

Энергетика и Безопасность

№ 14 2000

Издание IEER

Учетные записи по дозам облучения персонала глубоко недостоверны

Аржун МАКХИДЖАНИ
и Бернд ФРЭНК

В рамках ответственности за производство и испытание ядерного оружия Министерство энергетики (МЭ) и предшествующие ему ведомства (Комиссия по ядерной энергии (КЯЭ), 1947—1974 гг.; Управление по энергетическим исследованиям и разработкам, 1974—1977 гг.) отвечали за обеспечение того, чтобы работники не подвергались воздействию излучения свыше допустимой величины. Кроме того, Министерство энергетики отвечало за соблюдение так называемого принципа ALARA, под которым понимается, что уровень радиационного воздействия должен быть “предельно разумно достижимым низким” (“As Low As Reasonably Achievable”) при наличной технологии.

Целью ограничения доз радиационного воздействия и принципа ALARA является защита здоровья персонала путем ограничения экспозиционной дозы. Однако, если экспозиционная доза измеряется неправильно, то невозможно обеспечить ни выполнение инструкций по контролю за радиационным воздействием, ни следование принципам. Специалисты по наблюдению и контролю за здоровьем персонала могут быть не осведомлены о тех случаях, когда уровень облучения работников превышает норму. Заболевания, риск возникновения которых при этом повышается, могут оказаться незамеченными, что нанесет ущерб работникам и их семьям. Медицинские исследования, основанные на данных по дозам облучения персонала, дадут дезинформи-



ROBERT DEL TREDICI

Работник предприятия по переработке плутония в Хэнфордe, штата Вашингтон, проходит обследование с целью определения наличия потенциального радиоактивного загрязнения.

рующие результаты, поскольку учетные записи по дозам будут неполными и знания о них будут неточными.

С начала атомной эры до 1989 г. дозы облучения в результате воздействия радиоактивных материалов, попавших в организм работников при вдыхании или с пищей, не вычислялись и не включались в учетные записи по дозам облучения персонала. Это было раскрыто Министерством энергетики в рабочих материалах, посланных IEER 7 апреля 1997¹. МЭ и предшествующие ему ведомства все-таки проводили измерения внутренней дозы облучения от радиоактивных материалов, в основном, по анализам мочи. Однако эти измерения не были систематичны (см. ниже). После середины—конца 60-х годов стали выборочно использоваться более усовершенствованные детекторы излучения, осуществляющие прямые замеры радионуклидов в организме работников. По инструкциям, МЭ не должно было вычислять дозы облучения персонала, оно должно было только вести учет того, подвергались ли работники внутреннему облучению в результате воздействия превышающих определенные количества радионуклидов.

См.: Учетные записи, с. 2
Примечания, с. 5

Все предыдущие номера “Энергетики и безопасности” можно найти в Интернете на сайте IEER <http://www.ieer.org/russmain>

В БЮЛЛЕТЕНЕ

Всемирная Комиссия.....	6
Измерение радиации: терминология и единицы излучения.....	7
Измерение радиации: приборы и методы.....	10
Трансмутация отходов на базе ускорителя.....	15

Отсутствие исторических данных по дозам внутреннего облучения в учетных записках по дозам облучения персонала имеет серьезные последствия в отношении государственной политики по вопросам здравоохранения, научных исследований вопросов радиационного риска и, более всего, для более полумиллиона работников (и их семей), которые, начиная с Манхэттенского проекта, участвовали в создании и испытании ядерных боеголовок в США. В 1989 г. МЭ начало исправлять эту историческую ошибку, начав программу по интеграции доз внутреннего и внешнего облучения персонала.

Пределы экспозиционных доз

Пределы допустимых экспозиционных доз с годами менялись, и в целом, по мере того, как увеличивающиеся знания о рисках заболевания раком в результате облучения указывали на то, что угроза, которую представляет облучение, — значительно больше, чем предполагалось ранее, наблюдалась тенденция к их понижению. Для того чтобы гарантировать, что персонал не подвергается вредному воздействию свыше нормы, необходимо должным образом контролировать наиболее важные пути этого воздействия. Необходимо также учитывать, что ионизирующее излучение оказывает воздействие на людей различными путями.

В случае, когда мы имеем дело только с внешней радиацией, изменение дозы облучения персонала проводится пленочными дозиметрами (небольшие фотопластины, чувствительные к гамма- и бета-излучению) или термолюминесцентными дозиметрами (ТЛД — устройства многократного использования, измеряющие внешнее гамма- и бета-излучение). Эти устройства могут измерять экспозиционную дозу, которую получает работник, но не величину радиации, попавшей внутрь организма при вдыхании, с пищей или каким-либо иным путем.

Внутреннее радиационное облучение возникает, когда радиоактивные материалы попадают внутрь организма и распадаются там, облучая близлежащие ткани. Внутреннее облучение зачастую более направлено на конкретные органы, чем внешнее. Если радионуклиды оседают в конкретных частях тела, таких, например, как легкие или кости, эти участки подвергаются значительно большему облучению, чем другие. Риск внутреннего облучения высок на тех рабочих местах, где воздух загрязняется радиоактивными материалами или пылью, что часто имело место на различных ураноперерабатывающих комбинатах и на урановых шахтах. Рабочие также могут подвергаться воздействию внутреннего облучения в результате попадания радиоактивного материала через пищеварительную систему (например, если радиоактивные материалы попадают в рот из воздуха) или через раны и порезы.

Вероятность внутреннего облучения ниже в тех ситуациях, когда радиоактивный материал тем или иным путем изолирован от рабочей среды, например, при использовании перчаточных боксов. Однако, если в этих ситуациях происходит авария или если оборудование, такое как вентиляционные системы или перчаточные боксы, неисправно или находится не в должном рабочем состоянии, тогда рабочие могут также подвергнуться внутреннему радиационному воздействию.

На протяжении почти всего периода производства атомного оружия всегда устанавливались пределы допустимых доз облучения от источников как вне организма, так и внутри него. Некоторые современные

См.: Учетные записки, с. 3

ЭНЕРГЕТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

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

Institute for Energy and Environmental Research
6935 Laurel Avenue, Suite 204
Takoma Park, MD 20912 USA
Тел. 1-301-270-5500; факс 1-301-270-3029
Электронная почта: michele@ieer.org
Адрес в Интернете: <http://www.ieer.org>

Институт исследований 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 и создания более здоровой окружающей среды.

Сотрудники IEER:

Аржун Махиджани — президент
Лиза Ледуидж — координатор по внешним связям
Мишель Бойд — координатор по международным связям
Энн Махиджани — научный сотрудник
Шрирам Гопаль — научный сотрудник
Луис Чалмерс — заведующий библиотекой
Дайана Кон — бухгалтер
Бетси Турл-Шилдс — администратор

Благодарим наших спонсоров:

Выражаем благодарность нашим спонсорам, благодаря поддержке которых стало возможным осуществление нашего международного проекта:

W. Alton Jones Foundation, John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, Ford Foundation

Мы также благодарим других спонсоров IEER:

Public Welfare Foundation, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Town Creek Foundation, Beldon II Fund, Turner Foundation, New Land Foundation, Stewart R. Mott Charitable Trust, Rockefeller Financial Services

Мы также благодарим наших читателей, помогающих нашему Институту. Мы высоко ценим Вашу поддержку.

Дизайн: *Cutting Edge Graphics*
Редактор английского издания:
Лиза Ледуидж

Русское издание:
Ответственный: *Елена Копылова*
Научный консультант: *Олег Бухарин*

Весь тираж "Энергетики и безопасности" распространяется бесплатно

Мы приветствуем перепечатку материалов из этого бюллетеня с соответствующими ссылками. Мы будем признательны за копии тех изданий, в которых воспроизводятся наши статьи.

Выпуск 14 (vol. 8, no. 4) английского издания вышел в свет в сентябре 2000 г.

Адрес издательства:
Издательство СО РАН
Лицензия ЛР 020909 от 01.09.99
630090, Новосибирск, 90, Морской пр., 2
Тираж: 2500

ограничения регулируют совокупную внешнюю и внутреннюю дозу облучения, тогда как в прошлом ограничения накладывались конкретно по каждому органу, такому как легкие. Так, до 1958 г. предел допустимой дозы облучения легких составлял 15 бэр в год для персонала предприятия или населения за пределами объекта, в 1959 же г. это значение для населения за пределами объекта было понижено до 1,5 бэр.

Мониторинг не состоялся

Седьмого апреля 1997 г. IEEER получил рабочие материалы из отдела МЭ по программам защиты персонала и обращению с опасными веществами, в которых четко было сказано то, о чем IEEER подозревал уже несколько лет:

“...до 1989 г. в Министерстве энергетики и до 1991—1994 гг. в атомной промышленности дозы внутреннего облучения персонала не определялись. До 1989 г. в МЭ велся учет радиационной активности в выделениях или в виде процентного содержания радионуклидов в организме”.

Таким образом, хотя содержание радионуклидов внутри организма работников и контролировалось, эти данные не переводились в оценки радиационных доз; а оценки радиационных доз, соответствующие содержанию радионуклидов в организме, не вносились в учетные записи по дозам облучения персонала.

Хотя по инструкциям не требовалось фактически вычислять дозу облучения персонала, отсутствие оценки доз внутреннего облучения в учетных записях по дозам облучения персонала означает, что учетные записи по дозам работников, подвергавшихся риску внутреннего облучения, являются неполными, неточными и дезинформирующими. Степень неполноты и неточности будет отличаться от работника к работнику, от одного исторического периода к другому и от предприятия к предприятию. Но общий результат один — *большое число работников получали информацию о своих дозах облучения, в которой фактические дозы облучения систематически занижались.*

Другое последствие неполноты учетных записей по дозам внутреннего облучения, которые велись до 1989 г., состоит в том, что в судебных делах, связанных с компенсациями рабочим, получившим дозы внутреннего облучения, аргументы МЭ и его подрядчиков, по-видимому, были основаны на неполных данных, в которых уровни облучения недоучитывались. Таким образом, во многих случаях против рабочих могли быть вынесены несправедливые решения. В настоящее время вопрос относительно того, сознательно ли МЭ и предшествовавшие ему ведомства не учитывали информацию о дозах внутреннего облучения при разборе некоторых дел, связанных с компенсациями работникам, остается

открытым, но задать его представляется правомерным.

Хотя невозможно точно оценить, какая часть из 500 000—600 000 рабочих, работавших на МЭ, подвергались риску облучения свыше допустимых пределов, мы констатируем, что на предприятии по переработке урана в штате Огайо, известном как “предприятие в Ферналде”, большая часть персонала в первые годы подвергалась риску. Фактически, в 1955 г., который был наиболее тяжелым в отношении уровня облучения работников, по оценкам IEEER, 90 % работников подвергались облучению свыше предельно допустимой дозы в 15 бэр для легких².

Есть ряд других прямых последствий существенной неполноты учетных записей по дозам облучения:

- Дозы внутреннего облучения работников урановых предприятий в некоторых случаях могли привести к отравлению тяжелыми металлами, особенно в отношении почек. Такие случаи можно было бы лучше обнаружить, если бы информация по дозам внутреннего облучения была включена в учетные записи по дозам облучения.
- В некоторых случаях ошибочные медицинские диагнозы могли быть результатом того, что учетные записи по дозам облучения были неполны.
- Во многих случаях меры по улучшению условий на рабочих местах, по-видимому, принимались с запозданием или вообще не принимались, поскольку в учетных записях по дозам не указывалось превышение допустимого уровня облучения.

В период до середины — конца 60-х годов проблема стояла наиболее остро по двум причинам. Во-первых, есть указания на то, что это было время, когда условия на рабочих местах были наиболее грязными и когда рабочие подвергались наибольшему риску воздействия. Это наблюдение нельзя использовать, чтобы сделать заключение по конкретным работникам или даже конкретным предприятиям. Однако на сегодняшний день большая часть данных, исследованных нами, показывает, что по разным причинам уровни воздействия в этот период были, как правило, наивысшими.

Во-вторых, в этот период времени еще не было приборных методик, обеспечивающих прямые измерения содержания радионуклидов в организме. Пороговые дозы устанавливались для содержания радионуклидов в моче. До тех пор, пока содержание определенных радионуклидов было ниже этих пороговых концентраций, уровень задержания в организме радиоактивного вещества и дозы облучения персонала считались ниже максимально допустимых пределов. После того, как в начале 60-х появились счетчики радиоактивности для легких и по всему телу, некоторое время их не использовали. Даже после того, как их стали использовать, например в Ферналде в 1968 г., измерения концентраций радионуклидов в моче продолжали оставаться основным методом контроля дозы внутреннего облучения.

К сожалению, процедура мониторинга, принятая МЭ и его подрядчиками, была полна недостатков. Анализ учетных записей по дозам облучения в Ферналде, проведенный IEER в 1985 г., выявил следующие проблемы:

- ° Содержание радионуклидов в легких, вычисленное из данных анализов мочи, постоянно недооценивалось из-за ошибочных предположений по поводу отношения количества урана в моче к его количеству в тканях легких.
- ° В анализах мочи контроль велся не по всем радионуклидам.
- ° Мониторинг анализов мочи обычно проводился слишком редко, чтобы дать точное определение содержания радионуклидов в организме и их изменений со временем. Поскольку многие химические формы радионуклидов выводятся относительно быстро, дозы, полученные при авариях или других случайных, но высокоуровневых облучениях, вероятнее всего, не обнаруживались при редком мониторинге. Более того, во многих случаях измерения по анализам мочи проводились настолько редко, что даже химические формы с относительно долгим периодом полувыведения вряд ли были бы точно обнаружены. В результате этого низкие содержания радионуклидов в моче не обязательно соответствовали низким уровням облучения, а просто отражали больший промежуток времени между попаданием радионуклида в организм и забором анализов мочи (или показаний счетчиков по легким).
- ° Растворимость состава, попадавшего в организм при вдыхании или с пищей, не определялась, а если была известна, то не регистрировалась.
- ° Отношение времени забора мочи к времени облучения в большинстве случаев неизвестно.

В результате всех этих факторов предположение, что если концентрация радионуклида в моче была ниже порогового уровня, то и доза была ниже допустимых пределов, научно необоснованно. Даже когда фактические дозы были ниже допустимых пределов, необходимо было внести данные по внутренним дозам облучения в учетные записи, а также соответствующим образом добавить их к показаниям по внешним дозам.

Дозы облучения для конкретных органов и для тела в целом

Радиационные нормы предусматривают ограничение дозы облучения как для отдельных органов, так и для тела в целом. Рассмотрим, например, дозы облучения для легких. Легкие могут подвергнуться радиационному воздействию от источников гамма-излучения, находящихся вне организма, в результате чего дозы облучения будут, по существу, равны дозам облучения

других органов в организме. Они также могут подвергаться радиационному воздействию от радионуклидов, попавших в организм при вдыхании. Для того чтобы обеспечить соблюдение предельной дозы облучения легких, составлявшей с 50-х годов до 80-х 15 бэр, МЭ и его подрядчики должны были учитывать только данные по внутреннему содержанию радионуклидов в организме. (Однако, как мы уже указывали, до 1989 г. внутренние дозы по этим данным не вычислялись.) В большинстве случаев, как, например, на предприятии в Ферналде, дозы по легким выводились из результатов замеров урана в моче. Если находили, что его содержание ниже допустимых концентраций, то ограничение в 15 бэр/год считалось соблюденным.

С конца 80-х годов в нормативно-правовой практике стали применяться “полувековые эффективные эквивалентные дозы”. В этой модели “эффективная доза” рассчитывается путем умножения доз облучения, полученных отдельными органами или тканями, такими как щитовидная железа, костные ткани или легкие, на весовой коэффициент, который отвечает за относительную вероятность летального исхода от раковых заболеваний, полученных в результате радиационного воздействия на конкретный орган. Это позволяет рассматривать вместе радиационное воздействие на один орган и радиационное воздействие на организм в целом. Далее, дозы внутреннего облучения органов рассчитываются на основе полувековой ожидаемой дозы, т.е. всей дозы, полученной органом в результате воздействия радионуклида в течение 50 лет (в большинстве случаев основную часть дозы орган получает в течение нескольких лет). Эти два понятия, “эффективная эквивалентная доза” и “полувековая ожидаемая доза”, были объединены, и так возникла “ожидаемая эффективная эквивалентная доза”. При выработке правил и норм полная полувековая ожидаемая доза приписывается к тому году, когда радионуклид попадает внутрь организма. Но даже при этой новой практике дозы, получаемые органами в результате внутреннего радиационного воздействия, должны быть известны, поскольку без этих данных нельзя рассчитать правильную эффективную эквивалентную дозу. Это изменение в инструкциях, требующее расчета эффективной эквивалентной дозы, заставило МЭ начать двигаться в сторону политики объединения доз внутреннего и внешнего облучения.

Хотя отсутствие точных научных методик до середины 60-х годов могло препятствовать точной оценке доз внутреннего облучения, дозы можно было вывести из данных по анализам мочи и включить их в учетные записи по дозам, чего сделано не было. Начиная со второй половины 60-х годов КЯЭ и ее подрядчики могли сделать относительно точные оценки доз облучения персонала, но опять-таки не сделали этого. Похоже, что до тех пор, пока холодная война не начала постепенно ослабевать, ведомственная точка зрения, поставившая

См.: Учетные записи, с. 5

производство оружия над интересами окружающей среды, отводила второе место и надежным учетным записям доз облучения персонала.

Последствия недооценки доз облучения

Недооценка доз внутреннего облучения — это не только плохая практика охраны здоровья персонала. Она также создает проблемы при эпидемиологических исследованиях. Оценка медицинских рисков в результате радиационного воздействия требует проведения тщательной эпидемиологической работы, а для этого необходимы исследования, основанные на надежных данных относительно доз облучения различных групп работников.

В исследованиях с дифференциацией по контингентам, к примеру, проводится сравнение состояния здоровья людей, подвергшихся различной степени радиационного воздействия. Такие исследования обычно проводятся среди совокупностей работников, и они помогают оценить риск воздействия радиационного излучения (или других факторов, вызывающих заболевания). Однако, если учетные записи по дозам облучения персонала искажены вследствие того, что решающая компонента дозы не была включена, то работники с высокими дозами облучения могут перемешаться с работниками, получившими низкую дозу, так что статистический контроль станет невозможным.

Например, в исследованиях, в которых учитываются только внешние воздействия, работники с низкой дозой внешнего облучения будут отнесены к одной группе, а с высокой дозой внешнего облучения — к другой. Если бы некоторые или все работники из группы с низким уровнем внешнего облучения получили более высокие дозы внутреннего облучения, чем работники из группы с высоким уровнем внешнего облучения, тогда исследование бы проводило сравнение одних работников с высоким уровнем облучения с другими работниками также с высоким уровнем облучения⁴. Такое исследование будет некорректным с тенденцией к недооценке рисков. И наоборот, если бы группа с высоким уровнем внешнего облучения получила еще большие дозы внутреннего облучения, исследование тоже было бы некорректным с тенденцией к преувеличению радиационного риска.

В рабочих материалах, присланных МЭ в апреле 1997 г., также указывается, что, хотя оценка риска для персонала основывается на дозе облучения, накопленной в течение всей жизни, учетные записи о дозе, накопленной в течение жизни, тщательно не велись. Если учетные записи о дозах не передаются от одного подрядчика на предприятии к другому или — когда работники меняют место работы — от предприятия к предприя-

тию, то здоровье персонала, а также здоровье всего населения ставится под угрозу, поскольку становится невозможным точно проследить медицинские последствия радиационного воздействия на рабочих местах. И, конечно же, это является еще одним затрудняющим фактором при выполнении эпидемиологических исследований и оценки радиационного риска.

Данные по внешнему радиационному воздействию

Состояние данных по внешнему радиационному воздействию также нуждается в тщательной проверке. МЭ признало следующие проблемы⁵:

- Данные по внешнему радиационному воздействию зачастую неполны и ненадежны.
- Первичные данные по дозам облучения и электронные версии этих данных (которые часто используются исследователями в их работах) не всегда согласуются.
- В некоторых случаях в учетных записях по дозам облучения персонала значится, что доза облучения была равна нулю, независимо от действительных показаний дозиметра.

Наконец, было проведено очень мало измерений воздействия на персонал нерадиоактивных опасных материалов. Однако мы знаем, исходя из существа работы, проводившейся на военных атомных предприятиях, что многие работники подвергались воздействию или риску воздействия кислот, органических растворителей, бериллия, фтора и фторидов, а также тяжелых металлов.

В результате всех этих проблем мы можем сделать вывод, что знания о дозах облучения на рабочих местах при производстве атомного оружия и его испытании были неудовлетворительны и что результаты, по крайней мере некоторых эпидемиологических исследований, вероятно, будут дезинформирующими. В настоящее время невозможно сказать, какие медицинские последствия могут быть выявлены, если провести надлежащие исследования. Но мы с уверенностью можем сказать, что для большого числа работников дозы радиационного воздействия были выше, чем дозы, которые явно следуют из их учетных карточек, поскольку до 1989 г. дозы внутреннего облучения не учитывались и поскольку было много пробелов в других учетных записях по дозам.

1. Рабочие материалы были получены IEEER по факсу 7 апреля 1997 г. при подготовке к встрече 14 апреля 1997 г., на которой присутствовали сотрудники IEEER и отдела МЭ по программам защиты персонала и обращения с опасными веществами.
2. См.: Science for Democratic Action, Vol. 5, No 3.
3. Эта модель называется "дозиметрическая модель МКРЗ 30" (МКРЗ — Международный комитет по радиологической защите); она была объявлена в публикации 30.
4. Этот вид ситуации вполне возможен, поскольку многие важные радионуклиды, включая уран-238, плутоний-239, стронций-90 и тритий обычно дают низкие дозы внешнего облучения, но высокие дозы внутреннего облучения.
5. Более подробно о данных МЭ по дозам внешнего облучения см. A. Makhijani, H. Hu and K. Yih, eds., *Nuclear Wastelands*, (Cambridge: MIT Press, 1995), pp. 262—263.

Всемирная Комиссия по точности и полноте сведений об экологическом ущербе и ущербе для здоровья от производства ядерного оружия

Аржун МАКХИДЖАНИ

Обширная исследовательская работа, проведенная за последние два десятилетия, показала, что ядерные державы, во имя национальной безопасности, нанесли урон прежде всего собственному населению — без его согласия¹. Персонал предприятий по производству ядерного оружия оказался в первых рядах пострадавших от этой оборотной стороны холодной войны, которую проводили ядерные державы против своего населения. Однако каким образом велась эта затяжная атака на здоровье и окружающую среду, до сих пор остается во многом неизвестным и малопонятным. За последние два десятилетия этот важный вопрос об ущербах стал возникать из тумана отрицания и пропаганды только в одной ядерной державе — США.

Архив США, который является открытым, отнюдь не успокаивает. Он показывает акцент на производство, по сравнению с охраной здоровья, регулярные серьезные нарушения правил техники безопасности и охраны здоровья людей, намеренное введение в заблуждение рабочих (чтобы не вызывать обеспокоенность или чтобы не выплачивать компенсации за профессиональную вредность, хотя и то, и другое было явно оправдано) и подрыв демократического процесса.

Неряшливая, некомпетентная наука была обычной частью общей унылой картины. Как указывается в статье на с. 1, Министерство энергетики признало, что до 1989 г. не предпринимались усилия, чтобы определить дозу внутреннего облучения персонала в результате воздействия радиоактивных материалов, попавших в организм при вдыхании или с пищей. Работа IEER по данным, полученным на предприятии в Ферналде вблизи Цинциннати, штат Огайо, где шла переработка урана для реакторов по производству плутония, показала, что в 50-х и начале 60-х годов большая часть рабочих в результате поступления урана при вдыхании фактически подверглась вредному воздействию свыше нормы. Многие, вероятно, страдали поражением почек вследствие токсичности урана как тяжелого металла. Однако людей заверяли, что с ними ничего не случилось.

По мере того, как такая информация становилась достоянием общества, стали раздаваться призывы к

восстановлению справедливости, публичному разоблачению, охране здоровья и компенсации. Недавно в США был принят закон, дающий право большинству работников, работающих в условиях повышенной радиации, на компенсацию и лечение, в случае, если они приобретают определенные заболевания. Кроме США, ни одно из правительств еще не признало столь широко потенциальный вред, причиняемый излучением, хотя в ряде мест некоторые скромные программы для ограниченного числа людей и действуют. Первичные данные по дозам облучения персонала и условиям на рабочих местах (при всем уважении к частной жизни работников) по большей части остаются засекреченными. Несмотря на то, что с середины 80-х годов Россия стала более открытой страной и там стали публиковаться некоторые данные по дозам облучения работников, первичные данные до сих пор практически недоступны независимым российским исследователям. Секретность также господствует и в других относительно открытых странах: Франции, Индии и Великобритании. В Китае, Пакистане и Израиле ситуация еще хуже.

Практика засекречивания случаев загрязнения окружающей среды и нанесения вреда здоровью своих собственных людей во имя национальной безопасности глубоко антидемократична. Она основана не на том, что люди сознательно приносят жертвы ради безопасности своей страны, а на том, что бюрократы высших эшелонов атомной промышленности могут принимать решения о жизни и смерти в нарушение установленных законов, норм, инструкций, без получения согласия проинформированных людей.

Ущерб не ограничивается лишь границами предприятий, а распространяется шире, на семьи, на людей, проживающих в районах вблизи предприятий, на широкие слои населения. Так, официальное исследование, проведенное Национальным институтом рака США, показало, что в течение 50-х годов большая часть поставок молочных продуктов в США была загрязнена иодом-131 в результате выпадения радиоактивных осадков при испытании атомного оружия в атмосфере на испытательном полигоне в Неваде². Ни одна из других ядерных держав не прилагала подобных усилий в отношении того, чтобы отвечать перед своим собственным народом.

См.: Всемирная Комиссия, с. 16

Измерение радиации: терминология и единицы излучения

Дэвид КЛОС и Лиза ЛЕДУИДЖ

Ионизирующее излучение испускается при радиоактивном распаде вещества. Радиоактивный распад происходит при спонтанном распаде ядра атома за счет испускания частицы (альфа-частицы, электрона или одного или нескольких нейтронов).

Имеются четыре формы ионизирующего излучения: альфа-частицы, бета-частицы, гамма-лучи и, косвенно, нейтроны. Все они обладают достаточной энергией, чтобы ионизировать атомы, другими словами, отделить от атома один или более электронов.

Альфа-частица (α -частица) состоит из двух протонов и двух нейтронов и эквивалентна ядру атома гелия. Альфа-частицы легко ионизируют материал, с которым приходят в соприкосновение, и передают энергию электронам этого материала. В воздухе альфа-частица может перемещаться на расстояние до нескольких миллиметров, но в общем случае при увеличении плотности среды это расстояние снижается. Например, альфа-частицы не проникают через внешний слой кожи человека, но при вдыхании они могут повредить ткани легкого.

Бета-частица (β -частица) — это электрон или позитрон, и она намного легче, чем альфа-частица. Поэтому, чтобы потерять энергию, ей потребуется переместиться на большее расстояние, чем альфа-частице. В воздухе бета-частица со средней энергией перемещается приблизительно на метр, а в тканях тела — на один миллиметр.

Гамма-лучи (γ -лучи) — это электромагнитное излучение. Радиоактивный элемент может испускать гамма-лучи (дискретными пучками или квантами, называемыми **фотонами**), если после альфа- или бета-распада ядро остается в возбужденном состоянии. Гамма-лучи могут проникать глубже, чем альфа- и бета-частицы. Фотон гамма-лучей с высокой энергией может проходить сквозь человека, совершенно не взаимодействуя с тканями тела. При взаимодействии с тканями тела гамма-лучи ионизируют атомы. Понятие “рентгеновские лучи” также часто используется для обозначения гамма-лучей, испускаемых в процессе радиоактивного распада, которые приходятся на нижнюю часть энергетического спектра электромагнитного излучения, испускаемого в результате радиоактивного распада.

Нейтроны — это нейтральные частицы, которые не обладают электрическим зарядом. В отличие от альфа- и бета-частиц, они не взаимодействуют с электронами и не вызывают непосредственно ионизацию. Однако нейтроны разными путями могут ионизировать косвенно: упругие столкновения, неупругое рассеяние, реакции захвата или процессы расщепления. Эти процессы в различной степени приводят к испусканию гамма-лучей, бета-радиации и, в случае расщепления, большего количества нейтронов. Более детальное объяснение можно найти в *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V report)*, National Academy Press, 1990, pp. 15—17.

Измерение радиации

Ионизирующее излучение может измеряться в следующих единицах: электрон-вольты, эрги и джоули. Электрон-вольт (сокращенно эВ) — это единица энергии, связанная с перемещением электрона. В атоме водорода (один протон, один электрон) электрон “крепко связан”. Для того чтобы оторвать этот электрон от протона, требуется энергия. Чтобы полностью оторвать этот электрон от протона, потребуется 13,6 электрон-вольт. В этом случае мы говорим, что атом “ионизирован”. Выражаясь жаргонно, “энергия ионизации” крепко связанного электрона в атоме водорода равна 13,6 электрон-вольт.

Электроны — это очень легкие частицы, поэтому не следует ожидать, что электрон-вольт будет представлять собой очень большую энергию. Один электрон-вольт равен всего $1,6 \times 10^{-19}$ джоулей энергии, другими словами 0,16 миллиард-миллиардной части джоуля. Один джоуль (сокращенно Дж) эквивалентен количеству энергии, потребляемой лампочкой мощностью в один ватт, для того чтобы светить в течение одной секунды. Энергия, связанная с радиоактивным распадом, составляет от тысяч до миллионов электрон-вольт на ядро, вот почему распад одного ядра обычно ведет к большому числу ионизаций.

Радиоактивность вещества измеряется числом ядер, распадающихся в единицу времени. Стандартная международная единица измерения радиоактивности называется **беккерель** (сокращенно Бк), и она равна одному распаду в секунду (dps). Радиоактивность также изме-

См.: **Терминология**, с. 8

Терминология со с. 7

ряется в кюри — историческая единица, которая определяется числом расщеплений в секунду в одном грамме радия-226 (37 миллиардов). Таким образом, 1 кюри = 37 миллиардов Бк, 1 пикокюри = 0,037 Бк, и 1 Бк = 27 пикокюри. Один пикокюри (сокращенно пКи) — это 10^{-12} (или 0,000000000001) кюри. Радиоактивность также измеряется числом количества распадов в минуту (dpm). Одна единица dpm = 1/60 Бк.

Удельная активность определяет радиоактивность единицы веса вещества. Она измеряется в кюри на грамм или беккерель на грамм. Это позволяет сравнить, насколько одно вещество более или менее радиоактивно относительно другого. Удельная активность радионуклида обратно пропорциональна его атомному весу и периоду полураспада.

Экологические и биологические измерения радиоактивности обычно представляются как измерения концентрации радиоактивности в почве, воде, воздухе или в ткани. Примерами таких единиц измерений являются пикокюри на литр, беккерель на кубический метр, пикокюри на грамм, количество расщеплений на минут на

100 квадратных сантиметров. Иногда вес радиоактивного материала на единицу почвы или ткани может даваться в “частей на миллион” (или ppm) и выражаться в единицах массы. Эта величина может быть преобразована в единицы радиоактивности, поскольку нам известны удельные активности различных радионуклидов. Число расщеплений в минуту на 100 квадратных сантиметров (dpm/100 см²) — это единица, обычно используемая для измерения поверхностного загрязнения объекта, такого как бетон или металл.

Измерение доз

Если ваше тело окажется рядом с источником радиации, то вы подвергнетесь облучению. Чтобы вычислить вредный фактор, связанный с этим облучением, необходимо рассчитать поглощенную дозу. Она определяется как энергия, переданная определенной массе ткани. Обычно доза распространяется по телу неравномерно. Радиоактивное вещество может быть выборочно поглощено определенными органами или тканями.

См.: Терминология, с. 9

НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

ЕДИНИЦЫ	ОПИСАНИЕ	ЭКВИВАЛЕНТ
Бэр (биологический эквивалент рентгена)	Единица измерения, эквивалентная поглощенной дозе радиации, учитывающая относительную биологическую эффективность различных видов ионизирующего излучения или различные пути передачи этой энергии тканям человеческого организма. Доза в бэрах эквивалентна дозе в радах, умноженной на коэффициент качества (Q). Для бета- и гамма-излучения коэффициент качества принимается равным единице, т.е. бэр равен раду. Для альфа-излучения коэффициент качества принимается равным 20, т.е. бэры в 20 раз больше радов. Бэр — это, по существу, мера наносимого биологического повреждения. Для нейтронов Q обычно принимается равным 10	бэр = рад × Q
Зиверт (Зв)	Единица измерения, эквивалентная поглощенной дозе, равной 100 бэр	1 Зв = 100 бэр Зв = Гр × Q
Рад (поглощенная доза радиации — от англ. radiation absorbed dose)	Единица измерения поглощенной дозы радиации. Рад — это мера количества энергии, поглощенной тканью	1 рад = 100 эрг/г
Грей (Гр)	Единица поглощенной дозы радиации, равной 100 рад. Грей — это мера энергии, поглощенной тканью	1 Гр = 100 рад
Кюри (Ки)	Традиционная единица измерения радиоактивности, равная радиоактивности одного грамма чистого радия-226	1 кюри = 37 млрд распадов в секунду = 37 млрд Бк
Беккерель (Бк)	Стандартная международная единица радиоактивности, равная одному распаду в секунду	1 Бк = 27 пикокюри
Распады в секунду (dps)	Число субатомных частиц (например, альфа-частица) или фотонов (гамма-лучи), высвобождаемых из ядра данного атома за одну секунду. Одна единица dps = 60 dpm (распадов в минуту)	1 dps = 1 Бк

Источники: *Nuclear Wastelands*, Makhijani et al., eds., Cambridge: MIT Press, 1995; *Science for Democratic Action*, vol. 6, no. 2, November 1997; *Radiation Protection: A Guide for Scientists and Physicians*, 3rd Ed., Jacob Shapiro, Cambridge: Harvard University Press, 1990.

Терминология со с. 8

Дозы радиации часто вычисляются в единицах “рад” (доза поглощенной радиации — от английского radiation absorbed dose). Один рад равен 100 эрг/грамм или, другими словами, 100 эрг энергии, поглощенной одним граммом некоторой ткани организма. Эрг равен одной десятиллионной джоуля. Сто радов эквивалентно одному джоулю/килограмм (Дж/кг), что также равно одно-

му грею (Гр), стандартной международной единице измерения дозы радиации. А если учесть время? Тогда мы будем говорить об интенсивности дозы (доза в единицу времени). Примером единицы измерения интенсивности дозы является миллирад/час. С точки зрения повседневной жизни, джоуль (или даже более, если взять эрг) — это довольно малое количество энергии.

См.: Терминология, с. 14

ГЛОССАРИЙ

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

Альфа-излучение: излучение, состоящее из ядер гелия, которые высвобождаются в результате радиоактивного распада некоторых тяжелых элементов, включая уран-238, радий-226 и плутоний-239. Альфа — это первая буква греческого алфавита и записывается как α .

Бета-излучение: излучение, состоящее из бета-частиц, которые являются электронами или протонами (положительно заряженными электронами); они испускаются на большой скорости определенными элементами в ходе радиоактивного распада. Бета, вторая буква греческого алфавита, пишется как β .

Эффективный эквивалент дозы (ЭЭД): эквивалент дозы, полученной организмом в целом, рассчитываемый путем умножения дозы, полученной конкретным органом (или несколькими органами), на коэффициент, который позволяет дать приблизительное представление об эквивалентной дозе, полученной организмом в целом, и, следовательно, о риске заболеть раком радиогенного происхождения.

Электрон: элементарная частица, несущая одну единицу отрицательного электрического заряда. Ее масса равна 1/1836 части массы протона.

Внешняя доза облучения: доза, полученная из источников излучения, находящихся вне организма. Как правило, она является результатом воздействия гамма-лучей, однако бета-лучи также могут отвечать за эту дозу, поражая кожный покров и другие относительно близкие к поверхности ткани.

Гамма-излучение: электромагнитные волны с высокой энергией, такие как волны, испускаемые некоторыми ядрами во время радиоактивного распада. Гамма, третья буква греческого алфавита, пишется как γ .

Внутренняя доза радиации: доза, полученная органами тела в результате воздействия радиоактивного материала, проникшего внутрь организма при вдыхании,

с пищей или через порезы и раны. Она может состоять из любой комбинации альфа-, бета- и гамма-излучения от попавшего внутрь радиоактивного материала. Внутренняя доза также включает в себя косвенную ионизацию, вызванную нейтронами, проходящими через тело.

Ионизировать: отщеплять один или более электронов от атома или раскалывать нейтральную молекулу, в результате чего осколки становятся электрически заряженными частицами.

Нейтральные атомы: атомы, которые не несут чистого электрического заряда, поскольку их отрицательные и положительные заряды (соответственно, электроны и протоны) полностью уравновешены. При температурах, которые характерны для Земли, атомы элементов нейтральны.

Нейтрон: элементарная частица, немного тяжелее, чем протон, и не имеющая электрического заряда. Свободные нейтроны нестабильны и распадаются на протоны и электроны с периодом полураспада около 12 минут.

Позитрон: элементарная частица с положительным электрическим зарядом, а в остальных отношениях идентичная электрону.

Протон: элементарная частица с положительным электрическим зарядом и массой, которой присвоено значение единицы по шкале атомных весов.

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ): показатель, который используется для выражения относительного объема биологического изменения, вызванного единицей энергии, переданной конкретной части тела определенным типом ионизирующего излучения. ОБЭ носит комплексный характер и зависит от конкретного пораженного органа. Из-за сложности его вычисления в регулирующей практике для оценки биологического повреждения и связанного с ним риском заболеть раком от различных видов излучения используется более простой параметр, называемый коэффициентом качества.

Измерение радиации: приборы и методы

Дэвид КЛОС и Лиза ЛЕДУИДЖ

Приборы и методы, используемые для измерения внешней дозы облучения в результате воздействия ионизирующего излучения, можно разбить на четыре категории: дозиметры, детекторы бета- и гамма-излучения, детекторы альфа-излучения, методы обнаружения нейтронов. Есть также методы обнаружения внутренней дозы облучения, хотя они относятся скорее к косвенным методам. Мы также рассмотрим измерение радионуклидов в воздухе, воде, растениях и почве.

Дозиметры

Дозиметры — это приборы, которые контролируют индивидуальную дозу внешнего облучения. Наиболее часто используются следующие два вида дозиметров: **термолюминесцентные дозиметры (ТЛД)** и **плёночные дозиметры**. Оба устройства измеряют дозу, накопленную за определенный период времени. Например, плёночные дозиметры можно носить в течение месяца, а затем, после их сбора и анализа, можно определить общую дозу облучения за этот месяц.

В одном из наиболее широко используемых типе термолюминесцентного дозиметра используется кристалл фторида лития. При поглощении излучения фторидом лития электроны в кристалле переходят на более высокие энергетические уровни. Некоторые из этих электронов захватываются примесями в кристалле, где они остаются в возбужденном состоянии, до тех пор пока кристаллы не нагреются. При нагревании кристалла электроны высвобождаются из этих участков захвата и испускают свет. Испущенный свет можно измерить, и он будет пропорционален величине излучения, которое воздействовало на кристалл ТЛД и, по-видимому, на человека. После того, как кристалл будет нагрет до достаточно высокой температуры, все захваченные электроны высвободятся и дозиметр можно будет использовать снова. Чувствительность некоторых ТЛД достаточно высока, что позволяет измерять дозы бета- и гамма-излучения в несколько десятков микрорад. Некоторые ТЛД могут также обнаруживать нейтроны.

Плёночные дозиметры используются для контроля индивидуальных доз в результате воздействия бета- и гамма-излучения. Чтобы оценить одновременно различные дозы облучения, полоску пленки покрывают поглотителями. Меняя тип и толщину поглотителя, мож-

но определить дозы облучения кожи, хрусталика глаз, а также дозу облучения, полученную всем телом. У некоторых плёночных дозиметров есть небольшое окошко, покрытое тонким слоем майлара, который может обнаруживать бета-излучение, и один или более участков с металлической фольгой для обнаружения гамма-излучения. Радиационное воздействие на пленку определяется степенью потемнения пленки, после проявки. Плёночные дозиметры выглядят как значки, и их можно прикреплять на карман или пояс.

Плёночные дозиметры и ТЛД измеряют дозу, полученную работником за длительный промежуток времени, тогда как карманные дозиметры измеряют дозу, полученную работником за один день. Используя карманные дозиметры, можно определять, получил ли работник опасную дозу облучения за данную смену, а не ждать, пока пройдут несколько недель. В принципе, плёночные дозиметры или ТЛД и карманные дозиметры надо носить одновременно. Карманные дозиметры могут измерять гамма-излучение с энергией до двух мегаэлектрон-вольт. Они, по существу, являются устройствами, которые могут хранить электрический заряд. Они состоят из внешнего корпуса — пластиковой трубки, покрытой проводящим материалом, и проволоки, изолированной от внешней стенки и проходящей внутри по центру трубки. Для подачи положительного заряда на центральную проволоку используется дополнительное устройство, называемое зарядно-отсчетным устройством. При облучении некоторая часть этого положительного заряда нейтрализуется ионами, образовавшимися под воздействием данного излучения. Показания дозиметров считывают напрямую или, чтобы определить фактически полученную дозу облучения, их помещают в зарядно-отсчетное устройство. Карманные дозиметры похожи на ручки, и их прикрепляют на карман рубашки.

Детекторы бета- и гамма-излучения

Детекторы излучения — это устройства, используемые для обнаружения бета- и гамма-излучения в воздухе. Они отличаются от дозиметров тем, что могут измерять излучение напрямую в реальном времени. Большинство детекторов излучения регистрируют эффект воздействия излучения на молекулы газа. По мере того, как излучение, замедляясь, проходит через газ, оно

См.: **Приборы и методы**, с. 11
Примечания, с. 14

Приборы и методы со с. 10

ионизирует атомы газа, выталкивая из них электроны и оставляя за собой положительные ионы. В детекторе Гейгера—Мюллера, более широко известном под названием **счетчик Гейгера**, ионизация приводит к постоянной выработке электрического импульса, независимо от количества энергии, передаваемой в детектор, и от природы ионизирующего излучения. С другой стороны, выходные сигналы сцинтиляционных счетчиков и газопроточных пропорциональных счетчиков пропорциональны величине энергии, передаваемой в детектор.

Счетчик Гейгера может насчитывать бета-частицы и гамма-лучи. Если его оборудовать достаточно тонким окошком (как, например, в “плоском” детекторе), счетчик Гейгера может также регистрировать альфа-частицы. Весь прибор фактически состоит из двух компонент: трубки Гейгера—Мюллера (детектор, в котором происходит ионизация) и электронного усилителя (который активизирует устройство, считывающее количество ионизации). Трубка Гейгера—Мюллера (ГМ) состоит из цилиндрической камеры, по центру которой проходит металлическая проволока, изолированная от внешней стенки. В трубке содержится инертный газ, такой как гелий или неон. Положительный провод источника высокого напряжения подсоединен к центральной проволоке, а отрицательный — к внешней оболочке трубки.

Процесс измерения излучения начинается с того, что счетчик Гейгера помещают около источника излучения. В результате этого падающая бета-частица или гамма-лучь ионизирует атомы газа. Высвобождающиеся при этом электроны сильно притягиваются к положительно заряженной проволоке. На пути электронов находятся другие молекулы газа, которые также будут ионизированы. Эти новые электроны вызовут новые ионизации, что в конечном итоге приведет к каскадному процессу ионизации. Одна начальная ионизация приводит к образованию миллиардов ионов, которые собираются на положительно заряженной проволоке, проходящей по центру. Затем используется электронный усилитель для активизации подсчитывающего устройства.

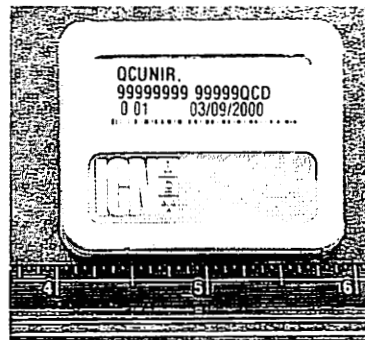
Бета-частицы, которые достигают газа в детекторе и вызывают ионизацию, будут учтены. Однако многие гамма-лучи пройдут через весь газ без взаимодействия и таким образом не будут зарегистрированы (если только не используются более толстые поглотители для захвата гамма-лучей высокой энергии). Поскольку трубка ГМ более эффективна для обнаружения бета-частиц, чем гамма-лучей, она должна быть сконструирована так, чтобы окошко было достаточно тонким и через него могли проникать бета-частицы. Ее выходной сигнал не может быть использован для предоставления инфор-

См.: Приборы и методы, с. 12

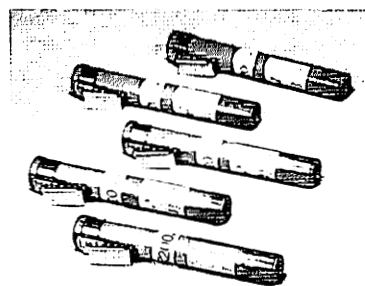
BIODEX MEDICAL SYSTEMS



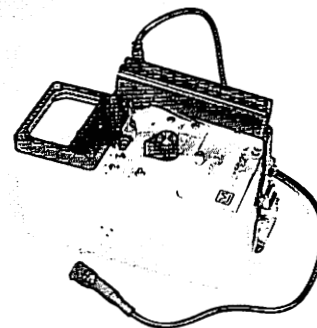
Плоский датчик Гейгера—Мюллера (также называемый “фрискер”, от англ. “frisk” — “обыскивать”).



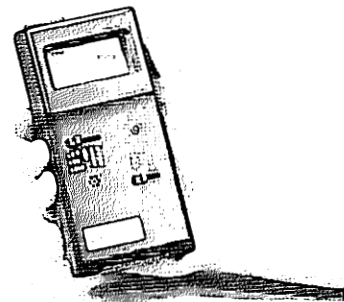
Плечевой дозиметр.



Карманные дозиметры.



Прибор радиационного контроля (используется со сцинтиляционным датчиком (не показано) или плоским датчиком ГМ (справа).



Портативный прибор радиационного контроля (измеряет альфа-, бета- и гамма-радиацию).

ICN BIOMEDICALS, INC.

BIODEX MEDICAL SYSTEMS

BIODEX MEDICAL SYSTEMS

BIODEX MEDICAL SYSTEMS

мации о типе падающей частицы, которая фиксируется счетчиком. Чтобы отличить бета-частицы от гамма-лучей, можно использовать поглотители. Например, тонкий поглотитель, помещенный между источником излучения и трубкой ГМ, задержит все бета-частицы и позволит гамма-лучам проникнуть в детектор. Для различения бета-частиц от гамма-лучей можно использовать интенсивность счета с поглотителем и без него.

Тогда как счетчики Гейгера насчитывают ионизации, возникающие в результате взаимодействия падающего излучения с атомами газа, **сцинтилляционные счетчики** реагируют на энергию самого падающего излучения. Сцинтилляционный счетчик сделан из материала, который светится (сцинтиллирует) при попадании на него излучения, и усилителя света. Когда бета-частица замедляется в сцинтилляторе, небольшая часть энергии, которую она передает атому в сцинтилляторе, преобразуется в свет. Когда гамма-лучи проходят через сцинтиллятор, они отрывают электроны, которые в свою очередь ведут себя как бета-частицы и преобразуют часть своей энергии в свет.

Сцинтилляторы бывают разных форм и размеров. Некоторые из них пластиковые, а некоторые представляют собой плотные кристаллы нитрата натрия. Для обнаружения гамма-лучей необходимы большие плотные сцинтилляторы, поскольку гамма-лучи высоких энергий могут проходить через умеренно толстый слой обычного материала (ткани человеческого тела, бетонные стены, воду и т.д.), почти не взаимодействуя с ним. Количество света, вырабатываемого в сцинтилляторе, можно измерить с помощью усилителя света, называемого фотоэлектронным умножителем. Величина каждого импульса света представляет собой меру энергии, переданной сцинтиллятору. Возможность измерять эту энергию означает, что можно идентифицировать излучение от различных источников и в то же самое время оценить интенсивность источника. Другие приборы, о которых мы говорили выше, не позволяют различать величину энергии фотонов (т.е. тип гамма-лучей). Определив тип гамма-лучей, мы можем сделать вывод о типе радионуклида, который их испускает.

Счетчики Гейгера могут быть выполнены в виде небольших приборов, умещающихся в ладони. Их легко использовать в качестве переносных дозиметров. Сцинтилляционные счетчики — это обычно большие лабораторные измерительные приборы.

Детекторы альфа-излучения

Обнаружение альфа-частиц — это технически более сложная задача, чем обнаружение бета-частиц и гамма-

лучей. Подобно бета- и гамма-излучению, альфа-частицы могут порождать ионизацию, но их проникающая способность ниже.

В принципе, альфа-частицы можно обнаружить с помощью простой трубки ГМ. Счетчики ГМ, снабженные детектором, выполненным в виде тонкого окошка из майлара (например, плоский датчик ГМ), могут быть использованы для обнаружения как альфа-, так и гамма- и бета-излучения. Однако лучше всего альфа-частицы измеряются так называемыми газопоточными пропорциональными счетчиками.

В некоторых пропорциональных счетчиках источник излучения, которое нужно измерить, или образец помещаются непосредственно внутрь детектора. В этих “безокошечных” трубках образец находится в непосредственном контакте с газом счетчика (газ, находящийся внутри детектора). Как и в счетчиках Гейгера, сигнал, производимый пропорциональным счетчиком, получается в результате электрического заряда, который в свою очередь создается ионизацией газа под воздействием падающего излучения. Газ в детекторе состоит из 90 % аргона и 10 % метана и течет через камеру при атмосферном давлении.

Малогабаритные приборы, которые измеряют альфа-, бета- и гамма-излучение совместно (с точки зрения величины ионизации, которую они порождают) и выдают показания в виде количества импульсов в минуту или миллирентген в час, внедрены в производство и доступны для широкого круга потребителей. Альфа-счетчики используются, например, в местах, где люди работают с плутонием (альфа-излучатель).

Обнаружение нейтронов

Гамма-лучи классифицируются как ионизирующее излучение. Они являются электромагнитными лучами (так же как свет), и с ними не связано никакого заряда. Они отрывают электрон от нейтрального атома, оставляя позади себя положительный ион. Альфа- и бета-частицы являются ионами, другими словами, они несут результирующий заряд. Альфа-частица имеет результирующий заряд, равный +2, а бета-частица — единичный положительный или отрицательный заряд. Чтобы представить ионы или продукты ионизации в виде поддающихся измерению событий (единицы счета), применялись различные схемы, рассмотренные выше.

С другой стороны, нейтроны являются нейтральными частицами. Они не несут электрического заряда и напрямую не вызывают ионизацию. Нейтроны могут быть обнаружены косвенным путем посредством заряженных частиц, которые они образуют в ходе ядерной реакции, или по гамма-лучам, порождаемым при

См.: **Приборы и методы**, с. 13

Приборы и методы
со с. 12

косвенной ионизации. Например, в результате типичной реакции захвата изотоп бора-10 захватит нейтрон. Это послужит началом ядерной реакции, в ходе которой образуются характерные гамма-лучи, и они могут быть обнаружены одним из методов обнаружения гамма-излучения, описанных выше. Однако гамма-детекторы должны иметь возможность различать гамма-лучи, образованные в ходе ядерной реакции, и гамма-лучи, исходящие от других источников.

Это не так-то просто сделать. Однако, если есть возможность обнаружения энергии, связанной с излучением (см. выше "сцинтилляционный счетчик"), то можно попытаться найти энергии определенных диапазонов, которые могут быть связаны с источником излучения. (Например, гамма-лучи, которые, как известно, являются продуктами распада.) Можно построить электронные схемы, которые будут отличать характеристические гамма-лучи от всех других.

Измерение окружающей среды

Радионуклиды можно измерять в воздухе, воде, растительности и почве с использованием приборов, описанных выше, в сочетании со станциями мониторинга состояния атмосферы, отбором проб воды и лабораторными анализами, отбором образцов почвы, а также другим оборудованием и методами. Чтобы установить величину излучения в воздухе на рабочем месте, определенное количество воздуха пропускают через бумажный фильтр, который затем измеряют одним из детекторов, описанных выше.

Радиоактивность в жидкостях измеряется с помощью жидкостного сцинтилляционного счетчика. Если в качестве жидкости рассматривается вода, то это довольно стандартная процедура. Например, предприятия, использующие радиоактивные материалы, должны измерять радиоактивность в жидких отходах с тем, чтобы определить, является ли она ниже установленных норм и поддаются ли эти отходы утилизации в качестве сточных вод. Определение уровня радиоактивности в других жидкостях, особенно неизвестных, является более сложной процедурой.

Измерение концентрации радионуклида, являющегося источником гамма-излучения, в почве может быть выполнено в полевых условиях с использованием простого миниатюрного счетчика Гейгера. Однако для обнаружения конкретных альфа- или бета-излучающих радионуклидов образцы почвы

анализируются с помощью сцинтиллятора или газопропорочного пропорционального счетчика и, как правило, в лабораторных условиях.

Многие лаборатории, которые проводят измерения радиоактивности, предлагают свои методики измерений для проверки. Лаборатория по измерению окружающей среды (ЛИОС) Министерства энергетики в рамках Программы оценки качества проводит оценку участвующих лабораторий. Эта программа сравнивает эффективность аналитической деятельности участвующих лабораторий. Примерно два раза в год ЛИОС публикует результаты своих оценок, а также размещает их на своем сайте в Интернете <http://www.eml.doe.gov/qap/>.

Внутренние радиационные дозы¹

Внешние устройства контроля, такие как ТЛД, могут измерять величину внешнего радиационного воздействия на рабочего, но не дозу облучения в результате попадания радионуклидов внутрь тела человека при вдыхании, с пищей или каким-либо другим образом. В общем, определение дозы воздействия от веществ, попавших внутрь тела человека, является значительно более сложной процедурой. Кроме всех прочих факторов, размер внутренней дозы будет зависеть от химической формы материала, путей его проникновения и распределения в теле человека, а также от скорости выведения его из организма (биологический период полувыведения). Поскольку показатели обмена веществ у разных людей разные, внутренняя доза, которую человек получает от конкретного радионуклида, может значительно отличаться от дозы, рассчитанной на основе его среднего показателя биологического периода полувыведения.

Мониторинг доз внутреннего облучения производится несколькими способами. Один из широко принятых методов заключается в измерении концентрации радионуклидов в моче. Если известны скорости вывода при различных содержаниях радионуклидов в организ-

См.: Приборы и методы, с. 14

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	
УСТРОЙСТВА	МОГУТ ИЗМЕРЯТЬ
Пленочные дозиметры	бета-частицы гамма-лучи
Термолюминесцентные дозиметры (ТЛД)	бета-частицы нейтроны
Карманные дозиметры Счетчики Гейгера—Мюллера (счетчики Гейгера)	гамма-лучи альфа-частицы (если используется соответствующий детектор) бета-частицы гамма-лучи
Сцинтилляционный счетчик	бета-частицы гамма-лучи
Газопропорочный пропорциональный счетчик	альфа-частицы гамма-лучи очень низкой энергии бета-частицы очень низкой энергии

Приборы и методы со с. 14

ме, тогда можно рассчитать эти содержания и, таким образом, вычислить дозу облучения.

Другой метод заключается в измерении излучения, испускаемого радионуклидом внутри организма. Поскольку часть гамма-излучения проникает через ткани организма, небольшая доля гамма-лучей, испускаемых радионуклидами внутри организма, выходит наружу. Их можно измерить путем помещения рабочего или части его тела в "счетчик", представляющий собой камеру, которая измеряет гамма-излучение. Таким образом, у нас есть "счетчики" по всему организму, "счетчики по легким" и т.д. При измерении содержания радионуклидов внутри организма необходимо делать поправку или исключать источники природной радиоактивности, особенно радона и продуктов его распада.

Внутренние дозы персонала могут быть оценены косвенно, путем измерения концентраций радионуклидов в воздухе на рабочих местах. На тех участках, где вероятность вредного воздействия повышена, рабочие могут носить портативные устройства контроля за качеством воздуха для измерения концентраций радионуклидов в "респираторной зоне", т.е. непосредственной близости с лицом. Внутренние дозы персонала можно оценить, если известны частота дыхания, эффективность защитных устройств, если таковые имеются, а также другие факторы.

Важно, чтобы радиационный контроль проводился точно и достаточно детально. Например, пленочные портативные устройства и ТЛД, когда они не используются, должны храниться соответствующим образом,

чтобы они не загрязнялись в промежутках между использованием. Кроме того, там, где существует опасность внутреннего облучения, необходимо достаточно часто проводить мониторинг за состоянием здоровья работников, для того чтобы точно определить внутреннее содержание радионуклидов у них в организме.

В военной атомной промышленности данные по дозиметрическому контролю и облучению рабочих в большей степени неточны и неполны. В 1994 г. Министерство энергетики признало, что ее данные по дозам внешнего облучения персонала неполные, неточные и порой вводят в заблуждение и что это частично объясняется плохой калибровкой измерительных приборов, многократной выдачей портативных дозиметров и плохим выбором места расположения дозиметров². Совсем недавно было проведено исследование по оценке эксплуатационных параметров приблизительно 1 000 персональных устройств радиационного контроля в Европе, в результате которого было обнаружено, что 25 % внешних доз, зарегистрированных дозиметрами бета-излучения и нейтронов, были значительно занижены³.



1. Выдержки из *Science for Democratic Action*, vol. 6, no. 2, November 1997.
2. Более детально по этому вопросу см. *Science for Democratic Action*, vol. 6, no. 2, November 1997, and *Nuclear Wastelands*, Makhijani, Hu, and Yih, eds., Cambridge: MIT Press, 1995.
3. J.M. Bordy, et al. "Performance Test of Dosimetric Services in the EU Member States and Switzerland for the Routine Assessment of Individual Doses (Photon, Beta and Neutron)", *Radiation Protection Dosimetry* 89 (1—2), pp. 107—154 (2000), как опубликовано в *New Scientist*, 26 August 2000.

Терминология со с. 9

Но с точки зрения возможности ионизации молекул или элементов, джоуль — это огромное количество энергии. Один джоуль ионизирующего излучения может вызвать десятки тысяч триллионов ионизаций.

Рентген измеряет величину ионизации в воздухе, вызванной радиоактивным распадом ядер. В бескостной биологической ткани один рентген эквивалентен приблизительно 0,93 рад. В воздухе один рентген эквивалентен 0,87 рад. Шкала с делениями мР/ч дает показания в миллирентген/час.

С физической точки зрения наиболее простой способ измерения воздействия излучения — это измерить количество энергии, переданной некоторой единице веса материала. Однако, передача энергии — это только один аспект проблемы, связанной со способностью излучения вызывать биологическое повреждение. Повреждение, вызванное единицей переданной энергии, больше, если она передается на более коротком рас-

стоянии. Следовательно, альфа-частица, которая передаст всю свою энергию на очень коротком расстоянии, вызовет большее повреждение на единицу энергии, чем гамма-лучи, которые будут передавать свою энергию на более длинном отрезке пути. Вес биологического вещества, которому была передана энергия, также играет важную роль. Чувствительность различных органов — различна. В попытке зафиксировать относительную эффективность различных видов излучения, вызывающих биологические повреждения, было введено понятие относительной биологической эффективности (ОБЭ).

Значение ОБЭ различно в зависимости от облученного органа, длительности воздействия и других факторов. В регулирующей практике используется единственный показатель преобразования переданной энергии в рад, называемый коэффициентом качества, хотя это представляет собой значительное упрощение реальных рисков. Для бета- и гамма-излучения используется

См.: **Терминология**, с. 16

ТРАНСМУТАЦИЯ ОТХОДОВ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ

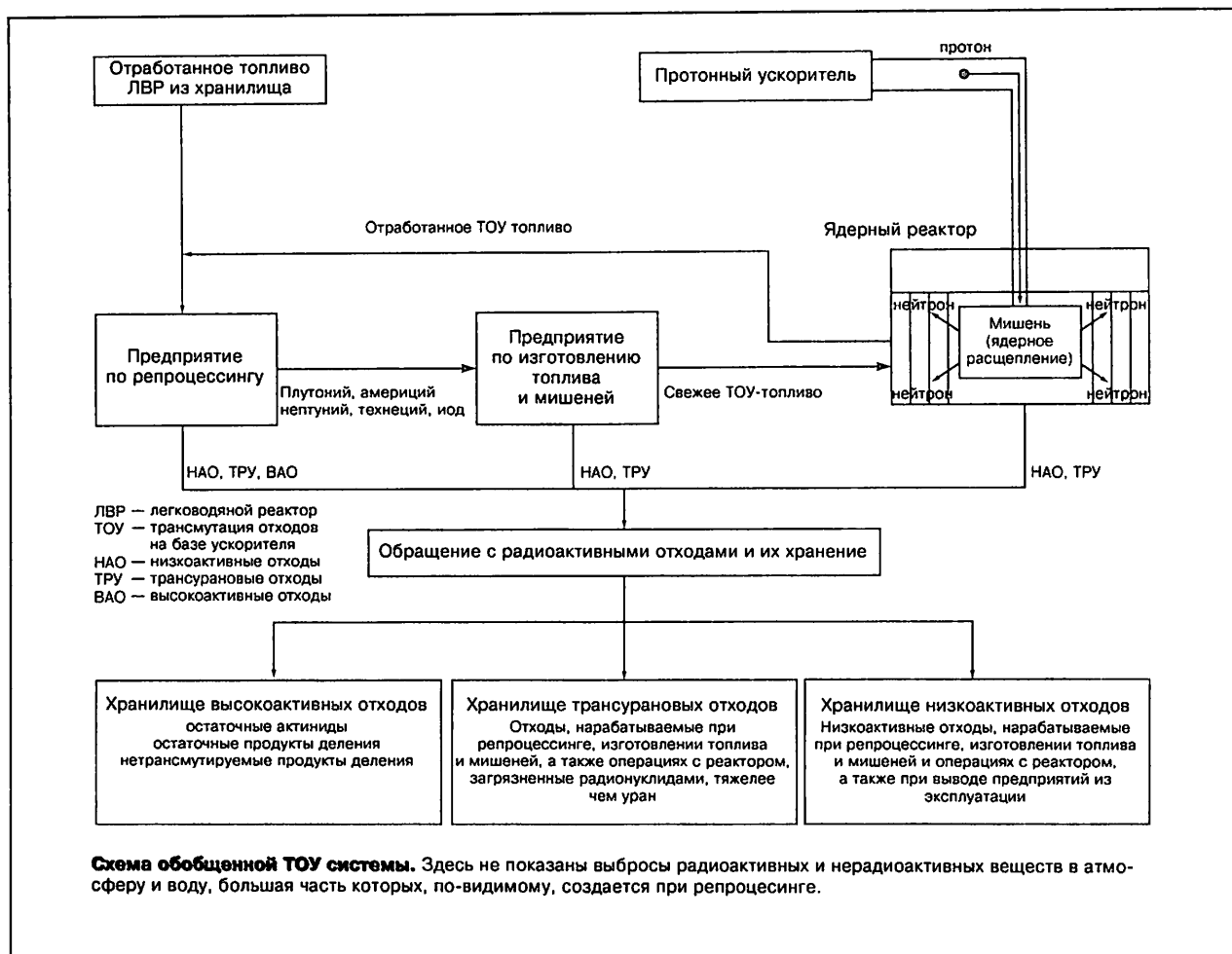
Термин “трансмутация отходов на базе ускорителя” (ТОУ) относится к ряду предложенных ядерных технологий по обращению с высокоактивным отработанным топливом, нарабатываемым современными ядерными реакторами. Однако при ТОУ требуются не только ускорители, но и многое другое. Каждый ускоритель будет поставлять нейтроны для ядерного реактора (или иногда нескольких ядерных реакторов).

С этими установками “ускоритель/реактор” будут связаны предприятия по репроцессингу ядерного топлива, изготовлению топлива, а также по утилизации отходов. Кроме этого, в конечном счете, неизбежно потребуются долговременное хранилище для хранения оста-

точных отходов от ТОУ, а также радионуклидов, которые ТОУ-системы не смогли трансмутировать. Схема обобщенной ТОУ-системы показана на рисунке внизу.



Более подробную информацию о трансмутации и ТОУ можно найти в ЭБ, № 13, 2000 или “*The Nuclear Alchemy Gamble: An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy*”. Бюллетень и некоторые части доклада можно найти на сайте IEER в Интернете (<http://www.ieer.org>) или их можно получить, связавшись с IEER.



Более того, испытания в атмосфере, проводимые ядерными державами, загрязняли молочные продукты далеко за пределами своих государств. Интересно отметить, что карты загрязнения молока, опубликованные Национальным институтом рака, как по волшебству, останавливаются на границах с Канадой и Мексикой. Шахтерам урановым шахт в неядерных государствах был нанесен ущерб государствами, владеющими технологией производства ядерного оружия. Испытательные полигоны загрязнили бывшие колониальные территории, такие как Алжир и Полинезия. Тем не менее, никакой адекватной ответственности не предполагается. Хотя, с другой стороны, почему ядерные державы стали бы отвечать перед людьми за пределами своих границ, если они не отвечают перед теми, кто проживают в пределах этих границ?

Намеренный вред, причиняемый персоналу предприятий и широким слоям населения в ходе производства и при испытаниях атомного оружия, поднимает тревожные вопросы о том, как была сформулирована национальная политика безопасности. Если ядерно-оружейный истеблишмент может участвовать в намеренном нанесении вреда тем самым людям, которых, как заявляется, он защищает, без их ведома, как можно быть уверенным, что сама политика безопасности в большей мере не мотивирована бюрократическим самосохранением, а не интересами безопасности и охраны здоровья общества в целом? Это отнюдь не риторический и не теоретический вопрос. К примеру, имеется убедительное свидетельство того, что решение о бомбардировке Хиросимы и Нагасаки было частично мотивировано стремлением оправдать огромные расходы на создание атомного оружия в ходе Манхэттенского проекта. Ядерный истеблишмент боялся, что если не удастся продемонстрировать высокую боевую эффективность этого оружия, то после войны будут неизбежны беспощадные расследования по поводу бессмысленно потраченных денег³. Такие расследования, без сомнения, также сделали бы неясными перспективы сохранения больших бюджетных ассигнований на атомное оружие после войны.

В каждом ядерном государстве необходимо провести разнообразные общественные дискуссии по вопросам вреда окружающей среде и здоровью человека, которые эти страны причинили собственному населению. Необходимо также всемирное обсуждение вопросов вреда, нанесенного за пределами этих государств. Большая часть этого вреда была нанесена сознательно. Например, в передовой статье журнала выпускников инженерного факультета Университета Калифорнии в 1960 г. отмечалось, что “к настоящему моменту ядерные испытания уже стали причиной рождения дополнительно около 6 000 младенцев с крупными врожденными дефектами [по всему миру]”. И несмотря на это добавлялось, что “вы должны рассматривать этот осознанный риск в сопоставлении с доказанной необходимостью США в ядерном арсенале”⁴. В статье не объяснялось, почему дети Нигерии, Коста-Рики или Индонезии должны иметь врожденные дефекты, чтобы США могли иметь ядерный арсенал.

Пришло время Генеральной Ассамблее ООН учредить независимую и открытую Комиссию по точности и полноте сведений о разрушительном действии, произведенном в мире изготовлением и испытаниями атомного оружия. Комиссия должна не только исследовать причины и масштабы вреда, но также и то, каким образом и намеренно ли был причинен этот вред; она должна выработать рекомендации относительно того, каким образом люди во всем мире могут заставить ядерный истеблишмент отвечать за это. Она также должна изучить, действительно ли и до какой степени доводы о необходимости секретности и физической безопасности ядерного оружия были придуманы с целью держать людей в неведении и страхе с тем, чтобы военная бюрократия могла сохранить себя навсегда. Такое исследование было бы весьма уместно сегодня, принимая во внимание то, что атомные военные ведомства до сих пор отказываются выполнять свои обязательства по разоружению в соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия и что люди продолжают заболеть и умирать от вреда, нанесенного им атомным военным истеблишментом.



1. См.: Arjun Makhijani, Howard Hu, and Katherine Yih, eds. *Nuclear Wastelands: A Global Guide to Nuclear Weapons Production and Its Health and Environmental Effects*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995.
2. См.: Pat Ortmeier, “Let Them drink Milk”, *Science for Democratic Action*, vol. 3 no. 2.
3. См.: Leslie Groves, *Now It Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*. New York: Harper and Row, 1962. Chapter 26 и David Robertson, *Sly and Able: A Political Biography of James F. Byrnes*. New York: Norton, 1994. Chapter 15. Также см.: Arjun Makhijani, “Japan: Always the Target?”, *The Bulletin of Atomic Scientists*, May—June 1995.
4. Editorial, *California Engineer*, April 1960; reprinted in 1990.

Терминология

со с. 14

коэффициент качества, равный единице, т.е. 1 рад = 1 бэр. Альфа-излучение вызывает большее поражение на единицу энергии, поглощенной живой тканью. В настоящее время коэффициент качества для альфа-излучения равен 20 (чтобы получить в бэрах, надо альфа-излучение в радах умножить на 20). Мы говорим “в настоящее время”, потому что коэффициент качества для альфа-излучения с годами меняется. Коэффициент качества, обычно используемый для нейтронов, в настоящее время равен 10.

Коэффициенты преобразования дозы (КПД) используются для преобразования количества радиоактивности (измеряемой в кюри или беккерелях), попадающей в организм человека при вдыхании или с пищей, в дозу (измеряемую в бэрах или зивертах). Коэффициенты КПД, использующиеся в нормативно-правовой практике, рассчитываются как с использованием экспериментальных данных, так и на основе математических моделей.

