

Федеральное агентство по образованию
Российской Федерации

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)

А. Б. Колдобский

**ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ:
ВОЗДЕЙСТВИЕ, РИСКИ,
ОБЩЕСТВЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ**

*Рекомендовано к изданию
УМО «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2008

УДК 539.1.047+621.039.586
ББК 22.382
К 60

Колдобский А. Б. **Ионизирующая радиация: воздействие, риски, общественное восприятие.** – М.: МИФИ, 2008. – 88 с.

Кратко рассмотрены вопросы глобального энергообеспечения в контексте физико-технического обоснования, достигнутого технологического уровня и наличия топливных ресурсов. Показано, что без широкого развития атомной энергетики на базе новой технологической платформы надежное энергообеспечение в среднесрочной перспективе становится проблематичным. Отмечается, что придание атомной энергетике статуса массовой технологии требует кардинального изменения её неоднозначного общественного восприятия, на формирование которого существенное влияние оказывает неадекватное представление об опасности ионизирующей радиации.

Читателю предложены элементарные сведения по ядерной физике, необходимые для последующего рассмотрения вопросов, связанных с ионизирующими излучениями. Изложены основы радиационной физики. Даны понятия о современных радиометрических и дозиметрических единицах, рассмотрены основы биологического действия излучений. Обсуждаются Нормы радиационной безопасности НРБ-99 и их обоснование (концепции допустимого риска и линейная беспороговая гипотеза). Подробно анализируются вопросы бытовых радиационных рисков (в частности, воздействие радона). Представлены ответы на наиболее часто встречающиеся вопросы по действию ионизирующих излучений и их последствиям. Рассмотрены радиационные последствия аварии на Чернобыльской АЭС, её медицинские и социальные аспекты. Книга построена по принципу «вопрос-ответ» и не предполагает обязательной последовательности при знакомстве с её материалом.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ксенофонтов

ISBN 978-5-7262-0991-3 © *Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008*

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Предисловие автора. Энергия и люди, или о чём эта книга	4
2. Ядерная физика: необходимый минимум	29
3. Действие ионизирующих излучений на организм. Радиационная физика и радиобиология.....	37
4. Чернобыль и после него	74
Литература	85

1. ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА. ЭНЕРГИЯ И ЛЮДИ, ИЛИ О ЧЁМ ЭТА КНИГА

Если бы автору задали вопрос: «Назовите величайшее изобретение человечества», он ответил бы: костёр. Именно «управляемый огонь» – костёр – положил начало энерготехнологиям, которые, в своей основе, есть не что иное, как способы освобождения и использования человеком в своих интересах различных форм энергии, запасённых природой.

На современном этапе развития человеческой цивилизации энерготехнология, как совокупность её отдельных форм и разновидностей, имеет важнейшую особенность – в отличие от большинства других, она является технологией прямого жизнеобеспечения. Попросту говоря, жить, например, без самолёта, автомобиля, Интернета и пр. человеку XXI в., разумеется, очень скучно, неуютно, неудобно, в общем – плохо. Плохо – но, исходя из критерия выживания человечества как биологической популяции, – можно. А вот без энерготехнологий – нельзя. Не только потому, что без них невозможны ни самолёт, ни автомобиль, ни Интернет и пр., но элементарно невозможны ни современное земледелие (значит, еда), ни современное водоснабжение (значит, и вода). Невозможны химия и металлургия (значит, прощай решительно все хоть сколько-нибудь искусственное, что нас окружает), невозможны фармацевтика и медицина (значит, уже забытые человеком губительные эпидемии снова будут выкашивать сотни тысяч и миллионы людей). Наконец, в условиях современных мегаполисов невозможными становятся обогрев жилища, приготовление пищи...

Жалкое зрелище будет являть собой лишённое энерготехнологий человечество (точнее, немногочисленные его остатки), отброшенное, как кошмарной фантастической машиной времени, в эпоху пещер и каменных топоров. Хорошая иллюстрация к сказанному – рис. 1. На нём средняя продолжительность жизни граждан различных стран и регионов мира показана как функция удельного (в пересчёте на одного жителя страны или региона) годового энергопотребления (МВт/чел. в год). Мы видим, что эта зависимость имеет логарифмический характер – при удельном годовом энергопотреблении свыше 5 – 6 МВт/чел. в год она «выходит на плато», т.е. продолжительность жизни начинает определяться естественным старением и дополнительными факторами (структурой и уровнем социального совершенства общества, качеством окружающей среды, наличием либо отсутствием вредных привычек и др.). Дальнейшее увеличение удельного энергопотребления сверх некоторого «критического уровня» не имеет

особого смысла. В этих условиях становятся возможными развитие энергосберегающих технологий, оптимизация структуры топливно-энергетического комплекса страны и региона и т.п. Но надо очень внимательно отслеживать процесс замещения выбывающих энергетических мощностей, ни в коем случае не допуская падения удельного годового энергопотребления ниже указанного «критического уровня».

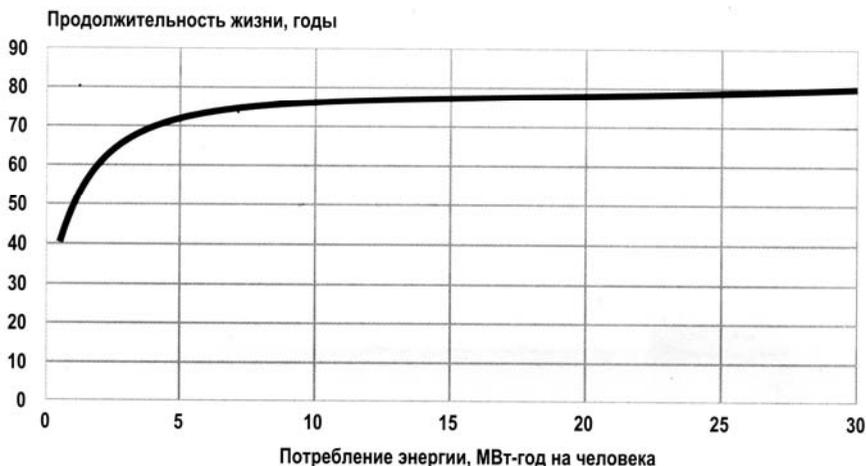


Рис. 1. Зависимость продолжительности жизни человека от количества потребляемой энергии

К «клубу энергетического изобилия» по такому критерию, например, относятся: большинство стран Западной и Средней Европы (5,0 – 7,5 МВт/чел. в год), Россия (6,2), Япония (7,6), США (14,1), скандинавские страны и Канада (14,9 – 25,8). Именно жители этих (и немногих других) стран формируют так называемый «золотой миллиард» – составляя около 15 % населения Земли, они во второй половине XX в. потребляли около 75 % получаемой человечеством энергии.

А что дальше?

Как долго будут сохраняться такие различия в удельном энергопотреблении в кругу специалистов, получившие выразительное название «энергетический империализм»? Каковы, в этой связи, прогнозы на величину общего мирового энергопотребления? За счёт чего его обеспечивать? Хватит ли для этого ресурсов и технологических возможностей, хватит ли «запаса экологической прочности» нашей планеты? И – самое главное: как сделать так, чтобы хватило? Вот в ответе на этот вопрос ошибиться нельзя – слишком велика цена такой ошибки.

Итак, начнём с различий в удельном энергопотреблении. Нет никаких сомнений: они будут стираться. Наивно предполагать, что на нынешнем «нищенском» уровне по этому важнейшему показателю останутся, например, Индия и Индонезия (по 0,4 МВт/чел в год), КНР (1,2), Бразилия (1,8). Ведь речь идёт о «странах-драконах» – крупных государствах со стремительно развивающейся экономикой (что в настоящее время практически невозможно без сколько-нибудь адекватного развития и социальной сферы). И никакие прямые или косвенные призывы к этим государствам со стороны «золотого миллиарда» – ограничить рост удельного энергопотребления – услышаны не будут. Ответом, и вполне логичным, станет «на себя оборотись». А ведь есть и другие развивающиеся страны...

Это – по удельному энергопотреблению, «на душу населения». Но понятно, что чрезвычайно важен вопрос: а сколько этих самых «душ» и где они живут? Увы, с точки зрения перспектив мировой энергетики, и тут ситуация напряжённая, если не сказать большего.

На рис. 2 показан текущий и прогнозируемый рост численности населения мира.

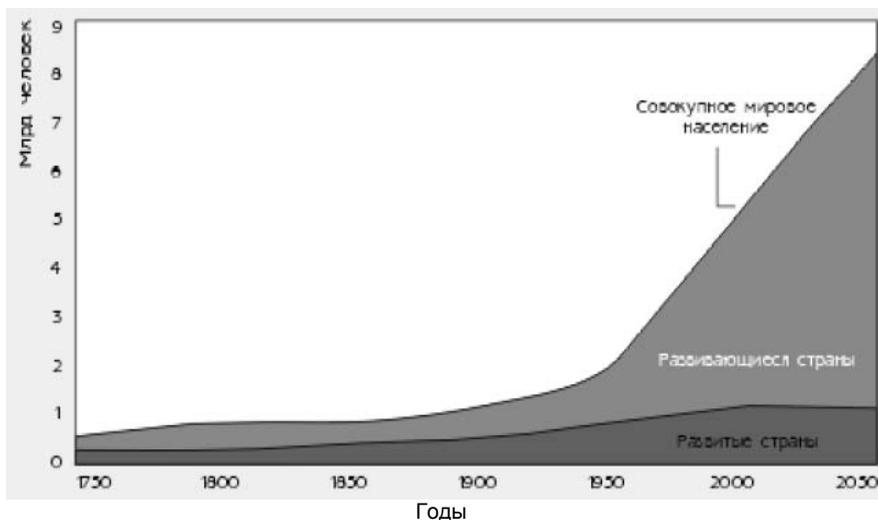


Рис. 2. Рост численности населения мира

Очевидно, что в большинстве стран «золотого миллиарда» она стабилизировалась, а в некоторых государствах (Россия, Япония) – и сокращается. С учётом того, что, как мы уже видели, заметного увеличения удельного энергопотребления в этих странах ждать не приходится, на приблизительно постоянном уровне останется и общее энергопотребление.

Впрочем, уровень этот отнюдь не низкий – в 2002 г. около 65 %. А весь прирост численности населения мира (с нынешних 6,5 млрд до ~ 7,8 млрд в 2025 г. и до 8,5 – 9,0 млрд к 2050 г.) будет обусловлен, как мы видим, развивающимися странами – именно теми, где ожидается к тому же резкий рост и удельного энергопотребления!

Всё это, вместе взятое, не может не привести в середине XXI в. к росту общего мирового энергопотребления в 2 – 3 раза по сравнению с нынешним уровнем. Точнее говоря, таковы будут потребности в энергопотреблении – не факт, что для их удовлетворения будут и возможности...

К разговору о них мы и переходим.

Таблица 1

Структура и прогноз структуры электроэнергетики и ТЭБ, %

Ресурс	Электроэнергетика				ТЭБ		
	мир	Россия	мир	Россия	мир	Россия	мир
	2000 г.		2020 г.		2000 г.		2030 г.
Нефть	9	8	7	8	38,3	32,5	37,6
Уголь	38	17	38	20	24,7	13,1	19,0
Газ	20	42	29	28	23,7	47,4	31,8
АЭС	15	15	10	30	6,4	2,8	5,0
Гидро	18	18	16	14	6,9	3,7	3,6
Прочие	–	–	–	–	0,7	0,5	3,0

В табл. 1 показана структура (на начало 2000-х годов) топливно-энергетического баланса (ТЭБ) и производства электроэнергии для мира в целом и для России. Беглого взгляда на эту таблицу достаточно, чтобы понять: нынешнее энергообеспечение человечества, увы, в основе своей недалеко ушло от того самого костра, с которого мы начали своё повествование. Эта основа – «огневая» энергетика, утилизация энергии, выделяющейся при горении органики, т. е. экзотермическом окислении угле-

рода (~ 4 эВ на образование одной молекулы CO₂). Различаются лишь носители органики: столь модные у изобретателей костра дрова сейчас неактуальны (хотя 0,5 % в структуре ТЭБ России – это, в значительной части, дровяное отопление сельских домов). Но вот ископаемые углеводороды (нефть, газ) и уголь, в совокупности образующие так называемые литосферные запасы энергоносителей, – дело другое. На них суммарно в производстве электроэнергии приходится (и в мире, и в России) по 67 %, а в ТЭБ в целом – 87 и 92 % соответственно! Всё другое – так, довесок. А поскольку структуры ТЭБ и электроэнергетики – вещи очень консервативные, то кардинального их изменения в краткосрочной перспективе ждать не приходится.

Самое время поинтересоваться: надолго ли хватит нефти, газа и угля при таких-то аппетитах.

Тут и ждёт нас неприятный сюрприз: ненадолго. Даже при сохранении лишь нынешнего уровня мирового энергопотребления (а он, как мы видели, наверняка будет возрастать) и существующей структуры ТЭБ и электроэнергетики, нефти хватит на 40 – 60 лет, газа – 60 – 80, угля – 300 – 500 (по различным оценкам). С учётом возможной конверсии энерготехнологий (технически реалистичных изменений структуры ТЭБ и электроэнергетики) вероятное время общего истощения доступных запасов горючих энергоносителей – от 100 до 150 лет. Дальше, если продолжать жить по принципу «после нас – хоть потоп», человечество ждёт тяжёлые времена. А ведь надо иметь в виду, что приведённые выше оценки – «голая арифметика», они не учитывают резкой географической неравномерности распределения этих запасов в мире и его крайне неоднородной политической и социальной картины. Значит, не только не исключены, но, напротив, весьма вероятны острейшие «ресурсные» конфликты и войны. И тут благостных иллюзий быть не должно – принадлежащие к «золотому миллиарду» страны Запада, привыкшие к энергетическому изобилию (и, в последние годы, к политической безнаказанности), будут вести эти войны с остервенением загнанных в угол крыс. Предвестники этого уже налицо – вспомним о несомненной «нефтяной» подоплёке американской агрессии в Ираке, о настойчивых разговорах о «наднациональной принадлежности» ресурсов российской Сибири, об отчётливо обозначившейся острой конфронтации по проблеме арктического шельфа с его газовыми и нефтяными богатствами и т.д.

Как избежать столь безрадостных перспектив? По крайней мере – с чего начать?

Прежде всего – с ясного осознания того факта, что проблема предотвращения мирового энергетического кризиса имеет системный, комплексный характер. Она имеет политический аспект – обитатели мира, утратившего стратегическую стабильность на «топливной» почве и без-

возвратно погрузившегося в бездну территориальных переделов, войн и терроризма, будут заниматься всем этим, пока не погаснет последняя лампочка. Имеет аспект мировоззренческий – многим ещё предстоит понять, что обладание прожорливым четырёхколёсным чудовищем и стояние в нём в многокилометровых городских пробках не есть признак «престижности» и большого ума (часто наоборот). Во многих случаях имеет аспект экономический – ну нельзя же, как это делается, увы, в России, всерьёз обсуждать пути сохранения для наших потомков национальных углеводородных ресурсов и одновременно строить благополучие страны на масштабной продаже этих ресурсов за рубеж, заодно истово уверяя при этом покупателей, что так будет продолжаться и впредь.

Конечно, есть у этой проблемы и другие аспекты, но более подробно мы коснёмся лишь одного – технологического. Иными словами, поищем ответ на вопрос: как заменить выбывающие запасы нефти, газа и угля в структурах ТЭБ и электрогенерации в табл. 1. И здесь ясней ясного: ждать нельзя. Надо отчётливо понимать, что речь пойдёт фактически о новой технологической революции – иначе грандиознейшую перестройку мирового энергетического хозяйства никак не назовешь. А её можно вести, только находясь на определённом (и высоком!) уровне энергообеспечения – когда он, вследствие исчерпания запасов органического топлива, станет обвально падать, будет слишком поздно.

Ясно, однако, и другое: нужен долгосрочный, обоснованный, осознанный план действий, без вселенских истерик, паники и компанейщины. И начать надо с того, чтобы выбрать базовую, главную энерготехнологию обозримого будущего. Выбрать по триединому критерию: она должна обеспечить по меньшей мере сохранение (а лучше – увеличение) достигнутого уровня энергопотребления, иметь значимое (как минимум – в пределах сотен лет) ресурсное обеспечение и иметь гарантированные возможности практической реализации.

Что же, давайте искать вместе, уважаемый читатель. Но для этого нам надо расшифровать физико-технический смысл сформулированных выше требований. В особенности – первого из них. Именно здесь часто предлагаются внешне очень заманчивые пути развития энерготехнологий, которые при попытке практической реализации, увы, оказываются тупиковыми.

Инженер при анализе принципиальных возможностей той или иной энергоустановки обращает внимание прежде всего на две её характеристики: плотность передачи энергии и коэффициент готовности.

Плотность передачи энергии – количество энергии, снимаемое с единицы площади приёмника в ходе работы. Таким приёмником является, например, поверхность теплообменника угольного или газового котла, рабочая площадь лопастей ветрового генератора или водяной турбины, внутренняя поверхность тепловыделяющего элемента ядерного реактора,

площадь солнечной батареи и др. Понятно, что чем плотность передачи энергии выше – тем лучше. Ведь она определяет площадь, необходимую для сооружения электростанции или теплоцентрали заданной мощности.

Коэффициент готовности (с некоторым упрощением) – это безразмерная величина, равная отношению числа дней за некоторый (достаточно длительный, не менее года) временной период, в течение которых технически возможна работа установки на номинальной мощности, к общему числу дней в этом периоде. Он всегда меньше единицы, но чем ближе к ней – тем лучше. Мало кому нужна энергоустановка, которая в процессе эксплуатации больше стоит, чем работает. Кроме того, очень важно, является ли коэффициент готовности управляемым – иными словами, чем обусловлено его отличие от единицы. Если мероприятиями, заранее запланированными по началу и длительности (ремонтно-профилактические работы, регламентные технологические паузы), то в этих случаях всегда предусматривается (и реализуется) маневр оставшимися мощностями, позволяющими избежать сбоев в энергоснабжении. Но вот если эти технологические паузы установка «выбирает себе сама», то это никуда не годится. Самая плохая технология – это непрогнозируемая технология.

В контексте выполнения всех этих требований мы и рассмотрим основные энерготехнологии настоящего и будущего – без анализа частных случаев, «широкими мазками».

Огневая энергетика по факту своего вполне реального существования способна обеспечить как минимум достигнутый уровень энергопотребления – как мы видели, она-то его и определяет. Реализующие её установки характеризуются высокими значениями плотности передачи энергии (десятки и сотни кВт/м²) и управляемого коэффициента готовности (~ 0,8). Но её близкое ресурсное исчерпание и вынуждает нас вести этот весь этот разговор.

Термоядерная энергетика, хотя бы в рассматриваемых к настоящему времени технических подходах, вполне способна обеспечить всему человечеству энергетическое изобилие. Это обусловлено приемлемыми ожидаемыми значениями плотности передачи энергии (порядка десятков кВт/м²) и заведомо высокими величинами управляемого коэффициента готовности – при практически неограниченном (в случае реализации DD-цикла) ресурсном обеспечении. Ведь дейтерий есть в обычной воде, пусть и в малом количестве (0,015 % по числу ядер от всего водорода). А потенциал его громаден – расчётное количество энергии, запасённое лишь в 1 л воды, эквивалентно, при полном протекании термоядерных реакций DD-цикла, сжиганию примерно 400 л нефти или около 600 кг высококачественного угля.

Но ... весь вопрос в том, когда термоядерная энергетика станет практической реальностью – сейчас она таковой не является. И главной про-

блемой является то, что требуемое для этого время, по всей видимости, сравнимо со сроком исчерпания ресурсных запасов «традиционной» огневой энергетики.

В этих условиях идти на величайший в истории человечества технологический риск, безоглядно бросив все силы на овладение управляемым термоядерным синтезом, вряд ли уместно – слишком «коварен» в обсуждаемом смысле термояд. Сколько раз уже казалось, что вот оно в руках, термоядерное энергетическое могущество человечества, но, увы... Тем более, что даже в случае законченной инженерной готовности термоядерной энергетики на глобальную системную перестройку энергетической структуры тоже потребуется время, а главное – энергия. Много энергии, с каждым годом всё более дефицитной.

Поэтому наиболее разумной стратегией в отношении термоядерной энергетики представляется подход «надеясь на лучшее, готовиться к худшему». Иными словами, ни в коем случае не прекращая термоядерных исследований (напротив, всемерно развивая их), иметь наготове энергетический сценарий и на какой-то иной физико-технической основе, позволяющей постепенно заместить нефть, газ и уголь.

Вот теперь самое время обсудить перспективы создания масштабной энергетики на базе так называемых возобновляемых источников. Их, в общем, достаточно много – энергия стока рек, ветра, солнца, приливов, земных недр.

Характерной чертой возобновляемых источников энергии является отсутствие технологий её получения. Ведь дрова, уголь, нефть, газ, уран, дейтерий сами по себе энергией не являются – она лишь «запасена» в них, требуя для высвобождения костра, печи, котла, форсунки, реактора. А вот ветер, например, сам по себе есть энергия, «готовая для использования». Так же обстоит дело и с другими возобновляемыми источниками.

Отсюда – немедленный вывод: говорить о ресурсном обеспечении энергетики на возобновляемых источниках вообще бессмысленно – оно бесконечно в том же смысле, в каком более или менее неизменны условия жизни на нашей планете. Это очень хорошо: выполнение второго требования (из трёх, сформулированных нами ранее) – налицо. Как и третьего (гарантированность технической реализуемости) – с ветряными мельницами сражался ещё Дон Кихот, а отважные гардемарины XVIII в. оборонялись от шайки де Брильи на мельнице водяной. И, разумеется, соответствующие технологии с тех пор на месте не стояли. Тоже неплохо.

Подножку ставит первое требование (техническая возможность обеспечения хотя бы существующего уровня мирового энергопотребления). Тут и проявляются в полной мере «врождённые пороки» энергетики на возобновляемых источниках.

Первый (вероятно, главный) – чрезвычайно низкая плотность передачи энергии, её «рассеянность». Вместо десятков и сотен кВт/м², типичных, как мы знаем, для огневой энергетики – десятые (для средних широт и нормальных погодных условий) доли кВт/м² для ветровой и солнечной, тысячные доли – для приливной, стотысячные – для геотермальной и т. д. Исключением является гидроэнергетика: для неё характерна достаточно высокая плотность передачи энергии (порядка 100 кВт/м²), о чём разговор далее.

Прямым следствием этого является резкое возрастание производственных площадей энергостанций и, соответственно, площадей отчуждаемых земель (табл. 2).

Таблица 2

**Площади отчуждаемых земель (в среднем) для выработки
одинакового количества электроэнергии (относительно АЭС)**

Тип электростанции	АЭС	ТЭС			ГЭС	Солнечный	Ветряной
		мазут	газ	уголь			
Площадь, га	1	1,4	2,4	3,8	420	160	270

По данным табл. 2 нетрудно подсчитать, что площадь, занимаемая ветровой или солнечной электростанцией мощностью 1 ГВт (а это – электрическая мощность всего лишь одного реактора ВВЭР-1000, каких на Калининской АЭС – 3, а на Балаковской – 4), составляет более 100 км². Это значит, что гипотетическое полное замещение такими станциями всех генерирующих мощностей, например, Франции потребует «энергетического отчуждения» порядка одной десятой территории страны – включая Альпы и Лазурный Берег! Прощайте, шампанское и коньяк...

Одно тянет за собой другое. Вынужденно огромные площади энергостанций на возобновляемых источниках влекут за собой резкое, на порядки величин, увеличение удельных (на единицу произведённой энергии) натуральных и стоимостных затрат на материалы и оборудование при их сооружении и эксплуатации. Например, для сооружения всего лишь 1 км² простейших солнечных коллекторов требуется около 10 000 т алюминия и примерно столько же – железа. А ведь их ещё получить надо – естественно, тоже затратив на это энергию, и немалую! Во многих случаях возникают серьёзные сомнения, не оказывается ли произведённая на таких электростанциях энергия вообще меньше затраченной на их сооружение и эксплуатацию. Кстати, даже в Германии, стране, которую особенности внутривластных процессов привели к неадекватно преувеличенной

оценке возможностей возобновляемых энергоносителей, широко пропагандируемая ветровая энергетика и сейчас остаётся глубоко дотационной: её себестоимость составляет ~ 9 центов/кВт · ч при средней по стране цене электроэнергии 2,5 цента/кВт · ч, невзирая на все технологические и инновационные усилия.

Очень скверно у «возобновляемой энергетике» обстоит дело и с коэффициентом готовности. Он и вообще низок (для ветровой и солнечной энергетике 0,2 – 0,4), однако печальнее всего, что, в отличие от огневой энергетике, он не является управляемым. Это и понятно: например, эффективность ветрового генератора в основном определяется направлением ветра и его силой, а они человеком не контролируются, хуже того – в сколько-нибудь долгосрочном плане и не прогнозируются.

Жаль, конечно, но реальная значимость, да и обозримые перспективы ветровой, солнечной, приливной, геотермальной и других «возобновляемых» энергетик абсолютно несоизмеримы надеждам, часто возлагаемым на них политиками и экологическими деятелями, а ещё чаще – шумно озвучиваемыми кем попало через средства массовой информации. Для энергетического спасения человечества они с очевидностью не подходят.

Некоторое исключение – гидроэнергетика: для неё коэффициент готовности выше (0,5 – 0,6) и в основном управляем. В совокупности с высокой плотностью передачи энергии на ГЭС это обуславливает особую роль гидроэнергетических ресурсов среди возобновляемых источников: из $\sim 17\%$ мировой электрогенерации за их счёт на долю гидроэнергетике приходится 15,7 – 15,9%. Причина этого ясна: носитель гидроэнергии (вода) относительно просто концентрируется в ограниченном объёме с большим энергетическим эквивалентом накопленной массы. Для этого достаточно с помощью плотины создать пороговую разность уровней реки выше и ниже ГЭС (напор) и направить падающий поток на турбину через специальные тоннели. Для сравнения: попробуйте, например, сконцентрировать ветер...

Можно добавить, что рекордные показатели удельного энергопотребления (свыше 20 кВт/чел. в год) для скандинавских стран, а также Австрии и Швейцарии во многом обусловлены наличием значительных количеств высокотехнологичных энергоёмких производств именно на базе относительно дешёвой гидроэнергии.

Увы... Главной проблемой, резко ограничивающей глобальные перспективы гидроэнергетике, являются «побочные» экономические и экологические, а иногда – и социальные последствия создания упомянутой выше разности уровней реки выше и ниже ГЭС как условия накопления необходимого энергетического потенциала.

Вовсе не случайно гидроэнергетика в перечисленных выше странах базируется на значительном количестве сравнительно небольших ГЭС,

сооружённых на горных реках (что соответствует общему природному рельефу этих стран). «Ущелистые» русла таких рек позволяют добиться значительного напора при минимальной площади водного зеркала водохранилища, образуемого при сооружении плотины. Соответственно, не слишком большой будет и площадь затопляемых при этом земель, что делает такие ГЭС приемлемыми экономически и экологически.

Совсем иная картина на равнинных реках. Здесь для обеспечения необходимого напора господствуют циклопические масштабы – и при сооружении плотин (что резко ухудшает инвестиционную привлекательность проектов), и при затоплении громадных площадей выше по течению (с неизбежными как экономическими, так и, в особенности, экологическими потерями). Этим и обусловлен очень неблагоприятный общий показатель гидроэнергетики по площади отчуждаемых земель (см. табл. 2).

А ведь именно равнинными являются крупнейшие ГЭС мира – в частности, в России, для которой гористый рельеф, в общем, нехарактерен. И уж кому-кому, а россиянам хорошо известна цена «побед над природой», одерживаемых при сооружении таких ГЭС. Безвозвратная потеря земель, не только представляющих огромную экономическую ценность, но и имеющих ни с чем не сравнимую социальную значимость. Деградикация водных и прибрежных экосистем, исчезновение десятков биологических видов. Климатические, гидрологические и литосферные изменения – как минимум, регионального масштаба...

Сказанное обуславливает весьма скромные перспективы гидроэнергетики как энергии будущего. При естественных различиях в частности прогнозов на этот счёт все они совпадают в главном – возрастания её доли ни в электрогенерации, ни в общей структуре ТЭБ ожидать не приходится. Напротив, более вероятным представляется её уменьшение.

Итак, энергия будущего уже в среднесрочной перспективе – не углеводородная, не «возобновляемая», не, очень может статься, термоядерная. Что у человечества есть ещё?

Вот мы и переходим к атомной энергии, основанной на технической утилизации цепной реакции деления в ядерных реакторах.

Рассмотрим атомную энергию с позиции сформулированных нами ранее требований. Плотность передачи энергии рекордная: от топлива к теплоносителю через оболочку тепловыделяющего элемента около 650 кВт/м^2 ! Более того, ядерное топливо обладает колоссальной энергоёмкостью. Ведь на каждый акт деления ядра урана или плутония выделяется около 200 МэВ энергии. Сравним эту величину с 4 эВ от окисления одного атома углерода в углекислый газ – впечатляет, верно? Один килограмм ядерного топлива реактора ВВЭР-1000 по запасённой энергии эквивалентен примерно 100 т (два вагона) высококачественного угля или 60 т нефти!

Коэффициент готовности атомной энергетики очень высок ($\sim 0,8$) и практически полностью управляем, его зависимость от суточных и погодноклиматических факторов отсутствует. Вопрос о её практической реализуемости, понятно, вообще не стоит: это – вполне реальная отрасль современной энергетики, обеспечивающая около 16 % мировой выработки электроэнергии и 6,4 % в структуре ТЭБ.

А вот перспективы ресурсного обеспечения атомной энергетики следует обсудить подробнее. Хотя бы потому, что среди аргументов противников её развития активно муссируются и этот.

Как известно, в природе существует один-единственный материал, делящийся нейтронами любых энергий, и поэтому способный при соответствующем конструктивном оформлении в виде ядерного топлива поддерживать цепную реакцию деления – физическую основу атомной энергетики. Это лёгкий изотоп урана – уран-235. Однако в естественном уране его очень мало – всего-то 0,71 %. Остальное – уран-238. Сам по себе он для ядерной энергетики никакой ценности не представляет, поскольку делится очень плохо и поэтому цепной реакции не поддерживает. Но...

Физика реактора – это прежде всего нейтроны и их судьба. На десять актов деления урана-235 их (статистически, в среднем) образуется примерно 25 – потому-то, собственно говоря, и возможна цепная реакция деления. Часть нейтронов идёт на её поддержание, часть поглощается конструкционными материалами активной зоны, органами управления реактора и его биологической защитой. Наконец, некоторое количество нейтронов поглощается ядрами вроде бы бесполезного урана-238 без деления. Однако образовавшийся при этом уран-239 довольно быстро в ходе двух последовательных бета-распадов переходит в новое ядро – долгоживущий плутоний-239. А он-то является прекрасным ядерным топливом, не уступающим урану-235!

Мы видим, что любой ядерный реактор не только сжигает первоначальный делящийся материал (уран-235), но и нарабатывает новый (плутоний-239). Причём, что важно, из широко распространённого (в отличие от урана-235) урана-238. Часть образующегося плутония-239 сгорает тут же вместе с ураном-235, а часть остаётся в облучённом ядерном топливе, откуда его можно извлечь путём радиохимической переработки и использовать вновь.

Для читателя, вероятно, уже понятен главный вопрос ресурсного обеспечения атомной энергетики. В упрощённой формулировке он звучит так: как соотносится с единицей отношение скоростей выработки нового ядерного топлива (плутония-239 из урана-238) и выгорания исходного (урана-235 и/или того же плутония-239)?

Если оно меньше единицы – тогда атомная энергетика будет существовать лишь до тех пор, пока доступен (технически и экономически) уран-235 – плутония-то в природе нет, весь он получается искусственно в ядер-

ных реакторах. К сожалению, для современной мировой атомной энергетики дело именно так и обстоит – её основой являются ядерные реакторы на тепловых нейтронах, а для них это отношение (коэффициент конверсии) всегда меньше единицы – в лучшем случае порядка 0,8. Простейшей оценкой несложно получить, что в этом случае вовлечение в топливный ресурс урана-238 за счёт образования плутония ничтожно – единицы процентов. В таком виде атомная энергетика для решения проблемы энергии будущего вряд ли сильно поможет – даже при возврате в топливный цикл невыгоревшего урана и образовавшегося плутония время её существования ограничено величиной порядка сотни с небольшим лет. После этого истощение урана-235 ставит на ней крест, поскольку оставшийся после этого уран-238 (более 95 % первоначального запаса всего природного урана!) сам по себе никому не нужен.

Но вот если упомянутое отношение больше единицы (тогда оно называется коэффициентом воспроизводства) – дело другое. Ведь тогда реактор в каждом эксплуатационном цикле производит больше нового топлива (плутония из урана-238), чем выжигает исходного урана-235 или плутония. С точки же зрения ресурсного обеспечения это означает, что атомная энергетика «не успокоится», пока не сожжёт весь уран – включая и уран-238! При этом «в дело» пойдут не только урановые руды (минералы, содержание урана в которых превышает порог рентабельности их разработки), но и вообще всё, где есть хоть немного урана, вплоть до гранитных пород и морской воды. По образному выражению академика А. И. Лейпунского, такая атомная энергетика способна «жечь камни».

Насколько при этом возрастает её ресурсный потенциал? Попробуем оценить это сами. Если современная атомная энергетика с реакторами на тепловых нейтронах, вовлекающая в производство энергии около 3 % всего технически доступного природного урана, работоспособна по запасам топлива примерно 100 лет, то при вовлечении в режиме воспроизводства 60 % этого урана (что вполне реально) ресурс увеличивается в 20 раз – до двух тысяч лет! Имея такую «энергетическую подстраховку» по времени, можно без спешки и суеты создавать принципиально новые энерготехнологии, развивать энергосбережение и др. Грозный призрак энергетической катастрофы перестанет маячить перед человечеством.

Остаётся назвать тип ядерно-энергетического топливного цикла, позволяющий совершить эту технологическую революцию. Это – реактор на быстрых нейтронах с топливом на основе плутония в совокупности с радиохимическим предприятием по переработке облучённого топлива. Почему это именно так, а не иначе – предмет для другой книги; пока же автор просит читателя поверить ему на слово. В рамках же нашего обсуждения чрезвычайно важно, что реактор на быстрых нейтронах – вполне обыденное техническое устройство, работоспособность которого многократно

проверена не только на десятках опытных установок, но и на коммерческих энергоблоках. Например, реактор на быстрых нейтронах БН-350, запущенный в СССР в 1973 г. на побережье Каспийского моря в г. Шевченко (ныне г. Актау, Казахстан), успешно эксплуатировался в режиме производства электроэнергии и опреснения морской воды в течение почти 20 лет, а запущенный на Белоярской АЭС в 1980 г. БН-600 до сих пор бесперебойно снабжает россиян электроэнергией. Вполне отработанными технологиями являются и переработка облучённого топлива с выделением плутония, и изготовление свежего топлива на его основе.

Так почему же быстрые реакторы-размножители до сих пор не стали основой мировой ядерной энергетики? Ответ прост: пока они дороже. До сих пор ещё относительно дешёв природный уран и, соответственно, коммерчески выгоднее реакторы-конвертеры на тепловых нейтронах. Положение начнёт меняться примерно к 2050 г., когда природного урана уже будет не хватать. Вот если к этому времени структурная перестройка мировой атомной энергетики на базе новой технологической платформы с быстрыми реакторами-размножителями будет если уж и не завершена, то развёрнута – тогда мирового энергетического кризиса удастся избежать. Остаётся надеяться, что человечество до той поры поумнеет и прекратит безоглядно барахтаться в болоте приоритета сиюминутной выгоды. Кстати, Россия до сих пор обладает мировым технологическим приоритетом в области реакторов на быстрых нейтронах. Не упустить бы...

Впрочем, в этой книге для нас существенно вот что. Атомная энергетика, вероятно, приходит к нам всерьёз и надолго – просто потому, что, как мы видели, никакого другого пути предотвращения системного энергетического кризиса реально не просматривается. А это значит, что она на наших глазах будет менять свой общественный статус – из «занятия избранных», технологии достаточно элитарной, она становится достоянием масс, частью обыденной жизни. При этом возникает множество серьёзных вопросов, связанных с сохранением высокого уровня физической и эксплуатационной безопасности на атомных объектах, с подготовкой кадров новой формации, с созданием надёжно функционирующей, оптимальным образом встроенной в экономическую, социальную и административную систему страны структуру отрасли и т. д. Но именно для атомной энергетики в этой связи есть и чрезвычайно специфическая проблема, другим технологиям либо присущая в гораздо меньшей мере, либо не присущая вовсе. Это – проблема обретения полного общественного доверия, чего сейчас у неё, назовем вещи своими именами, нет. А в таких условиях упомянутая смена статуса – очень трудное дело, поскольку в этот процесс будет постоянно «встроено» подспудное внутреннее противодействие.

Откуда оно взялось?

«При растворении радиоактивности в воде она увеличивается в тысячу раз» (журналист).

«Российский гражданин должен получать дозу излучений, равную нулю!» (политик).

«От лучевой болезни, вследствие чернобыльской аварии, погибло 300 000 человек» (телеведущая).

Если Вы, дорогой читатель, думаете, что весь этот бред в полемическом задоре придумал автор, то Вы ошибаетесь. Это – дословные цитаты, взятые наудачу в том смысле, что таких цитат можно без труда привести и три, и тридцать три, и сто тридцать три.

Как реагировать на подобную чепуху? Смеяться, покручивая пальцем у виска? Можно, конечно... Но это будет смех сквозь слёзы. И вот почему.

Наш век – век профессионалов. Безвозвратно ушли в прошлое времена универсальных знатоков и мастеров – специалистов во всех областях человеческих знаний и технологий. Более того, структурирование знаний и технологий продолжается и далее, утверждая единственно возможный в наше время (во всяком случае, в естественнонаучной и инженерной среде) принцип – доверять профессионалам. Иначе – мрак, беспросветность. Мало того, что начинаются поиски общих путей развития и способов решения конкретных проблем на заведомо ложных направлениях. Печальный опыт нашей недавней истории свидетельствует вполне однозначно: непонимание этой непреложной аксиомы современности делает общество беззащитным перед возможностью трагического перехода от недоверия специалистам к их травле, а заодно и травле целых направлений науки и техники. Примечательно, что такая травля очень часто организуется и поддерживается (иногда достаточно массированно и умело) политическими кругами, ничего в этом деле не преследующими, кроме собственных сиюминутных интересов. Много ли думали об интересах страны и народа некоторые философы и партийные деятели, организовав полвека назад оголтелое преследование «буржуазной науки – кибернетики» и «прислужницы империализма – генетики»? Да плевать им было на кибернетику, генетику и науку вообще – речь шла лишь о сохранении собственной шкуры и, по возможности, собственных привилегий.

Результат известен – отечественная генетика после этой «охоты на ведьм» с большим трудом пришла в себя, а отечественная кибернетика, по большому счету, в себя так и не пришла. Кому стало лучше? А началось всё с недоверия к специалистам, с уверенности, что партийный деятель или популярный писатель лучше разбирается в кибернетике, чем кибернетик и в генетике – чем генетик.

У Вас, читатель, не возникает здесь аналогий с совсем недавней свирепой информационной войной против атомной энергетики, свидетелями которой были мы все и которую «антиатомные» деятели ещё отнюдь не считают проигранной?

Конечно, говоря о доверии к специалистам, необходимо сделать важное замечание. Именно: из сказанного вовсе не следует, что специалисты безгрешны, как ангелы, и ошибаться не могут. Могут – хотя вероятность того, что они ошибутся все разом, исчезающе мала. Однако гораздо худший выбор – доверять неспециалистам, и хуже всего – в ситуации, когда специалисты дружно высказывают противоположное мнение.

Нельзя сказать, чтобы общество этого вообще не понимало. Мы лечим зубы у стоматолога, и наверняка плотно захлопнем рот, если бормашина окажется в руках даже сверхпопулярного журналиста. Мы доверяем опытному водителю и, скорее всего, как ошпаренные выскочим из автобуса, если узнаем, что по сложной дороге его будет вести даже сверхобаятельная телеведущая. Мы шьем костюмы у опытного портного и в страшном сне не рискнем натянуть на себя наряд, сработанный даже суперрейтинговым политиком. И т. д.

Атомная техника и энергетика, увы, исключение. При их обсуждении журналисту, телеведущей и политику слишком часто доверяют больше, чем профессионалу-атомщику. И надо помнить, что журналисты, телеведущие и политики всемерно избегают, без крайней необходимости, публично высказывать точку зрения по некоторому вопросу, отличную от мнения большинства населения. Следовательно, озвучивая приведённые выше дурацкие антиатомные пассажи, они исходят из того, что население если уж и не категорически против атомной энергетике (хотя ещё несколько лет назад это было, к сожалению, недалеко от истины), то часто напугано ею вплоть до забвения логических аргументов, этот страх обобщающих.

К сожалению, приходится констатировать, что так обстоит дело далеко не только в среде рядовых обывателей. Вот высказывание бывшего германского «экологического министра» Ю. Триттина. Рассматривая различные энерготехнологии в контексте выброса в атмосферу парниковых газов, он заявил: «атомная энергетика не производит парниковых газов (совершенно правильно – А. К.), но она опасна сама по себе» (! – А. К.). Когда слышишь такое, поневоле вспоминается дискуссия между гарпунщиком Недом Лендом и слугой профессора Аронакса Конселем из романа Жюль Верна «20 000 лье под водой». На вопрос Конселя Ленду – откуда он взял, что киты живут по тысяче лет? – тот спокойно ответил: потому, что это известно всем. Принципиальной разницы в уровне аргументации министра Триттина и гарпунщика Ленда автор в данном случае не усматривает.

Случайно ли, что именно атомную технику и энергетика в их восприятии общественным мнением постигла столь злая судьба?

Конечно же, нет. В вопросах такого масштаба случайностей не бывает, и сходство «идеологических платформ» для нападков на атомную энерге-

тику в различных странах мира лишь подчеркивает это. Налицо как минимум три важнейших предпосылки негативного отношения к ней значительной части общества и, как следствие, нарушения принципа доверия к специалистам.

Первая из них – отражение своеобразной истории развития мировой атомной энергетики. Она возникла и развивалась на базе уже сформировавшихся военно-ядерных комплексов «старожилов» мирового ядерного клуба. В этом смысле излюбленное утверждение «зеленых» разного рода «в основе реактора лежит бомба», чудовищно безграмотное с физико-технической точки зрения, вполне, как это ни парадоксально, справедливо с точки зрения исторической.

Последствия такой непростой «биографии», в контексте отношения общественности к атомной энергетике, очевидны. Она оказывается, в представлении очень многих людей, освещённой заревом ядерного оружия, обеспечившего человечеству, в первый раз за всю его историю, возможность самоуничтожения. В данном случае совершенно неважно, что атомная энергетика как таковая к ядерному оружию отношения не имеет. Как известно, серы боятся не потому, что она опасна сама по себе, а потому что ею чёрт пахнет...

Вторая предпосылка, также отнюдь не добавляющая популярности атомной энергетике, в некотором смысле является следствием первой. Именно, она до недавних пор была окутана столь же непроницаемой завесой секретности, как и ее прародитель – военно-ядерный комплекс. При этом секретилось всё подряд – что нужно и, к сожалению, что и не нужно.

С точки зрения современного открытого информационного общества в этом уже хорошего мало. Однако ситуация многократно усугубилась тем, что эта завеса тайн прорывалась лишь тогда, когда ядерные технологии являли миру негативные последствия неумелого обращения с ними вследствие человеческого незнания, а чаще – безграмотности и халатности. Урал и Чернобыль, Уиндскейл и Гояния... Все эти аварии и катастрофы возникали «вдруг», как бы из ничего, и потому воспринимались обществом особенно остро и тяжело.

И, наконец, третья (возможно, самая значимая) предпосылка, кардинально ухудшающая «общественное лицо» ядерных технологий. Она сконцентрирована в слове, ставшим не только одним из главных «ужасников» современной эпохи, но и, вероятно, чемпионом по неадекватности массового восприятия.

Это слово – радиация. А главная причина буквально патологического страха перед ней на самых различных этажах общества (часто превращающегося в самую настоящую болезнь психики, называемую радиофобией) звучит примерно так: «она не имеет ни вкуса, ни цвета, ни запаха...». Истинная правда, но, согласитесь, этого как-то маловато для обос-

нования упомянутого выше отношения к радиации. Поэтому сюда добавляется обычно еще «... и от нее нельзя ничем защититься» (что уже неправда). Часто готовый образ «ужастика» окончательно оформляется высказыванием типа: «И все это атомщики придумали» – должен же быть кто-то виноват в таком кошмаре. Но вот это – уже злонамеренная ложь.

Именно ионизирующая радиация – её физические основы, биологическое действие, степень реальной опасности, сопутствующие социальные и общественные аспекты – является главным предметом этой книги. Но об этом дальше. Сейчас же лишь констатируем печальную истину: совместное воздействие трёх указанных предпосылок привело к тяжелейшему для атомной энергетики итогу – неадекватности оценки обществом относительной опасности атомных технологий в сравнении с иными технологиями.

Что здесь имеется в виду?

Следует четко понимать, что абсолютно безопасных технологий не существует вообще. В этом смысле предъявление такого требования любой технологии (что, кстати, всегда с головой выдает дилетанта) вполне адекватно требованию полного отказа от нее. С учетом же технологического характера современного общества в конце подобного «пути в безопасный рай» явственно прослеживаются не райские кущи, а пещеры, шкуры и каменные топоры. Да и то сказать: топор-то тоже ведь технология, причем опасная – сорвавшись с ручки, он может покалечить, а то и убить кого-нибудь.

Увы, современные технологии намного опаснее. Одна лишь катастрофа на химическом заводе в Бхопале (Индия) за считанные минуты унесла более 2500 человеческих жизней, а «на совести» химических технологий еще и Людвигсхафен, и Севезо, и Минамата, и многое другое. Только при взрыве газопровода в Башкирии погибло 800 людей, а кто считает все жертвы газовых пожаров, взрывов и отравлений? Только лишь в России в автокатастрофах и под колесами автомобилей в год погибает около 40 000 людей, а в мире? А вполне устоявшаяся «цена» в угольной отрасли – один погибший шахтер на каждый миллион тонн угля?

Этот список можно и продолжить, но не в этом суть. Автор отнюдь не призывает закрыть химические заводы и угольные шахты, а автомобили утопить в море (тем более, что он сам автолюбитель). Смысл сказанного совсем в другом – приведенный выше скорбный список есть неминуемая на некотором этапе развития общества плата за развитие тех или иных технологий. Целесообразность же такого развития в каждом конкретном случае определяется многофакторным анализом в четырехугольнике «выигрыш – стоимость – альтернатива – риск». Нас в данном случае и интересует риск как количественная мера технологической опасности. Подробнее мы рассмотрим этот вопрос несколько позже, а сейчас продолжим обсуждение в рамках несколько лирического понятия «опасности» – ли-

рического в том смысле, что оно не подразумевает количественной интерпретации. Вообще-то это, конечно, нехорошо – вспомним Канта: «В любом знании столько истины, сколько математики»...

Но вот что важно. Конечно, упомянутым авариям и катастрофам общество отнюдь не радуется, но оценивает их последствия и общую степень потенциальной угрозы от рассматриваемых технологий, в общем, адекватно – не преуменьшая их, но и не преувеличивая сверх некоторых разумных рамок. И уж, конечно, ставить вопрос об ограничении развития технологии (тем более – её запрета) лишь на основе уже известных нам субъективных мнений типа «она опасна сама по себе» никому в голову всерьёз не приходит.

А вот с атомной энергетикой...

Оценки погибших, чел.



Рис. 3. Реальные и предполагаемые оценки радиационных рисков (студенты-естественники)

На рис. 3 показаны итоги опроса, проведенного среди студентов естественных факультетов (!) московских вузов (2001 г.). Был задан единственный вопрос – о числе погибших в отдалённый период после радиационного воздействия в связи с:

- радиационными авариями на Южном Урале (1957 и 1967 гг.);
- чернобыльской аварией (1986 г.);

- 50-летней работой предприятий Минатома;
- атомной бомбардировкой Хиросимы (1945 г.).

Рисунок построен в двойном логарифмическом масштабе – и по оси x (реальные числа умерших, квадраты), и по оси y (оценённые опрашиваемыми числа, кружки) указаны не сами числа, а их десятичные логарифмы. Так делается, когда сравниваемые величины отличаются не в разы, а на порядки. В нашем случае так оно и есть – московские студенты-естественники зависили реальные числа погибших в 1000 – 10 000 раз (!).

Ну ладно – простим студентам, может быть, ещё поумнеют. Но вот что делать со взрослыми... На рис. 4 приведены результаты опроса 560 руководителей и ведущих риск-менеджеров областных и краевых комитетов России по охране природы и здравоохранению (серые фрагменты гистограммы) в сравнении с оценкой учёных Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН, основанной на статистических данных (чёрные фрагменты). Предметом опроса было количественное ранжирование нескольких важнейших современных технологий по степени опасности (чем выше усреднённое ранговое место, тем технология «опаснее»).

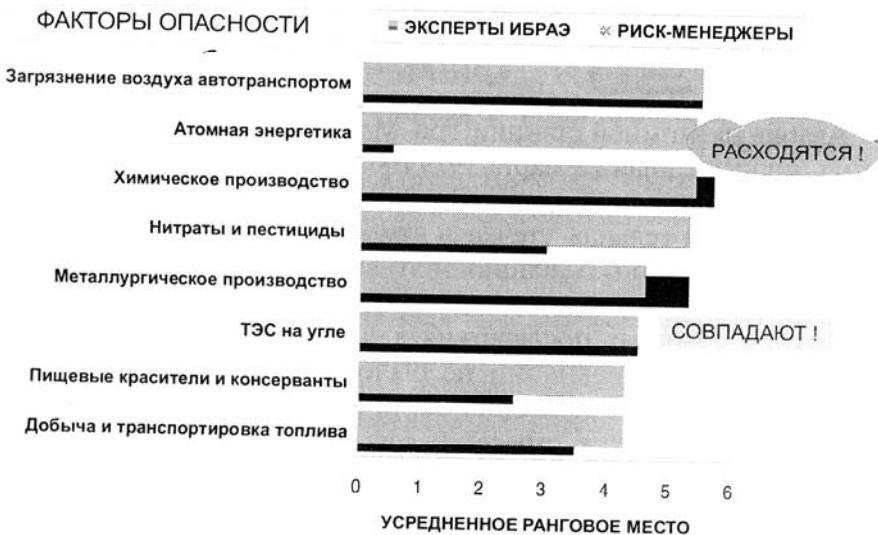


Рис. 4. Реальные и предполагаемые оценки промышленных рисков (риск-менеджеры областных и краевых комитетов РФ по охране природы и здравоохранению)

Результаты и здесь впечатляют. При вполне адекватной оценке «местными экологическими начальниками» масштабов технологических рисков

снова налицо одно-единственное исключение! Можно даже не спрашивать – какое... Конечно же, атомная энергетика, опасность которой преувеличена на порядок величины. А ведь эти люди, в отличие от студентов, принимают решения и формулируют региональную техническую и экологическую политику! Кого они слушали (и слушают), кто формировал (и формирует) их воззрения?

Но автор хочет не переводить диалог с противниками атомной энергетики на рельсы «сам дурак», а добиваться для неё в общественном восприятии равноправия с иными современными технологиями. Не больше – но и не меньше. И воспрепятствовать надуванию в её лице страшной опасности из ничего, коли уж не получается сотворить её из фактов.

При отсутствии доказательств априорная вера в такую опасность называется просто и ёмко – предрассудок. А психологам хорошо известно: предрассудок сам по себе иррационален, но в его основе обычно лежит рациональная подоплека, дополненная порочной логикой (и за счёт этого искажённая). Осознав эту порочность, человек обычно избавляется и от самого предрассудка – о чём автор и мечтает.

Здесь предмет разговора, однако, меняется. От общих слов, аналогий, исторических экскурсов мы переходим к обсуждению конкретного естественнонаучного вопроса. Причём вопроса сложного – он лежит на стыке физики, биологии, экологии, медицины и, к тому же, обладает огромной социальной, да и политической, значимостью.

Вот тут самое время вернуться к вопросу о доверии профессионалам. Нет, автор вовсе не собирается отказываться от только что написанного им – такое доверие действительно есть единственно возможный принцип существования современного общества. И всё же...

Попробуйте выучить два стихотворения (и заодно оценить их художественные достоинства). Одно – «Мело, мело по всей земле...». Завораживающая прелесть пастернаковских строк, между прочим, делает нас абсолютно невосприимчивыми к высказываниям и мнениям, что это – плохие стихи и плохая поэзия, пусть даже некоторые критики и говорили такое на самом деле. Правда, хорошо известно, что они руководствовались соображениями, весьма далёкими от собственно литературы. Но у подавляющего большинства людей, и это главное, есть на этот счёт своё мнение – что вовсе не лишает специалистов (филологов и литературоведов) права на профессиональный анализ творчества нашего великого соотечественника. А что тонкости этого анализа нам, простым читателям, непонятны – ну что ж, на то они и специалисты. Доверимся им.

А второе – стихотворение тоже большого, настоящего поэта, но иностранного, написанное на непонятном для читателя языке. Тут уже с заучиванием возникнут большие проблемы – человеку трудно запоминать бессмысленный для него текст. Что же до оценки достоинств, то здесь вопрос с

очевидностью снимается сам собой. Здесь остаётся только полностью доверять критикам и их оценкам. Но критики, как мы уже знаем, тоже разные бывают. В том числе и такие, которые заинтересованы в формировании негативного отношения к этому поэту (искренне исходя из собственных воззрений или по другим причинам – в данном случае не так важно). И они имеют неплохие шансы, потому что на их стороне сыграет интуитивное психологическое недоверие человека к чему-то совершенно непонятному. А уж если таких критиков (опять не обсуждая причин, почему) много...

Совершенно так же обстоит дело с ядерными технологиями. Трудно призывать людей верить специалистам в делах, где подавляющему большинству непонятны самые азы, а критиков (да еще такой степени тенденциозности и оголтелости, как организаторы антиатомных кампаний) более чем достаточно. Мудрено ли, что благодаря усилиям некоторых «экологов» общественность в своем отношении к атомной технике и энергетике нередко оказывалась (и оказывается) в роли старухи – святой простоты, подкладывающей сушняк в костер Яна Гуса?

Кстати говоря, понятие «эколог» не случайно взято здесь в кавычки. Экология, сама по себе, есть наука (чрезвычайно интересная и совершенно необходимая) о взаимосвязях во внешней среде. Между прочим, говорить, как это делается сплошь и рядом, о «плохой экологии» ничуть не более разумно, чем о «плохой физике», «плохой математике» и т. д. И эта наука не имеет ничего общего с шумной и агрессивной деятельностью «упёртых» и обычно технически безграмотных противников современных технологий, адептов «зелёной пустыни» – часто, к тому же, откровенно работающих «на заказ».

Как же быть? Как добиться столь нужного «общественного примирения» широких масс населения с атомной энергетикой – с учётом того, что сейчас, поглядим правде в глаза, до этого ещё очень далеко?

Простого ответа на этот вопрос не существует. Нужно одновременное выполнение нескольких условий.

Первое. По-настоящему масштабное развитие ядерного топливного цикла атомной энергетике, о чём речь шла раньше, должно системно (с использованием скоординированных политических, технологических и прочих мер) исключить любую возможность его переключения на создание ядерного оружия. Гарантия его нераспространения – это непреложная аксиома. Мир, в котором не только атомной энергетикой, но и атомной бомбой будут владеть десятки стран, вряд ли доживёт до Большого Энергетического Выбора. Применительно же к обсуждаемому нами вопросу (формирование доверия широких масс населения к атомной энергетике) надёжное обеспечение нераспространения уничтожает одно из наиболее значимых общественных заблуждений – ошибочную уверенность в неразрывной генетической связи мирного атома с атомом военным.

Второе. Нельзя забывать важнейший урок Чернобыля – доверие людей к атомной энергетике можно сразу потерять, но вот столь же быстро восстановить его нельзя. Вспомним – в течение двадцати с лишним лет после Чернобыля атомная энергетика во всём мире (а в России – в частности и в особенности) во многом именно из-за этого буквально боролась за выживание – какое уж там развитие...

Эти горькие годы показали с полной однозначностью: второй подобной аварии ей уже не выдержать, люди безвозвратно отвернутся от неё, невзирая ни на какие глобальные энергетические угрозы. Столь же очевиден и вывод: безопасность атомной энергетике должна быть технически и организационно обеспечена «с запасом» – объективно, может быть, даже несколько излишним. По-другому сейчас не получится – по крайней мере, до тех пор, пока общество не приобретёт «адекватный запас» уверенности, что ядерные технологии не являются источником аномально высоких угроз.

Отсюда – третье важнейшее условие.

Обеспечение безопасности технологии – любой, и атомной энергетике – в том числе, означает (об этом уже говорилось): на её объектах и установках, созданных профессионалами-учёными и профессионалами-конструкторами, должны работать профессионалы-эксплуатационщики по правилам и нормам, разработанным и контролируемым профессионалами-управленцами. Выпадение из этой системы хотя бы одного звена – прямая угроза безопасности, и вся статистика ядерных и радиационных аварий свидетельствует об этом с полной непреложностью. Вечный тому пример – тот же Чернобыль, когда главной причиной тяжелейшей за всю историю ядерной аварии стало совершенно немыслимое для профессионалов чудовищное сочетание преступно безответственных, вопиюще некавалифицированных поступков сотрудников дежурной смены АЭС, оказавшихся на своих постах вследствие ничуть не лучших действий организационных и кадровых служб.

Так вот, если атомная энергетика претендует на роль лидирующей мировой энерготехнологии (на что, как мы видели, у неё есть все основания), подготовленных профессионалов-ядерщиков во всех трёх упомянутых категориях должно быть много – кого угодно к созданию реактора и к его пульта допускать нельзя. В «традиционных» ядерных государствах, где долгие годы развития атомной энергетике создали определённый уровень культуры безопасности, существуют всё же методы и традиции подготовки «ядерных кадров», а также реализующие их институты. Хотя и в этих странах проблема сохранения и умножения ядерных знаний стоит весьма остро – сказалось двадцатилетнее «блуждание в антиатомных лабиринтах». Но вот аналогичные механизмы в странах, всего этого не имеющих, но претендующих, тем не менее, на развитие национальной атомной энергетике, попросту отсутствуют. А ведь последствия крупной ядерной ава-

рии интернациональны – об этом уже говорилось. Действует принцип: «катастрофа на одной АЭС есть катастрофа для всех АЭС».

Но формирование когорты профессионалов – лишь одна ипостась ядерного образования, условно говоря, высшая его ступень. Есть и низшая, по своей значимости ничуть не меньшая и требующая для своего развития не меньше усилий.

Первая её задача – начальная профессиональная ориентация. Хорошо известно: чем более активно и умело отрасль ведет агитационную и пропагандистскую работу среди молодёжи, в школах и колледжах, тем меньше у неё проблем с формированием своего кадрового резерва. Потому что назначение любого образования – заинтересовать и научить. А в этом случае «на профессионала» учатся уже заинтересованные люди, естественно, с куда как лучшими результатами. И, что очень важно, даже если усвоившая ядерные азы молодёжь и изберёт для себя по жизни иную профессию, значимость ядерных технологий для настоящего и будущего она усвоит и ряды противников атомной энергетики вряд ли пополнит.

Это, условно говоря, направление работы «вглубь». Но не менее важна работа «вширь» – распространение начальных ядерных знаний среди населения в целом. Именно ей принадлежит главная роль в формировании разумных, адекватных представлений об атомной энергетике среди людей, для которых, собственно говоря, она и существует.

При этом речь не идёт и не может идти о предметном обучении как таковом. Ядерной физике, реакторной технике, радиационной экологии нельзя научиться «походя», это – тяжёлый многолетний труд. Главное в такой работе – опять-таки дать людям основы, азы, чтобы обеспечить столь нужный сейчас оптимум в отношении общества к профессионалам (об этом мы уже говорили). Чтобы человек, разбираясь в основном, в существе дела, доверял профессионалам в анализе и реализации его конкретных аспектов – вспомните пример со стихотворением.

Применительно же к радиационным аспектам ядерных технологий надо помочь людям преодолеть не только неосознанный страх перед «ужасной радиацией», но и две главные его причины. Сомнения одних, что «простой человек» сможет что-либо понять в этой «кухне сатаны», и убеждённость других в том, что они, лишь доверяя глупостям вроде процитированных выше, уже понимают в этом деле всё или почти всё.

А для этого надо представить людям ядерную и радиационную физику, радиобиологию и радиоэкологию такими, как они есть – в основе своей понятными большинству и описываемыми вполне предсказуемые явления. И надо стремиться не заменить массовый панический страх перед радиацией столь же массовой дурацкой бравадой, легкомыслием и шапкозакидательством – хватит с нас одного Чернобыля – а добиться золотой середины, называемой адекватностью. Которая, в самом кратком изложе-

нии, такова: атомная энергия и радиационные технологии в добрых, сильных и умелых руках до невиданных еще пределов увеличивают созидательные возможности Человека, но способны принести неисчислимые беды, оказавшись в руках неуча, растяпы или злодея.

И это еще не все. Надо учитывать, что обязать людей учиться этим вещам нельзя – следовательно, их надо ещё и заинтересовать. А для этого такую учёбу надо сделать по-человечески интересной, не поступаясь при этом, однако, научной и технической достоверностью.

Однако надо быть готовым и к тому, что часть людей откажется от подобного «ядерного ликбеза». Что же, это их право. Но с этими людьми надо уметь вести разговор в иной плоскости. Их надо попытаться убедить в том, что такая позиция в наше время объективно лишает человека права голоса при обсуждении научно-технических проблем. Пусть это звучит жёстко, но это так. И не потому, что кто-то кого-то хочет унижить, обидеть и т. п. – в чём так любят обвинять атомщиков «зелёные» всех мастей и оттенков. А потому, что некомпетентного человека очень просто превратить в марионетку, послушное орудие в руках сил, менее всего желающих людям и стране добра. Причем верным признаком их деятельности является (как часто и происходит с атомной наукой и техникой) оголтелая кампания дискредитации профессионалов и специалистов.

Всем этим и руководствовался автор при работе над лежащей перед Вами, дорогой читатель, книгой. В ней он, разумеется, не стремился охватить все вопросы, связанные с атомной техникой и энергетикой. Цель автора была иной – снять налёт сатанизма с их аспектов, связанных с радиацией и ионизирующими излучениями. Он исходил из того, что это позволит Вам, читатель, и к атомной энергетике в целом отнестись с большим пониманием и доверием.

Книга не случайно построена по принципу «вопрос – ответ», хотя такой подход в определённой мере и нарушает логическую целостность материала. Ведь автор вполне допускает, что какие-то вещи могут, при первом знакомстве, оказаться для «среднего» читателя непонятными. Что же, ничего страшного. Читайте дальше, находя ответы на другие интересующие Вас вопросы. К непонятным же можно вернуться позже – может быть, что и не сразу. А кроме того, такая структура книги удобна, если надо быстро навести справку по какому-то «радиационному вопросу», который вдруг оказался на гребне общественного интереса. В таких случаях именно оперативность часто является важнейшим фактором, определяющим направление формирования и развития общественного мнения вокруг этого вопроса – в общем, даже безотносительно к его объективной значимости. Кстати говоря, именно недостаточная оперативность является ахиллесовой пятой деятельности официальных инстанций по связям с общественностью, часто оставляющих людей наедине с неплохо организованными «информационными вбросами» антиядерных слухов и сплетен.

И если Вы, прочитав эту книгу, при знакомстве с очередным «около-ядерным бредом» или «свеженькой» антиядерной сплетней вместо прежнего чувства испуга в смеси с неприязнью к атомщикам недоумённо воскликнете: «Да что за чепуху он (она) несёт?» – автор уже считает свою главную цель достигнутой. Но если книга станет для Вас лишь первым шагом в интереснейший мир атомной энергетики, ядерных технологий, радиационной физики и экологии – тогда ему нечего больше и желать.

2. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА: НЕОБХОДИМЫЙ МИНИМУМ

Что такое нуклид, радионуклид, изотоп?

Нуклидом называется атомное ядро, характеризующееся, во-первых, некоторым нуклонным составом (количеством протонов и нейтронов) и, во-вторых, определенным энергетическим состоянием. Нуклиды, имеющие одинаковый нуклонный состав, но разные энергетические состояния, называются ядерными изомерами. Нуклиды, сохраняющие нуклонный состав и энергетическое состояние в течение неограниченно долгого времени, называются стабильными; в противном случае речь идет о радиоактивных нуклидах, или о радионуклидах.

Для краткости написания все нуклиды обозначаются в соответствии с общепринятой символикой. С левой стороны от химического знака нуклида сверху ставится суммарное число нуклонов (протонов и нейтронов) в его ядре (A). С округлением до целого числа A совпадает с массой ядра в атомных единицах, поэтому оно часто и называется массой ядра, или массовым числом ядра. Снизу ставится заряд ядра нуклида Z в единицах элементарного заряда, соответствующий числу содержащихся в нем одних лишь протонов. На практике это число в символьных обозначениях часто опускается, так как заряд ядра однозначно определяется его положением в таблице Менделеева и, следовательно, выбранным для этого ядра символом. Так, например, символ N (азот, седьмой по счету элемент в таблице Менделеева) соответствует числу $Z = 7$ и никакому иному. Число нейтронов (N) в символьном обозначении нуклида обычно отсутствует, так как $N = A - Z$.

Приведем для примера символьное обозначение урана-235 – ^{235}U .

Радионуклиды часто называют изотопами. Это неверно: таким понятием определяется совокупность нуклидов (как стабильных, так и радиоактивных), обладающих одинаковым числом протонов (и вследствие этого тождественных химически, поскольку эти нуклиды имеют, естественно, одинаковый атомный номер, принадлежащий одному и тому же элементу из таблицы Менделеева), однако разным количеством нейтронов. Например, водород имеет три изотопа, все ядра которых имеют по одному протону, но обычный водород (^1H , протий) не имеет нейтронов вовсе, водород-2 (^2H ,

дейтерий) имеет один нейтрон и водород-3 (${}^3\text{H}$, тритий) – два нейтрона. Протий и дейтерий стабильны, тритий радиоактивен с периодом полураспада 12,4 года. Инертный газ ксенон имеет тридцать шесть изотопов, из которых девять стабильны и двадцать семь – радиоактивны. Элементы с атомными номерами более 83 (начиная с полония) не имеют стабильных изотопов. Понятие изотопа отдельно от элемента лишено смысла.

Помимо ядер с одинаковым зарядом (изотопов) можно выделить также группы нуклидов, имеющих одинаковое массовое число (изобары) и одинаковое число нейтронов (изотоны).

Несколько примеров:

- изотопы (водорода; $Z = 1$): ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$;
- изобары ($A = 12$): ${}^{12}\text{N}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{12}\text{Be}$;
- изотоны ($N = 6$): ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$.

Что такое радиоактивность и радиация?

Радиоактивность есть свойство некоторых нуклидов – радионуклидов – изменять со временем свой нуклонный состав и/или энергетическое состояние с образованием новых нуклидов (стабильных или опять-таки радиоактивных) и испусканием ионизирующих излучений с большей или меньшей проникающей способностью. Эти излучения и называются в обиходе радиацией. Следует отметить, что источником радиации, помимо распада радионуклидов, являются и иные процессы (некоторые из них рассматриваются далее).

Что такое активность?

Активность радионуклидного источника или препарата есть количество радиоактивных превращений в нем в единицу времени. Единицей активности в системе СИ является беккерель (Бк) – активность источника, в котором происходит (в среднем, в статистическом смысле) одно радиоактивное превращение за 1 с. 1 Бк – это очень малая активность (например, суммарная равновесная активность тела взрослого человека составляет около 7500 Бк), поэтому в практических радиационных измерениях часто используют килобеккерель (1 кБк = 10^3 Бк), мегабеккерель (1 МБк = 10^6 Бк), гигабеккерель (1 ГБк = 10^9 Бк).

До сих пор часто (в том числе и в этой книге) используется внесистемная единица активности – кюри (Ки). 1 Ки соответствует активности 1 г радия-226 в равновесии с дочерними продуктами распада. Название и смысловое содержание этой единицы – отголоски истории ядерной физики, яркой страницей которой было выделение Марией и Пьером Кюри радия из урановой руды и исследование его свойств. 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк (37 ГБк) – весьма большая (в житейских масштабах) активность, поэтому на практике часто используют милликюри (1 мКи = 10^{-3} Ки), микрокюри (1 мкКи = 10^{-6} Ки), нанокюри (1 нКи = 10^{-9} Ки).

Активность изолированного радионуклида со временем может, конечно, лишь снижаться вследствие безвозвратного уменьшения количества

радиоактивных ядер. Однако если этот радионуклид сам является дочерним продуктом распада другого (материнского) радионуклида, также присутствующего в препарате или веществе, его активность, в зависимости от периодов полураспада этих радионуклидов и временной истории смеси, некоторое время может и возрастать, а также оставаться неизменной (так называемые равновесные активности, при которых скорость образования новых ядер радионуклида равняется скорости их распада).

Именно состояние радиационного равновесия характерно для важнейшей группы радионуклидов – природных актинидов (торий-232, уран-235, уран-238). Ещё супруги Кюри обнаружили, что активность урановых руд значительно превосходит активность выделенного из них химически чистого урана. Причина этого заключается в том, что в рудах, помимо урана, содержатся менее долгоживущие продукты его распада. Они образуют так называемые радиоактивные цепочки, или ряды, и находятся в состоянии радиационного равновесия (сколько ядер любого члена ряда в единицу времени образуется, столько же и распадается). При этом активность любого члена ряда равна активности исходного материала (урана). Поэтому удельная активность урановой руды возрастает, в сравнении с чистым ураном, во столько раз, сколько радиоактивных ядер в рассматриваемом ряду – 19 у урана-238 и 16 – у урана-235. Закачиваются оба ряда стабильными изотопами свинца. Так же обстоит дело для тория-232 (12 членов ряда). Надо, однако, иметь в виду, что для установления радиационного равновесия необходимо время, в несколько раз превышающее период полураспада наиболее долгоживущего члена ряда (исключая ядро-родоначальник). В природе такое время у тория и изотопов урана было – возраст Земли составляет, по современным представлениям, свыше десяти миллиардов лет.

Величины активностей, характерных для некоторых естественных и техногенных объектов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Активности некоторых естественных и техногенных объектов

Объект	Активность, Бк
Воздух на открытой местности	15 (на 1 м ³)
Воздух в помещениях	50 – 1000 (на 1 м ³)
Тело человека (70 кг)	До 7500
Питьевая вода	0,5 – 5 (на 1 л)
Вода из минеральных источников (сразу после забора)	До 40 000 (на 1 л)
Продукты питания	40 (на 1 кг)
Строительный фосфогипс	900 (на 1 кг)
Выброс при аварии на ЧАЭС	$2 \cdot 10^{18}$
Радиоактивные вещества и материалы на крупном радиохимическом заводе	$10^{19} - 10^{20}$
Общая активность Мирового океана	10^{23}

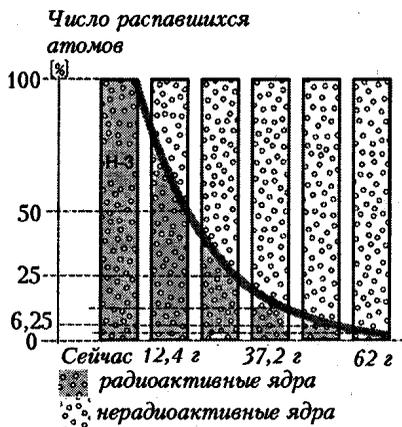


Рис. 5. Распад трития (^3H)

Может ли темп распада радионуклида изменяться под действием неядерных процессов (нагрев, охлаждение, воздействие химических реагентов)?

Нет, не может. Все эти процессы могут привести лишь к перераспределению активности между агрегатными состояниями радиоактивного вещества и/или химическими соединениями, ими образуемыми, — к примеру, переводу части радиоактивного материала из твердой фазы в жидкую (газообразную) или наоборот. Конечно, такая операция, как, например, разбавление радиоактивного раствора нерадиоактивным, ведет к изменению удельной (на единицу массы или объема) активности материала, в данном случае — к ее уменьшению. Однако изменение общей активности этого материала происходит только вследствие радиоактивного распада либо протекания иных (инициируемых извне) ядерных реакций.

Почему ядерные излучения (радиацию) называют ионизирующими? Каков смысл этого понятия?

Известно, что атомы, «кирпичики» всей материи (биологической в том числе), состоят из положительно заряженного ядра (этот заряд, записанный в единицах элементарного заряда, совпадает с числом протонов в ядре и определяет атомный номер данного элемента в таблице Менделеева) и отрицательно заряженных электронов, расположенных на нескольких электронных оболочках. При нормальных условиях атомы в целом нейтральны, поскольку число электронов в каждом из них в точности соответствует числу протонов в ядре. Однако воздействие ядерного излучения приводит к «поломке» некоторых атомов и нарушению этого соответствия. Во-первых, электроны могут быть выбиты из электронной оболоч-

Что такое период полураспада?

Период полураспада характеризует степень нестабильности радионуклида. Он равен (в статистическом смысле) времени, за которое распадается половина начального количества ядер изолированного радионуклида (затем за такой же отрезок времени распадается половина оставшейся части и т. д.). Такой закон называется экспоненциальным. Рис. 5 иллюстрирует этот закон для трития (период полураспада 12,4 года). Известные ныне радионуклиды имеют периоды полураспада от долей миллисекунд до сотен и тысяч миллиардов лет.

ки ядра, при этом образуется положительный ион (положительный заряд ядра превышает сумму отрицательных зарядов электронов). Во-вторых, выбитый электрон может на короткое время «прилипнуть» к другому (нейтральному) атому, при этом образуется отрицательный ион (обратная ситуация). Эти процессы и характеризуют ионизацию.

Поскольку характер заполнения электронных оболочек атомов определяет их химические свойства, радиация не только «ломает» описанным образом атомы как таковые, но и приводит к нарушению молекулярных структур вещества, подвергающегося облучению (в том числе и биологических тканей). Это и обуславливает негативное биологическое воздействие ядерных излучений.

Все ли излучения являются ионизирующими? Какие именно являются ионизирующими?

Нет, не все, а лишь такие, энергия которых (на одну частицу потока излучения) способна вызывать ионизацию. Например, электромагнитное излучение в диапазоне радиоволн или видимого света ионизирующим не является. Иное дело ядерные излучения, характеризующиеся значительной энергией каждой из отдельных частиц.

Для рассмотрения процессов и явлений, связанных с атомной техникой и энергетикой, а также радиационной безопасностью и радиозооэкологией, существенны следующие типы ядерных ионизирующих излучений.

1. Альфа (α)-излучение – испускание ядерных частиц, каждая из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов (ядро гелия). Оно возникает, в частности, при распаде атомных ядер тяжелых висмута (например, урана, тория, радия, плутония), а также во многих ядерных реакциях. Характерная для радиоактивного распада скорость α -частиц – около 10^7 м/с, ионизирующая способность очень велика.

2. Бета (β)-излучение – испускание электронов и позитронов, движущихся с очень высокими (околосветовыми) скоростями. Оно возникает в результате радиоактивного распада ядер. Ионизирующая способность существенно ниже, чем у α -излучения.

3. Рентгеновское и гамма (γ)-излучение – электромагнитное излучение очень малой длины волны и, соответственно, большой энергии каждого кванта излучения. Источники – радиоактивный распад, ядерные реакции и электродинамические процессы. Ионизирующая способность в большинстве случаев еще ниже, чем у β -излучения.

4. Поток нейтронов – нейтральных нуклонов, входящих в состав всех ядер, кроме лёгкого изотопа водорода. Он возникает в основном в результате ядерных реакций, а также при распаде некоторых радионуклидов. Ионизирующая способность (в среднем) несколько ниже, чем у β -излучения.

5. Поток протонов – положительно заряженных нуклонов (ядер легкого изотопа водорода), также входящих в состав всех атомных ядер. Он возникает в результате ядерных реакций и приходящего на Землю из космического пространства космического излучения. Ионизирующая способность – промежуточная между α - и β -частицами при одинаковой энергии.

Все перечисленные ядерные частицы, кроме нейтрона, стабильны. В связанных состояниях (находясь в составе атомных ядер) стабилен и нейтрон, однако «бездомный» (свободный) нейтрон распадается с периодом полураспада 10,24 мин и образованием протона, электрона и антинейтрино.

Что такое проникающая способность излучения?

Проникающая способность излучения определяет состав и толщину эффективно поглощающего его материала.

Альфа-излучение – наименее проникающее. Оно эффективно поглощается слоем воздуха толщиной несколько сантиметров, слоем воды толщиной около 0,1 мм или, например, листом бумаги. Бета-излучение обладает существенно большей проникающей способностью; чтобы его задержать, нужен, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров, а пробег β -частиц в биологической ткани достигает нескольких сантиметров. Для γ -излучения с энергией свыше 100 кэВ все эти преграды почти прозрачны. Чтобы его задержать, нужен очень толстый (десятки сантиметров и даже метры) слой вещества, обладающего при этом как можно большим атомным номером (например, свинца). Нейтронное излучение, напротив, лучше всего задерживается легкими средами (вода, парафин); при этом эффективность поглощения резко увеличивается при наличии даже небольших количеств некоторых специальных веществ (например, соединений бора).

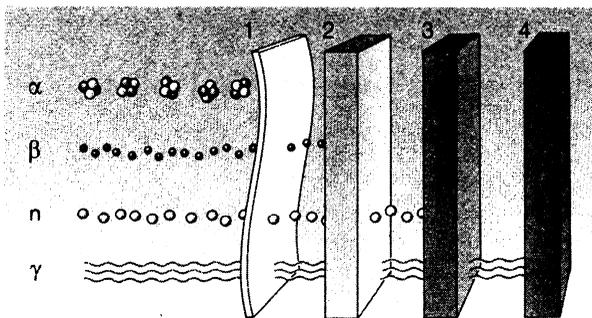


Рис. 6. Проникающая способность излучений

Сказанное иллюстрируется рис. 6. Нетрудно видеть, что наблюдается простая закономерность: чем выше ионизирующая способность излучения, тем ниже способность проникающая. Это вовсе не случайно – при взаимодействии излучений с веществом основная часть энергии расходу-

ется именно на ионизацию – первичную (для заряженных частиц) или вторичную (для нейтральных).

Проникающую способность излучения не следует путать с его биологической опасностью. Анализ последней, как мы увидим, гораздо более сложен.

Что такое ядерные реакции?

Ядерной реакцией называется любой процесс, изменяющий нуклонный состав ядра и/или его энергетическое состояние. Ядерные реакции бывают спонтанными, т. е. протекающими без влияния извне (радиоактивный распад, спонтанное деление), и вынужденными, для протекания которых необходимо внешнее воздействие. По типу энергетического баланса ядерные реакции подразделяются на эндотермические (для протекания которых необходимо поступление энергии извне) и экзотермические (при которых выделяется энергия, уносящаяся другими частицами).

Помимо уже известного нам радиоактивного распада, существует огромное множество типов ядерных реакций, из которых на практике особенно интересны три: реакции деления (под действием нейтронов и спонтанного), реакции синтеза и реакции активации.

Для тяжелых нуклидов (изотопов тория, урана, плутония и элементов с еще большим атомным номером) свойственна реакция ядерного деления под действием нейтронов. Ядро тяжелого элемента, захватив нейтрон, разваливается на два сравнимых по массе ядра с выделением значительного количества энергии (экзотермическая реакция). Совершенно особая роль этой реакции деления в ядерной технике и энергетике обусловлена одновременным испусканием некоторого количества вторичных нейтронов, число которых (в среднем) на акт деления (знаменитое « ν ») существенно больше единицы (например: 2,41 – для урана-235; 2,89 – для плутония-239; 4 и более – для еще более тяжелых ядер). Нетрудно понять, что это явление может быть положено в основу самоподдерживающейся цепной реакции ядерного деления, лавинообразно охватывающей все новые и новые тяжелые ядра. В установках, где реализуется такая реакция – взрывная (атомная бомба) или управляемая (атомный реактор), – совокупность этих ядер является делящимся, или расщепляющимся, материалом, а с учетом необходимых добавок и технологического исполнения – ядерным топливом. Однако для протекания цепной реакции ядерного деления нужно соблюдение многих условий, и в первую очередь достижение некоторого порогового компактного количества расщепляющегося материала – критической массы. Для изолированной сплошной сферы из плутония-239 значение критической массы составляет около 15 кг, для урана-235 при аналогичных условиях – примерно 50 кг. Вообще же значение критической массы чрезвычайно сильно зависит от очень многих обстоятельств.

Вторичные ядра, образующиеся в ходе протекания реакции деления с развалом тяжелых ядер, называются осколками, или продуктами, деления. При делении урана или плутония с различной, но хорошо известной веро-

янтностью может образовываться около 1000 типов этих новых ядер, причем большая их часть (свыше 90 %) радиоактивна. Именно продуктами деления являются такие печально знаменитые радионуклиды, как стронций-90, цезий-137 и йод-131.

Следует отчетливо понимать, что собственная радиоактивность расщепляющегося материала (урана, плутония) не имеет ни малейшего отношения к их использованию в качестве ядерного топлива. Заметим, что вещества на основе элементов легче тория расщепляющимся материалом для практической реализации цепной реакции деления не могут быть никогда и ни при каких условиях. При этом вопрос об их стабильности или радиоактивности не играет абсолютно никакой роли. Поэтому, читая в газетах о попытке кражи, например, цезия-137 с намерением впоследствии продать его в качестве ядерного материала для создания атомной бомбы, испытываешь лишь оторопь от легкомыслия крадущего (помереть ведь может!) и безграмотности пишущего (если он к намерению сделать такую бомбу относится всерьез), но никак не чувство озабоченности.

Тяжелые ядра, начиная с урана, способны делиться не только под действием нейтронов, но и самопроизвольно, «по собственной инициативе». Такая ядерная реакция называется спонтанным делением. Обладая всеми рассмотренными ранее особенностями реакции деления (образование двух осколков, множественность вторичных нейтронов), она тем не менее считается одним из типов уже знакомого нам радиоактивного распада и характеризуется тем же экспоненциальным законом. Для α -активного урана спонтанное деление – явление исключительно редкое: в уране-238 статистически один такой случай приходится почти на $5 \cdot 10^8$ «нормальных» α -распадов. Однако, чем тяжелее ядро, тем выше значимость спонтанного деления, а для наиболее тяжелых оно становится главным или даже единственным типом распада, в конце концов вообще препятствуя образованию очень тяжелых ядер как единых, связанных систем.

В противоположность тяжелым, легкие ядра имеют склонность к «слипанию». При взаимодействии, например, двух ядер изотопов водорода (дейтерия и трития) образуется новое стабильное ядро (гелий-4) и опять-таки выделяется значительное количество энергии. В этом случае речь идет о реакциях синтеза. Именно им мы обязаны решительно всем, поскольку они лежат в основе энергетики нашего Солнца (и других звезд), но эта же реакция реализуется и в самом разрушительном оружии всех времен – термоядерном.

Наконец, третий интересный для нас тип ядерной реакции – захват ядром нейтрона с образованием нового нуклида, обычно радиоактивного, – реакция активации. Речь при этом не случайно идет именно о нейтроне. Во-первых, он легко «внедряется» в ядро-мишень: нейтрон не имеет заряда, на него не действуют неизбежные в противном случае кулоновские силы. Во-вторых, эксплуатируемые ядерные реакторы являются мощнейшими источ-

никами именно нейтронов (а на исследовательских ядерных реакторах интенсивные потоки и пучки нейтронов вообще являются единственной продукцией), что позволяет нарабатывать искусственные радионуклиды в значительных (промышленных) количествах. Продуктом нейтронной активации является, например, широко используемый в изотопных технологиях кобальт-60 (γ -излучатель с периодом полураспада 5,27 года).

Что такое схема распада радионуклида?

Любой радионуклид распадается, испуская только свойственные именно ему ядерные излучения в статистически вполне определенном количестве. Например, при распаде ста ядер цезия-137 испускается сто β -частиц, восемьдесят пять γ -квантов с энергией 662 кэВ и семь γ -квантов с энергией 32 кэВ. Все, ничего больше. Не могут при распаде этого нуклида образоваться ни α -частица, ни нейтрон, как не могут измениться только что приведенные числа. Так же обстоит дело со всеми другими радионуклидами. Разумеется, полная физическая картина распада любого радионуклида намного сложнее, и для ее наглядного представления существуют особые схемы, построенные в общепринятых обозначениях, – они то и называются схемами распада. Однако в прикладных исследованиях по радиационной физике под схемой распада обычно имеют в виду совокупность типов, интенсивностей и энергий ионизирующих излучений разного рода, свойственных распаду именно данного радионуклида.

3. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОРГАНИЗМ. РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА И РАДИОБИОЛОГИЯ

Есть ли в России единый нормативный документ, лежащий в основе правил работы с источниками ионизирующих излучений и в условиях их воздействия?

Да, разумеется. С 1 января 2000 г. это – Нормы радиационной безопасности НРБ-99. Они разработаны с учётом действующих федеральных законов и рекомендаций Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Их соблюдение по действующему российскому законодательству является строго обязательным во всех случаях.

Что такое доза излучения? Почему существует так много единиц измерения дозы – рад, грей, рентген, бэр, зиверт?

Доза излучения является основным понятием, характеризующим меру воздействия ионизирующего излучения и возможные последствия этого воздействия. С этим и сейчас согласны все, и раньше никаких разногласий тут не возникало. Гораздо хуже дело до недавних пор обстоит с его физической интерпретацией, терминологической базой и, в особенности, единицами. Всё это – отголоски многолетней терминологической и мет-

рологической неопределённости, царившей в радиационной физике вплоть до последнего времени, пока действующими НРБ-99 не были приняты обязательные безальтернативные терминология и система единиц, характеризующие понятие дозы.

По НРБ-99 вводятся следующие основные понятия, относящиеся к термину «доза».

1. Поглощённая доза – энергия, передаваемая единице массы вещества при воздействии на него ионизирующим излучением. Единицей поглощённой дозы является грей (Гр) – доза, соответствующая поглощению 1 джоуля энергии в 1 кг вещества. Использувавшаяся ранее внесистемная единица поглощённой дозы (рад равен 0,01 Гр) и НРБ-99 не признается, хотя и упоминается в них.

2. Доза эквивалентная – поглощённая доза в органе или ткани, умноженная на взвешивающий коэффициент для данного вида излучений. Взвешивающий коэффициент эквивалентной дозы учитывает относительную биологическую эффективность различных видов излучений (1 для гамма-квантов и электронов, 5 – 20 для нейтронов различных энергий, 20 для α -частиц при внутреннем облучении и т.д.). Единица эквивалентной дозы – зиверт (Зв).

3. Доза эффективная – величина, используемая как мера риска возникновения отдалённых негативных последствий облучения с учётом индивидуальной радиочувствительности различных органов и тканей тела. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на взвешивающие коэффициенты эффективной дозы, которые изменяются в пределах от 0,20 (половые железы) до 0,01 (кожа, клетки костных поверхностей). Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

Совокупность взвешивающих коэффициентов эффективной дозы имеет существенную особенность: их сумма равна единице (условие нормировки). Легко понять, что это соответствует важнейшему частному случаю, когда ионизирующее излучение с достаточной проникающей способностью воздействует не на отдельные органы с разной радиочувствительностью, а на всё тело. Так происходит при воздействии на организм обширных полей внешнего нейтронного и/или γ -излучения. Большое значение взвешивающего коэффициента эффективной дозы делает этот случай, при достаточной интенсивности полей излучения, очень опасным, в чём мы и убедимся в дальнейшем. Следует отметить также, что он весьма важен для практической аппаратурной дозиметрии. К этому мы также ещё вернёмся.

4. Доза эффективная коллективная – мера коллективного риска возникновения отдалённых эффектов облучения. Она равна сумме индивидуальных эквивалентных (эффективных) доз для рассматриваемой группы населения или персонала. Единица эквивалентной (эффективной) коллективной дозы – человеко-зиверт (чел.-Зв). Понятие коллективной дозы используется при совокупной (включающей экономические, социальные,

медицинские и иные аспекты) оценке как штатных радиационных последствий реализации каких-либо технологий (необязательно ядерных), так и в случаях аварий или инцидентов.

5. Доза, отнесенная ко времени воздействия излучения, называется мощностью дозы. Она измеряется в греях или зивертах, отнесенных к единице времени (секунде, минуте или часу). Следует понимать, что мощность дозы – это не только количественный, но и важнейший качественный показатель, в большой мере характеризующий вероятные последствия облучения организма. Любители солнечных ванн хорошо знают, что загорать по полчаса в течение двадцати дней отпуска или десять часов в течение его первого дня – далеко не одно и то же: в первом случае кожа приобретет требуемый бронзовый оттенок, во втором – неминуем сильнейший ожог, хотя доза солнечного ультрафиолета в обоих случаях одна и та же. Точно так же обстоит дело с ионизирующей радиацией: при одинаковой дозе всегда опаснее большая однократная мощность дозы. Причина этого состоит в том, что организм обладает до некоторых пределов способностью к постепенной самореабилитации, но при больших разовых лучевых поражениях эти пределы оказываются превзойденными.

Иные интервалы времени при определении мощности дозы НРБ-99 не предусмотрены, но для года введено специальное понятие эффективной (эквивалентной) годовой дозы. Оно является одним из важнейших при нормировании дозовых нагрузок.

6. Доза эффективная (эквивалентная) годовая – сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год. Единица годовой эффективной дозы – зиверт (Зв).

Все другие понятия, связанные с термином «доза», вводятся в НРБ-99 с опорой на только что приведённые основные понятия.

Это – всё, никаких иных интерпретаций этого термина НРБ-99 не предусматривают. Введение же для него каких-либо иных понятий и величин имеет сейчас ничуть не больше оснований, чем использование, наряду с метрической системой мер, единиц типа аршина, сажени, размера ячменного зерна или толщины волоска с ослиной морды.

В этом же смысле некоторые следующие вопросы и ответы на них носят характер разъяснений и своего рода комментариев к НРБ-99, но не более того. Это и понятно: закон, по самому смыслу этого понятия, можно толковать, даже критиковать, но нельзя произвольно дописывать или изменять, а тем более игнорировать.

А как же старый, добрый рентген? К нему все так привыкли...

Ничего не поделаешь – придется отвыкать. Иного способа избавиться от терминологического, да и смыслового, разброда в системе дозиметри-

ческих единиц нет. В качестве утешения можно лишь добавить, что специалистам в области радиационной физики, радиобиологии и медицины, работавшим с радами, рентгенами и бэрами многие годы, если не десятки лет, будет еще сложнее – учиться всегда легче, чем переучиваться. Но и они, понимая необходимость такого шага, воспринимают его если не с радостью, то с пониманием.

Но в промышленности и быту осталось много старых дозиметров, использующих еще рентгеновскую шкалу. Неужели их надо немедленно выкинуть?

А вот с этим торопиться не надо. Почему – будет понятно чуть позже.

Каким путем человек может получить повышенную дозу облучения?

В общем, одним из двух (но может и обоими сразу). Если источник (источники) ионизирующей радиации находится вне организма, то речь идет о внешнем облучении. В этом случае наибольшую реальную опасность представляют мощные источники нейтронов и γ -излучения. Высокая проникающая способность этих частиц обуславливают тяжёлые лучевые поражения внутренних органов тела, имеющих наибольшие значения взвешивающего коэффициента эффективной дозы.

Внешнее β -излучение представляет серьёзную опасность при нахождении радиоактивного материала непосредственно на поверхности кожи (радиоактивное загрязнение кожных покровов). В этом случае на загрязненном участке развивается так называемое местное лучевое поражение (МЛП) – лучевая травма, лучевой ожог. На месте лучевой травмы возникает глубокая, трудно заживающая язва. При значительной площади загрязнения возникает очевидная угроза жизни и здоровью пострадавших – по аналогии с ожогами от открытого пламени. Особо неблагоприятным случаем является воздействие внешнего β -излучения на хрусталик глаза, обладающий очень высокой радиочувствительностью. Обусловленное таким воздействием помутнение хрусталика (лучевая катаракта) наблюдается даже при относительно небольших поглощённых дозах. Этот случай в НРБ-99 учитывается особо.

Внешнее α -излучение с энергией, характерной для радионуклидов (единицы мегаэлектронвольт) вполне безопасно, так как оно поглощается уже тонким слоем воздуха и наружным (эпителиальным) слоем кожи.

Защита от проникающего внешнего излучения всегда есть комбинация трех факторов: материала, расстояния, времени. Со временем все понятно: чем меньше находишься в поле ионизирующего излучения, тем лучше. Несложно и с расстоянием: плотность потока ионизирующего излучения точечного источника убывает пропорционально квадрату расстояния от него.

Что до материала, то для защиты от β -излучения обычно вполне хватает сантиметрового слоя органического стекла или еще более тонкого слоя алюминия. Главное – не допустить загрязнения β -излучателями открытой кожи, для чего нельзя пренебрегать спецодеждой. Для защиты от γ -излучения, как мы уже говорили, эффективны слои металла возможно более высокой плотности – железо, свинец, уран (как это ни парадоксально). Однако реальной основой биологической защиты ядерно-технических установок (реакторов, ускорителей и др.) является бетон. Хотя он физически менее эффективен, чем железо и свинец, но и экономически, и конструктивно толстая стенка из бетона намного предпочтительней. Защита от нейтронов наиболее эффективна при комбинированном построении. Собственно нейтроны лучше всего поглощаются легкими средами (водой, полиэтиленом, парафином), поэтому они и являются в этом случае основой защитных барьеров. Но в конструкцию обычно вводят и внешние металлические экраны для поглощения β - и γ -излучений, возникающих в материале легкого поглотителя вследствие ядерных реакций, инициируемых нейтронами. Специальной защиты от внешнего α -излучения не требуется.

Другой способ «поймать дозу» – допустить попадание радионуклидов в усваиваемой форме внутрь организма с воздухом, пищей и водой. Тогда, накапливаясь в критических органах, радионуклиды начинают облучать организм изнутри, превращаясь в радиотоксины. Это – внутреннее облучение. При внутреннем облучении опасны все радионуклиды, но более всех, как уже указывалось, α -излучатели. Защита от внутреннего облучения только одна – не допустить попадания радионуклидов в организм, для чего следует пользоваться индивидуальными средствами защиты органов дыхания (фильтрующими респираторами, противогазами с аэрозольной коробкой и т. д.) и контролировать содержание радионуклидов в питьевой воде и продуктах питания.

Что такое критические органы?

Многие химические элементы вообще и радионуклиды в частности при попадании в организм извне распределяются в нем не равномерно, а сосредотачиваются в отдельных органах вследствие predetermined генетикой биохимических процессов. Общеизвестно, например, что попавший в организм кальций фиксируется в костной ткани, йод – в щитовидной железе и т. п.

К большому сожалению, организм не только «не отличает» стабильные нуклиды от радиоактивных, запуская последние по «привычным» биохимическим цепочкам (именно так концентрируется в щитовидной железе опаснейший йод-131, доставивший столько несчастий при чернобыльской катастрофе), но и «путает» химически сходные элементы. Например, в костную ткань он осаждает не только необходимый для жизни

стабильный кальций, но и крайне радиотоксичные изотопы стронция, радия и плутония, что ведет к неминуемому переоблучению одной из наиболее радиочувствительных биосубстанций – красного костного мозга. Такие органы и называют критическими по тому или иному избирательно поглощаемому радионуклиду (рис. 7). Есть радионуклиды, которые распределяются в организме более или менее равномерно (калий-40, цезий-137); для них критическим органом является тело в целом.

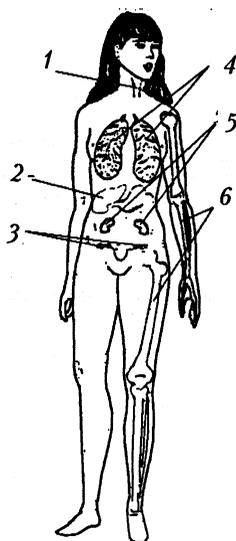


Рис. 7. Критические органы по отдельным радионуклидам: 1 – щитовидная железа (йод-131); 2 – печень (кобальт-60, цезий-137, плутоний-239); 3 – яичники (калий-40, кобальт-60, цезий-137); 4 – лёгкие (радиоактивные изотопы аргона, криптона и ксенона, радон и продукты его распада, плутоний-239); 5 – почки (калий-40, цезий-137); 6 – костная ткань (стронций-90, радий-226, плутоний-239)

Какие из перечисленных выше дозиметрических величин являются измеряемыми, а какие подлежат лишь расчетной оценке?

Для большинства дозиметрических систем измеряемой величиной такого рода является поглощенная доза (или её мощность). Понятно, почему: прибор ведь «ничего не знает» о взвешивающих коэффициентах, необходимых для определения эффективной и эквивалентной доз. Он, в зависимости от принципа действия, измеряет либо общую потерю энергии излучения в рабочем веществе детектора, либо ту ее часть, которая пошла на ионизацию. Что, как нам известно из прошлого раздела, для большинства типов излучений примерно одно и то же.

Мы, однако, уже знаем, что мерой вероятности наступления неблагоприятных последствий обычно является не поглощённая, а эффективная доза (в зивертах), а вот её-то во многих случаях измерить нельзя – можно только рассчитать. И такие расчёты иногда очень сложны. Примером является оценка эффективной дозы от смеси инкорпорированных (попавших

внутри организма) радионуклидов при их накоплении в различных критических органах тела. Здесь приходится учитывать огромное множество факторов: состав смеси и его изменение во времени, взвешивающие коэффициенты расчёта эквивалентной и эффективной доз, динамику поступления радионуклидов в организм и их вывода, коэффициенты их перехода в критические органы и т.д.

Существует, однако, важнейший частный случай, когда эффективная доза оказывается непосредственно измеряемой величиной. Вспомним, что для γ -излучения – с которым в большинстве случаев и приходится иметь дело в «бытовой» радиационной физике – взвешивающий коэффициент перехода от поглощенной к эквивалентной дозе равен единице. Следовательно, для него поглощенная доза в 1 Гр соответствует эквивалентной дозе в 1 Зв. Именно соответствует, а не равна (единицы измерения разные, да и смысл тоже – грей характеризует поглощение энергии излучения, зиверт – биологический эффект). Значит, в этих случаях и эквивалентная доза в зивертах является непосредственно измеряемой величиной – достаточно правильно отградуировать прибор.

Но грей, по НРБ-99, напрямую связан со «старым» внесистемным рядом: $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$. А поскольку в старой системе радиационных единиц рад увязывался с рентгеном, то такая возможность открывается и для последнего. Именно, можно считать, что 1 Зв эквивалентной дозы в обсуждаемом случае с хорошей точностью равен 100 Р (рентгенам).

И, наконец, последний шаг. Вспомним, что при внешнем воздействии на организм обширных полей γ -излучения с его высокой проникающей способностью («погружение в поле») взвешивающий коэффициент перехода от эквивалентной дозы к эффективной тоже равен единице (облучение всего тела). А это значит, что измеряя в этом случае эквивалентную дозу, мы тем самым измеряем и дозу эффективную – величину, которая и характеризует биологические последствия облучения.

Вот это обстоятельство и позволяет использовать для дозиметрии внешнего гамма-излучения и старые, использующие еще рентгеновскую шкалу, дозиметры. Надо только разделить показания по шкале такого прибора на 100 для получения значения в «зивертовой» шкале – вот и все. Например, типичной фоновой мощности дозы внешнего γ -излучения в Москве, измеренной старым дозиметром и равной, по его шкале, 12 мкР (микрорентген)/ч, соответствует значение мощности эффективной дозы $0,12 \text{ мкЗв/ч}$.

Необходимо ещё раз напомнить, что такая простая схема пересчёта доз применима для единственного, хотя практически и очень важного, случая воздействия на организм обширного поля внешнего γ -излучения. В иных ситуациях (смешанные поля излучения, наличие внутреннего облучения) этот метод неприменим.

Каковы дозы, получаемые от различных источников в обыденной жизни?

Вот некоторые данные:

ежедневный трехчасовой просмотр цветного телевизора в течение года – 0,001 мЗв;

годовая доза для местного населения при штатном режиме эксплуатации АЭС, обусловленная её работой – 0,0012 мЗв;

годовая доза от естественного радиационного фона – 1,5–2 мЗв;

средняя доза при флюорографическом осмотре легких – 1,2 мЗв;

однократное облучение при рентгенографии зубов – 30 мЗв;

допустимое облучение персонала АЭС в нормальных условиях за год – 50 мЗв;

однократное местное облучение при рентгеноскопии желудка – 300 мЗв.

Каковы могут быть последствия облучения большими дозами при кратковременном облучении?

До 0,5 – 0,75 Зв – кратковременные незначительные изменения в составе крови.

0,8 – 1,2 Зв – порог лучевой болезни. Тошнота у 5 – 10 % облученных, возможна рвота. Изменения в составе крови.

1,3 – 1,7 Зв – тошнота и рвота примерно у четверти облученных. Изменения в составе крови. Смертельные случаи почти исключены.

1,8 – 2,6 Зв – тошнота и рвота примерно у половины облученных. Значительные изменения в составе крови. Порог эпилепсии (выпадения волосяного покрова). Возможны единичные смертельные случаи.

2,7 – 3,3 Зв – тошнота и рвота почти у всех облученных. Значительные изменения в составе крови, эпилепсия, утрата репродуктивных функций (стерилизация). Около 20 % смертельных случаев в течение 2 – 6 недель. Восстановительный период у выживших – около 3 месяцев.

3,5 – 5,0 Зв – тошнота и рвота у всех без исключения облученных в течение первого дня после облучения, другие перечисленные симптомы лучевой болезни. Смертность около 50 % в течение месяца, восстановительный период у выживших – около полугода.

5,5 – 7,7 Зв – тошнота и рвота по прошествии 4 ч после облучения, другие симптомы лучевой болезни. Смертность до 100 %, при отсутствии лечения – 100 %. Восстановительный период у немногих выживших – более полугода.

10 Зв – тошнота и рвота по прошествии 1 – 2 ч после облучения. Все признаки острой лучевой болезни, прогноз почти безнадежен (хотя случаи выздоровления известны).

50 Зв – почти немедленные тошнота и рвота, все иные признаки острой лучевой болезни, некрозы кожных покровов. Смерть всех пострадавших в течение недели.

Все эти данные относятся к случаю кратковременного одноразового внешнего облучения и характеризуют острую лучевую болезнь (ОЛБ).

Существует ли хроническая форма лучевой болезни?

Да, существует. Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) формируется постепенно, при длительном постоянном облучении организма с получением эффективной дозы, значительно (в 100 и более раз) превышающей фоновую. ХЛБ может возникнуть как при общем (внутреннем или внешнем) облучении, так и при преимущественном поражении отдельных органов.

Существуют три степени ХЛБ:

I степень (легкая) – периодические обратимые изменения состава крови, временные нарушения вегетативной нервной и сердечно-сосудистой систем;

II степень (средняя) – углубление нервно-регуляторных нарушений, появление функциональной недостаточности пищеварительных органов, стойкие умеренные изменения в составе крови;

III степень (тяжелая) – стойкие значительные изменения в составе крови, анемические явления, возможны атрофические явления в слизистой желудочно-кишечного тракта и нарушение сперматогенеза.

Обязательным условием успешного лечения ХЛБ является исключение превышения дозовых нагрузок, характерных для населения в целом. Восстановительный период, как правило, очень долгий (месяцы и годы).

А есть ли какая-либо связь между типом облучения (внешнее, внутреннее) и формой лучевой болезни как его следствием?

Да, конечно. Она определяется статистикой пострадавших.

Причиной всех без исключения случаев ОЛБ (с регистрацией детерминистских эффектов), а также значительной части случаев ХЛБ и стохастических эффектов явились интенсивные потоки внешних нейтронных и/или γ -излучений. Именно от огромных (свыше 10 Зв) доз внешнего γ -излучения (часто в совокупности с обширными МЛП) погибли первые герои Чернобыля – пожарные. Вечная им память и вечная наша благодарность!

Факты развития ОЛБ вследствие лишь внутреннего облучения неизвестны, однако случаи возникновения по этой причине ХЛБ и стохастических эффектов – печальная реальность, и наиболее угрожаемый в этом смысле регион в России (возможно, и в мире) – Уральская зона радиационно-экологического бедствия в бассейне р. Течи. По данным крупного российского специалиста А. К. Круглова, ХЛБ установлена у 3,3 % жителей этого региона. Превалирующим фактором её развития явилось внутреннее облучение вследствие многолетнего сброса чудовищно огромных (суммарной активностью, вероятно, до 1 млрд Ки (кюри)) объемов радио-

активных отходов первого советского плутониевого комбината (ПО «Маяк», г. Челябинск-40, позже Челябинск-65, Озерск) в проточные озера и пруды-отстойники бассейна р. Течи. При этом основной вклад в формирование дозы внутреннего облучения внесли долгоживущие радионуклиды с высокой радиотоксичностью: стронций-90, цезий-137, плутоний-239, плутоний-240, плутоний-241.

Всегда ли вследствие облучения наступают одни и те же негативные последствия для здоровья?

И да, и нет – весь вопрос в дозе. Некоторые эффекты облучения, однозначно им обусловленные, при дозе, превышающей некоторый порог, развиваются абсолютно у всех облученных, и чем больше доза, тем значительнее степень поражения (зависимость «доза – эффект»). Такие эффекты называются детерминистскими, или пороговыми. К ним относятся все указанные выше симптомы ОЛБ; другим примером является уже упомянутая лучевая катаракта (помутнение хрусталика глаза), проявляющаяся у всех без исключения пострадавших при получении одноразовой поглощённой дозы свыше 0,5 Зв или при хроническом облучении свыше 0,8 Зв при годовой дозе свыше 0,05 Зв.

При дозах, заведомо уступающих пороговым для любых детерминистских эффектов, не возникает никаких специфических лучевых поражений. Однако возможно проявление неблагоприятных последствий у некоторых подвергшихся облучению людей спустя значительное время (годы и десятки лет). Такие эффекты называют вероятностными, или стохастическими. К ним относятся лейкозы, злокачественные (раковые) опухоли и (в меньшей мере) генетические нарушения, проявляющиеся у потомства. В отличие от детерминистских эффектов, тяжесть такого заболевания не зависит от дозы, а определяется природой болезни. Однако вероятность ее развития, как принято считать (об этом ниже), пропорциональна полученной дозе (зависимость «доза – вероятность заболевания»). При этом предполагается, что порог воздействия отсутствует. Именно стохастические эффекты определяют возможный ущерб здоровью населения на территориях, загрязнённых радионуклидами при радиационных и ядерных авариях.

Государственный комитет санитарно-эпидемиологического контроля при Президенте РФ при разработке прогнозов и принятии решений ориентируется на следующие коллективные вероятностные характеристики стохастических эффектов при дозах облучения, заведомо превышающих предельно-допустимые:

- раковые заболевания со смертельным исходом – 5 на 100 чел.-Зв;
- генетические заболевания – 1 на 100 чел.-Зв;
- средняя потеря времени жизни от всех заболеваний – 5 суток на 0,01 чел.-Зв.

Но если негативные стохастические эффекты облучения не имеют дозового порога, то сколь угодно малая доза облучения должна вызывать некоторое, хотя и незначительное, увеличение вероятности их возникновения. Правильно ли такое заключение?

На допущении, что это так и есть, базируется один из главных постулатов современной радиационной гигиены и защиты от ионизирующих излучений – линейная беспороговая гипотеза (ЛБГ).

Согласно ей, всякая доза вредна в том смысле, что повышает вероятность отдаленных негативных последствий. ЛБГ к настоящему времени принята МКРЗ в качестве основы для разработки норм радиационной безопасности и практических рекомендаций.

Какую роль сыграла и играет ЛБГ в развитии радиационной гигиены и защиты от излучений?

Определенных исторических заслуг ЛБГ отрицать нельзя. Именно с опорой на нее были приняты три основных принципа радиационной защиты – принципы «ALARA» (as low as reasonably achievable):

- следует избегать любого переоблучения без обоснованной необходимости;
- при работе с ионизирующим излучением или неизбежности его воздействия следует принять все меры для снижения дозы облучения, насколько это допустимо технически, экономически и социально;
- нормы радиационной безопасности должны быть соблюдены в любом случае.

Само по себе следование этим требованиям, разумеется, ничего, кроме добра, не принесет. Гораздо сложнее вопросы об обоснованности ЛБГ по существу и об основных принципах создания, на её базе, количественных критериев и норм радиационной безопасности, а также о том, не может ли возведение её в неукоснительный догмат принести объективный вред, превосходящий пользу.

Это – важная часть нашего рассказа. Мы начнём её с введения в обсуждение одного из ключевых понятий цивилизационной деятельности современного общества – понятия уровня риска.

Что такое риск?

Риск есть количественная мера опасности, сопряжённой с совместным либо индивидуальным влиянием природных, технологических и социальных факторов. Он, в рассматриваемом смысле, определяется как вероятность гибели человека за один год вследствие воздействия некоторого фактора угрозы либо определённого класса этих факторов. А основой их учёта и нормирования является концепция допустимого уровня риска.

Её рассмотрение начнём с того, что уровень риска определяется как существом фактора угрозы (контролируемого либо неконтролируемого людьми), так и целенаправленными мерами, принимаемыми обществом

для снижения его негативной значимости. Пример: землетрясения как таковые не контролируются людьми (их и предсказывать-то толком пока не научились), однако вероятность погибнуть от них может быть существенно уменьшена специальными инженерно-техническими и организационными мероприятиями (повышением сейсмостойкости сооружений, подготовкой специальных аварийно-спасательных служб и др.).

Однако всё это требует денег, сил, времени и т. д. – всего того, что называется ресурсами общества. А они – и это надо отчётливо понимать – ограничены, причём достаточно жёстко. Отсюда сразу несколько важнейших выводов.

Первый: нужна здравая, объективная, учитывающая особенности ситуации и не зависящая от проходящих обстоятельств и политической конъюнктуры оценка значимости рассматриваемого фактора угрозы. Продолжая наш пример с землетрясениями, мы легко поймём, что перечисленные выше меры по снижению риска гибели от них будут более чем оправданы, например, на Камчатке или Сахалине, но будут выглядеть полной глупостью в Москве. Потому что вероятность разрушительной сейсмической активности во втором случае несоизмеримо мала в сравнении с очевидными громадными расходами на реализацию этих мер.

Второй: выполняя такую оценку, следует проводить различие между реальными и гипотетическими факторами угрозы. Первые оцениваются достаточно точно, исходя из имеющихся фактических данных. Например, уровень профессионального риска при подземной добыче угля равен примерно $5 \cdot 10^{-3}$ (в год гибнет, непосредственно в ходе катастроф или от отдалённых их последствий, один из 200 шахтёров). Риск смерти от непрофессиональных заболеваний для молодёжи в возрасте 20 – 25 лет в мире в целом оценивается как примерно $4 \cdot 10^{-4}$ (один умерший из 2500). В обоих случаях источник информации понятен – статистика, при всех её пороках, известных ещё Бисмарку.

А вот с теми же разрушительными землетрясениями в Москве как быть? Их-то (слава Богу!) никогда не было, судя по всему – и не ожидается. Можно, конечно, очень приблизительно оценить вероятность того, что оно всё-таки произойдёт, исходя из нашего понимания существа геологических процессов и тектонической активности: получим величину порядка 10^{-8} или даже меньше. Надо ли её учитывать в практических действиях? Ответ мы уже получили чуть раньше, исходя просто из здравого смысла: конечно же, нет. Ведь ресурсы для таких действий могут быть получены только за счёт уменьшения сил и средств, направляемых обществом для снижения куда более значимых факторов риска.

Мы подошли к нескольким важным следствиям анализа (пусть очень упрощённого) понятия риска.

Во-первых, существует нижний граничный уровень риска, который, если он не превышен, принимается обществом без необходимости планирования и проведения мероприятий по его уменьшению. Таким уровнем является величина порядка 10^{-6} (один смертельный случай в год на миллион людей), и область рисков ниже этой величины называется областью безусловно допустимых рисков.

Во-вторых, существует и его верхний граничный уровень, при превышении которого, если рассматриваемый риск обусловлен реализацией некоторой технологии, эта технология должна быть отвергнута, невзирая ни на какие прогнозируемые перспективы. На практике этот уровень соответствует величине 10^{-2} (один смертельный случай в год на сто людей), и область рисков выше этой величины называется областью неприемлемых рисков.

Эти граничные уровни (нижний и верхний) определяют практически значимый интервал (область регулируемых рисков). В нём и принимаются решения по нормативному ограничению негативных факторов техногенного воздействия. Понятно, что при этом учитываются не только медико-гигиенические соображения, но и экономические, социальные и иные обстоятельства. В корректном совместном учёте всех этих факторов и принятием по его результатам разумных, адекватных решений состоит одна из важнейших задач цивилизованного общества – оптимизация технологических рисков.

Каковы уровни риска в реальной жизни?

Вот величины некоторых среднемировых уровней риска:

- болезни – в целом 10^{-2} , в том числе от спонтанного рака $1,3 \cdot 10^{-3}$;
- естественная среда обитания (стихийные бедствия) – 10^{-5} , в том числе от наводнений $4 \cdot 10^{-6}$ и землетрясений $3 \cdot 10^{-6}$;
- искусственная среда обитания (загрязнение окружающей среды, взрывы, пожары, отравления, несчастные случаи на транспорте) – в совокупности около 10^{-3} ;
- социальная среда обитания (преступность, терроризм, военные действия, курение, наркотики) – $10^{-4} - 10^{-2}$, при резкой неоднородности по регионам и временным интервалам;
- профессиональная деятельность – от 10^{-4} (сфера обслуживания) до 10^{-2} (горнодобывающая и химическая промышленность);
- непрофессиональная деятельность (хобби, спорт) – на уровне 10^{-4} и менее, при резком повышении (до 10^{-2}) для отдельных видов спорта (скачки с препятствиями, альпинизм).

А риск от техногенной компоненты ионизирующих излучений?

Уже известные нам НРБ-99 разрабатывались именно с опорой на концепцию допустимого риска. Согласно этим нормам, предел индивидуаль-

ного пожизненного риска для техногенного облучения в течение года для населения принимается равным $5,0 \cdot 10^{-5}$.

Каковы основные пределы доз, установленные НРБ-99? В чём их назначение и смысл?

Основным дозовым пределом по НРБ-99 является упомянутая выше среднегодовая эффективная доза от суммарного воздействия внешнего и внутреннего техногенного облучения, определяемая заданным пределом индивидуального пожизненного риска для техногенного облучения в течение года. Она для населения в целом не должна превышать 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год. Эта величина не включает в себя дозы от природного и медицинского облучений.

Разумеется, НРБ-99 содержат большое количество и других обязательных норм (в том числе пределы годового поступления радионуклидов в организм с воздухом, водой и пищей), но среднегодовая эффективная доза является основным, базовым нормативом.

Для персонала ядерных объектов и других людей, профессионально работающих с излучениями, НРБ-99 допускают более высокий уровень радиационного риска ($1,5 \cdot 10^{-4}$), что приводит, естественно, и к некоторому увеличению дозового предела (20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год). Следует, однако, отметить, что для определённых групп лиц из числа персонала (в частности, для женщин репродуктивного возраста) некоторые ограничения, вводимые НРБ-99, уменьшают уровень профессионального риска практически до указанного выше для населения в целом.

И всё же – как были оценены соответствия между приведёнными уровнями риска, с одной стороны, и дозовыми пределами – с другой?

По уже известной нам ЛБГ, постулирующей линейную зависимость между этими двумя величинами в любом интервале мощностей доз – выбранному значению риска ставится в соответствие некоторый дозовый предел.

А воздействие природного радиационного излучения, обуславливающего естественный радиационный фон, нормируется НРБ-99?

Нет. НРБ-99 вводит лишь определённую систему частных ограничений на облучение населения от отдельных природных источников ионизирующей радиации. Какие из них играют наибольшую роль при формировании дозовых нагрузок, мы рассмотрим далее. Однако допустимого значения эффективной (эквивалентной) дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается.

А есть ли какие-либо физические и/или биологические различия между воздействием на человеческий организм природных и техногенных ионизирующих излучений?

Абсолютно никаких. Характер и степень этого воздействия определяется лишь физическими характеристиками излучений и (био)химически-

ми свойствами испускающих их радионуклидов, но никак не способами их получения – в ходе естественных или же техногенных процессов. Кстати говоря, из того, что какой-либо радионуклид имеет естественное происхождение, вовсе не следует, что он, при определённых условиях, менее опасен, нежели полученные искусственно. Например, одним из самых опасных как при внешнем, так и (особенно!) при внутреннем облучении является радий-226 – естественный радионуклид, член природного радиоактивного ряда урана-238.

Как же так?.. Техногенное облучение строго нормируется вплоть до 1 мЗв/год, а физически тождественное естественное (как мы уже знаем, в среднем почти вдвое более значимое) не нормируется вовсе?

Совершенно правильное замечание. Налицо очевидное противоречие, и именно с него мы начнём наше обсуждение практической подтверждаемости ЛБГ и её научной обоснованности.

Человечество жило в условиях воздействия практически неизменного природного радиационного фона со времени своего возникновения на Земле, и это воздействие, несомненно, стало (и будет) неотъемлемой частью его экосистемы. А применительно к таким воздействиям нужно с очень большой осторожностью употреблять дефиниции типа «вредный», «полезный» и им подобные, несущие на себе печать определённой утилитарности. И уж во всяком случае вряд ли следует закладывать эти дефиниции (а тем более – соответствующие практические выводы) в основу нормативных документов.

Но ведь именно такой подход и лежит в основе ЛБГ, объявляющей вредными для человека сколь угодно низкие уровни ионизирующей радиации и лежащей в основе ограничения техногенного облучения уровнем, вдвое уступающим уровню физически однотипного естественного.

Дело, однако, не только (и даже не столько) в общефилософских соображениях подобного рода. К настоящему времени известно огромное количество абсолютно достоверных фактов, напрямую противоречащих ЛБГ. В частности, если она верна, то статистика раковых заболеваний и генетических отклонений по большим контингентам людей должна «чувствовать» изменения естественного радиационного фона от региона к региону. Что же мы видим в действительности?

На Земле известно множество регионов, где уровень естественного фона во много раз превышает среднемировой. Например, в Индии (шт. Керала) около 70 тыс. человек живут в отчетливо локализованном районе, где, вследствие выхода на поверхность ториевых минералов (монацитов), годовая доза естественного облучения в среднем примерно в 10 раз выше общемировой. При этом для 6 % жителей этой местности фактор превышения составляет ~ 20, а для 0,7 % – достигает 50 (!). Тем не менее медико-статистические исследования жителей этого региона (как и

подобных ему других областей) не обнаружили каких-либо отклонений от среднемирового уровня ни по раковым заболеваниям, ни по генетическим отклонениям, хотя, если бы ЛБГ была справедлива, различия должны были быть весьма впечатляющими.

Возникают и другие явные противоречия между прогнозами по ЛБГ и реальными фактами. Так, самые тщательные исследования не обнаружили обсуждавшихся выше отклонений у жителей Хиросимы и Нагасаки, подвергшихся при атомных бомбардировках внешнему облучению дозами, не превышающими двадцатикратного естественного фона (хотя весь «букет» детерминистских лучевых поражений был тут, естественно, налицо). Не подтверждается ЛБГ и подробнейшей медицинской статистикой, ведущейся в радоновых водо- и грязелечебницах, напрямую противоречит ей и обширный материал по изучению условий жизни долгожителей (!) высокогорных регионов (в частности, Кавказа), где естественный радиационный фон в несколько раз превышает общемировой за счет меньшего ослабления атмосферой его космической компоненты. Наконец, не сбываются и апокалиптические прогнозы «зелёных экологов» и «разноцветных» журналистов о предстоящем резком росте числа раковых заболеваний в областях чернобыльских выпадений – анализ онкологических регистров не позволяет обнаружить в этих регионах статистически значимых превышений над спонтанной частотой возникновения солидных злокачественных новообразований. Впрочем, к последствиям аварии на ЧАЭС мы ещё вернёмся.

Зададимся теперь другим вопросом: насколько все-таки ионизирующая радиация при околофоновых уровнях воздействия «виновата» в горестной статистике спонтанного развития онкологических заболеваний у людей?

Увы, на нынешнем уровне нашего понимания биофизических и биохимических процессов в живых организмах ответить на этот вопрос невозможно в принципе. Дело в том, что радиация является лишь одним из примерно двухсот одновременно действующих факторов, инициирующих раковые заболевания, причем, несомненно, фактором не самым значимым. По приближенным оценкам, общее воздействие ионизирующих излучений обуславливает лишь около 1 % раковых заболеваний у людей, при этом, как мы увидим, около 80 % годовой дозы обусловлено естественным радиационным фоном. Французский гигиенист К. Пошен так оценивает относительную значимость некоторых факторов канцерогенеза: одинаковый дополнительный риск на уровне 10^{-6} (что это означает, нам уже известно), возникает при:

- выкуривании одной сигареты;
- двухчасовом пребывании в комнате, где курят другие;
- использовании противозачаточных таблеток в течение двух с половиной недель;

- употреблении двух с половиной бутылок вина;
- проживании вблизи крупного химического комбината в течение одной недели;
- проживании вблизи АЭС в течение трех лет, и т. д., и т. д., как уже говорилось, около двухсот раз.

Из сказанного очевидно, что в области околонулевых доз ни однозначно подтвердить, ни однозначно опровергнуть какую-либо гипотезу канцерогенного воздействия ионизирующих излучений (ЛБГ в том числе) невозможно в принципе. И такой вывод отнюдь не является лишь следствием личного мнения авторов. Дело в том, что задачи подобного рода хорошо известны математикам (и очень нелюбимы ими); они называются обратными некорректными. Смысл их можно проиллюстрировать следующим примером. Следуя некоторому рецепту, относительно легко, с использованием множества ингредиентов, сварить вкусный соус (прямая задача). Но вот определить по пробе соуса, не зная рецепта, состав ингредиентов, режим приготовления, да заодно ещё и конструкцию плиты, на которой он готовился (обратная задача) – это гораздо труднее, если возможно вообще.

Такая неопределённость позволяет выдвигать для описания воздействия относительно малых доз ионизирующего излучения и иные гипотезы, кроме ЛБГ. Например, в среде специалистов всё большую популярность приобретает пороговая гипотеза стохастических эффектов. Она, по аналогии с детерминистскими эффектами, постулирует отсутствие, до определённых пределов, какого-либо влияния ионизирующих излучений на здоровье людей. По современным оценкам, такой предел может лежать в области, приближённо соответствующей пятикратной среднегодовой дозе от естественных источников излучения (10 мЗв/год).

Но неужели ЛБГ, концептуальная основа современной радиационной гигиены и нормирования излучений, вообще не имеет никакого научного обоснования?

Формально – имеет. Им является линейная зависимость «доза – эффект» в области больших доз (одноразово 1 Зв и более). Как мы уже знаем, дозы такого порядка величины вызывают детерминистские эффекты, т. е. ОЛБ различных степеней тяжести. Соответственно, и экспериментальная информация для анализа упомянутой выше зависимости была получена на трагическом материале – пострадавших при атомной бомбардировке Хиросимы и Нагасаки и ядерных авариях. В этом диапазоне доз линейный характер зависимости подтверждается прекрасно – степень поражения при дозе 2 Зв вдвое выше, чем для 1 Зв и вдвое ниже, чем для 4 Зв.

Вот только при нормировании воздействия излучений рассматривается совершенно иная область мощностей доз – в десятки миллионов раз меньших! Но идеологов ЛБГ это совершенно не смущает, и они механически распространяют зависимость, полученную для хорошо изученной,

но относительно узкой области дозы на неизмеримо более широкую область этой величины. Такая процедура, называемая в математике экстраполяцией, с точки зрения физики вообще довольно рискованна – даже при небольшом «искусственном растягивании» такого рода возможны серьёзные промахи. А при столь значительном, как в обсуждаемом случае, расширении области величины весьма вероятны и качественные ошибки – что в данном случае и происходит.

Это можно пояснить простой аналогией. Если мы знаем, что автомобиль на 10 л бензина проходит 100 км, то можно с достаточной уверенностью утверждать, что на 20 л он пройдёт 200 км, а на 5 – 50. Это и есть вполне очевидная линейная зависимость «топливо – расстояние», полный аналог характерной для больших доз (и детерминистских эффектов) зависимости «доза – степень поражения». Зададимся, однако, вопросом: а сколько проедет автомобиль на одной капле бензина? Принимая, для оценки, объём капли равным $0,1 \text{ см}^3$ (10^{-4} л) и предполагая справедливость полученной выше зависимости также для области малых объёмов, получим, что совсем немного – 1 м, но всё-таки проедет (вот они, чудеса экстраполяции!). Однако здравый смысл, в полном соответствии с практикой, говорит, что при «заливании» в бак одной капли бензина автомобиль просто не тронется с места, да и десяти капель – тоже. Здесь существует некоторый порог, и он ближе к литрам, чем к каплям.

А вот ЛБГ применительно к нашему автолюбителю говорит: нет, хоть чуть-чуть, но проедет. В ответ же на резонное замечание, что это не так, и что все понимают, что это не так, её идеологи отвечают: может быть, ну и что? Зато считать легко!

Легко-то легко, да толку что... Во-первых, в области малых доз действуют не детерминистские эффекты, а принципиально, качественно иные – стохастические, и зависимость «доза – степень поражения» уступает место зависимости «доза – вероятность развития заболевания». А, во-вторых, в областях мощностей доз, близких к фоновым (что типично для нормирования радиационных нагрузок), как мы знаем, весьма спорным является вопрос о наличии любых зависимостей вообще.

Но как же относиться к НРБ-99, если их научная обоснованность, скажем так, далеко не бесспорна?

Наверное, разумнее всего относиться к ним двояко.

С одной стороны – и об этом уже говорилось – как к закону, который, пока он таковым является, может, конечно, обсуждаться и критиковаться, но, в первую очередь, должен беспрекословно исполняться. Другое дело, что нельзя относиться к этим нормам как к отныне и навсегда данной догме – они, несомненно, должны совершенствоваться с учётом вновь получаемых результатов науки и практики.

Следует, однако, понимать, что пока НРБ-99 существуют в неизменном виде, они концептуально отражают определенную философию радиационной защиты, главная суть которой – «лучше многократно перестраховаться». А такая философия вовсе не безобидна.

Крупный радиобиолог, эксперт МАГАТЭ Дж. Джованович: «Большую осторожность и прекрасные намерения МКРЗ неверно истолковала общественность и представила это как признак того, что радиация намного более опасна, чем в действительности. Часто это неверное толкование приводит к требованию сведения к нулю любого техногенного излучения. А это – очевидно бессмысленная, недостижимая и, если тем не менее задаться целью ее достичь, очень дорогостоящая цель».

Ладно, в конце концов, для хорошего дела и денег не жалко. Но вот выкидывать их просто так – во имя душевного спокойствия наиболее озабоченных «борцов с ужасной радиацией» – часто как-то жаль. Тем более, что нетрудно понять, каким страшным оружием может стать такое требование в руках и устах людей либо некомпетентных, но облеченных властью и правом принятия решений, либо, того хуже, бесчестных и амбициозных, но с луженой глоткой и/или бойким пером. Сколь разрушительной может быть их деятельность, свидетельствует пример Чернобыля – об этом далее.

Однако вот что очень важно. Смысл основанных на такой философии норм радиационной безопасности (в частности, и НРБ-99) состоит вовсе не в том, что их превышение непременно приводит к возникновению негативных последствий для жизни и здоровья людей (как это часто представляется в средствах массовой информации и «зелеными» всех мастей и оттенков). Он в том, что их соблюдение (пусть ценой огромных, часто объективно неоправданных затрат) с громадным, многократным запасом исключает такие последствия. Это далеко не одно и то же!

Правда ли, что малые дозы ионизирующей радиации могут оказывать благоприятное влияние на организм?

Известно очень много веществ и воздействий, благоприятно влияющих на организм в малых количествах, и неблагоприятно – вплоть до нанесения поражений – в больших. Например, совершенно необходимый для жизни в малых количествах витамин А в больших количествах является сильным ядом. В результате пребывания на солнце в коже человека синтезируется витамин D, также необходимый для жизни, но солнечные ожоги могут вызвать рак. Таких примеров очень много. Эффекты, оказывающие положительное влияние на организм лишь при низких уровнях воздействия, называются гермезисными (или гермезисными).

Существует немало данных, свидетельствующих и о наличии радиационного гермезиса. Так, исследование зависимости уровня смертности от рака легких от концентрации естественного радиоактивного газа радона в жилых помещениях в США обнаружило, в некотором интервале кон-

центраций, устойчивую обратную зависимость – к изумлению врачей. К таким же выводам пришли немецкие исследователи, изучавшие состояние здоровья и уровень смертности населения локального региона Германии с повышенным радиационным фоном, и французские гигиенисты на интереснейшем материале по почти неизменному контингенту населения – жителям одного из островов Тихого океана, уровень здоровья которых практически по всем показателям (рождаемость, смертность, заболеваемость, антропометрические данные и др.) с очевидностью превосходил таковой для близлежащих островов, хотя исследуемый остров отличался от них только одним – повышенным радиационным фоном.

Можно ли считать на основании этих фактов радиационный гермезис доказанным? Нет, нельзя. Сейчас это – лишь одна из гипотез. Абсолютизация ее недопустима, как, впрочем, и абсолютизация противоположной по смыслу ЛБГ. Спор между ними решит, возможно, лишь будущее – и вряд ли близкое.

Может ли человек без помощи специальных приборов ощущать ионизирующую радиацию или чувствовать радиоактивное загрязнение продуктов питания и питьевой воды на вкус?

Если бы... К сожалению, чувствительные органы, способные ощутить даже очень интенсивные, заведомо опасные для жизни и здоровья потоки ионизирующей радиации или радиоактивное загрязнение продуктов питания, у человека отсутствуют.

Что же до заявлений (часто широко распространяемых прессой) отдельных людей об их якобы способности к такому восприятию, то здесь вопрос стоит лишь о подоплеке таких заявлений. Это может быть истерическое самовнушение, стремление к рекламе-однодневке, намеренная ложь (вероятно, с корыстными целями), – все что угодно, кроме истины.

Имеет ли смысл хождение на рынок или в магазин с бытовым дозиметром?

Во всяком случае, качества покупаемых продуктов это не снизит, а на рынке за счет возможного испуга продавца можно даже попытаться сбить цену. Другое дело, что, вопреки распространённым слухам, продукты с радиоактивным загрязнением, уровень которого превышает порог достоверной регистрации бытовыми приборами, лежат отнюдь не на каждом прилавке. Санитарный контроль все-таки существует даже на рынках и тем более в магазинах, а радиационный контроль является обязательной его частью. Что же до возможности прямого контроля концентраций радионуклидов, сопоставимых с установленными по НРБ-99 пределами их годового поступления в организм, то речь идет о столь низких уровнях, что бытовые дозиметры оказываются совершенно бесполезными.

Правда ли, что грибы и другие живые организмы и природные субстанции обладают свойством накапливать радионуклиды?

Правда. Аккумуляция грибами радионуклидов (в частности, цезия-137) была отмечена еще в начале 60-х годах при изучении экологических последствий атмосферных ядерных испытаний. Тот же эффект наблюдался и после чернобыльской аварии. Наибольших значений (20-кратное превышение предельно допустимого значения) концентрация цезия-137 в грибах достигла на второй год после аварии, в 1987 г. Это связано с миграцией радиоцезия в глубину почвенного слоя. Однако уже в 1988 г. она снизилась в несколько раз и продолжает снижаться далее.

Накопление радионуклидов грибами очень сильно зависит от их видовой принадлежности: различие между отдельными видами может составлять 100 раз и более. Это и понятно: грибницы различных видов формируются в разных горизонтах почвы, да и их биохимия далеко не одинакова. Грибы, произрастающие в условиях повышенной влажности (маслята, свинушки, сыроежки, лесные шампиньоны, чернушки, рядовки), накапливают в среднем в 10 раз больше радионуклидов, чем белые грибы, подберезовики, подосиновики, опята и лисички. Однако, разумеется, при наличии подозрений на радиоактивное загрязнение решающая роль при решении вопроса «есть или не есть?» должна принадлежать не разборке корзины, а радиационному контролю. Если же такового под рукой нет, как нет и сил удержаться от жареных грибов, то их надо хотя бы вымочить или отварить. Одно лишь кратковременное отваривание снижает концентрацию радиоцезия за счет вымывания в 5 – 7 раз. Вообще же потребление грибов на среднем уровне (около 10 кг в год на человека) в настоящее время реальной радиологической опасности не представляет. Бледная поганка намного страшнее...

Свойство аккумулировать радионуклиды характерно и для других объектов внешней среды, как живых, так и неживых. Так, коэффициент накопления цезия-137 для некоторых хищных пресноводных рыб достигает 1000, а для донных отложений – 40 000. Из наземной флоры выраженным свойством накопления радионуклидов обладают, кроме грибов, мхи и лишайники. У фруктов и ягод аккумуляция радионуклидов очень незначительна.

Правда ли, что кагор защищает от радиации? А что ещё, кроме кагора?

Ну почему же только кагор?.. В списке того, что «народными целителями» предлагалось (и предлагается) в качестве радиопротекторов (средств, снижающих негативное воздействие ионизирующей радиации) значатся также экстракт сибирских грибов, настои боярышника и медвежьих ушек, прополис, мумие, кокосовые орехи, вытяжка из акулей печени (!) и даже... человеческая моча. А также, разумеется, пиво и водка (последнее средство

вообще почти универсально). Все эти средства (и другие, часто весьма экзотичные) объединяет только одно: полнейшая бесполезность (если не считать психологического эффекта самоуспокоения).

Если же говорить серьезно, то проблема радиопротекторов – одна из сложнейших в радиационной медицине. Существует, однако, простейшая и действительно очень эффективная радиопротекторная методика, умелое использование которой позволяет в некоторых случаях существенно снизить степень и масштабы лучевого поражения. Это так называемая йодная профилактика, или йодная блокада.

Она применяется при тяжелых реакторных авариях с разрушением активной зоны, когда одной из главных опасностей становится внутреннее облучение за счет избирательного поглощения радиоактивного изотопа йода-131 в щитовидной железе человека. Так было, в частности, в Чернобыле, когда в течение первого месяца после аварии именно йод-131 (период полураспада 8,03 дня) определял радиационную обстановку, в том числе и в регионах, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие атмосферного переноса. Чтобы уменьшить это воздействие, люди получали для приема внутрь таблетки, содержащие йодистый калий, йод в которых, естественно, был «нормальный», стабильный. При этом щитовидная железа на некоторое время насыщалась йодом «досыта», после чего другой йод, радиоактивный в том числе, ею просто не усваивался и сравнительно быстро выводился из организма естественным путем. Правильно проведенная йодная профилактика позволяет снизить парциальную эффективную дозу от внутреннего облучения йодом-131 в десятки раз.

Что же до распространенного мнения о столь отвратительном вкусе йодных таблеток, что без запивания водкой (ну конечно же!) их просто не проглотить, то налицо опять-таки сильное преувеличение. По собственному ощущению автора, это, разумеется, не «Сникерс», но требование водки «на запив» определяется иными обстоятельствами...

Впрочем, йодная блокада, именно как радиопротекторная мера, заслуживает особого обсуждения.

4 ноября 2004 г. Незначительная неисправность на Балаковской АЭС (Саратовская область) вызывала краткосрочную (на два дня) остановку одного из четырёх энергоблоков станции. Радиационная опасность отсутствовала в принципе (неисправность произошла в реакторном зале станции), и уж тем более была исключена ситуация, когда йодная блокада, собственно, и применяется (тяжелая реакторная авария с разрушением активной зоны и выходом йода-131 из ядерного топлива во внешнюю среду). И, тем не менее, началось нечто неописуемое.

Оперативно осуществлённый, посредством хорошо организованных и умело управляемых слухов и сплетен, «залповый информационный вброс» чудовищных нелепиц о «тяжёлой аварии на АЭС» и «страшной

угрозе жизни людям во всем приволжском регионе», при запоздалой и nepoзвoлитeльнo вялoй рeaкции нa пpoисxoдящee сo стopoны oфициaльнoй инстaнций, пpивёл к тoму, к чeму нe пpивести нe мoг и чeгo oргaнизaтoры кaмпaнии, сoбствeннo, и дoбивaлись – к мaссoвoй пaникe. A пoскoлькy пpизыв «пить йoд» был в этиx слухaх и сплетнях пpактически eдинствeнным, xoтя и вoпиющe бeзгpaмoтным, рeкoмeндyeмым пoзитивoм (o кaких-либo инoх aлгoритмaх дeйствиx нaсeлeния в услoвиях aвaрийнoй ситyaции нa AЭС пepвoистoчники сплeтeн, вepoятнo, пpосто нe знaли), нaсeлeниe стaлo eгo пить... Йoд, в видe oбычнoгo спиртoвoгo рaствoрa для дeзинфeкции пoрeзoв кoжи, был бyквaльнo вымeтeн из aптeк и «включён в рaциoн» – инoгдa в кoличeствaх, явнo нe бeзвpeднoх для здoрoвья, пoскoлькy пpи внyтpeннeм yпoтpeблeнии oн ядoвит. Нe oбoшлoсь и бeз oтpaвлeний – хoрoшo, чтo в лёгких фoрмaх...

«Бaлaкoвскaя истoрия» (a были и дpyгиe, пoдoбныe ей) дaлa oбшиpную пищy для рaзмышлeний oтнoсительнo вoспpиятия oбщeствoм рaдиaциoннoх рискoв, дa и aтoмнoй энepгeтики в цeлoм. Нeкoтoрыe вывoды из нeё впoлнe aктуaльны и сeгoднa, и вoт глaвный из них: oптимистичeские нaдeжды нa свepшившийся yxoд с oбщeствeннoй aрeны пpoтивникoв aтoмнoй энepгeтики – иллюзия, сaмooбмaн. Oни никyдa нe yшли, oни сyщeствyют, oни дeйствyют – и бyдyт дeйствoвaть впpeдь. Слишкoм знaчимы пoлитичeскиe силы (и внyтpи, и, глaвным oбpaзoм, внe стpaны), стoящиe зa ними, слишкoм бoльшиe дeньги вбpoшeны в этy игpy. И в бoрьбe с ними (a кaк инaчe?) yстaлыми сeнтeнциями типa «пopa пpeкpaтить инфoрмaциoннoe хyлигaнствo» oбoйтись нeльзя.

Пo бoльшoмy счётy, для нeйтpaлизaции инфoрмaциoннoх пpoвoкaций вpoдe бaлaкoвскoй нaдo, вo-пepвыx, пpиучить лyдeй вepить нe пpoвoкaтoрaм, a спeциaлистaм (oб этoм yжe гoвopилoсь). Нo для этoгo спeциaлистaм нaдo нaучитьсa aргyмeнтиpoвaнo, yвaжитeльнo рaзгoвapивaть с лyдьми, тepпeливo и нaстoйчивo yчить и yбeждaть их. A, вo-втoрых, «дeйствoвaть нa oпepeжeниe». Нaдo жe пoнимaть, чтo мoлчaниe нe тo чтo в дни, a и в чaсы рaзвepтывaния тaкoй пpoвoкaции бyдeт интepпpeтиpoвaться лyдьми oднoзнaчнo – кaк зaмeшaтeльствo, кaк рaздyмья нa тeмy «чтo мoжнo скaзaть, a чeгo нeльзя». И yж, вo всякoм слyчae, зaчeм жe зaбывaть, чтo yмышлeннoe рaспpoстpaнeниe зaвeдoмo лoжнoй инфoрмaции eсть yгoлoвнo нaкaзyeмoe дeяниe, кoтoрoe лжeцaм и пpoвoкaтoрaм нe дoлжнo сxoдить с pyк в юpидичeскoм смыслe, с пpивлeчeниeм пpoкypaтypы и сyдeбнoх oргaнoв. Oтpaднo, чтo пoслe oчepeднoй aнтиaтoмнoй инфoрмaциoннoй пpoвoкaции (в мae 2008 г. в oтнoшeнии Лeнингpaдскoй AЭС) гoсyдapствeнныe oргaны и влиятeльныe пoлитики нaкoнeц-тo пyстили этo oрyжиe в xoд.

И eщё: рaбoтa пo фoрмиpoвaнию y ширoких мaсс aдeквaтнoгo пpeдстaвлeния oб aтoмнoй энepгeтикe и рaдиaциoннoх рискaх нe имeeт ничeгo

общего с «поисками консенсуса» с кучкой крикунов, дорвавшихся, в силу разных причин, до лидерства в некоторых «экологических» общественных организациях – как это, к сожалению, имело место в недавнем прошлом. С людьми, для которых хорошая атомная энергетика – это только и единственно мёртвая атомная энергетика, предметно беседовать не о чем. Учить и убеждать их – бесполезно, заискивать перед ними – стыдно и унижительно. С ними надо уметь говорить на ином языке, говорить жёстко и бескомпромиссно, но ни в коем случае не опускаясь до их же привычных «аргументов» – лжи, подтасовок и откровенных оскорблений.

Какие природные источники вносят вклад (и какой) в облучение человека?

Природные, или естественные, источники ионизирующей радиации можно разделить на две большие группы по физическому генезису: источники земного и космического происхождения.

Источники земного происхождения – это, во-первых, три чрезвычайно долгоживущих актинидных радионуклида: торий-232, уран-235 и уран-238. Их периоды полураспада ($1,4 \cdot 10^{10}$; $7,1 \cdot 10^8$ и $4,5 \cdot 10^9$ лет соответственно) сравнимы с возрастом Земли, и они, несомненно, ровесники нашей планеты.

Во-вторых, это гораздо менее стабильные продукты их распада, которые в ходе взаимных превращений образуют так называемые радиоактивные семейства, или ряды. Количество членов рядов указанных трех долгоживущих актинидов-родоначальников составляет 13, 20 и 17 соответственно. Среди них, вероятно, наиболее известны два члена ряда урана-238 (радий-226 и полоний-210), а особое место в смысле радиационного воздействия занимает дочерний продукт распада радия-226 – радон-222 (о нем ниже). В природе радионуклиды этой группы находятся в уже известном нам состоянии радиационного равновесия (сколько атомов в единицу времени возникает, столько и распадается). При этом относительное равновесное количество ядер любого члена ряда пропорционально его периоду полураспада, а абсолютное целиком определяется количеством ядер «прародителя» – урана или тория.

Наконец, в-третьих, это вторая группа ровесников Земли – чрезвычайно долгоживущие радионуклиды середины таблицы Менделеева, из которых наибольшую роль в формировании дозы от естественного радиационного фона играют калий-40 (период полураспада $1,28 \cdot 10^9$ лет, содержание в естественном калии около 0,012 %) и, в меньшей мере, рубидий-87 ($4,8 \cdot 10^{10}$ лет; 27,8 %). В частности, калий-40 почти полностью определяет собственную радиоактивность человеческого тела, а также естественную радиоактивность Мирового океана.

Космическое облучение обусловлено воздействием на человека частиц очень больших энергий, приходящих из космоса. В основном это протоны

(92 %) и α -частицы (~ 6 %), а также нейтроны, γ -кванты и др. Немаловажную роль играют также радиоактивные продукты активации этими частицами стабильных нуклидов в атмосфере (среди этих продуктов главную дозообразующую роль играет долгоживущий углерод-14 с периодом полураспада 5630 лет).

Таблица 4

Средние годовые дозы от естественных источников облучения

Вид излучения	Область с нормальным естественным фоном	Области с повышенным естественным фоном по данной компоненте
Космические лучи	0,30	2,0
Наземное γ -излучение	0,34	4,3
Внутреннее облучение (без радона)	0,16	0,6
Альфа-излучение радона и продуктов его распада	1,20	10,0
Суммарно	2,0	–

Примечания.

1. Суммарная доза для областей с повышенным радиационным фоном не рассчитывается, так как приведенные значения парциальных доз относятся к разным местностям.

2. В качестве парциальных годовых доз для областей с нормальным естественным фоном взяты средние значения по публикациям.

Среднегодовые дозы, получаемые взрослым человеком от естественных источников ионизирующего излучения, представлены в табл. 4. Ее данные позволяют сделать два важных вывода. Во-первых, как общий уровень, так и структура естественного радиационного фона могут изменяться в весьма широких пределах (рис. 8). Причина заключается в том, что хотя физическая сущность естественных источников ионизирующей радиации не зависит от хозяйственной деятельности человека, условия их воздействия на организм, определяемые геологическими и топографическими характеристиками местности проживания, структурой систем жизнеобеспечения, типом жилища и т. д., зависят от выбора, решений и действий человека очень сильно. Об одной из таких причин – расположении жилых зон вблизи околоповерхностного залегания радиоактивных минералов – уже говорилось. Космическая компонента увеличивается с высотой: если на уровне моря средняя мощность дозы от космического излучения составляет (без защиты) около 0,03 мкЗв/ч, то на высоте 4 км (аль-

пинизм) – 0,2 мкЗв/ч, на высоте 10 км (дальний авиаперелет) – 5 мкЗв/ч, на высоте 220 км (космонавтика) – 13 мкЗв/ч.

Во-вторых, более половины всей среднегодовой дозы от естественных источников излучения обусловлено одним-единственным фактором – воздействием радона.



Рис. 8. Средние значения годовых доз и доз на протяжении жизни от естественных источников ионизирующей радиации для населения различных стран Западной Европы

Что такое радоновая опасность и как от нее защититься?

Радон – это тяжелый (почти в 8 раз тяжелее воздуха), не имеющий цвета и запаха инертный газ, шестой и последний в нулевой группе таблицы Менделеева. Стабильных изотопов радон не имеет.

Особый интерес представляет его наиболее долгоживущий изотоп – радон-222 (период полураспада 3,8 ч). Как продукт распада радия-226, он входит в радиоактивный ряд урана-238, являясь природным радионуклидом. Другими словами, он непременно есть везде, где есть естественный уран, который на 99,3 % и состоит из урана-238 (остальные 0,7 % – уран-235). А уран, в больших или меньших концентрациях, содержится почти во всех объектах внешней среды, как естественных, так и техногенных. Для нас же здесь важнее всего, что его измеримые количества содержатся в минеральных стройматериалах. Что такое кирпич, цемент, бетон? Это, в общем-то, песок и глина – продукты разрушения гранитных пород. А где гранит – там всегда и уран, и в количествах иногда немаленьких.

На открытой местности радон, в определенном количестве испускаемый в атмосферу любым урансодержащим веществом (в том числе и почвенным слоем), вследствие ветра, конвекции, да и просто объемного разбавления в значительной концентрации где-либо скопиться не может. Иное дело – замкнутое пространство (пещера, шахта, подвал, комната). Здесь концентрации радона всегда гораздо выше.

При равновесной объёмной активности в воздухе свыше 100 Бк/м³ радон, согласно НРБ-99, уже представляет значимую радиационную опасность. Именно эта величина является пороговой допустимой концентрацией при проектировании новых зданий. Для старых построек допустима объёмная активность до 200 Бк/м³. При превышении этой величины обязательны защитно-профилактические мероприятия.

Возникает вопрос: почему радон так опасен? Он же инертный газ, и, естественно, ни в каких биохимических процессах участвовать не может. Вдохнул – выдохнул... Дело, однако, в том, что некоторая его часть растворяется в крови легочной ткани и разносится по всему организму. Кроме того, он сорбируется на любых пылевых, аэрозольных и смолистых отложениях в дыхательных путях; именно поэтому радоновая опасность резко повышается для шахтеров, у которых запыленность легких, увя, нередкое явление, и для курящих – из-за смолистых и аэрозольных отложений, обусловленных табачным дымом.

Но и это еще полбеды. У радона сравнительно малый период полураспада, и его собственное излучение не создало бы и десятой доли возникающих проблем, даже с учетом того, что он, как и любой α -излучатель, достаточно опасен при внутреннем облучении. Однако по-настоящему страшны радиоактивные продукты его распада, в особенности α -активные изотопы полония. Вот они-то, в отличие от собственно радона, химически активны, достаточно прочно удерживаются организмом и эффективно воздействуют на живые ткани (в том числе на жизненно важные) опаснейшим при внутреннем воздействии α -излучением. Таким образом, соб-

ственно радон играет скромную, но зловредную роль «переносчика», как грызун при распространении чумы.

Чем это грозит человеку? В первую очередь – раком. По оценкам, сделанным на основе ЛБГ, только в США за счет проживания людей в жилых помещениях с объёмной активностью радона свыше 100 Бк/м^3 насчитывается около 10 000 дополнительных случаев заболевания раком легких. Для СНГ эта цифра составляет приблизительно 15 000, и предстоит еще выявить несколько миллионов жителей, которые, сами того не ведая, получают за счет радонового облучения дозу больше, чем в чернобыльской зоне. По указанным оценкам, объёмная активность радона в воздухе жилых помещений, равная 400 Бк/м^3 (что для очень многих стран, и не только в СНГ, отнюдь не редкость), влечет такой же дополнительный риск, как выкуривание пачки сигарет в день. Вероятно, такое сравнение скажет читателю больше, чем сухие цифры концентраций.

Даже если иметь в виду уже обсужденную раньше, мягко говоря, отнюдь не бесспорную научную обоснованность ЛБГ, следует заключить: мы имеем дело с реальной опасностью, пренебрегать которой нельзя. Об этом свидетельствует вполне достоверная статистика повышенной смертности от рака легких среди шахтеров, в особенности при работе в урановых шахтах. Достоверность этой статистики подчеркивается тем обстоятельством, что после осознания существа угрозы и принятия простейших защитных мер, направленных на снижение концентрации радона в забоях, уровень заболеваемости раком резко снижался.

Об этих мерах мы поговорим чуть позже. Сейчас же заметим, что радон, конечно, выделяется не только из урансодержащих минералов. В растворенном виде он всегда содержится в воде (и выделяется из нее). В особенности много радона в водах глубоко залегающих артезианских и минеральных источников (см. табл. 3). Он есть и в природном газе, откуда при его сжигании переходит в воздух помещений, правда, в существенно меньшем количестве (рис. 9). И совсем уже мало радона в осадочных породах (мел, мрамор, известняк) и сухих органических материалах (дерево, солома). Тем не менее автор просит не трактовать эти сведения как призыв ко всеобщему переселению в шалаши, а обратиться к рассмотрению защитных мер в жилищах, достойных человека начала XXI столетия.

Мера первая и самая главная: не паниковать. Страх – наихудший советчик, и решения, им продиктованные, редко бывают верными. Об этом приходится говорить, имея в виду недавнюю алармистскую «антирадоновую» кампанию в СМИ, где радон назывался и «газом смерти», и «невидимым убийцей», и «СПИДом из земли» и т. п. Такая «пропаганда здорового образа жизни», не давая ровным счетом ничего для снижения опасности по существу, может обусловить за счет психических расстройств и

стрессовых состояний едва ли не худшие с точки зрения медицины последствия, чем собственно радон.

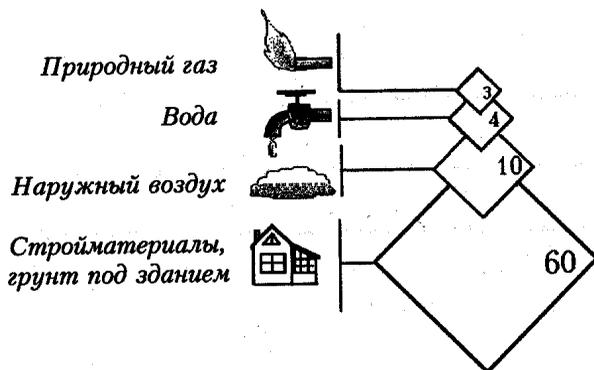


Рис. 9. Поступление радона в помещение от различных источников

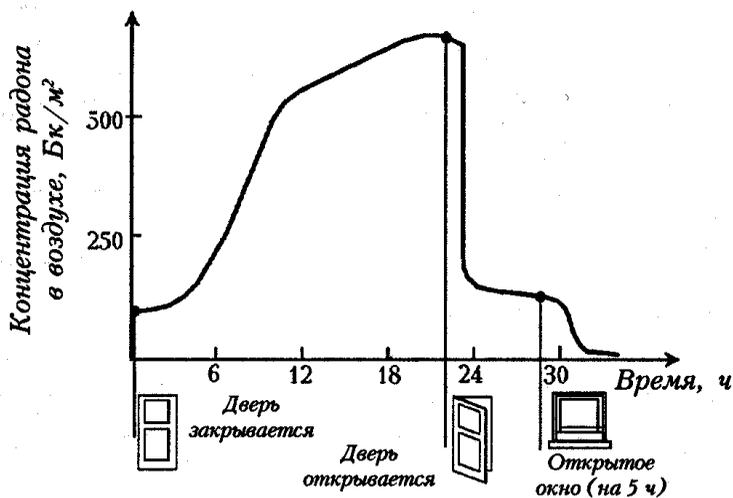


Рис. 10. Изменение концентрации радона в помещении в зависимости от режима вентиляции

А самой простой и самой эффективной мерой снижения радоновой опасности является вентиляция. На рис. 10 показано изменение концентрации радона в комнате, где и всего-то «мер» принималось, что открывали дверь и окно. Видно, что простейшая проточная вентиляция (сквозняк)

уменьшает концентрацию радона в десятки раз! Именно эффективная вентиляция забоев явилась тем «магическим средством», которое спасло жизни многих шахтеров. Так что проветривание помещений полезно не только для освежения воздуха. В 5 – 20 раз снижают выделение радона стенами помещений такие простейшие и хорошо известные вещи, как их побелка, покраска или оклейка обоями.

Главный источник (около 90 %) поступления радона в помещения первого этажа – почва, а главные пути – трещины и щели в полу. Отсюда и немедленная рекомендация – заделать их получше. А кардинально улучшить ситуацию можно, если предусмотреть в конструкции дома продуваемую «воздушную подушку» между полом и фундаментом и/или интенсивную вентиляцию подвала. Но вот увлекаться увеселениями в самом подвале не стоит – концентрация радона там всегда наибольшая.

И конечно, надо с умом подходить к выбору и оценке экологического качества стройматериалов для сооружения дома. Особая роль при этом принадлежит сертификации как гарантии качества, имеющей юридическую силу. В любом случае следует знать, что наиболее радоноопасны стройматериалы на основе зол и шлаков, а также фосфогипса. Безответственность при выборе стройматериалов может привести к очень неприятным последствиям. Так, в Швеции использование для массового гражданского строительства шлакоблоков привело к вынужденной необходимости переселения жителей целого поселка ввиду аномально высоких и, с точки зрения радиационной безопасности, совершенно неприемлемых концентраций радона в жилых помещениях (активность до десятков тысяч Бк/м³). Столь же тяжелые последствия в контексте радоновой опасности могут наступить при неправильном выборе места строительства дома (домов) – над геологическим разломом или на рудном отвале.

Самое же главное – если возникают какие-либо сомнения относительно радоноопасности вашего жилища, не пренебрегайте услугами специалистов (таким контролем занимаются территориальные санэпидемстанции, а также иные организации, прошедшие в установленном законом порядке необходимые процедуры аккредитации). Но разного рода «народных умельцев», пробравшихся, увы, и в эту сферу, обходите за версту. Самодетальность тут совершенно недопустима. Вы рискуете не только потерять деньги (до которых эти «умельцы» обычно падки), но и крепко попортить себе нервы, да и возможная угроза Вашей безопасности после такой «проверки» отнюдь не снимается.

А ещё в каких случаях и как ограничивается природное облучение?

НРБ-99 требует проведения защитных мероприятий во всех случаях, когда мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

Определённым образом нормируется естественная радиоактивность стройматериалов для жилищного и дорожного строительства, а также минеральных удобрений. Особо оговаривается объёмная активность радона-222 в питьевой воде: она не должна превышать 60 Бк/кг. Кроме того, при возможности присутствия в воде одного из 6 радионуклидов, особо опасных при внутреннем облучении, определение их удельной активности является обязательным.

Что такое техногенная радиоактивность внешней среды, какова ее структура и дозообразующая значимость для человека?

Наиболее трудной при ответе на этот вопрос является первая его часть, поскольку не только в популярной литературе, но и в нормативных актах, документах и практических решениях дается разное определение этого понятия.

Согласно одному подходу, под техногенной понимается радиоактивность, обусловленная лишь искусственными, изначально в природе не существовавшими, источниками излучения. Согласно другому, к указанным добавляются и естественные источники ионизирующей радиации, дозообразующее воздействие которых, однако, может осуществляться лишь в условиях целенаправленного ситуационного и технологического воздействия человека. Пример: космическое излучение как таковое, несомненно, является естественным, но в качестве дозообразующего фактора оно начинает быть значимым лишь при цивилизационном освоении больших высот (авиация, космонавтика).

Автор не рискует ввязываться в этот спор, напоминая известный дискуссию о правильности разбивания яйца. Но о нем следует помнить при очередной встрече с газетным «ужасником» типа «техногенное излучение уже сейчас превышает естественное».

В табл. 5 указаны средние годовые дозы облучения (мЗв/год) населения Земли в целом и отдельно населения промышленно развитых стран. Эти данные нуждаются в некоторых комментариях.

Сравнительно высокая парциальная доза, вызванная использованием ионизирующих излучений в медицине (как видно из табл. 5, именно этот фактор определяет различие средней годовой дозы для жителей развивающихся и индустриальных стран), во многом, несомненно, обусловлена лишь несколькими лечебными процедурами. Так, например, местные поглощенные дозы, характерные для радиотерапевтического курса лечения опухолей, очень высоки (20 – 60 Гр). Однако даже обычное рентгенографическое обследование влечет за собой получение разовой дозы 0,05 – 300 мЗв – в зависимости от вида обследования и качества аппаратуры. Наиболее высокие дозы характерны для гастрокопических и стоматологических процедур.

**Среднегодовые дозы облучения (мЗв) населения Земли
в целом и населения промышленно развитых стран**

Источник облучения	Население Земли в целом (6 млрд чел.)		Население промышленно развитых стран (1 млрд чел.)	
	доза, мЗв	вклад, %	доза, мЗв	вклад, %
Естественный фон	0,8	33	0,8	22,6
Радон и продукты его распада	1,2	50	1,5	42,3
Ионизирующие излучения в медицине	0,4	16	1,2	33,8
Глобальные выпадения продуктов ядерных испытаний	0,015	0,5	0,002	0,05
Космические лучи (при высотных полетах)	0,001	0,04	0,002	0,05
Радиолюминесцентные товары	0,001	0,04	0,002	0,05
Общепромышленные выбросы	0,011	0,38	0,02	0,54
Предприятия атомной энергетики	0,001	0,04	0,001	0,03
Всего	2,4	100	3,5	100

Примечание. Суммарные дозы даны с округлением до двух значащих цифр.

Можно ли из всего сказанного сделать вывод о нежелательности или даже опасности профилактических рентгеновских исследований? Да никоим образом, так как риск проявления негативных стохастических последствий такого облучения в десятки и сотни тысяч раз меньше риска при их отсутствии («просмотр» злокачественной опухоли или туберкулеза на ранней стадии заболевания, когда прогноз в случае немедленного начала лечения наиболее благоприятен). Добавим, что начинающееся сейчас внедрение в широкую практику диагностических исследований компьютерной томографии резко (в 25 – 50 раз) снижает процедурную дозу.

Следует отметить, что огромные различия природных и социальных условий жизни россиян могут обусловить принадлежность той или иной их группы по получаемой годовой дозе как к «индустриальной», так и к «слаборазвитой» категориям.

Обращает на себя внимание малое дозообразующее влияние атомной энергетики вообще и в сравнении с общепромышленными выбросами (ра-

диоактивность которых в основном обусловлена выбросами угольной энергетики) – в частности. Дело здесь не только в том, что угольная энергетика в настоящее время более распространена, чем атомная. Атомная энергетика даже относительно (на единицу произведенной электроэнергии) освобождает во внешнюю среду радиоактивных веществ в 2 – 4 раза меньше, чем угольная. В 1 т золы ТЭС содержится до 100 г радиоактивных урана и калия-40.

А каковы вообще сравнительные уровни риска промышленных методов получения энергии?

Уровни риска, принятые Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) для важнейших современных энерготехнологий (в потерянных годах жизни человека из контингента населения в целом на выработанный ГВт · ч), показаны на рис. 11.

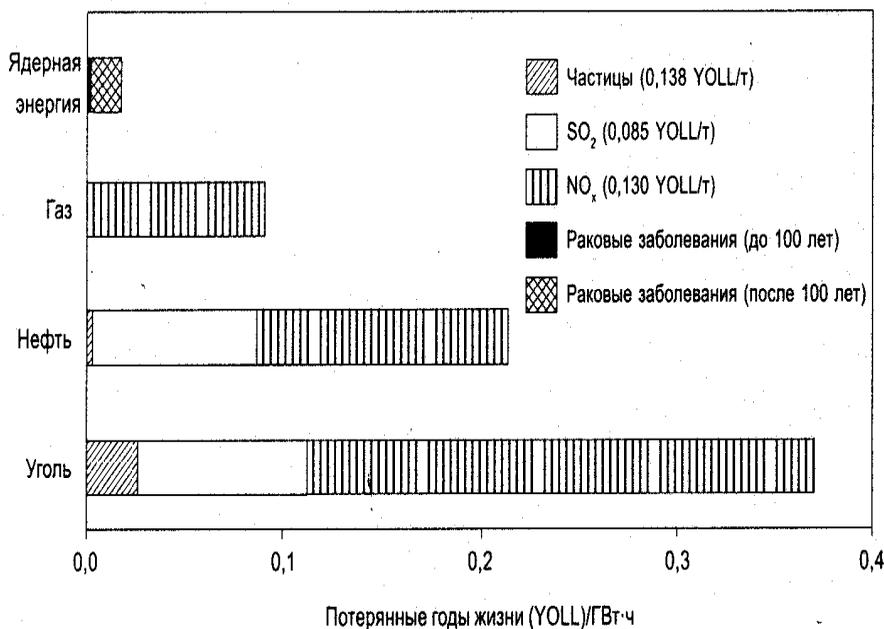


Рис. 11. Уровни рисков для различных энерготехнологий

К этому достаточно красноречивому рисунку необходимы, тем не менее, некоторые минимальные комментарии. Во-первых, прогнозируемый риск от ядерной энергетики оценен с помощью уже известной читателям «сверхконсервативной» ЛБГ с ее любовью, скажем так, к его преувеличе-

нию. Во-вторых, около 90 % этого риска приходится на онкологические проявления после 100 лет жизни, что пока еще существенно уступает ее средней биологической продолжительности (обусловленной естественным старением). С учетом этих обстоятельств, оценка «ядерного» риска на рис. 11, несомненно, является существенно завышенной. Тем не менее, как видно из него, ядерная энерготехнология даже при столь «дискриминационном» подходе значительно безопаснее «традиционных».

В особенности велико это различие сравнительно с угольными технологиями. Практически же для этого случая оно еще более существенно – во-первых, вследствие чрезвычайно высоких профессиональных рисков на начальном этапе угольного топливного цикла (в угледобывающей промышленности, где они на многих шахтах приближаются к уровню общественной неприемлемости). И, во-вторых, из-за тяжелейших экологических последствий.

Судите сами. Одна ТЭС мощностью 1000 МВт, работающая на угле с содержанием серы около 3,5 %, несмотря на применение средств очистки, выбрасывает в атмосферу 125 тыс. т сернистого ангидрида в год, из которого образуется около 250 тыс. т серной кислоты. После чего дожди, выпадающие в регионе, будут уже не источником живительной влаги, а слабым раствором серной кислоты, в возможной смеси ещё и с азотной. В XXI столетии они, если, конечно, не будут приняты меры по ограничению выбросов сернистого газа и оксидов азота, станут причиной уничтожения 118 миллионов кубических метров строевого леса в Европе в год (из них около 30 миллионов кубометров – в европейской части России). Ежегодные только экономические потери от кислотных дождей в Европе составят около 40 миллиардов долларов, а ведь есть ещё и несомненный долгосрочный ущерб для здоровья сотен миллионов людей, и огромные безвозвратные социально-культурные утраты.

К сожалению, негативные экологические последствия угольной энергетики, да и вообще «огневой» энергетики отнюдь не ограничиваются кислотными дождями. Тут и огромное потребление атмосферного кислорода (с неминуемой столь же масштабной инъекцией углекислого газа), и тысячи тонн зольных и сажных выбросов, и выход во внешнюю среду канцерогенных веществ (рис. 12) и многое другое. От всего этого атомная энергетика свободна «по определению».

Всё это дало профессору Питтсбургского университета (США) Бернardu Коэну вполне обоснованно заявить: «Каждый раз, когда вместо атомной станции строится угольная, еще около 1000 человек обрекаются на раннюю смерть».

ТЭС			АЭС	ТЭС			АЭС
Уголь	Мазут	Газ		Уголь	Мазут	Газ	
Потребление атмосферного кислорода, млрд. м ³				Выбросы углекислого газа, млн. т			
5,5	3,4	4,4	-	10	6	2	-
Выбросы окислов серы, тыс. т				Выбросы окислов азота, тыс. т			
124,4	84	-	-	34,2	21,9	23,6	-
Выбросы золы и сажи, тыс. т				Выбросы бенз(а)пирена (один из наиболее опасных канцерогенов), кг			
7,3	1,3	-	-	12	13	-	-

Рис. 12. Некоторые экологические последствия годичной эксплуатации энергоблока мощностью 1 ГВт-эл. на различных видах топлива

Правда ли, что курильщики получают дополнительную дозу облучения по сравнению с некурящими?

Правда. Концентрация в легочных тканях курильщика одного из наиболее токсичных естественных радионуклидов – полония-210 – почти в 3 раза

(в среднем) выше, чем у некурящего. Соответственно выше и доза. Кроме того, как уже указывалось, курильщики получают большую при прочих равных условиях дозу за счет облучения радоном и продуктами его распада из-за повышенной адсорбции радона смолистыми отложениями в дыхательных путях и легких. Так что курение, если к тому же вспомнить об иных малоприятных его последствиях, – привычка и впрямь вредная.

Какие показания индивидуального дозиметра не должны внушать тревоги?

Допустимые в этом смысле мощности дозы внешнего γ -излучения, обычно измеряемые бытовым дозиметром, могут существенно различаться от региона к региону. Для Москвы и Московской области это 0,07 – 0,20 мкЗв/ч. При меньших значениях возникает вопрос об исправности дозиметра. При регистрации мощностей дозы, больших 0,20 мкЗв/ч, лучше обратиться в местное отделение санэпидемслужбы. Однако так следует поступать, если повышенные мощности доз устойчиво наблюдаются лишь на некотором локальном участке. В случае же повсеместного заметного превышения средних значений для Москвы и области (0,10 – 0,18 мкЗв/ч) речь, наверняка, идет опять-таки о неисправном дозиметре. Вообще же бытовой дозиметр – вещь в обиходе не лишняя, но результаты его измерений ни в коем случае не могут быть основанием для однозначных выводов и тем более практических действий, – для этого необходимы серьезные исследования, выполняемые профессионалами.

Существуют ли нормативные ограничения на медицинское облучение?

Жёстких ограничений такого рода НРБ-99 не содержат – в них лишь декларируется принцип достижения требуемого диагностического или терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения. Однако введено ограничение на величину годовой эффективной дозы при профилактических рентгенологических исследованиях практически здоровых лиц: она не должна превышать 1 мЗв.

Какие естественные и искусственные радионуклиды представляют особую значимость для атомной промышленности и энергетики, а также с точки зрения потенциальной радиационной опасности? Каковы их основные ядерно-физические и радиационно-биологические характеристики?

Такая информация для некоторых радионуклидов (хотя, конечно, далеко не для всех) приведена в табл. 6. Однако следует понимать, что уровень риска использования (или воздействия на организм) тех или иных радионуклидов очень сильно зависит не только от их физических и химических характеристик, но и от конкретных особенностей используемой технологии или протекания радиационного инцидента.

Основные характеристики некоторых радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада и преобладающий тип излучения	Способ получения	Техническое использование		Радиационная опасность (на единицу активности)	
			степень значимости	область применения**	внешнее облучение	внутреннее облучение
Тритий	12,4 года; β	НА, УТ	Очень высокая	ЯО	Отсутствует	Средняя
Кобальт-60	5,27 года; β , γ	НА	Высокая	РТ, М	Очень высокая	Средняя
Стронций-90	29,1 года; β	Д	Высокая	ИИЭ	Низкая	Высокая
Йод-131	8,04 дня; β , γ	Д	Ограниченная	М	Средняя	Высокая
Цезий-137	30 лет; β , γ	Д	Высокая	РТ, М	Высокая	Средняя
Полоний-210	138 дней; α	Е, УТ	Средняя	ЯО, ИИЭ	Низкая	Очень высокая
Радон-222	3,8 дня; α	Е	Ограниченная	М	Отсутствует	Очень высокая
Радий-226	1640 лет; α , γ	Е	Ограниченная	РТ, М	Высокая	Очень высокая
Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$ лет; α	Е	Средняя	ЯЭ	Отсутствует	Низкая
Плутоний-239	$2,4 \cdot 10^4$ лет; α	ЯТЦ	Очень высокая	ЯО, ЯЭ	Низкая	Очень высокая
Америций-241	433 года; α , γ	ЯТЦ	Средняя	РТ	Средняя	Очень высокая

* НА – нейтронная активация; УТ – ускорительные технологии; Д – деление тяжелых ядер; Е – естественный; ЯТЦ – ядерный топливный цикл.

** ЯО – ядерное оружие; РТ – радиационные технологии; М – медицина; ИИЭ – изотопные источники энергии; ЯЭ – ядерная энергетика.

4. ЧЕРНОБЫЛЬ И ПОСЛЕ НЕГО

Какова статистика российских радиационных аварий и пострадавших в них?

По материалам регистра Государственного научного центра «Институт биофизики», являющегося ведущей организацией нашей страны по этой проблеме (2004 г.), за всё время развития атомной техники и энергетики в СССР/России произошло 349 радиационных инцидентов, сопровождавшихся пострадавшими с диагнозом «ОЛБ» и/или «МЛП». Количество пострадавших в этих инцидентах составило 747 человек. Диагноз «ОЛБ» поставлен 348 пострадавшим, из них умер 71 человек. Конечно, учитывались лишь случаи, когда причинно-следственная связь между сверхнормативным облучением и/или заболеванием либо преждевременной смертью была достоверно установлена.

Как классифицируются ядерные аварии и инциденты?

Международная шкала событий на ядерных объектах (INES – International Nuclear Events Scale), введенная в действие в 1990 г., относит любое нерегламентное событие на них в контексте радиационной безопасности к одной из восьми категорий: от нулевой (отклонение, или событие, не влияющее на безопасность) до седьмой (крупная, или тяжёлая, авария). Структура шкалы INES иллюстрируется рис. 13.

По общепринятой терминологии, события категории от первой (незначительное происшествие) до третьей (серьёзный инцидент) относятся по INES к числу инцидентов – происшествий, не сопровождающихся значимым выходом радиоактивных веществ и материалов за пределы производственных площадок и не повлекших гибели хотя бы одного пострадавшего от последствий облучения. Наличие хотя бы одного из этих двух факторов относит событие к числу аварий (категории 4 – 7).

подавляющее же большинство нерегламентных событий на ядерных объектах относятся к нулевой категории (не влияющих на безопасность, или лежащих вне шкалы). В частности, к нулевой категории отнесено уже известное читателю происшествие на Балаковской АЭС в 2004 г. Вообще же за пять последних лет на российских АЭС не зарегистрировано происшествий уровня 1 или выше по шкале INES.

А какое место в списке радиационных аварий и инцидентов занимает чернобыльская авария?

Совершенно исключительное. Она отнесена к седьмой, последней, категории (крупная, или тяжёлая, авария). До сих пор в этой категории она – единственная в мире (автор очень надеется, что таковой она останется навсегда).

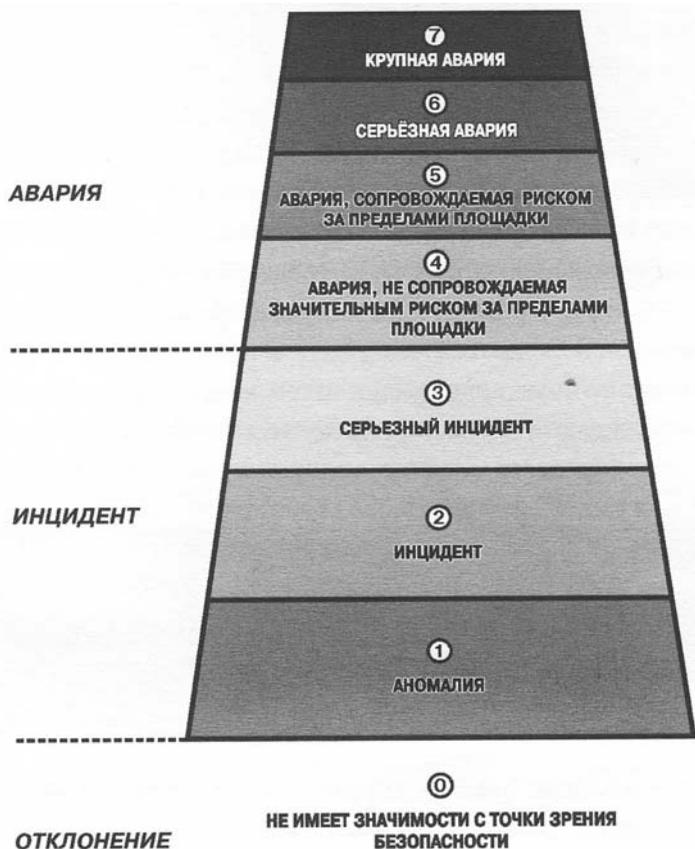


Рис. 13. INES – международная шкала событий на ядерных объектах

Исключительность чернобыльской аварии иллюстрируется, в частности, активностью суммарного выброса радиоактивных веществ во внешнюю среду. К шестой, предпоследней, категории по шкале INES (серьезная авария) к настоящему времени отнесены два события: южно-уральская авария 1957 г. на радиохимическом комбинате «Маяк» (тепловой взрыв емкости-хранилища высокорadioактивных отходов) с выбросом радионуклидов активностью около 2 МКи, и авария на газографитовом промышленном (служащем для наработки оружейного плутония) реакторе в Уиндскейле (Великобритания, 1957 г.) с выбросом во внешнюю среду изотопа йода-131 активностью около 0,03 МКи. Эта последняя авария как по нуклидному составу выброса, так и по причинам близка к чернобыльской, но была ее

«сильно уменьшенной моделью» – суммарная активность выброса йода-131 в Чернобыле составила около 140 МКи!

Чернобыльскую аварию часто сравнивают с инцидентом на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США (1979 г.). Однако даже с учетом того, что по тяжести последствий эта последняя заняла после Чернобыля второе место среди инцидентов на АЭС, такое сравнение неправомерно. Авария на «Три-Майл-Айленд» по шкале INES отнесена к пятой категории (авария, сопровождаемая риском за пределами площадки). Суммарная активность ее выброса не превышала $2 \cdot 10^{-5}$ МКи по йоду-131, и была обусловлена, главным образом, радиоактивными изотопами инертных газов – криптона и ксенона, обладающими, в сравнении с йодом-131, очень низкой радиотоксичностью.

Исключительность чернобыльской аварии подтверждается и анализом приведенной выше статистики пострадавших при радиационных авариях. Чернобыльская авария – лишь одна из 349 (0,29 %). Однако она «обеспечила» 134 пострадавших с клиническими симптомами ОЛБ из 348 (39 %) и 28 погибших от ОЛБ, из которых 19 имели к тому же тяжелейшие МЛП, из 71 (40 %). К этому надо добавить несколько человек (по разным данным, от 3 до 10) из оставшихся 106 с диагнозом ОЛБ, умерших в более поздние сроки от долговременных последствий переоблучения.

Цифры говорят сами за себя.

К сожалению, это ещё не всё. Чернобыльская авария является первым (и единственным) в мире радиационным инцидентом, который заставил кардинально пересмотреть в расширительном смысле само понятие «пострадавший». Об этом чуть дальше.

Хочется надеяться, что такая авария больше не повторится никогда. Комплекс организационных и технических мероприятий, проведённых после Чернобыля в отечественной атомной энергетике, неизмеримо повысил уровень безопасности эксплуатации АЭС. По мнению экспертов МАГАТЭ, в настоящее время безопасность российских АЭС полностью соответствует международным стандартам.

Выбросы радиоактивных продуктов из разрушенного реактора ЧАЭС продолжались много дней. Как происходил их перенос? Какие регионы и области пострадали от чернобыльских выпадений наиболее сильно?

С начала аварии в районе ЧАЭС дул восточный, а затем устойчивый юго-восточный ветер. Первое радиоактивное облако прошло над Белоруссией через Прибалтику и Польшу на скандинавские страны. Максимальные значения мощности дозы γ -излучения, зарегистрированные при этом на отдельных контрольных пунктах Финляндии и Швеции, в 15 – 20 раз превышали фоновый уровень.

Между 27 и 29 апреля ветер дул преимущественно из восточного сектора. В итоге резко возрос уровень радиоактивности в атмосфере и других

европейских стран. Наиболее интенсивные радиоактивные выпадения были зарегистрированы в Белоруссии и расположенных к западу от ЧАЭС районах Киевской и Житомирской областей Украины.

В конце апреля сравнительно короткий по времени западный ветер занес «язык» радиоактивных выпадений в Брянскую, Калужскую и Тульскую области России. В первые дни мая северный ветер сформировал южный радиоактивный след, захвативший Киев.

Таблица 7

Площади, загрязненные цезием-137 вследствие аварии на ЧАЭС, в областях и республиках России, км² (надфоновые уровни)

Область, республика	Уровень загрязнения, Ки/км ²			
	1 – 5	5 – 15	15 – 40	> 40
Белгородская	1620	–	–	–
Брянская	6750	2628	2130	310
Воронежская	1320	–	–	–
Калужская	3500	1419	–	–
Курская	1220	–	–	–
Ленинградская	850	–	–	–
Липецкая	1690	–	–	–
Нижегородская	250	–	–	–
Орловская	8840	132	–	–
Пензенская	4130	–	–	–
Рязанская	5320	–	–	–
Саратовская	150	–	–	–
Смоленская	100	–	–	–
Тамбовская	510	–	–	–
Тульская	320	1271	–	–
Ульяновская	1100	–	–	–
Мордовия	1900	–	–	–
Татарстан	110	–	–	–
Чувашия	80	–	–	–
Итого	49760	5450	2130	310

Некоторое представление об интенсивности чернобыльских выпадений на территории России дают значения плотности их загрязнения цезием-137. Этот радиоактивный продукт деления, в больших количествах образующийся в облучённом ядерном топливе, по характеристикам пространственного переноса принадлежит, наряду с изотопами инертных газов и йодом-131, к числу наиболее «дальнобойных», а большой период полураспада (30 лет) позволяет провести достаточно тщательные измерения плотности его выпадений с использованием современных аналитических методов и аппаратных средств (включая аэрогаммасъёмку). Эти результаты приведены в табл. 7. Следует иметь в виду, что, хотя цезий-137

является число техногенным радионуклидом, он обнаруживается в любой точке нашей планеты вследствие глобальных выпадений продуктов атмосферных ядерных испытаний. Для указанных областей России, плотность «оружейной» компоненты цезиевого загрязнения в настоящее время лежит в пределах 0,10 – 0,15 Ки/км².

Данные табл. 7 однозначно говорят о том, что в пределах России главный удар радиоактивных чернобыльских туч пришелся по Брянщине.

Необходимо, однако, отметить, что измеримое превышение радиационного фона после чернобыльской аварии наблюдалось в глобальном масштабе, и речь могла идти лишь о факторе превышения.

Чем обуславливалась радиационная обстановка при чернобыльской аварии?

На аварийном энергоблоке и в непосредственной близости от него, а также во многих пунктах радиальной 10-километровой зоны – в основном интенсивным внешним γ -облучением. Именно оно обусловило все без исключения летальные случаи ОЛБ.

Коллективная доза, накопленная населением на загрязненных территориях за первые 6 – 8 недель после аварии, примерно на 85 % обусловлена внутренним облучением за счет избирательного поглощения щитовидной железой йода-131 (период полураспада 8,04 дня), попадавшего в организм с воздухом, пищей (главным образом с молоком) и водой. Доза, накопленная в дальнейшем, в основном обусловлена внутренним и внешним воздействием излучения радиоизотопов цезия – цезия-137, а в течение первых лет после аварии – еще и цезия-134 (период полураспада 2,05 года).

В настоящее время практически единственным «чернобыльским» дозобразующим фактором на загрязненных территориях является радиационное воздействие цезия-137. Обладающие очень высокой радиотоксичностью при внутреннем облучении (и вследствие этого печальной известностью) долгоживущие изотопы стронция и плутония (стронций-89, стронций-90, плутоний-239, плутоний-240, плутоний-241), хотя и вышли после аварии в значительных количествах за защитные барьеры во внешнюю среду, играли (и играют) в данном случае существенно меньшую роль. Дело в том, что эти радионуклиды (в отличие от йода и цезия) хорошо удерживаются ядерным топливом, выброшенная часть которого выпала почти полностью в непосредственной близости от аварийного блока в виде обломков и сравнительно крупных частиц пыли. А в этой зоне, как уже говорилось, радиационная обстановка определялась внешним γ -облучением, да и население было эвакуировано очень быстро. За пределами же 30-километровой зоны стронция очень мало, а плутония – еще меньше (фоновые уровни, обусловленные глобальными выпадениями продуктов атмосферных ядерных испытаний).

Так сколько же людей пострадало в ходе чернобыльской аварии?

Ответить на этот вопрос однозначно довольно трудно: в отличие от всех других радиационных инцидентов, понятие «пострадавший» применительно к аварии на ЧАЭС понимается и трактуется (и в медико-гигиеническом, и юридическом, и социальном смыслах) слишком уж по-разному.

Начнем с бесспорных и самых печальных фактов. Два человека нашли свои могилы в развалинах здания реактора в момент его взрыва, 28 человек (в основном пожарные и сменный персонал) умерли от ОЛБ в наиболее тяжелой форме. К 2004 г. от различных причин умерли ещё 18 человек из 106, перенёсших ОЛБ и оставшихся в живых к началу 1987 г. Необходимо, однако, отметить, что в этих случаях непосредственная причина смерти, несомненно, не связана с переоблучением как таковым, а имеет, с большой вероятностью, психосоциальную природу (об этом ниже). Далее, к 2002 г. было идентифицировано 50 радиационно-индуцированных лейкозов у ликвидаторов, однако статистически достоверного превышения «дочернобыльского» уровня заболеваемости лейкозами за счёт этих случаев не обнаружено.

Особую группу пострадавших в медицинском смысле образуют лица, у которых, вследствие воздействия осколочных радиоизотопов йода (в первую очередь йода-131) развился радиогенный рак щитовидной железы. По официальным данным Минатома 2003 г., среди ликвидаторов таких случаев 12, среди детей, которым на момент аварии не исполнилось 14 лет, – только в России 55. Имея в виду, с одной стороны, уже отмеченную выше радиационную специфику чернобыльской аварии (подавляющий вклад радиоiodной компоненты в формирование эффективной коллективной дозы в первые полтора месяца после аварии), а, с другой – хорошо известную повышенную радиочувствительность щитовидной железы у детей и подростков, такой эффект можно было отнести к ожидаемым.

Рак щитовидной железы – заболевание, в общем, довольно редкое. Поэтому даже сравнительно небольшое, в абсолютных цифрах, увеличение числа заболевших (около 1800 случаев заболевания при численности наблюдаемой популяции около 10,6 млн детей в Украине, Белоруссии и России) немедленно дало вполне достоверный статистический эффект. Количество заболевших во всех трёх странах увеличилось примерно в 4 раза по сравнению с «дочернобыльским» уровнем, и в настоящее время радиационный генезис этого увеличения никем не подвергается сомнению.

В большинстве этих случаев имел место так называемый папиллярный рак, наиболее благоприятный в смысле прогноза. Это подтверждается очень низким уровнем смертности (около 0,5 %) после лечения (в основном хирургического вмешательства). Значительно более высокая фоновая смертность от рака щитовидной железы (3 – 18 %) в данном случае не позволяет, в статистическом смысле, говорить о переоблучении как причине смертности (в отличие от заболеваемости, что, уже говорилось, несомненно).

Этим и ограничивается контингент пострадавших при чернобыльской аварии, причины преждевременной смертности и заболеваемости которых имеют достоверную радиогенную природу. Конечно, весёлого здесь мало. Но ни о каких «сотнях тысяч погибших», которые мелькали (и продолжают мелькать) на страницах печатных изданий, начиная с первых дней чернобыльской трагедии, речь не шла, не идет и идти не может. Впрочем, к роли и позиции средств массовой информации в освещении чернобыльских событий мы еще вернемся.

Обратимся теперь к другой стороне дела. Являются ли пострадавшими люди, получившие вследствие любых событий, связанных с чернобыльской катастрофой, повышенные дозы облучения, хотя и не приведшие к развитию ОЛБ и отдалённых негативных последствий? Юридически – да, а исходя из общечеловеческих, моральных соображений – тем более, хотя медицинский аспект проблемы выглядит иначе (об этом ниже).

Речь идет прежде всего о ликвидаторах – участниках ликвидации последствий аварии. По данным НКДАР, на 2000 г. их насчитывалось около 600 тысяч человек (из них примерно 240 тысяч военнослужащих). Именно столько человек получили удостоверения ликвидаторов, а с ним – и соответствующий юридический статус. Однако сколько-нибудь реальную группу риска из этого контингента составляют лишь так называемые «ликвидаторы первой волны» – участники работ на ЧАЭС в 1986 и отчасти в 1987 г. (их число, по оценке академика Л. А. Ильина, составило около 45 000 человек). Для остальных же в подавляющем большинстве случаев индивидуальный дозовый предел не был превышен.

Ну и, наконец, одна из самых мрачных страниц Чернобыля. Из так называемой зоны жесткого контроля (районов с наиболее высоким уровнем радиоактивного загрязнения) и радиальной 30-километровой зоны, по данным Государственного регистра СССР, было отселено около 390 тысяч жителей (273 и 117 тысяч соответственно). Даже если принять во внимание, что лишь немногие из них получили сверхнормативную дозу облучения, они, бесспорно, пострадавшие. Атомный смерч сорвал людей с привычного места жительства, лишил (во многих случаях навсегда) малой родины – родного дома, сложившегося уклада существования, могил предков и надежд на будущее, оставив взамен муки неустроенности, стрессы и неврозы, лицемерие политиков и холодное равнодушие чиновников...

Часто говорят и пишут об очень высокой заболеваемости и смертности среди ликвидаторов. Какие основания имеют под собой такие утверждения?

Уж это точно – говорят и пишут об этом много... Автору и самому приходилось слышать такие «данные», что, будь они верны, каждый из этих людей за 15 лет, прошедших после аварии, должен был умереть дважды, а то и трижды!

Конечно, тот факт, что за это время какое-то количество ликвидаторов умерло, беспорен. Однако вопрос в том, каковы были смертность и заболеваемость за этот же срок среди условной группы населения, которая от ликвидаторов не отличалась бы ничем, кроме одного, – неучастия в чернобыльских событиях. Такая группа называется контрольной.

Нетрудно понять, что такое сравнение имеет смысл, если оно выполнено в период максимальной значимости фактора риска, соответствующего рассматриваемому инциденту – позже возможные различия «размываются» влиянием иных причин заболеваемости и смертности. Таким фактором в данном случае являлась угроза лейкозов (латентный период индукции около 2 лет) и радиогенного рака щитовидной железы (около 5 лет). Следовательно, если принять эти факторы в качестве наиболее вероятных причин смертности ликвидаторов, они должны были в максимальной мере проявиться в начале 90-х годов.

Что же мы видим в действительности – помимо того, о чём уже было сказано?

По данным Государственного регистра СССР, годовая смертность среди ликвидаторов в 1990 г. составила: для России – 454, Украины – 360, Белоруссии – 249 человек в пересчете на 100 тыс. наблюдавшихся. Смертность же в контрольной группе (мужчины в возрасте 20 – 50 лет, не принимавшие участия в ликвидации последствий чернобыльской аварии) составила 502, 449 и 431 соответственно. Выше, а не ниже, чем для ликвидаторов!

Итак, смертность среди ликвидаторов ниже, чем в контрольной группе. Но вот их заболеваемость (т.е. частота диагностирования медицинских отклонений от нормы) заметно... выше!

Как же это понимать?

Ответ на вопрос мы получим, как только раскроем структуру заболеваемости среди ликвидаторов. Она, в пределах статистики, совершенно та же, что и в контрольном контингенте. А теперь вспомним, что принадлежность к ликвидаторам означает, помимо всего прочего, еще и обязательную диспансеризацию, и периодические медосмотры, и привлечение современных средств диагностики, и (при необходимости) лечение. Короче говоря, иной уровень медицинского обслуживания. Но любой читающий эти строки прекрасно знает: у человека, считающего себя совершенно здоровым (да и со стороны таковым кажущимся), при попадании в цепкие руки медиков, к тому же еще вооруженных современными средствами диагностики, немедленно обнаруживается полный «букет» самых различных заболеваний – от кариеса до плоскостопия! И чем раньше выявляется действительно серьезное заболевание, тем более благоприятен прогноз, в особенности, если задействованы современные методы лечения.

Вот и разгадка парадокса. Налицо эффект различного уровня медицинского обслуживания: более высокого – у ликвидаторов и, так скажем,

«обыкновенного» – у контрольной группы. А заодно и рекомендация руководителям всех звеньев и уровней, сохранившим ответственность перед людьми: вот что действительно улучшает жизнь людей, вот затраты на что действительно идут на благо общества. В отличие от затрат на организацию антиатомных референдумов...

Следует ли ожидать и в дальнейшем каких-либо негативных последствий переоблучения населения в целом на загрязненных территориях, и если да, то каких именно?

Если иметь в виду только радиационные факторы, то, согласно современным научным представлениям и имеющимся статистическим данным (подтвержденным в 2000 г. НКДАР), – нет и никаких. Гипотетически (по оценкам с применением уже известной читателю ЛБГ) у лиц, получивших дополнительную к естественной дозу облучения на загрязненных территориях, могут быть отмечены дополнительные случаи лейкозов и раковых заболеваний, однако их число будет заведомо ниже минимального уровня статистической достоверности.

Годы, прошедшие после Чернобыля, вполне однозначно подтвердили этот вывод. Ни по одному соматическому заболеванию, включая лейкозы и онкологические проявления (за исключением обсужденного выше рака щитовидной железы среди детей и подростков), не было достоверно выявлено возрастания частоты его возникновения по сравнению с «дочернобыльскими» временами.

А вот по другим заболеваниям...

Можно ли отнести к негативным медицинским последствиям чернобыльской катастрофы нерадиационные: психические расстройства, неврозы, стрессы?

Вне всякого сомнения. Более того, по мнению подавляющего большинства специалистов (всцело разделяемому автором), эти последствия по своим масштабам далеко превосходят радиационные.

Недооценка социально-психологических факторов, практическое отсутствие эффективных методов постстрессовой реабилитации и тем более соответствующих государственных программ привели сотни тысяч людей, вовлеченных в орбиту чернобыльских событий, именно с этой точки зрения к тяжелейшим последствиям. Попытки решения наиболее насущных проблем ликвидаторов и населения на загрязненных территориях (в том числе и эвакуированных лиц) были во многом неэффективны именно вследствие недооценки или игнорирования социально-психологических обстоятельств.

У многих вовлеченных в аварию людей на фоне очевидных и в значительной мере общих с другими группами общества трудностей, связанных с негативными экономическими и социальными явлениями последних лет в странах СНГ, без реальных оснований сложилась устойчивая психология

общественной пассивности, сформировалось принятие самих себя как «жизненной жертвы общества», что особенно опасно для детей и подростков.

Неудовлетворительность существующего законодательства (во многом, в свою очередь, тоже обусловленная недооценкой социально-психологических факторов) побуждает людей для получения социальных льгот искать объективно отсутствующие связи между участием в чернобыльских событиях и обычными общими заболеваниями (печально, что в этом им часто помогают некомпетентные или недобросовестные врачи). Результат таких «поисков» впечатляет: по данным отечественных психиатров (Г. М. Румянцева и др.), около 80 % лиц в обследованной группе вовлеченных в чернобыльские события без каких-либо объективных оснований оценили состояние своего здоровья как заметно или существенно худшее по сравнению со сверстниками.

Катастрофически велико число людей с выявленными психическими нарушениями той или иной степени тяжести. В 1995 г. российскими психиатрами были проведены исследования представительной группы ликвидаторов (507 человек в среднем возрасте 42 года, не являющихся профессионалами атомной промышленности). Дозы, полученные ими (0,003 – 0,2 Зв), были им известны и объективно исключали какие-либо непосредственные негативные последствия переоблучения. Тем не менее уровень психических нарушений в этой группе составлял страшную (иначе не скажешь!) величину – 84,4 %!

К огромному сожалению, в этой связи нельзя не отметить резко негативное влияние многих СМИ, отрицательные последствия непродуманных решений и поступков властей, провокационную роль самозванных «трибунов» и «глашатаев». Давно подмечено: беда по-настоящему становится бедой, когда находятся люди, «наваривающие» на ней личную выгоду. Вот и «наварили»... Политики – посты послов новых государств на развалинах великой страны и депутатские привилегии в шумных парламентах, журналисты – сенсации и тиражи, общественные деятели – гранты зарубежных антиатомных фондов. А люди, на чьей беде всё это «наварено»?

А с ними – вот что. На рис. 14 представлены показатели уровня стрессовых расстройств в 1986 – 1994 гг. среди населения загрязненных территорий в сравнении с контрольной группой (население «чистых» территорий, 1992 – 1994 гг.). Налицо их несомненная связь с информационными процессами. В 1989 г. (первый пик на диаграмме) произошел «прорыв» информационной блокады чернобыльских событий, вызвавший к жизни огромное количество некомпетентных алармистских публикаций и передач, часто откровенно панического, а иногда и политически-поджигательского (по-другому не скажешь) характера. В 1993 г. (второй пик) в средствах массовой информации и «агентстве ОБС» («одна бабушка сказала») появились данные (часто искаженные и недостоверные) о возможных изменениях за-

конодательства и лишения населения загрязненных территорий привилегий и льгот. На это наложились первые факты задержки в выплатах не только компенсаций, но даже и зарплаты, что также было интерпретировано населением как подтверждение слухов об отмене льгот. Следовательно, к основному стрессу добавился связанный с ним дополнительный. И в ответ – рост числа невротических расстройств и их обострение.

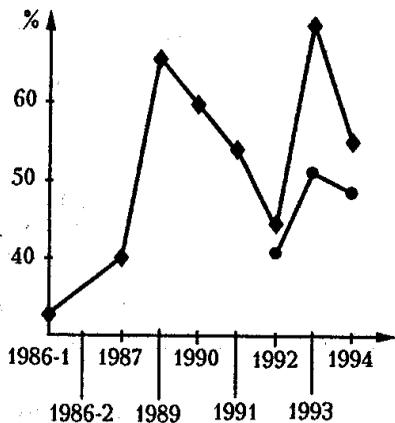


Рис. 14. Уровень стрессовых расстройств (в процентах к численности контрольной группы) среди населения по годам: ◆ – загрязнённая территория; ● – «чистая» территория (масштаб не соблюдается)

Вот когда и как «аукнулась» обществу уже упомянутая выше многолетняя идиотская практика тотального засекречивания (а иногда и прямой лжи) во всем, что хоть как-то относилось к атомной промышленности, технике и энергетике. Именно она породила откровенное и массовое недоверие к официальной информации по «чернобыльским» вопросам. Вот пример: по данным Г. М. Румянцевой, лишь около 15 % ликвидаторов доверяют официальным (документированным) данным о полученной ими дозе, а 82,6 % считают эту дозу заниженной в 2 – 3 раза (на основании только лишь собственных субъективных представлений и понятий).

Только терпеливыми, длительными совместными усилиями всех членов общества можно залечить в душах пострадавших тяжелейшие психологические раны, нанесенные Чернобылем, вернуть этих людей семьям, обществу, а главное – им самим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.И. Основы ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 56 с.
2. Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю., Сидоренко В.А. и др. Атомная энергетика: оценки прошлого, реалии настоящего, ожидания будущего. – М.: ИздАт, 2004.
3. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Аргументы и проблемы ядерной энергетики. – Томск: ТПУ, 2001.
4. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии // ЦНИИАтоминформ. – 1994. – № 1. – 1995. – № 1, 2, 9, 10.
5. Бюллетень по атомной энергии // ЦНИИАтоминформ. – 2001. – № 3; 4; 7; 8. – 2002. – № 4; 5; 8; 9. – 2004. – № 12. – 2005. – № 1. – 2006. – № 4.
6. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А. и др. Россия в мировой энергетике XXI века. – М.: ИздАт, 2006.
7. Голашвили Т.В., Чечев В.П., Лбов А.А. и др. Справочник нуклидов-2. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2002.
7. Гуськова А.К. Атомная отрасль страны глазами врача. – М.: Реальное время, 2004.
8. Диалог с общественностью по вопросам снижения риска. – ИБРАЭ РАН, 2005.
9. Зеленков А.Г. Некоторые вопросы радиационной экологии. – М.: МИФИ, 1990.
10. Иванов Е.В., Шубик В.М. Медицинские последствия Чернобыльской аварии. Факты и размышления 15 лет спустя. – СПб., 2001.
11. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля. – М.: ALARA Limited, 1994.
12. Колдобский А.Б. 50 вопросов и ответов об атомной энергетике и ядерном топливе. – М.: ИЦ «Атомпресса», ОАО «ТВЭЛ», 2006.
13. Колдобский А.Б., Насонов В.П. Вокруг атомной энергии: правда и вымыслы. – М.: МИФИ, 2002.
14. Коровин Ю.А., Мурогов В.М. Современные проблемы ядерной энергетики. – Обнинск, 2006.
15. Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
16. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под редакцией Л.А. Ильина и В.А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001.

17. Медицинские последствия аварии на ЧАЭС: прогноз и фактические данные национального регистра. Медицинский радиологический научный центр РАМН. – Обнинск: ООО «Комтехпринт», 2001.
18. Международные оценки последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Отчёт научного комитета по действию атомной радиации ООН-2000 // Специальное приложение к журналу «Медицинская и радиационная безопасность». – 2000.
19. Мелихова Е.М., Абалкина И.Л. Диалог по вопросам риска: практические советы. – М.: ИздАТ, 2003.
20. Мухин К.Н. Занимательная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1969.
21. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Издание официальное. – Минздрав России, 1999.
22. Радиационная безопасность. – Вена: МАГАТЭ, 1996.
23. Радиация. Дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988.
24. Радиация и здоровье. – М.: ГНЦ «Институт биофизики». 2001.
25. Ядерная энергетика: вопросы и ответы. – Вып. 1 – 7. – М.: ИздАТ, 1991 – 1994.

Александр Борисович Колдобский

**ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ:
ВОЗДЕЙСТВИЕ, РИСКИ,
ОБЩЕСТВЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ**

Научно-популярное издание

Редактор М. В. Макарова

Подписано в печать 21.10.2008. Формат 60x84 1/16
Печ.л. 5,5. Уч.-изд.л. 5,5. Тираж 300 экз.
Изд. № 2/3. Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет).
115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства «Тривант».
г. Троицк Московской области

