случае тяжелых изотопов, таких как уран-238, происходит целый ряд распадов, при которых вновь образующиеся элементы распадаются до тех пор, пока не образуется окончательный стабильный элемент. Этот процесс известен как цепной распад. В целом, нуклиды с одинаковым количеством протонов и нейтронов стабильны. Период полураспада радионуклидов означает период времени, в течение которого половина атомов элемента подвергается радиоактивному распаду.

Альфа-частица представляет собой ядро атома гелия (каждый из которых состоит из двух нейтронов и двух протонов). Тяжелые элементы, например, уран-238 и плутоний-239, при распаде выделяют, в основном, альфа-частицы.

Например, при распаде плутония-239:



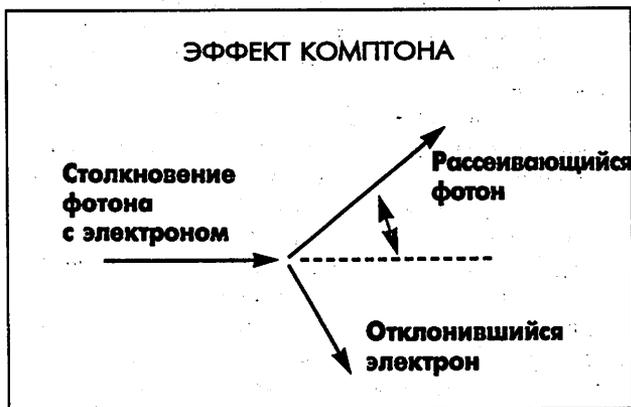
Выделяемая альфа-частица несет большое количество энергии, порядка 5 млн. электрон-вольт. Атом гелия при комнатной температуре обладает энергией, равной 0,025 электрон-вольт. Биологическое поражение радиацией происходит именно вследствие большой энергии частиц, излученных в процессе распада и попадающих в клетки организма.

Альфа-частицы относятся к тяжелым и передают свою энергию другим атомам и молекулам на значительно меньшем пути, чем гораздо более легкие электроны, представляющие собой основное средство радиационного воздействия гамма- и бета-излучения. При нахождении вне организма альфа-частицы не представляют угрозы, поскольку они не в состоянии преодолеть внешний "мертвый" слой кожи. Однако при проникновении внутрь организма путем механического попадания, вдыхания или попадания через раны и порезы, альфа-частицы очень опасны, поскольку при преодолении небольших расстояний в живых тканях они постоянно бомбардируют окружающие клетки и ткани. Альфа-радиация именуется радиацией с высокой линейной передачей энергии (или high LET-радиацией, где LET - сокращение от англ. "linear energy transfer"), в отличие от относитель-

но низкой передачи энергии на единицу длины фотонов и электронов (low LET-радиация). Термины "high" (высокая) и "low" (низкая) означают скорость передачи энергии на единицу длины при облучении.

Бета-частица представляет собой электрон или позитрон (положительно заряженная частица, в остальном аналогичная электрону). Бета-частицы значительно легче альфа-частиц и проникают гораздо дальше. При обладании достаточной энергией, они способны проникать через кожу. Поэтому некоторые источники бета-излучения, даже находясь вне организма, представляют собой значительную опасность, особенно для лимфатической системы. Основная часть бета-радиации может быть экранирована легкой системой защиты, например, куском дерева или несколькими листами бумаги. Однако некоторые источники, в частности, натрий-24, требуют более тяжелой защиты.

Радиоактивный распад также часто сопровождается выделением гамма-радиации, являющейся очень высокочастотным электромагнитным излучением (например, рентгеновским). Защита от гамма-лучей требует тяжелого экранирования, в частности, посредством использования свинца или стали. Гамма-лучи состоят из фотонов, представляющих собой сочетание квантовой и электромагнитной энергии. Выделение фотонов не приводит к трансмутации. Однако после первого "столкновения" фотона и молекулы, при котором происходит поглощение фотона, молекула сохраняет лишь небольшую долю его энергии. Обычно основная ее часть повторно выделяется в форме



бета-частиц (электрона) или другого фотона. Это называется эффектом Комптона (см. диаграмму). Эти электроны, а также электроны, образующиеся в результате дальнейших столкновений с новыми фотонами, являются основным источником опасности при гамма-радиации.

Альфа-, бета- и гамма-радиация обладают различными свойствами, но все они представляют собой ионизирующую радиацию, т.е. каждая из трех разновидностей обладает достаточной энергетикой для разрушения химических связей и, тем самым, способна повреждать или уничтожать живые клетки. Как и гамма-лучи, видимый человеческим глазом свет также является электромагнитной энергией, однако обладающей более низкой частотностью. Фотоны видимого света не располагают достаточной энергетикой для того, чтобы вызвать ионизацию. Радиоволны еще более низкочастотны, чем видимый свет.

## Дозы радиации

**Р**адиационное поражение человека измеряется количеством энергии радиации, полученной его организмом; поражение населения измеряется суммированием индивидуальных доз облучения<sup>1</sup>. Единицей измерения дозы облучения является грей. Она измеряет количество ионизации, возникшей в результате облучения и представляет собой чисто физическую единицу измерения. Другие факторы, например, тип радиации (альфа, бета и т.п.), а также часть организма, подвергнувшаяся поражению, определяют биологический эффект облучения. При внесении корректив с учетом этого фактора используется другая единица измерения - зиверт. При оценке поражения групп населения используется показатель человеко-зиверт. Дозы, полученные населением, измеряются в человеко-греях и человеко-зивертах - в зависимости от того, измеряется ли накопление энергии или биологический ущерб.

В случае урановых шахт применяется и другая единица - рабочий уровень (РУ) - количество продуктов распада радона (также именуемых дочерними элементами) на один литр воздуха, которые приведут к излучению 130 млрд. электрон-вольт энергии альфа-частиц. Если дочерние элементы радона находятся в состоянии равновесия с радоном в воздухе (т.е., если радон остается в воздухе в течение определенного времени), то примерно 100 пикокюри (3,7 беккерелей) радона на литр воздуха составляет 1 рабочий уровень. Месячный рабочий уровень (МУР) представляет собой показатель общей дозы радиации, которую получает шахтер при вдыхании 1 рабочего уровня в течение одного рабочего месяца (170 часов).

Источниками доз радиации могут быть как находящиеся вне организма, так и вещества, проникшие внутрь организма при еде, питье, дыхании, или через порезы или раны. Оценить дозы радиации при облучении гамма-лучами или бета-частицами, при наличии необходимого измерительного оборудования, довольно легко. Более сложным является измерение дозы радиации от источника, находящегося внутри организма. Размер дозы будет зависеть от химической формы материала, пути его проникновения и местоположения в организме, а также от скорости выведения из организма и ряда других факторов. Вывод радионуклидов из организма, как правило, представляет собой весьма сложное явление; его можно лишь весьма приблизительно описать посредством концепции "биологического полураспада" - времени, необходимого для выведения из организма половины материала.

При оценке доз от природной радиоактивности прямое измерение количества радионуклидов в организме практически невозможно. Необходимо применять комплексные компьютерные модели, часто в условиях присутствия большого числа параметров и связанных с ними неопределенностей. Это особенно характерно для оценки доз, полученных населением за пределами объекта, где отсутствовало прямое измерение доз или накопле-

### ЕДИНИЦЫ РАДИАЦИИ И ДОЗЫ

**Беккерель (Bq):** стандартная международная единица радиоактивности, равная одному распаду за секунду. Это - очень небольшая единица, равная примерно 27 пикокюри.

**Кюри (Ci):** традиционная единица измерения радиоактивности, равная радиоактивности 1 грамма чистого радия. Она эквивалентна 37 млрд. распадов в секунду (37 млрд. беккерелей).

**Рад:** единица измерения поглощенной дозы радиации, определяемая как накопление 100 эргов энергии на 1 грамм ткани.

**Грей (Gy):** Единица поглощенной дозы, равная 100 радам.

**Рентген:** Старая единица измерения радиационного воздействия. Представляет собой единицу гамма-радиации, измеряемую уровнем ионизации атмосферы. От 1 рентгена нежесткие биологические ткани получают радиационное воздействие, равное примерно 1 раду.

**Рем (радиационный эквивалент человека, от англ. radiation equivalent man):** единица измерения эквивалентной поглощенной дозы радиации, учитывающая различные пути передачи энергии от ионизирующей радиации тканям человеческого организма (известна также как относительная биологическая эффективность). В то время как в радах и греях измеряется накопление энергии в тканях, ремы и зиверты измеряют биологический ущерб. В случае бета- и гамма-радиации рады и ремы равны друг другу. Однако, поскольку альфа-радиация наносит гораздо больший ущерб на единицу энергии, накопленной в живых тканях, измеренная в радах альфа-радиация должна быть умножена на равный 20 коэффициент с тем, чтобы получить результат в ремах. Указанный коэффициент 20 (называемый качественным фактором) принят в настоящее время, однако в будущем он может быть изменен в результате переоценки наносимого радиацией ущерба. В настоящее время ICRP рекомендует ограничение дозы в пределах 2 рем/год для персонала и 500 миллирем/год для населения.

**Зиверт (Sv):** единица измерения эквивалентной поглощенной дозы, равной 100 ремам.

**Человеко-зиверт:** Доза для населения, определяемая как сумма индивидуальных доз населения определенной выборки.

**Рабочий уровень (РУ):** Единица дозы, используемая при добыче урана. Рабочий уровень представляет собой единицу концентрации в воздухе потенциальной альфа-энергии, излучаемой радоном и его продуктами деления. Если радон присутствует в воздухе в течение определенного времени, 1 рабочий уровень равен примерно 100 пикокюри радона на 1 литр воздуха.

**Месячный рабочий уровень (МРУ):** Месячный рабочий уровень определяется как воздействие 1 среднего рабочего уровня в течение рабочего месяца, равного 170 часам.

ния в организме радиоактивных материалов. Однако количество радионуклидов в пище, воде, воздухе может быть измерено. Если это сделано достаточно аккуратно, подобные измерения могут послужить основой для оценки полученных доз. Если внутреннее накопление ра-

СМ. ДОЗЫ РАДИАЦИИ НА С. 14

## Эффективный эквивалент дозы

При попадании радиоактивности внутрь организма получаемая доза зависит от энергии, приносимой во внутренние органы - легкое, щитовидную железу, кости.<sup>1</sup> Коэффициент конверсии дозы позволяет перевести количество радиоактивности (измеряемой в кюри или беккерелях) в дозу (измеряемую в ремах или зивертах). Используемые при выработке правил и норм коэффициенты рассчитываются как при использовании экспериментальных данных, так и на основе математического моделирования. Для каждого отдельно взятого радионуклида указанный коэффициент зависит от периода полураспада радиоактивного материала и от типа излучаемой радиации (альфа-, бета-, гамма-). Он также зависит от того, насколько легко радионуклид способен проникнуть в организм. Для материалов, способных проникнуть внутрь путем вдыхания, учитывается их растворимость. Для материалов, проникающих с пищей, учитывается их забор в организм - количество материала, поглощаемое кровью в малой кишке.

Растворимость означает, с какой вероятностью материал растворим в воде. Чем он менее растворим, с тем большими сложностями для организма связано его выведение из легких. Обычно после поглощения нерастворимый материал находится в организме в течение более длительного времени, что приводит к большому ущербу. Этим объясняется, что для большинства радионуклидов нерастворимые формы имеют более высокий коэффициент конверсии дозы по сравнению с обладающими большей растворимостью. Аналогичным образом, радионуклиды с меньшей степенью поглощения быстрее выводятся из организма и причиняют меньший ущерб. Поэтому при одинаковой радиоактивности их коэффициент конверсии ниже.

Радиационные стандарты для персонала и населения измеряются в эквиваленте дозы, полученной организмом в целом. Но в действительности организм крайне редко - если вообще когда-либо - получает равномерное облучение, и отдельные его части и органы зачастую поражаются больше, чем другие. Это происходит, поскольку проникающие в организм радионуклиды неравномерно распределяются между различными органами (например, радиоактивный йод концентрируется в щитовидной железе, а попадающий через дыхательные пути плутоний наносит наиболее существенное поражение легким, тогда как стронций накапливается в костях). Кроме того, не исключена возможность и того, что внешний радиационный источник приводит к поражению только части организма.

Эффективный эквивалент дозы представляет собой метод преобразования реального весьма сложного процесса радиоактивного воздействия в более простую концепцию дозы, поражающей организм в целом - т.е. полученная локально доза условно распространяется на весь организм. Это является методом количественной оценки повышения вероятности заболеваний вследствие получения дозы, что измеряется, главным образом, дополнительными случаями смертельных раковых заболеваний и наследственных болезней. Эффективные дозы позволяют делать сопоставления между различными видами радиационного воздействия.

Для оценки того, получило ли какое-либо конкретное лицо дозу, превышающую рекомендованный лимит (единовременный коэффициент конверсии дозы), применяется "эффективный" коэффициент конверсии дозы в расчете на определенный орган. Избранный орган именуется в этом случае "стандартным органом". Эффективная доза рассчитывается путем учета доз, полученных отдельными органами, и их преобразованием в эквивалент дозы организма в целом путем использования различных коэффициентов. Затем эти цифры суммируются для расчета общей дозы. Указанные коэффициенты показаны в таблице ниже. Таким образом, например, полученная щитовидной железой доза в 20 рем равна эффективной дозе в 0,6 рем.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДОЗ  
ОТДЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Орган или ткань	Коэффициент
Половые органы	0,25
Грудь	0,15
Красный костный мозг	0,12
Легкое	0,12
Щитовидная железа	0,03
Поверхность костей	0,03
Остальные*	0,30

\* При поражении пяти других органов или тканей, получающих наиболее высокие эквиваленты доз, применяется коэффициент, равный 0,06 (исключая кожу, хрусталик глаза и конечности).

Имеет место как единовременное, так и постоянное радиационное воздействие. Единовременное воздействие возникает при чрезвычайных обстоятельствах, в частности, авариях. Постоянное воздействие может возникнуть в результате регулярных выбросов радиоактивности в воздух или воду, и осуществлять поражение в течение обычной повседневной жизни.

Даже при воздействии радиоактивности на организм в течение очень короткого периода времени (при единовременном воздействии), радиоактивный материал остается в организме на определенное время, в течение которого и оказывает свое воздействие. Длительность воздействия определяется периодом полураспада материала, попавшего в организм, и количеством времени, в течение которого он остается в организме (доминирующим является меньший из указанных факторов). Доза, ожидаемая в течение всего эффективного периода воздействия радиоактивности в организме, именуется полученной дозой. Эквивалентом полученной дозы, установленным ICRP, является доза, эквивалентная накопленной в течение 50 лет после начала воздействия радионуклида.

<sup>1</sup> Данная статья перепечатана в переработанном варианте из: Kevin Gutney, "DCFs", *Science for Democratic Action*, vol. 2, No. 3 (Fall 1993), p. 8.

## Предельно допустимые уровни концентрации для атмосферы и воды, установленные Комиссией по ядерному регулированию США

В приведенной ниже таблице показаны установленные Комиссией по ядерному регулированию (NRC) США предельно допустимые уровни концентрации (ПДК) в воде и воздухе некоторых изотопов, часто встречающихся в окрестностях ядерных объектов. Эти стандарты обязательны для объектов, подлежащих лицензированию NRC (например, невоенные предприятия по переработке урана и АЭС), а также для представителей общественности. Разрешенные уровни воздействия для персонала ядерных объектов несколько выше.

Эти ПДК рассчитаны таким образом, что уровень дозы не превышает 50 миллiremов в год для каждого радионуклида. Учитываются лишь те радионуклиды, которые способны попадать внутрь организма при вдыхании или механическим путем; ПДК пропорционально сокращаются, если имеется более одного радионуклида.

Эти стандарты не учитывают фоновую радиацию, которая определяется как "радиация из космических источников; природных радиоактивных материалов, включая радон (исключая те случаи, когда он является продуктом распада источника или специального ядерного материала) и глобальных осадков, появившихся в окружающей среде в результате испытаний ядерных взрывных устройств"<sup>1</sup>. Другими словами, фоновая радиация учитывается помимо ПДК. Однако, если поблизости находится другой объект (например, несколько заводов, составляющих единый комплекс), общее загрязнение от этих предприятий должно быть ниже ПДК.

<sup>1</sup> Nuclear Regulatory Commission, 10 CFR Part 20.1002 (Washington, D.C., US Government Printing Office, 1994), p. 304.

Радионуклид	Растворимость	ПДК для атмо- ПДК для		Медицинские последствия
		сферы (pCi/l)	воды (pCi/l)	
Водород-3 (тритий)	Нерастворимый	100	1 000 000	Низкоэнергетическое бета-излучение. В форме воды может захватываться атомами водорода, находящимися в клетках организма. Находясь в воде, при воздействии на беременных женщин проникает через плаценту и облучает плод
	Растворимый	100	1 000 000	
Стронций-90	Нерастворимый	0,006	-	Излучает бета-радиацию. Подобно кальцию, концентрируется в костных тканях
	Растворимый	0,03	500	
Иод-131	Нерастворимый	0,2	1000	Излучает бета-радиацию. Концентрируется в щитовидной железе, проникает, главным образом, через молоко
	Растворимый	0,2	1000	
Цезий-137	Нерастворимый	0,2	1000	Излучает бета- и гамма-радиацию. Подобно калию, накапливается в мускульных тканях
	Растворимый	0,2	1000	
Радон-222	Без продуктов распада	10	-	Наносит ущерб посредством, главным образом, короткоживущего альфа-распада, накапливается на стенках бронхов и может вызывать рак легких
	С продуктами распада	0,1	-	
Радий-226	Нерастворимый	0,0009	60	Источник альфа-радиации. Подобно кальцию, накапливается в костных тканях. Попадает внутрь организма, в основном, механическим путем.
	Растворимый	0,0009	60	
Природный уран	Нерастворимый	0,00009	-	В основном, источник альфа-излучения, химически токсичен, особенно для почек. Вдыхание и проникновение в организм механическим путем повышает риск заболевания раком легких и костей.
	Малорастворимый	0,0009	-	
	Растворимый	0,003	300	
Плутоний-239	Нерастворимый	0,00002	-	Источник альфа-излучения. Основная угроза исходит от вдыхания частиц и от попадания внутрь организма через порезы
	Малорастворимый	0,00002	20	
Америций-241	Нерастворимый	0,00002	20	Источник альфа- и гамма-излучения. Продукт распада Pu-241. Представляет особую опасность для персонала, работающего с энергетическим Pu.
	Растворимый	0,00002	20	

Источник: Nuclear Regulatory Commission, 10 CFR Part 20.1002 (Washington, D.C., US Government Printing Office, 1994).

\* Стандарты для питьевой воды, установленные Агентством по охране окружающей среды (EPA), основаны на уровне 4 миллirem/год, при условии попадания радиации внутрь организма исключительно через питьевую воду. Таким образом, установленные EPA ПДК составляют, как правило, менее чем 1/10 представленных в таблице. При наличии ряда радионуклидов, например, трития, ПДК еще ниже (20 тыс. pCi/l).

## Радиационная защита

**П**равила радиационной защиты основаны на трех основных рекомендациях, первоначально разработанных ICRP в 1977 г. и вновь подтвержденных впоследствии:<sup>1, 2</sup>

- **Целесообразность:** Запрещена любая деятельность, при которой человек может подвергнуться облучению, за исключением тех случаев, когда она приносит субъекту облучения или обществу достаточно благ, чтобы компенсировать наносимый радиацией ущерб.
- **Оптимизация:** Облучение должно быть настолько низким, насколько это практически достижимо.
- **Ограничение на риски и персональные дозы:** Ни один человек не может получить радиационную дозу, превышающую максимально разрешенный предел.

Наиболее сложным из этих принципов, к тому же далеко не всегда адекватно применяемым, является целесообразность. Оценка вероятности чистой выгоды, которую способна принести та или иная деятельность, основывается на заключениях о целесообразности, которые трудно - или невозможно - количественно измерить. Это признает ICRP:

"Комиссия рекомендует, чтобы в случаях, когда предпринимаемая деятельность требует или содержит риск радиационного облучения, приносимый ею ущерб должен быть однозначно включен в процесс осуществления выбора. Рассматриваемый ущерб не должен ограничиваться тем, который связан с радиацией, он должен принимать во внимание и другие виды ущерба, а также стоимость самой деятельности. Зачастую причиняемый радиацией ущерб является лишь незначительной частью общего ущерба. Таким образом, целесообразность осуществления той или иной деятельности определяется более широкими причинами, чем радиационная защита... Поиск наилучших вариантов обычно находятся за пределами ответственности ведомств, осуществляющих радиационную защиту"<sup>3</sup>.

Это положение получило дальнейшее развитие в явлении Комитета по радиационной защите и общественному здоровью Агентства по атомной энергии ОЭСР:

"Решения по целесообразности осуществления деятельности, предполагающей радиационное воздействие, помимо радиологической защиты, как правило, включает широкий

спектр социальных, экономических и политических проблем... Критерий целесообразности является частью политического процесса принятия решений, в ходе которого технические и связанные исключительно с преимуществами и негативными сторонами деятельности, предполагающей радиационное воздействие, аспекты играют хотя и важную, но относительно ограниченную роль"<sup>4</sup>.

В первоначальный период разработки ядерного оружия вовлеченные в нее ученые и администраторы полагали, что соображения национальной безопасности делают целесообразным сопутствующий этой разработке риск. Как отметил Дж.Ньюэлл Стэннард, "в 1947 г. данные о плутонии и других актиноидах использовались в ходе серии конференций трех держав по ограничению радиационного воздействия... Они требовали четкой интерпретации, наиболее консервативные из которых привели бы к закрытию Лос-Аламоса"<sup>5</sup>.

Принцип целесообразности по-прежнему остается краеугольным камнем философии ICRP, но применимость этого принципа в отношении конкретной ситуации в ядерной промышленности, как гражданской, так и военной, обсуждается редко<sup>6</sup>. Оптимизация предполагает, что будут приняты меры по снижению радиационного воздействия до тех пор, пока выгоды дальнейшего сокращения не будут оправдывать их стоимость. Неясно, каким образом можно активно реализовать этот принцип, в особенности, поскольку он требует определенных количественных оценок денежной стоимости человеческой жизни. На практике, оптимизация применяется двумя путями: поощрением "наилучших доступных технологий", а также осознанием того, что простое соответствие пределам является недостаточным. Если дальнейшие ограничения доз станут применимы в пределах разумной стоимости, их следует использовать. Как правило, оптимизация относится к коллективным, а не индивидуальным дозам.

Основные ограничения доз, рекомендованные в публикации ICRP № 26 (1977 г.), составляют: 5 миллизивертов (5 рем) в год для персонала радиационноопасных объектов и 5 миллизивертов (500 миллирем) в год для населения. Сопутствующая рекомендация предполагает поддерживать, по возможности, дозы для населения в пределах 1 миллизиверта в год. Она постепенно становится основным долгосрочным лимитом для населения; ежегодное краткосрочное воздействие по-прежнему допускается в пределах 5 миллизивертов.

ICRP предполагает применять указанные ограничения для облучения всеми источниками радиации, за исключением естественного радиационного фона. Эта организация разработала методологию, позволяющую суммировать дозы, полученные из различных источников, как например, от вдыхания рудной пыли и от гамма облучения. (Для населения дозы были снижены до 100 миллирем.) Суммарная доза должна соответствовать установленному лимиту.

### ДОЗЫ РАДИАЦИИ

СО СТР. 11

дионуклидов велико, возможно использование таких методов, как подсчет дозы во всем организме (измерение "ин vivo") или анализ мочи.

<sup>1</sup> Перепечатано с разрешения издателя из: Nuclear Wastelands, Arjun Makhijani, Howard Hu, and Katherine Yih, eds. (Cambridge: MIT Press, 1995), Chapter Four "Health Hazards of Nuclear Weapons Production".

**РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА**

СО СТР. 14

В 1991 г. ICRP пересмотрела свои первоначальные стандарты радиационной защиты, главным образом, в ответ на пересмотр дозиметрии и риска раковых заболеваний у жертв атомных бомбардировок<sup>1</sup>. Наиболее значительное изменение предусматривает снижение ежегодного лимита для персонала до 20 миллизивертов. Пока это изменение мало отразилось на существующих правилах.

1 Recommendations of the International Committee on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Annals of ICRP, vol.1, no.3. Oxford, New York: Pergamon Press, 1977, p. 3.

2 1990 Recommendations of the International Committee on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of ICRP, vol.21, no.1-3. Oxford, New York: Pergamon Press, 1991, p. 28.  
 3 ICRP 1991, para. 115.  
 4 Nuclear Energy Agency, Committee on Radiation Protection and Public Health. Applicability of the ICRP principle of justification of a practice to radiological protection standards. Journal of the Society for Radiological Protection. vol.2, no.4 (1982), p.15.  
 5 J.N.Stannard. Radioactivity and Health: A History. Prepared for the U.S.Department of Energy, Office for Health and Environmental Research. Oak Ridge, Tennessee: Office of Scientific and Technical Information, U.S. DoE. October 1988.  
 6 База данных организации QUEST (1992 г.) содержит лишь 5 ссылок на принцип "целесообразности" и 91 - на оптимизацию (QUEST Data Base Vol. 2.6, 1992. [Создана и рассылается корпорацией Radiation Technology, inc., P.O. Box 10457, Silver Spring, MD 20914, USA.]  
 7 ICRP 1991.

**ЗАДАНИЕ**

Уяснение единиц измерения доз весьма сложно. Улучшите свои навыки путем решения следующей задачи.

В урановой шахте Дип-Каньон уровень концентрации радона составляет 100 пикокюри на 1 л воздуха. Какова будет доза радиации в радах, накопленная в легком шахтера, проработавшего там в течение 1 месяца? Одного года? Ответ будет опубликован в следующем номере.

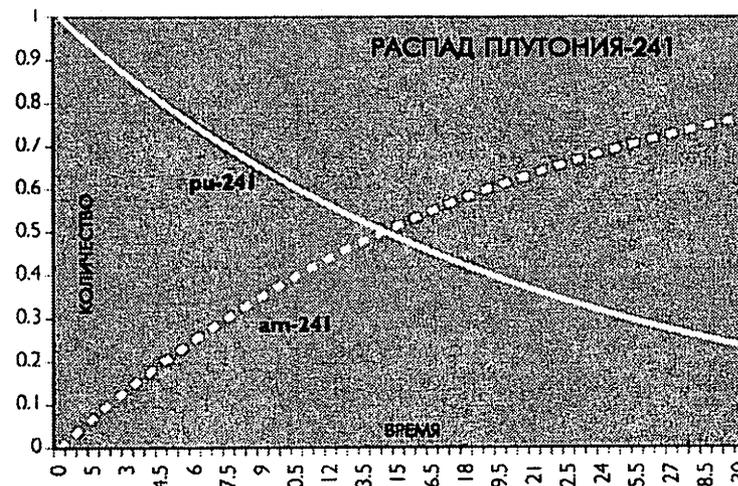
**Для облегчения решения задачи приводится следующая информация (см. также определение рабочего уровня на с. 7):**

- 1 РУ =  $2,08 \times 10^{-8}$  джоулей (J)/ литр
- Количество воздуха, вдыхаемого шахтером в течение 1 ч тяжелой физической работы, оценивается в 2000 литров
- 1 МУР = произведению 1 РУ на 170 часов
- 1 грей = 100 радам = 1 J/кг
- Вес легкого взрослого человека оценивается в 1,2 кг

**ОТВЕТ НА ЗАДАНИЕ ИЗ «ЭиБ» № 3**

Итак! В прошлом Выпуске читатели не нашли достаточной информации для заполнения таблицы на с. 8 в рубрике "наука для критических масс" "ЭиБ" № 3. Ниже приводится таблица, показывающая распад плутония-241, и накопление америция-241. Как мы упоминали в прошлом Выпуске, для простоты мы проигнорировали распад америция-241. Кроме того, 28,8 лет - слишком короткий промежуток времени в сравнении с полураспадом этого элемента, равным 432 г. В приведенной ниже таблице вы найдете цифры, пропущенные в предыдущем Выпуске (выделены жирным шрифтом).

Изотоп	Первоначальный состав	После 2 лет	После 5 лет	После 14,4 лет	После 28,8 лет
плутоний-241	1	0.91	0.79	0.5	0.25
америций-241	0	0.09	0.21	0.5	0.75



1 Для наиболее продвинутых читателей приводим уравнение, позволяющее рассчитать распад  $N=N_0 \cdot \exp(-0,693 \cdot t / \tau)$ , где  $N_0$  - начальное количество изотопов,  $t$  - период времени и  $\tau$  - период полураспада.

Уран также несет много других угроз, не связанных с радиацией. Будучи химически токсичным тяжелым металлом, при вдыхании или в результате инъекции растворенный уран поражает почки. Урановая руда, помимо урана, содержит и другие нерадиоактивные токсичные тяжелые металлы. Их состав меняется в зависимости от местоположения рудника, но может включать, помимо других, мышьяк, свинец, молибден и марганец. В результате бурения образуется кремниевая пыль, которая является возбудителем различных заболеваний, именуемых силикозами. Силикозы приводят к постепенному поражению легких. Они ограничивают функции легкого и могут привести к раку и повышенному риску заболевания туберкулезом, ревматическими артритами и почечными болезнями. Как и горняки в целом, персонал урановых шахт подвержены высокому риску механических травм; однако этот риск пошел на убыль по мере совершенствования в большинстве стран мер безопасности.

Дозы, получаемые шахтерами в урановых шахтах, можно уменьшить путем обеспечения должной вентиляции, проведения тщательного планирования, хороших конструкторских работ и эффективной организации работы. Однако повсюду в мире владельцы шахт сопротивлялись мерам по улучшению условий труда. Например, в США вплоть до середины 60-х гг. не существовало мер защиты против известных факторов поражения, даже несмотря на то, что исследования, проведенные Службой общественного здоровья США (USPHS) в начале 50-х гг., показали, что угрозы здоровью американских рабочих аналогичны европейским, где к тому времени уже

была зафиксирована возросшая заболеваемость раком легких. Канада, вовлеченная США в гонку за обладание бомбой, приступила к промышленной добыче и переработке урана с начала 40-х гг. До 1968 г. не существовало верхнего предела радиационного воздействия для канадских шахтеров. До 1954 г. Советский Союз эксплуатировал свои шахты в Восточной Германии без применения мер радиационной защиты. В течение десятилетий эти шахты оставались местом экологической катастрофы. Здоровье и безопасность персонала игнорировалась и на шахте Россинг в Намибии. В течение первых трех лет ее эксплуатации для персонала не являлось обязательным иметь при себе индивидуальные счетчики, впоследствии это правило было распространено только на персонал, занятый в конечных процессах извлечения урана. Исследование, проведенное в 1992 г., показало, что "в период [80-х гг.] принятые в Россинге промышленные гигиенические стандарты для содержащегося в воздухе урана превышали рекомендованные ICRP предельно допустимый для природного урана в 6 раз, и в 36 раз - допустимый уровень, рекомендуемый новейшими научными исследованиями"<sup>2</sup>.

В разных странах был проведен целый ряд медицинских исследований, задокументировавший возрастание уровня заболеваемости раком легкого. В Чехословакии после 1970 г. была проведена серия изучений состояния здоровья нескольких групп шахтеров. Обследование 4042 шахтеров, начавших работать под землей в период между 1948 и 1957 гг., показало, что в 1985 г. количество смертей от заболеваний раком легкого превысило ожидаемый уровень в пять раз<sup>3</sup>. Исследование "Онтарио" проанали-

СМ. УРАНОВОЕ БРЕМЯ НА С. 17

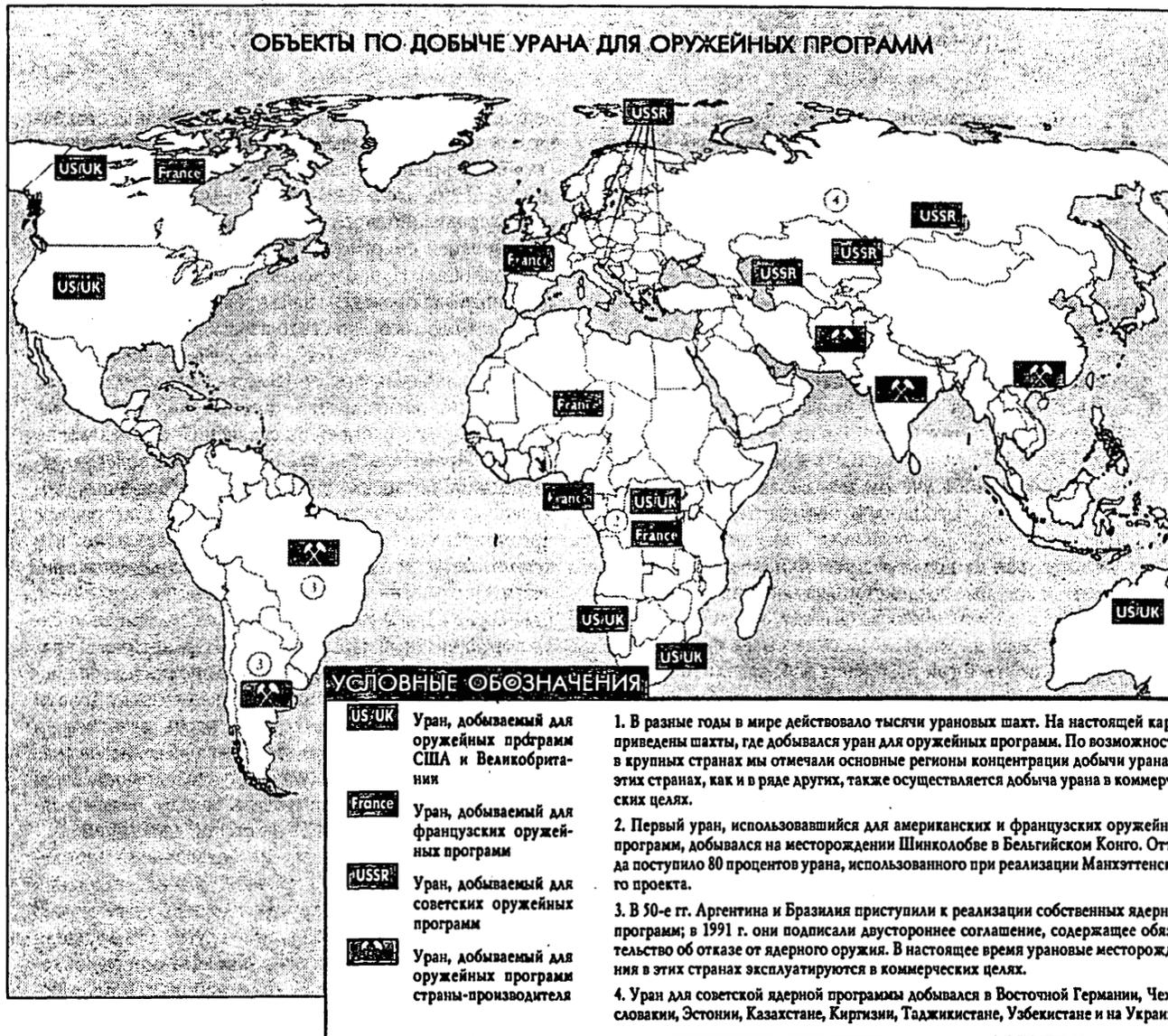
10 КРУПНЕЙШИХ УРАНОВЫХ РУДНИКОВ, 1996 г.  
("Западный мир")

Страна	Рудник	Владелец	Тип добычи	Объем производств (т)	% от мирового производства
Канада	Ки-Лейк	Камеко/Юрейнерз	Открытый карьер	5 429	15,4
Канада	Рэббит-Лейк	Камеко/Юрейнерз	Открытый карьер/ подземная добыча	3 972	11,3
Австралия	Рейнджер	ERA	Открытый карьер	3 508	10,0
Намибия	Россинг	RTZ	Открытый карьер	2 452	7,0
Нигер	Акута	Кожема/Онарем	Подземная добыча	2 120	6,0
Канада	Клафф-Лейк	Кожема	Открытый карьер/ подземная добыча	1 963	5,6
Австралия	Олимпик-Дэм	WMC	Побочный продукт (добычи меди), подземная добыча	1 466	4,1
Нигер	Арлит	Кожема/Онарем	Открытый карьер	1 200	3,4
Ю.Африка	Вааль-Рифс	Англо-Америкэн	Побочный продукт (золотодобычи) подземная добыча	914	2,6
Габон	Окелобондо	Кожема/Габон	Подземная добыча	565	1,6
<b>ВСЕГО</b>				<b>23 589</b>	<b>67,0</b>

Источник: The Uranium Institute. Web page <http://www.uilondon.org/utopmin.html>



## ОБЪЕКТЫ ПО ДОБЫЧЕ УРАНА ДЛЯ ОРУЖЕЙНЫХ ПРОГРАММ



### УРАНОВОЕ БРЕМЯ

СО СТР. 16

зировало данные по 50201 шахтеру (в том числе, по 15000 человек, работавших исключительно на урановых рудниках Онтарио) за период между 1955 и 1986 гг. Было обнаружено, что количество смертельных раковых заболеваний легкого среди них было на 120 больше, чем ожидаемая цифра в 171,8 для лиц, не подвергавшихся вредному воздействию. В Соединенных Штатах продолжались наблюдения в отношении группы лиц, избранных USPHS, были проведены новые исследования. В исследовании 1988 г., проведенного Хорнунгом и Мейнхардтом, говорилось о синергетическом эффекте воздействия на организм курения сигарет и облучения продуктами распада радона. Превышение смертей от рака легкого по сравнению со среднестатистическим было обнаружено и в исследованиях состояния здоровья австралийских, восточногерманских и французских шахтеров. Информация об экологических и медицинских последствиях во многих других регионах, в частности, Африке, бывшем Советском Союзе, Китае, остаются труднодоступными: там осуществлялось меньше работ в данной области.

Отходы от переработки урана, включающей в себя выделение урана из руды, также оказывают вредное медицинское и экологическое воздействие. При обычной концентрации урана в 0,2 процента, для выделения 2 т урана требуется переработать 1000 т урановой руды - т.е. в отходы направляется 998 т породы. Эти отходы, именуемые "хвостами", содержат 85 процентов радиоактивности первоначальной руды, помимо химически токсичных веществ и тяжелых металлов, образующихся в результате воздействия используемых при переработке реагентов, в частности, серной кислоты и хлорида аммония.

Образующиеся в результате первичного обогащения урана "хвосты" состоят, примерно, на 40 процентов из твердых, и на 60 процентов - из жидких отходов. Жидкие отходы проникают в почву и создают риск загрязнения грунтовых вод. Ветры разносят небольшие радиоактивные частицы сухих отходов, которые при вдыхании поражают персонал и окрестное население. "Хвосты" также часто использовались при строительстве жилых домов, что приводило к накоплению значительных доз радона у их жильцов. Основные радиоактивные компонен-

СМ. УРАНОВОЕ БРЕМЯ НА С. 20

## СЛУЧАИ ЛЕЙКЕМИИ В ОКРЕСТНОСТЯХ ЛА-ХАГ И СЕЛЛАФИЛДА

Радиоохимический завод в Ла-Хаг, Франция, является крупнейшим предприятием своего типа в мире (см. "Энергетика и безопасность" N 2), обладающим мощностью в 1650 т отработанного топлива в год. Исследование, опубликованное в январе 1997 г. в "Бритиш Медикал Джорнэл" двумя французскими учеными, показало потенциальную связь между возросшим количеством случаев лейкемии у детей в районе вокруг Ла-Хаг и выбросами с предприятия. Доминик Побель и Жан-Франсуа Виль провели сравнительное исследование, охватывавшее территорию с радиусом в 35 км вокруг завода в Ла-Хаг. Они рассмотрели 27 случаев лейкемии у лиц моложе 25 лет в период между 1978 и 1993 гг. и 192 случая у контрольной группы, подобранной с учетом таких факторов, как пол, возраст, место рождения и местожительство. Были изучены и родители указанных лиц, включая такие факторы, как их вредные привычки, воздействие радиации и вредные воздействия на рабочих местах.

Побель и Виль пришли к выводу, что дети, проводившие время на местных пляжах более одного раза в месяц, почти в три раза чаще заболели лейкемией, чем контрольная группа. Они также обнаружили дополнительный риск, когда их матери регулярно посещали пляжи в период беременности. Аналогичным образом, повышенная заболеваемость была обнаружена у детей, часто употреблявших местную рыбу и моллюсков. Тогда как употребление подобной пищи их матерями не приводило к растущему риску для детей. Вредное воздействие на родителей на рабочих местах (не только посредством радиации, но и химикатами и древесной пылью), а также радиационное воздействие не оказало значительного влияния на появление лейкемии у детей. Были также обнаружены свидетельства повышенного риска от воздействия радона в домашних условиях.

Исследование пришло к выводу, что имеются некоторые убедительные случаи вредного радиационного воздействия на окружающую среду, и гарантированно требуется дополнительное изучение такого воздействия, в особенности, через морские экосистемы. Действительно, проведенное "Гринписом" в июне 1997 г. наблюдение за районом вокруг дренажной трубы, ведущей из радиоохимического завода, а также независимый анализ взятых там проб, осуществленный Департаментом труда, здравоохранения и социальной службы Федеральной земли Гамбург (Германия), показал концентрацию в них трития, равную 160 млн.беккерелей на литр и осадки, которые могут быть классифицированы как "отходы, содержащие ядерное топливо". В июле французский министр окружающей среды Доминик Войне призвал к безусловному запрету на рыболовство и купание вблизи предприятия в Ла-Хаг.

Исследование Побеля и Виль представляло собой первое сравнительное исследование (в котором под-

вергшееся вредному воздействию население сравнивалось с непораженным), проведенное во Франции (там было проведено лишь небольшое количество менее глубоких исследований по медицинским последствиям радиационного воздействия, по сопоставлению уровней смертности в различных географических районах). Напротив, начиная с 1983 г. в Великобритании была проведена целая серия исследований по определению того, что стало известным под наименованием "группа Сискейла". В деревне Сискейл, недалеко от радиоохимического завода в Селлафилде, было обнаружено десятикратное превышение детской заболеваемости лейкемией по сравнению со средним по стране. Правительство распорядилось провести исследование по оценке возможных доз радиации, полученных детьми в Сискейле, в результате выбросов с предприятия в Селлафилде. Было обнаружено, что вероятные дозы были слишком невелики, чтобы привести к повышенному риску заболевания лейкемией, однако, не исключено, что данное исследование носило поверхностный характер. В 1990 г. Мартином Гарднером и другими было проведено дополнительное исследование, показавшее наличие связи между дозами радиации, полученными отцами перед зачатием, и лейкемией у детей. Вокруг этого вывода велись значительные споры, поскольку данное исследование было первым, изучившее взаимосвязь между радиационным воздействием на отцов и детской лейкемией.

После обнаружения случая повышенной заболеваемости в Сискейле был проведен ряд исследований и по ситуации вокруг других ядерных объектов. В 1989 г. Пола Кук-Мозаффари и другие обнаружили небольшой, но заметный рост заболеваемости лейкемией среди лиц моложе 25 лет в районах, прилегающих к 15 ядерным объектам в Англии и Уэльсе. Наиболее значительный из них был зафиксирован около заводов по производству ядерного оружия в Олдермастоне и Бергфилде, расположенных вблизи друг от друга. Этот район наиболее плотно заселен. Указанные случаи трудно объяснить, опираясь на официальные оценки радиоактивного воздействия на окружающую среду, поскольку рассчитанные на их основе дозы для населения недостаточны для того, чтобы вызвать лейкемию. В других странах не было независимых исследований последствий радиоактивных выбросов и оценок доз, поскольку большая часть документации остается секретной. Однако наша деятельность в Соединенных Штатах показывает, что официальные оценки доз, полученных в результате эксплуатации оружейных предприятий, зачастую неверны и серьезно недооценивают вредное воздействие на население.

—АНИТА СЕТ

никновением заболевания (известный как латентный период) может длиться многие десятилетия, как, например, в случае рака или генетических заболеваний (врожденных дефектов). За десятилетия достаточно несложно утратить связь с наблюдаемыми, поскольку они переезжают, женятся, меняют работу и т.п.

- Ошибочный диагноз и/или неверно задокументированные причины смерти в результате ошибки или преднамеренно.
- Неопределенности, возникающие в результате взаимодействия между экологическим воздействием или поражением на рабочем месте и другими факторами, как например, пол, возраст, диета, курение и другие вредные привычки.
- Синергетические эффекты. Часто население поражается более чем одним возбудителем заболевания и их синергетические эффекты, как правило, недостаточно известны. Иногда люди подвергаются воздействию одинаковых возбудителей, имеющих разные источни-

ки происхождения.

- Чрезмерный фокус на раковых заболеваниях. Такие нераковые последствия воздействия нерадиоактивных токсичных веществ, как врожденные дефекты и поражение иммунной системы, только сейчас начинают осознаваться и, поэтому, им зачастую не придается должного значения.
- Наличие небольших групп пораженного населения в сочетании с низкой фоновой заболеваемостью многими болезнями ведет к значительным статистическим неопределенностям. Поскольку имеются большие различия в том, как различные группы населения реагируют на возбудители заболеваний, эпидемиологическое исследование должно охватывать значительное количество людей, чтобы определить с разумной вероятностью присутствие дополнительного риска.
- По ряду причин, обычно присутствуют значительные неопределенности относительно медицинских последствий низких уровней радиационного воздействия и других токсичных материалов.

Г Л О С С Л Р И И

**Анализ путей проникновения:** анализ путей проникновения в человеческий организм токсичных и радиоактивных веществ, происходящих от предприятия, объекта либо процесса по их производству, использованию, хранению или захоронению через воздух, воду, почву, производство пищевых продуктов или их сочетание.

**Внешняя радиационная доза:** доза, полученная из источника, находящегося вне организма. Как правило, она образуется в результате гамма-облучения. Бета-облучение может поражать кожный покров и другие наружные ткани.

**Внутренняя радиационная доза:** доза, полученная каким-либо органом человеческого организма от радиоактивного материала, проникшего внутрь при вдыхании, потреблении пищи, механическим путем, либо через раны или порезы. Она может вызываться любой комбинацией альфа-, бета- и гамма-излучения, а также нейтронами.

**Выборка:** группа людей, обладающих стандартным статистическим фактором (например, одинаковым возрастом), выбранная при проведении демографического или эпидемиологического исследования.

**Источник загрязнения:** количество загрязнителя, попавшего в определенную среду (например, воду или воздух) из определенного источника.

**Лимит дозы:** установленный правилами верхний предел количества радиации, которую человек может получить из искусственных источников (исключая медицинские источники). Разрешенные уровни для персонала обычно превышают разрешенные уровни для населения.

**Линейная передача энергии (LET - Linear Energy Transfer):** интенсивность передачи энергии (и, следовательно, уровень поражения) в расчете на единицу пройденного пути. Например, альфа-частица относится к высокой LET-радиации, когда как фотоны и электроны - к низкой LET-радиации.

**Относительная биологическая эффективность (ОБЭ):** фактор, измеряющий относительную эффективность поражающих факторов различных видов радиации. Этот фактор носит весьма комплексный характер и зависит от конкретного пораженного органа. Из-за его комплексности в регулирующей практике применяется более простой параметр, именуемый качественным фактором.

**Относительный риск:** отношение количества заболеваний (или смертей) пораженного населения к аналогичным показателям населения, не подвергшегося вредному воздействию.

**Поглощенная доза:** количество энергии, накопленной на единицу веса биологической ткани. Поглощенная доза измеряется в радах и греях.

**Растворимость:** способность растворяться в воде. Например, чем радиоактивный материал менее растворим, тем сложнее его вывести из организма. В частности, попадающие в легкие при вдыхании нерастворимые материалы располагают большим временем для вредного воздействия на них.

**Реконструкция дозы:** оценка поражения с учетом анализа излучения, измерения состояния окружающей среды и путей воздействия поражающих факторов.

ты отходов - радий-226 и торий-230 с периодами полураспада 1600 и 75000 лет, соответственно. "Хвосты" составляют более 95 процентов общего объема радиоактивных отходов ядерного топливного цикла (исключая шахтные отходы). Они также отличаются значительной долгоживучестью (хотя на них приходится небольшая доля радиоактивности).

В первые десятилетия существования ядерной индустрии "хвосты" хранились в прудах без изоляции стенок, что приводило к загрязнению грунтовых вод. Имел место целый ряд случаев прорыва дамб, в результате которых происходил выброс отходов и широкомасштабное загрязнение. В 1979 г. была прорвана дамба в бассейне по хранению отходов компании "Юнайтед Ньюклар" около Черчрок, штат Нью-Мексико, что привело к выбросу 94 млн.галлонов жидких отходов и 1100 т твердых отходов, распространившихся на расстояние 60 миль от объекта. В Канаде также наблюдается деградация окружающей среды вследствие производства урана. В районе месторождения Эллиот-Лейк (провинция Онтарио) подверглось заражению 80 км речной системы Серпент-ривер, включая 10 небольших озер. Кроме того, там было зарегистрировано 30 случаев прорыва дамб и 125 случаев радиоактивных выбросов в Саскачеван. В Соединенных Штатах под отходами выстилают пластиковые поддоны для предотвращения их просачивания. Сами отходы хранятся под водой для сокращения выделения продуктов распада радона.

Негативные последствия производства урана, поощряемого небольшим числом государств, стремящихся к обладанию ядерным оружием и использованию атомной энергии, в непропорционально большой степени легли на коренные, колонизированные и другие зависимые народы. В США примерно две трети урановых запасов находятся на землях коренных американцев, включая резервации Навахо, Хопи, Лагуна Пуэбло, Лакота и Нортгерн Арапахо. Почти треть накопленных в Соединенных Штатах отходов переработки руд урана, находящихся на оставленных производствах, расположено в резервации Навахо. Северный Саскачеван, где находятся богатейшие запасы, и где добывается примерно 20 процентов мирового урана, населен индейскими племенами Кри и Дини.

Большая часть урана, используемого на французских реакторах и в ядерном оружии, добывалась в Нигере и Габоне. Хотя рудники в этих странах управлялись французской компанией "Кожема", на них не распространялись действовавшие во Франции медицинские и экологические правила. Ситуация в Нигере заставила продюсера компании Би-Би-Си Криса Олъяти отметить: "Некото-

рые беднейшие народы на Земле работали в условиях безжизненной окружающей среды для содания энергии для электропоездов и топлива для бомб для богатейших государств мира". Другие европейские страны и Япония также покупали уран в Нигере и Габоне. В 1976 г. британская компания "Рио Тинто Цинк" приступила к добыче в Намибии на месторождении Россинг в нарушении принятой ООН в 1974 г. резолюции, запрещающей разрабатывать природные ресурсы Намибии без разрешения Совета ООН по Намибии. До 1990 г. Намибия оставалась колонией ЮАР. Значительное количество добытого там урана направлялось на осуществление британской программы по созданию ядерного оружия и в гражданскую атомную энергетику Японии.

В большинстве стран добыча урана представляет собой связанную с наибольшим загрязнением стадию производства ядерных материалов, как с точки зрения доз, так и количества подвергшихся вредному воздействию людей. Требуются более энергичные усилия для выявления населения, подвергшегося негативному воздействию вследствие добычи урана и его рудной переработки, для оценки уровня такого воздействия, а также с целью предоставления ему необходимого медицинского наблюдения и другой помощи. Государства должны обеспечить защиту как персоналу урановых рудников и предприятий, так и проживающему вблизи данных объектов населению путем установления стандартов, соответствующих рекомендациям Международного комитета по радиологической защите (ICRP) (устанавливающих ограничения для персонала на уровне 2 рем на человека в течение года). Учитывая непропорционально высокое бремя, которое несут неядерные страны и зависимые народы, им следует обеспечить адекватный медицинский и экологический мониторинг, восстановление окружающей среды в пораженных районах и компенсацию за прошлые несправедливости с целью уменьшить вопиющее неравенство в загрязнении.

- 1 В написании данной статьи мы в значительной степени опирались на работу: Arjun Makhijani, Howard Hu, and Katherine Yih, eds., *Nuclear Wastelands. A Global Guide to Nuclear Weapons Production and Its Health and Environmental Effects*, Cambridge: MIT Press, 1995. Особое значение имеет глава 4 "Health Hazards of Weapons Production," by David Sumner, Howard Hu and Alistar Woodward, а также главы 5 "Uranium Mining and Milling for Military Purposes," by Katherine Yih, Albert Donnay, Annalee Yassi, A.James Ruttenber, and Scott Saleska.
- 2 G.Dropkin and D.Clark, *Past Exposure: Revealing Health and Environmental Risk of Rossing Uranium*. Partizans, London, 1992 (as cited in *Nuclear Wastelands*, p. 144).
- 3 J.Sevc, L.Tomasek, E.Kunz, V.Placek, D.Chmielewsky, D.Barclay, and A.M.Keller. A survey of the Czechoslovak follow-up of lung cancer mortality in uranium miners, *Health Physics*, vol.64, pp. 355-369 (as cited in *Nuclear Wastelands*, p. 159).
- 4 As cited in *Nuclear Wastelands*, p. 106.